纸张平整度视觉精密测量系统

闫 龙¹, 王 安¹, 夏营威¹, 王 澍¹, 张 文¹, 高震宇¹, 张 龙^{1,2}

¹(中国科学院 合肥物质科学研究院, 合肥 230031) ²(中国科学院 皖江新兴产业技术发展中心, 铜陵 244000)

摘 要: 针对纸张平整度测量,研究和提出了基于四步相移法的面结构光三维测量方法. 首先, DLP 投射正弦条 纹图像到待测纸张表面,光栅条纹以 1/4 周期为步长平移扫描. 然后由相机采集经待测纸张表面形貌调制后的结 构光分布信息,并利用四步相移法获取结构光图像的相位主值. 最后采用多频外差原理实现解调,获得绝对图像 相位的解调信息,经相位与高度之间的映射关系得到纸张高度信息并重建出纸张表面形貌. 采用纸张表面点云 高度坐标的极差和标准偏差对其平整度进行定量评价. 实验结果表明,测量精度达到 0.1mm,测量时间小于 2 秒, 其稳定性和测量精度能够满足纸张平整度的测量要求.

关键词: 计算机视觉; 数字相移法; 纸张平整度; 四步相移法; 多频外差原理

Visual Precision Measurement System for Paper Flatness

YAN Long¹, WANG An¹, XIA Ying-Wei¹, WANG Shu¹, ZHANG Wen¹, GAO Zhen-Yu¹, ZHANG Long^{1,2}

¹(Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

²(Wanjiang Center for Development of Emerging Industrial Technology, Chinese Academy of Sciences, Tongling 244000, China)

Abstract: Aiming at the paper flatness measurement, a method based on four-step phase-shifting algorithm has been studied and proposed for the structured light measurement. The sine light that projected to the paper surface by DLP is scanned in steps of 1/4 period. After modulated by the surface topography of the paper to be measured, the structured light distribution information is acquired by the camera along with the phase main value of the structured light obtained through four-step phase-shifting algorithm. Finally, the absolute phase demodulation can be achieved through the multi-frequency heterodyne principle and the paper surface topography can be reconstructed through the height information after mapping the relationship between the phase and height. Using paper surface coordinate point cloud height range and standard deviation for quantitative evaluation of its flatness, the experimental results show that the measurement accuracy and stability meet the requirement of paper flatness measurement with the accuracy of 0.1mm and the measurement time of less than two seconds.

Key words: computer vision; digital phase shift method; paper flatness; four-step phase shift method; multi-frequency heterodyne principle

视觉检测技术通过成像的方法获取目标信息,由于其快速、非接触、高精度等优点^[1],广泛应用于生产过程控制和质量检验^[2].在烟草行业中,卷烟产品的外观检测和烟叶分捡识别等都采用了视觉方法^[3,4].

由于卷烟条盒外包装纸的印刷工艺和环境条件影 响,常出现弯曲或翘边现象,该缺陷可能导致包装机 "卡纸"等故障,严重影响生产效率.因此,纸张平整度 是卷烟辅料的一项重要考核指标,通常采用人工方法 进行测量.由于其质地柔软,接触法测量时容易导致纸 张变形,测量数据出现偏差,使得测量结果参考价值具 有局限性,难以指导生产.为准确测量纸张的平整度信 息,本文提出了 3D 表面重建的非接触测量方法.

基金项目:中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(Y23J321121) 收稿时间:2015-08-03;收到修改稿时间:2015-09-21

基于 3D 表面重建的非接触测量方法根据光学投 射器所投光束的不同,可分为点结构光、线结构光和 面结构光等方法.利用点结构光或线结构光重建出的 物体表面由点或线拼接而成,不能够对待测物体表面 局部细节完全重建,且测量精度低,速度慢.使用面 结构光可以对物体表面进行整体重建,精度高,速度 快.

同时该方法避免了人工接触测量造成的纸张形变, 可以对纸张表面空间分布进行准确的定量分析,为卷 烟企业评估卷烟条盒外纸的上机适应性提供一种有效 的测量方法.

1 系统组成

纸张平整度检测系统如图 1 所示, 主要包括: 成 像系统、图像处理系统、载物平台、投影系统等. 成 像系统用于采集条纹图像, 包括相机、图像采集卡、 镜头等部分. 图像处理系统用于处理获取的条纹图像, 给出纸张的表面参数. 载物平台用于放置待测纸张, 配合投影系统呈现放置待测纸张前后不同的条纹图像. 投影系统用于投射不同周期的正弦结构光条纹图像.



 1 CCD 相机
 2 镜头
 3 支架 4 基准平面
 5 DLP 投影仪

 图 1
 测量装置结构图

2 测量方法

2.1 检测基本流程

结合纸张表面信息的测量要求,提出了基于 3D 重建的平整度定量方法,基本流程如下图 2 所示.计 算机控制 DLP 投影仪输出正弦条纹图像,投射于待测 纸张表面; CCD 相机采集纸张表面调制后的条纹图像, 并且通过图像采集卡将所采集的条纹图像传送至计算 机;利用高斯滤波和图像分析等预处理算法对条纹图 像进行数值滤波和数值拉伸;利用多频外差原理获取 高频条纹图像的绝对相位值,再结合相位——高度映射 关系,得到待测纸张表面信息;最后再根据纸张平整 度评定参数评价纸张表面特征.大致分析流程如图 3 所示.



2.2 图像预处理

获取的结构光图像及样品调制后的结构光图像如 图 4 所示,相机视野覆盖完整待测区域.



图 4 条纹图像及待测纸张调制后的条纹图像

Research and Development 研究开发 243

由于周围环境光线的影响,导致获取的条纹图像中 产生微小的畸变,相位信息出现被"削顶"或"削底"的现 象,如图 5(a)所示,由同一列所计算出的相位信息呈非 正弦型.图 5(c)是所采集到被"削顶"的条纹图像.针对这 种现象本文提出首先对获取的条纹图像进行预处理,利 用一系列的图像算法滤除其中的高频噪声信号;其次, 对条纹图像进行归一化和灰度值拉伸等处理,使其相位 值均匀分布在(-π,π)之间^[5-7],呈现为正弦型分布,如图 5(b)所示,对应的条纹图像如图 5(d)所示.



(c)条纹图像处理前(d)条纹图像处理后图 5 条纹图像预处理前后的相位信息

2.3 多频外差原理

本文对获取的条纹图像预处理后,通过四步相移法计算出条纹图像中每个像素的相位值 $\psi(x,y)$,再使用多频外差技术对条纹图像进行解包裹,获取高频光栅投影对应条纹图像的条纹等级 n(x,y),计算过程如图 6 所示.



图 6 经多频外差技术解包裹前后的相位图 假设低频光栅所对应的条纹图像频率为λ,、相对 相位值为ψ₁(x,y),则其对应的绝对相位值为:

244 研究开发 Research and Development

 $\Psi_1(x, y) = \psi_1(x, y) + 2n_1(x, y)\pi$ (1)

如图 6(b)所示; 高频光栅投影对应的条纹图像的 频率为 λ_2 , 图 6(a)为其截断相位值 $\psi_2(x, y)$, 条纹等级 $n_2(x, y)$ 计算公式如下:

$$n_2(x, y) = floor\left[\frac{\lambda_2 \Psi_1(x, y)}{2\pi\lambda_1} - \frac{\Psi_2(x, y)}{2\pi}\right]$$
(2)

结果如图 6(c)所示,结合截断相位值 $\psi_2(x,y)$ 计算出高频光栅投影对应条纹图像的绝对相位值:

$$\Psi_2(x, y) = \psi_2(x, y) + 2n_2(x, y)\pi$$
(3)

如图 6(d).

由以上计算出高频光栅的绝对相位值与其相应基 准平面的绝对相位值,获取二者之间的相位差值,再 结合相位差值与高度的映射关系计算出纸张的高度信 息 *h*(*x*, *y*),计算公式如下:

$$h(x,y) = \frac{Lp\Delta\Psi(x,y)}{2\pi d + p\Delta\Psi(x,y)}$$
(4)

其中, *L* 是相机与基准平面之间的距离, *d* 是投影装置与相机之间的距离, *p* 是基准平面上相隔两条光栅之间的距离, $\Delta \Psi(x, y)$ 是待测纸张调制前后条纹图像绝对相位之间的差值.

结合光栅图像预处理和多频外差原理,滤除环境 干扰,即可重建待测纸张的表面数据信息,计算纸张 表面高度的特征参数.

2.4 平整度参数

针对纸张平整度本文提出利用纸张表面高度的最 大值、最小值、高度均值以及标准差等参数进行表征. 其中最大值、最小值和均值用于表征纸张的翘边程度, 标准偏差、极差表征纸张凹凸不平的离散程度.为纸 张的上机适应性提供有效而全面的评价指标.纸张表 面高度的最大值、最小值、高度均值、标准差、极差 等参数通过分析计算出的纸张高度信息 h(x,y)得到.

3 实验分析

本文算法在 Visual Studio 2008 平台上实现,采用 工业相机 DFK 23GP031 进行图像采集.为验证本文方 法的精密度参数,开展了准确性实验和重复性实验.

3.1 方法准确性实验

实验中采用一个梯形的标准块工件作为测量样品, 样品标测尺寸和本文方法的测试结果如表1所示.



图 7 标准块三维效果图及实物图

实验结果表明,本文方法的测量误差低于 0.1mm, 能够满足卷烟生产企业对包装用纸平整度测量的精度 要求.

表1 标准块的标称值和测试结果

标准块	上底宽/mm	下底宽/mm	高度/mm	厚度/mm
实际尺寸	10.00	40.00	10.00	10.00
测量尺寸	9.95	40.07	10.06	10.02

3.2 方法重复性实验

实验中采用卷烟条盒包装纸作为实验样品,对同 一个样品进行10次重复测量,测量结果如表2所示.

手有快应办测具体用

	衣 2 里夏性头短测里结米			
次数	高度均值/mm	最大值/mm	最小值/mm	级差/mm
1	1.56	2.21	0.25	1.96
2	1.46	2.20	0.26	1.94
3	1.42	2.09	0.28	1.81
4	1.43	2.15	0.30	1.85
5	1.43	2.10	0.25	1.85
6	1.42	2.14	0.26	1.88
7	1.44	2.15	0.29	1.86
8	1.53	2.17	0.24	1.93
9	1.42	2.08	0.28	1.80
10	1.48	2.08	0.29	1.79
标准偏差	0.05	0.084	0.021	0.055

表中四种纸张平整度描述指标的标准偏差均小于 0.1,表明本文方法具有较好的重复性,可以满足工业 现场的实际应用需求.

此外,为比较本文方法与人工方法的测量效率, 开展了以下对比实验,结果如表 3 所示.

衣	3 测重效率对比	
编号	人工方法/s	本方法/s
1	210	5
2	215	4
3	209	4
4	212	4
5	207	5
均值	210.6	4.4

上表数据表明本文方法耗时约为人工方法的1/50, 极大地缩短测试所用时间,提高了纸张平整度的测量 效率.

在实际应用过程中,投影仪所投射的光栅条纹易 受环境中自然光的干扰,使相机采集的光栅图像出现 畸变,利用多频外差原理叠加出的低频光栅将携带高 次谐波,最终导致重建结果表面出现波纹.因此,在 采集到光栅图像后,使用数字图像处理算法对其进行 灰度值拉伸和高频滤波等处理,去除环境光和高次谐 波的干扰,准确地对纸张表面进行三维重建,获取纸 张表面信息.

4 结语

本文针对纸张平整度的测量需求,提出了基于 3D 表面重建的平整度测量方法.该方法采用四步相移和 多频外差原理实现了正弦结构光的空间信息解调,实 现了纸张表面的快速 3D 重建.开展地准确性和重复 性实验表明,本文方法可以满足工业现场对包装纸张 的平整度测量要求,为纸张的上机适应性提供了有效 的评价依据.

参考文献

- 1 叶声华,邾继贵,王仲,杨学友.视觉检测技术及应用.中国工 程科学,1999,1(1):49-52.
- 2 边绍辉,蔡晋辉,周泽魁,张光新.基于 DSP 和 USB 接口的视 觉检测系统的设计.计算机工程,2004,30(20):189-191.
- 3 刘朝营,许自成,闫铁军.机器视觉技术在烟草行业的应用状况.中国农业科技导报,2011,13(4):79-84.
 - 4 夏营威.基于计算机视觉的烟草检测方法与系统研究[学位 论文].合肥:中国科学院合肥物质科学研究院,2012.
 - 5 祝荣壮.CV-751 视觉系统在 ZB25 包装机小盒外观缺陷检测上的应用.合肥:中国烟草学会 2010 年学术年会,2010.
 - 6 方隽,张乐年,郑启旺.机器视觉在烟条外包装检测系统中的 应用.机械制造与自动化,2009,38(5):138-140.
 - 7 Kim EH, Hahn J, Kim H, et al. Profilometry without phase unwrapping using multi-frequency and four-step phase-shift sinusoidal fringe projection. Optics Express, 2009, 17(10): 7818–7830.
 - 8 金观昌.计算机辅助光学测量.北京:清华大学出版社, 2007.
 - 9 黄燕钧,李中伟,史玉升,王从军.基于多频外差原理的三维 测量技术.新技术新工艺,2008,(12):37-40.
 - 10 宋雷,岳晓峰,王乐.多频外差相移三维测量关键技术.长春 工业大学学报(自然科学版),2012,33(4): 391-396.
 - 11 梁晋,肖振中,臧顺来,梁新合.外差式多频相移技术的三维 光学点云测量研究.锻压技术,2008,33(1):143-147.
 - 12 秦大辉,毛婷,刘建军.基于相移原理的便携式岩石三维形 貌测量系统.辽宁工程技术.大学学报(自然科学版), 2012, 31(4):504-507.
 - 13 梁晋,肖振中,臧顺来,梁新合.模具与塑性加工中外差式多 频相移三维光学测量技术研究.第十届全国塑性工程学术 年会、第三届国际塑性加工先进技术研讨会论文集.南 昌.2007.
 - 14 Zhao H , Chen W , Tan Y. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes. Applied Optics, 1994, 33(20): 4497–4500.
 - 15 Li JL, Su HJ, Su XY. Two-frequency grating used in phase-measuring profilometry. Applied Optics, 1997, 36(1): 277–280.

Research and Development 研究开发 245