

玻璃面板油墨厚度无损在线数字化检测系统

周 林¹, 杨甬英¹, 闫 凯¹, 曹 频², 李 晨¹, 吴 凡¹

- (1. 浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;
2. 杭州晶耐科光电技术有限公司, 浙江 杭州 311112)

摘 要: 为了实现对玻璃面板油墨层厚度的检测, 提出了一种满足工业化检测需要的玻璃面板油墨厚度无损在线检测系统。首先, 基于结构光测量原理进行非接触式测量, 进一步提出了基于自适应提取算法的油墨厚度数字化定量计算模型, 对采集到的携带油墨厚度信息的亮线图像进行处理, 该模型非常适用于非接触式数字化检测; 其次, 建立了完整的检测系统, 将标准油墨面板作为油墨检测的评价标准, 多次测量拟合定标系数; 最后, 该玻璃面板油墨厚度无损测量系统的最大检测厚度达 23 mm, 检测精度优于 4 μm , 通过对玻璃面板油墨层厚度的检测, 实现了对油墨厚度的高精度、快速、无损检测, 具有广阔的应用前景。

关键词: 玻璃油墨厚度; 结构光; 无损在线; 机器视觉

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1217009

Nondestructive and on-line measurement system for the thickness of panel glass printing ink

Zhou Lin¹, Yang Yongying¹, Yan Kai¹, Cao Pin², Li Chen¹, Wu Fan¹

- (1. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zernike Optical Technology Co., Ltd, Hangzhou 311112, China)

Abstract: In order to detect the thickness of ink coated on the glass, a nondestructive and on-line measurement system was proposed, which can be used in industrial measurement. Firstly, the structure light principle was presented, and a model based on the adaptive extraction algorithm, called digital quantitative calculation model for the thickness of glass printing ink was creatively put forward to process the bright-line images of printing ink. It was extremely suitable for non-contact digital detection. Secondly, a standard glass with printing ink film was chosen as the accurate evaluation basis, managed to obtain a ratio which was related to the thickness of printing ink from multiple measurements and fitting. Finally, the maximum detection thickness was 23 mm and the precision of the nondestructive and on-line measurement system can reach 4 μm . As a result, by measuring the thickness of glass printing ink, this instrument can complete a high-precision, fast and nondestructive detection, which offers a broad application prospect.

Key words: thickness of glass printing ink; structured light; nondestructive and on-line; machine vision

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61627825, 11275172); 现代光学仪器国家重点实验室(MOI2015B06)

作者简介: 周林(1994-), 女, 硕士生, 主要从事机器视觉、光学精密检测方面的研究。Email: lao_zhua@163.com

导师简介: 杨甬英(1954-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密检测、纳米测试方面的研究。Email: chuyyy@hznc.com

0 引言

油墨印刷在某些玻璃生产加工过程中是十分关键的环节。油墨层厚度的均匀性直接影响玻璃面板的外观。因此,带有油墨层加工的玻璃面板在出厂前都会对油墨层厚度进行测量,且精度要求也逐渐提高。然而,由于技术的局限性,在当前的生产车间中,依然采用普通的接触式测量方法,即通过数字式千分尺夹紧盖板玻璃两面^[1],或者采用接触式的反射显微镜进行检测^[2]。这种接触式检测设备消耗人力、检测效率低、速度慢,如果操作不当还会对元件表面造成不同程度的划伤^[3],所以接触式厚度检测已经不能满足既要保证测量精度和速度,又要保证不损伤油墨层光洁度的要求。而且,目前工业上仍然没有一种高精度在线式的测量设备,实现对玻璃面板油墨层厚度的快速无损检测。

非接触式的厚度测量方法如涡流测厚法^[4],可无损测量非磁性金属基体(如:铝、铜、不锈钢)上非导电覆层的厚度(如:油漆、粉末、塑料、橡胶、珐琅、搪瓷、电泳、防腐层等),但是导电的油墨层吸附于非金属的盖板玻璃之上,因此无法使用该方法进行检测。此外,还有非接触式的利用光声效应的油墨厚度检测^[5],但该检测方法一般用于测量厚度较大的油墨层,且系统复杂,误差大。又由于油墨层具有一定的反光性,因此可以通过光学干涉的方法实现测量,但是因为其测量视场范围很小,很难对所测区域实现快速定位,因此不适合流水线式的在线检测,并且其成本也非常昂贵。与此同时,随着自动化检测技术快速发展,基于机器视觉的检测技术以数字图像处理技术为核心,在智能检测中有着广泛的应用和发展,在工业自动化中也起到了越来越大的作用,被用在许多检测领域。

文中提出了一种基于机器视觉的油墨厚度无损在线检测系统,采用基于自适应提取算法的油墨厚度数字化定量计算模型实现油墨层厚度的精确测量。

1 基于机器视觉的油墨厚度无损在线数字化检测系统

该测量系统是利用结构光中的激光三角测量原理^[6],从而设计出一套油墨厚度无损在线数字化

检测系统,系统整体结构图如图 1 所示,该检测系统结构简单、灵活,可满足工业化油墨厚度在线检测的需求。

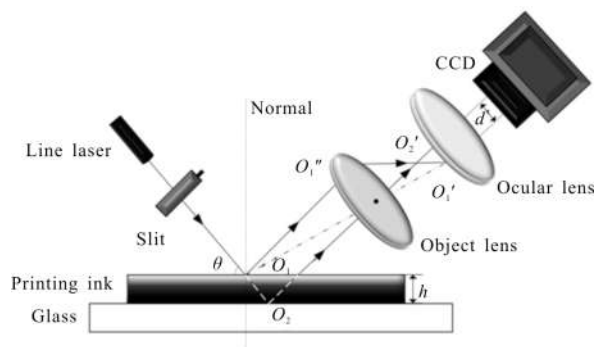


图 1 检测系统光路图

Fig.1 Light path diagram of measurement system

该系统以光亮度高、方向性强、单色性好的半导体激光器作为光源。采用具有准直消像散和整形作用的柱面镜将点光源转换为线光源输出,避免因为激光发出的点光源的光斑面积小以及微小震动造成的信号丢失。接着,经过狭缝装置去除杂散光之后以一定角度射向待测油墨面板,在其表面汇聚成亮度高、宽度细的长直线。这里使用狭缝装置是对线激光边缘的杂散光做隔离处理使得入射光更加清晰锐利。细长的线激光入射在放置于传送带上的待测油墨面板表面,该线激光穿过油墨层和玻璃层相交的区域,将一个长工作距显微镜系统对焦在该区域,可以观察线激光穿过该区域后的弯曲变化程度。入射光在两个表面分别形成反射光并进入显微镜系统中,经过物镜和双胶合消球差透镜后,在 CCD 相机的成像表面形成适合于数字图像二值化处理的暗背景上的有一定弯曲度的亮线图像。

这一弯曲亮线的形成是因为油墨层与玻璃层之间存在高度差,在两个界面上的光路分布原理如图 2(a)所示。理论上,最后显示在 CCD 上的亮线像如图 2(b)所示。

由图 1 所示的检测系统结构图可知,当光线入射到油墨面板的玻璃面时,其反射光线经过显微镜系统的传播路径如图中虚线 O_2O_2' 所示,并且在相机的成像表面形成的图像为 O_2' 。当入射光线经过油墨层发生反射时,其反射光线经过显微镜系统的传播路径如图中实线 $O_1O_1''O_1'$ 所示,并且在相机的成像

表面形成的图像为 O_1' 。从图中可以看出,当沿着样品表面的投射光线只经过油墨面板的玻璃表面时,其反射光线在相机成像表面的图像是沿着 O_2' 的一条直线如图 2(b)中的 B 虚线区域对应亮线所示。当投射光线经过油墨层时,其图像是沿着 O_1' 的一条直线,如图 2(b)的 A 虚线区域对应亮线所示。由于反射面的高度发生变化,在显微镜系统中成像图像也会随着反射面的高度变化而发生不同层次的弯曲。

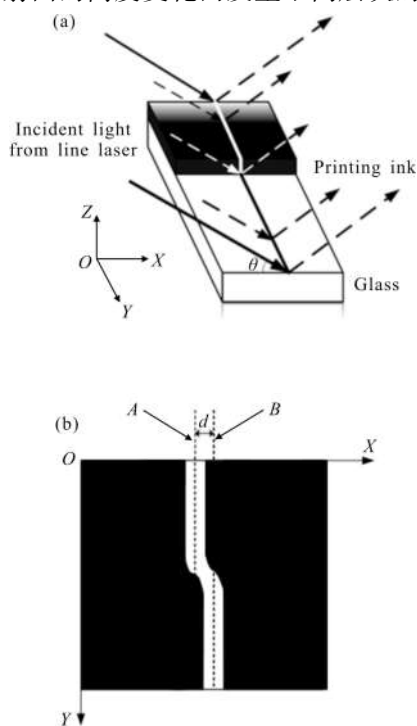


图 2 (a) 线结构光反射原理图, (b) 反射光线理论分布截面图
Fig.2 (a) Principle diagram of light reflection, (b) cross-section of reflected light in theory

根据 2(a)中的光路图,可以计算出油墨层高度 h 与 CCD 相机中图像的偏移距离 d 的关系。其中相同入射光线,在盖板玻璃与油墨层的交点分别为 O_1, O_2 之间的距离为:

$$O_1O_2 = \frac{h}{\sin\theta} \quad (1)$$

式中: h 为待测油墨层的高度; θ 为入射光线与样品之间的夹角。

根据显微镜的放大倍率 β 可以计算出 O_1O_2 在成像面上的距离 $O_1'O_2'$, 即油墨层与非油墨层反射光在成像面上的偏移距离 d :

$$d = O_1'O_2' = \beta \times O_1O_2 = \beta \times \frac{h}{\sin\theta} \quad (2)$$

再根据图像中两条光线的偏移距离求得油墨层的高度 h :

$$h = \frac{d \times \sin\theta}{\beta} \quad (3)$$

另外,设当前系统中一个像素的大小为 T ,进一步对采集得到的光线反射图像进行处理,计算出图像中光线的偏移像素,并且建立偏移像素与待检测油墨层厚度的数学模型。通过对图像进行处理可以计算出当前图像中两条亮线偏移像素为 P , 间接求解出油墨层的高度 h :

$$h = K \cdot \frac{P \times T \times \sin\theta}{\beta} \quad (4)$$

式中: T 为当前系统中一个像素的大小; θ 为入射光线与待测平面的夹角; β 为显微镜系统的放大倍率; K 为系统误差比例系数。

2 基于自适应提取算法的油墨厚度数字化定量计算模型

针对该油墨厚度无损在线数字化检测系统中 CCD 采集得到的油墨亮线弯曲条纹图像,建立图像中光线的弯曲像素与油墨层厚度的数学模型,在上述硬件测量设备的基础上,文中提出了基于自适应提取算法的油墨厚度数字化定量计算模型。该模型依据线激光通过油墨层与玻璃层不同高度反射后会在成像图像中发生弯曲的现象,间接计算出当前位置处油墨层与玻璃层的高度差,从而得出当前位置处的油墨厚度。

2.1 模型的基本原理

该测量系统得到的是线激光经过油墨层与玻璃层反射后的光线弯曲图像,这条亮线的外形特征近似于图像上连通面积较大的两个矩形的连接,而待测玻璃表面的脏污和不光洁、紧邻亮线周围出现的衍射条纹等都会对处理结果造成影响,如果单纯使用诸如 Hough 变换方法^[7]寻找边界再利用形态学中的骨骼法提取条纹中心线会造成处理结果在图像某些位置处的不连续从而给检测结果带来很大的误差。所以综合考虑 CCD 接收的亮线图像的特征,文中提出一种基于自适应提取算法的油墨厚度数字化定量计算模型。该模型能最大限度地精确和优化结果,使其与所处理图像数据的统计分布特征、结构特征相适应。

2.2 模型的实现步骤

在上述提出的一种基于自适应提取算法的油墨

厚度数字化定量计算模型原理的基础上,建立了一种玻璃面板油墨厚度数字化定量计算流程,该流程的具体实现步骤如图 3 所示。

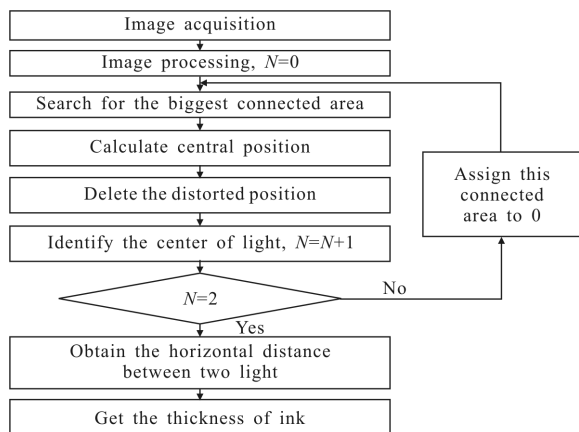


图 3 玻璃面板油墨厚度计算模型流程图

Fig.3 Calculation model for the thickness of glass printing ink

2.2.1 预处理操作

首先,CCD 采集得到亮线原始的灰度图。利用数字形态学中的去噪、区域分割、形态学操作、二值化对原始的灰度图进行预处理操作,目的是去除线激光光源通过狭缝边界处产生的衍射效应而使最终图像中亮双线周围出现的衍射条纹以及杂散光成像的影响,操作完成后油墨区和玻璃区亮线交界处会得到局部消除,即两区域被分离开来,得到较为清晰的亮双线图像。

2.2.2 获取亮条纹中心位置

利用图像处理操作寻找出图像中的亮线区域,即图中最大亮纹连通区域,按照行遍历的顺序找到该连通区域在每一行中灰度最大区域的边界,并将左边界存储在 A 数组中,右边界存储在 B 数组中。

已知图像有 n 行,那么就会得到从 $\{A_1, B_1\}$ 到 $\{A_n, B_n\}$ 共 n 组边界集合。求取从 $\{A_1, B_1\}$ 到 $\{A_n, B_n\}$ 各组边界集合的平均值,将结果存储到元素个数同样为 n 的数组 L 中,则 L 的每一个元素就代表各行的亮条纹中心线对应的位置:

$$\{L[1], L[2], \dots, L[n]\} = \left\{ \frac{A_1+B_1}{2}, \frac{A_2+B_2}{2}, \dots, \frac{A_n+B_n}{2} \right\} \quad (5)$$

2.2.3 条纹的自适应优化

实际上,图像的边界存在着一些噪点,经过图像预处理后虽然边界处变得平滑,但依然有噪声的影响,此时需对图像进行自适应优化,首先对数组 L 求

平均作为畸变临界阈值 Q :

$$Q = \left(\sum_{k=1}^n L[k] \right) / n \quad (6)$$

再将数组 L 中的每个元素与 Q 比较,删除与 Q 差距较大且同时满足差别点零散出现(差别较大元素可能为噪点,如果除该元素外其相邻元素与阈值差别不大即可判定该元素为噪点)的数组元素,重新得到有价值的条纹中心点数组 L' ;求数组 L' 元素的平均值作为该亮条纹中心线所在位置的最终参数 $Light_{L_1}$;为了寻找第二条亮纹位置,利用数字形态学知识对上述第一条亮纹区域进行赋 0 操作,此时还需要判断赋 0 操作执行次数,如果已经执行过一次就结束模型处理,如果没有执行该操作则重复流程图中寻找最大连通区域之后的所有步骤,按照同样的方法找到第二条亮条纹中心所在位置最终参数 $Light_{L_2}$,显然,双亮线中心的像素间隔为:

$$P = |Light_{L_2} - Light_{L_1}| \quad (7)$$

最后,由公式(4)所示得两条光线的偏移像素距离 P 与油墨层的高度 h 的关系,当检测系统以及样片确定后其他参数保持不变,这样下一步的任务就简化成参数的标定过程,即通过对标准油墨面板多次多位置测量,拟合得到该种材料油墨的系统误差比例系数 K 。通过比例系数 K 即可计算同种材质的油墨层厚度。

3 油墨厚度检测结果与分析

根据文中第二部分论述的基于机器视觉的油墨厚度非接触式在线检测原理,搭建出一套油墨厚度测量系统。依托 VC++ 编程平台,结合 OPENCV 的数字图像处理技术^[8],可实现基于自适应提取算法的油墨厚度数字化定量模型的可操作化计算,并验证了精度。

3.1 精度验证

取一块表面平整的标准油墨面板样品进行测量,通过使用该厚度检测系统对油墨层检测的原始图像进行采集,采集图像如图 4(a)所示,观察到光线在油墨和玻璃之间的台阶区域,反射光成像杂乱无章。利用能够进行各种形状及复杂程度的实时干涉图形快速测量的 Zygo 数字波面干涉仪检测台阶区域得到的图像如图 4(b)所示,精度为 $10^{-7} m$ 的台阶仪对任意样品的表面粗糙度检测结果如图 4(c)所示,

图 4(c)的分界层部分和图 4(b)都对应图 4(a)中椭圆虚线框位置处,观察到油墨分界层有很明显的起伏,这很好的说明了工业上玻璃面板层涂式油墨印刷的弊端,该系统也能为油墨面板涂层边界的均匀度做一个定性的评价。另外,油墨层和玻璃层交界处存在大范围起伏(此区域在亮双线计算前已经被去除,不会对最后结果造成影响),而油墨层面较为平滑,上下差距最大约 2 μm,利用台阶仪对不同油墨厚度的手机面板进行检测发现这个结论是共性。

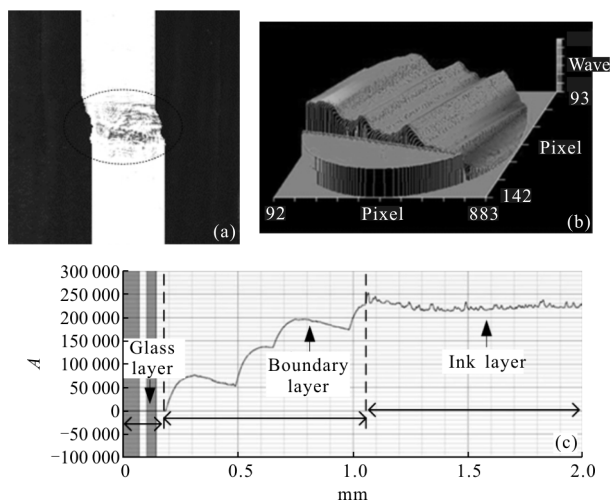


图 4 (a)测量原始图像;(b)油墨截面 Zygo 三维重构像;(c)台阶仪测量结果

Fig.4 (a) Original image of measurement; (b) Zygo 3D reconstruction of cross-section of ink film; (c) measurement results of step profiler

考虑到检测样品油墨层表面足够光滑和工业生产环节中要求高效便捷这两个因素,对手机面板油墨层厚度的标定仪器采用精度为 1 μm 的螺旋测微仪进行,这与具有一定宽度的亮线进行检测的结果在本质上都是平均量,可以等价。如果测量样片表面较为粗糙,标定仪器就要换成干涉仪或台阶仪以提高精度。

标定环节对同一块光滑的标准样品的油墨区域中 10 个均匀分布的点进行测量,测得的数值为真实值 V_i 。再利用该油墨厚度检测设备对上述 10 个测量点进行测量,得到亮线的偏移像素 P_i ,进而求出不同位置处的误差比例系数 K_i 。规定油墨厚度的真实值和系统测得像素数 P_i 的比值为该点的比例系数 K_i :

$$K_i = \frac{V_i}{P_i} \quad (8)$$

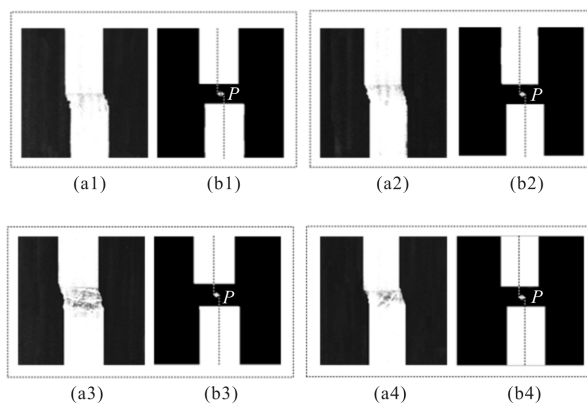


图 5 (a1)~(a4)原始图像;(b1)~(b4)处理图像

Fig.5 (a1)~(a4)original images; (b1)~(b4) processed images

取当前 10 个测量点中的 4 个,采集的原始图像和处理图像如图 5(a1)、(b1)~(a4)、(b4)虚线框所示,其中图 5 (b1)~(b4) 中的 P 表示两条亮线的偏移像素。表 1 所示为对误差比例系数 K_i 的求解。

表 1 比例系数 K_i 的实验结果

Tab.1 Experimental results of ratio K_i

No.	$V_i/\mu\text{m}$	P_i/pixel	K_i
1	6	21	0.286
2	7	22	0.318
3	6	20	0.300
4	6	21	0.286
5	6	21	0.286
6	7	21	0.333
7	7	22	0.318

对测量得到的 K_i 求平均得到最终的误差比例系数 K ,其中 n 是检测次数:

$$K = \left(\sum_{k=1}^n K_i \right) / n \quad (9)$$

为了计算该系统的精度,利用这一系统误差比例系数 K 对同种材质的另一标准油墨面板进行测量得到测量值 U_i ,对应与螺旋测微仪测得的实际值 P_i 进行比对得到该系统的检测误差 Error,结果如表 2 显示。

表 2 油墨厚度测量结果

Tab.2 Measurement results of the ink thickness

No.	$P_i/\mu\text{m}$	$U_i/\mu\text{m}$	Error/ μm
1	10	13.4	3.4
2	11	13.8	2.8
3	10	13.1	3.1
4	10	12.5	2.5
5	10	13.1	3.1
6	11	14.1	3.1
7	10	13.4	3.4
8	11	13.7	2.7
9	10	13.2	3.2
10	10	13.6	3.6

实验结果表明,检测得到的油墨厚度绝对误差优于 $4\ \mu\text{m}$,且用该检测系统检测其他油墨面板得到的检测数值与螺旋测微仪的检测结果也高度吻合。同时,由检测数据可以看出,测量过程比较稳定,能够实现“同种材料,一次定标、无限测量”的目的。该系统对外界环境影响不敏感,更适合于现场的实时检测。

3.2 误差分析

经过对整个检测过程的分析,系统的测量误差 Δ 包括系统误差 ε 和随机误差 σ 两部分。

3.2.1 系统误差

根据测厚系统的建模过程和标定原理的分析可知,系统误差来源主要有标定误差 ε_1 ,图像处理误差 ε_2 ,测试系统非绝对水平或垂直引入误差 ε_3 。

标定误差 ε_1 由 CCD 镜头的畸变而产生,会导致像元大小 T 存在微小误差 Δt 。当光线通过显微物镜和消球差透镜后的残留畸变,它会使像元实际对应尺寸发生微小变动,所以在系统搭建过程中应根据 CCD 成像对显微物镜和消球差透镜的位置做微小调整。实验中,首先利用一块带有已知大小的荧光网格线的标准透明面板采集多幅图像(以任意垂直的两条网格线作为坐标系将 CCD 摆正并采集图像)。提取得到的实际网格的交点,同时拟合计算标准网格的坐标。再根据实际得到的网格的交点和理想网格交点做比对,使用 Matlab Calibration Toolbox 实现空间域的坐标矫正操作,最后,通过双线性插值算

法^[9]明确非整数像素位置的灰度分布情况,恢复矫正后的图像。如果得到的矫正图像仍然略有弯斜,在光路中微调显微物镜和消球差透镜位置,使得网格图像在充满 CCD 整个视场的同时,保证 CCD 采集网格图像的准确性,重复几次微调 and 图像校准比对操作,使得畸变影响达到最小。

其次,图像处理误差 ε_2 产生于亮双线定量计算预处理操作环节可能把有效区域当成噪声点的删除。 ε_2 和测试系统非绝对水平或垂直引入误差 ε_3 互相关联。在计算模型处理过程中。理想情况下,图像中线激光与 CCD 镜头截面的横轴夹角应为直角,但是设备在调试的过程中是很难保证绝对垂直。如果线激光存在扭动,那么部分有价值点的位置就会因为与所求中心位置偏差太大而被删除,从而会降低第二次中心点寻找的准确性。通过细微调节后测试计算,可以将所得图像的横轴与图像中的亮线夹角控制约 90.5° ,已知图像处理区域是一个边长为 R 的正方形区域,占像素 $S*S$,该角度会使线激光在图像的上下边界像素偏移 Δs ,以图像左上方位位置作为坐标原点,利用最小二乘法求出亮条纹细化之后的中心线方程,当 $y=R$ 时,求得的即为 x 的最大偏移量 x_m ,而理论上光线绝对垂直, $x_n=0$,则处理区域的最大像素偏差:

$$(\Delta s)=|x_m-x_n|*\frac{S}{R} \quad (10)$$

即在自适应操作删除误差较大点要满足与 Q 距离约 $(\Delta s)/2$ 个像素为佳,该范围内的点都可以视为有效位置,范围之外的点可视为误差点予以删除。

对于同一块油墨面板,夹角 θ 和 CCD 接收的亮线间隔像素 P 之间存在着对应关系。理论上, θ 越大, P 越大,越容易区分和计算,但由于显微镜通光孔直径为 $22\ \text{mm}$ 的制约,且需尽量保证亮线成像位于 CCD 视场的中间部分,所以本系统最佳入射角度为 38° 附近,各个部件之间需满足法线一致性,焦平面重合以减少误差 ε_3 的比重。

3.2.2 随机误差 σ

随机误差可分为两类,一类是检测件表面的不确定性 σ_1 以及检测环境的不稳定 σ_2 。 σ_1 主要由被检元件的面形、均匀度、表面粗糙度等产生, σ_2 主要由平台的抖动产生,所以在元件检测之前需对表面做必要的清洗,检测过程尽量保持环境稳定,测试过程

应避免平台抖动。

系统的测量误差 Δ 公式为:

$$\Delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \sigma_1 + \sigma_2 \quad (11)$$

为了得到误差的稳定趋势,利用该厚度检测系统对不同油墨厚度样片进行多次检测。实验结果如图 6 所示。

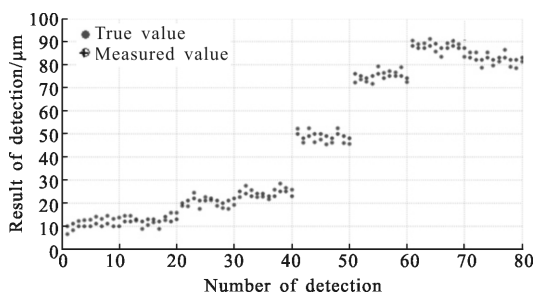


图 6 不同厚度样片真值和测量值结果

Fig.6 True and measured value of different thickness samples

利用公式(12)对检测数据的系统误差进行计算,得到结果为 3.2:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(\left(\sum_{i=1}^n U_i \right) / n \right) - P_i \right)}{n} \quad (12)$$

利用公式(13)对检测数据的随机误差进行计算,得到结果为 0.223 5:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(U_i - \left(\sum_{i=1}^n U_i \right) / n \right)}{n} \quad (13)$$

最终,对上述几个影响因素进行校正和补偿后,测厚系统的检测精度优于 $4 \mu\text{m}$,重复性约 $1 \mu\text{m}$ 。

4 结 论

文中建立了一种新型的基于机器视觉方法的油墨厚度无损在线数字化检测系统,实现对油墨厚度的无损在线和高精度测量。新型的油墨厚度无损在线数字化检测系统具有非接触、高精度、抗噪抗干扰的优点,适用于各种非导电玻璃材料表面涂层厚度的非接触式测量。该设备由于轻便小巧可以直接搭

建在盖板玻璃生产线上,实际的玻璃检测前已经过清洗操作,玻片会均匀分布在传送带中运动,经过测量系统后被区分为良品和不良品自动由传送带流向不同方位,所以检测过程无需额外的机器人等辅助设备,节省大量的人工成本和时间成本,促进无人化检测工厂的建设,真正实现了在线快速检测。

参考文献:

- [1] Xiao Changjiang, Zhang Jingchao, Li Xingyuan. Experimental research on thickness measurement of reflection-type flat glass based on line laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(5): 909-912. (in Chinese)
- [2] Módis L J, Langenbucher A, Seitz B. Corneal thickness measurements with contact and noncontact specular microscopic and ultrasonic pachymetry [J]. *American Journal Ophthalmology*, 2001, 132(4): 517-521.
- [3] Liu Peng. Visualized detection for the surface micro-defects of optical elements [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012. (in Chinese)
- [4] Lee C, Danon Y. Measurement of the thickness of non-ferromagnetic metal sheets by eddy current testing [J]. *Nondestructive Testing*, 2005, 27(9): 454-456.
- [5] Kurita K. A non-contact and online ink thickness sensor for printing machines using the photoacoustic effect [J]. *Measurement Science & Technology*, 2008, 19(7): 184-187.
- [6] Li Xiaotian, Zhang Tieqiang, Zhang Shengyong. Small objects dimension measure and three-dimension reconstruction system based on laser triangulation [J]. *Optical Instruments*, 2008, 30(6): 21-26. (in Chinese)
- [7] Herout A, Dubská M, Havel J. Review of Hough Transform for Line Detection [M]//Real-Time Detection of Lines and Grids. London: Springer, 2013: 3-16.
- [8] Bradski G, Kaehler A. Learning OpenCV: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library [M]. California: O'Reilly Media, Inc., 2013.
- [9] Guo W, Zhang C. Real-time image distortion correction system based on improved bilinear interpolation algorithm [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 513-517: 3773-3776.