

文章编号: 1001-3806(2015)03-0391-04

基于激光视觉原理测量玻璃中气泡的尺寸

肖长江^{1,2}, 张景超¹, 魏 勇^{1,2}, 李兴元¹, 胡学良¹

(1. 燕山大学 理学院, 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 里仁学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 为了实现玻璃中气泡尺寸的在线测量, 基于激光视觉原理, 采用线结构激光器、线阵 CCD 相机和运动控制系统在实验室搭建玻璃气泡的动态测量系统。投射到玻璃表面的线结构激光光斑经变焦镜头成像在相机的光敏阵列上, 相机的横向扫描与运动平台的纵向扫描配合, 利用 Sapera CamExpert 图像采集软件获得玻璃气泡的灰度图像; 理论上讨论了图像的纵向和横向精度, 给出了气泡图像失真的判断依据及工作像素时钟频率与玻璃板纵向运动速率之间的匹配关系; 采集了不同纵向运动速率下气泡的灰度图像, 利用 Sapera Architect 软件测量气泡图像的横向和纵向像素数, 通过理论计算得出气泡的横向和纵向尺寸, 并与直尺测量结果比较, 发现纵向尺寸相对误差为 0.18, 横向尺寸相对误差为 0.05。结果表明, 在相机工作距离、焦距和像元尺寸确定的情况下在误差允许的范围内该系统可以用来测量气泡的横向尺寸。

关键词: 测量与计量; 玻璃气泡尺寸测量; 激光视觉; 图像失真

中图分类号: TQ171.6⁺5

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.024

Measurement of glass bubble size based on laser vision principle

XIAO Changjiang^{1,2}, ZHANG Jingchao¹, WEI Yong^{1,2}, LI Xingyuan¹, HU Xueliang¹

(1. College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. College of Liren, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to measure glass bubble size in real time, a dynamic system for measuring glass bubble was built in laboratory with a linear laser diode, a linear CCD and a movement control system based on the laser vision principle. The laser spot projected onto the glass surface was imaged on the photosensitive array of the camera through its zoom lens. Gray images of glass bubbles were grabbed by Sapera CamExpert software with the combination of the transverse scanning of the camera and the longitudinal scanning of the movement platform. The transverse and longitudinal precision of gray images was discussed in theory. The criterion for distinguishing the bubble images from distortion was confirmed and the matching relationship between the clock frequency of work pixels and the longitudinal velocity of the float glass was deduced. Bubble gray images were grabbed at the different longitudinal velocities. The transverse and longitudinal pixel number of glass bubbles was measured by the Sapera Architect. The transverse and longitudinal size of bubbles was acquired by theoretical calculation. Comparing with bubble size measured with a ruler, the relative error of the longitudinal size is 0.18 and of the transverse size is 0.05. The results show that in the case that camera work distance, focal length and pixel cell size are fixed, the transverse size of glass bubbles can be measured by this system in the range of permitted errors.

Key words: measurement and metrology; size measurement of glass bubble; laser vision; image distortion

引 言

平板玻璃广泛用于建筑、汽车、制镜、显示、光伏等行业, 气泡、结石、裂纹等缺陷的存在不仅影响其美观还直接关系到玻璃的机械强度和透光性能^[1], 进一步

的加工处理也很难消除缺陷。由于下游产业对玻璃原片的质量要求不断提高^[2-4], 这就需要对玻璃的缺陷进行严格的监控^[5]。人眼对浮法玻璃上的缺陷并不敏感, 且容易产生漏检。目前, 德、英、美等发达国家已具备较成熟的玻璃在线检测系统, 但设备价格昂贵。国内一些公司也在试制玻璃缺陷在线自动检测系统, 但检测及识别速率、精度方面与国外还有较大差距^[1]。检测设备性能的提高可有效保障玻璃产品的质量, 提高其市场竞争力^[6]。激光视觉检测技术^[7-11]是一种可行有效的玻璃缺陷检测技术。本文中主要探讨玻璃气泡的激光视觉检测原理, 采用线结构光激光器 (linear

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60977061); 秦皇岛市科学技术研究与发展计划资助项目 (201101A072)

作者简介: 肖长江 (1982-), 男, 讲师, 硕士, 现主要从事玻璃材料性能及参量的光电检测方面的研究工作。

E-mail: xiaochangjiang@aliyun.com

收稿日期: 2014-05-07; 收到修改稿日期: 2014-06-17

laser diode, LLD)、线阵 CCD 相机(linear array charge coupled device camera, LCCD)以及一套速率可调的运动平台在实验室搭建了玻璃气泡尺寸视觉测量系统,从理论和实验两方面研究气泡图像的失真原因及失真情况下气泡尺寸的测量问题。

1 激光视觉测量原理

视觉测量原理如图 1 所示。图 1a 中,LLD 是线结构激光器,LCCD 是线阵 CCD 相机, n, t, l 分别是平板玻璃法向、横向和纵向。LLD 发射一线结构激光照射在平板玻璃上,成像透镜将线光斑成像在 LCCD 像元阵列上,LCCD 最大行频由下式确定:

$$\nu_{\max} = \nu \times 1000 / M \quad (1)$$

式中, ν_{\max} 为最大行频(单位为 kHz), ν 为像素时钟频率(单位为 MHz), M 为分辨率(即 LCCD 光敏单元上的像元个数)。图 1b 为 n - O - t 平面上的系统示意图,其中, V 为相机视场(单位为 mm), d 为工作距离(单位为 mm), f 为成像透镜焦距(单位为 mm), s 为像元尺寸(单位为 μm),由几何光学可知,LCCD 的视场由下式计算:

$$V = \frac{d}{f} \times \frac{s}{1000} \times M \quad (2)$$

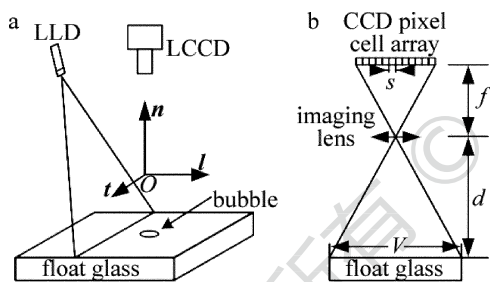


Fig. 1 Sketch of laser vision measurement

LCCD 的视场在横向上是 1 维的,每次只采集一行,只有横向信息,如果要获取 1 幅图像,浮法玻璃板必须沿纵向运动。

图像的横向精度可表示为:

$$p_t = V / M \quad (3)$$

式中, p_t 为图像横向精度(单位为 mm),即图像横向相邻两个像元间距代表玻璃板上横向的实际尺寸(由于像元之间排列紧密,这里近似认为像元间距与像元尺寸相等)。将(2)式代入(3)式得:

$$p_t = \frac{d}{f} \times \frac{s}{1000} \quad (4)$$

可以看出,在相机工作距离、焦距和像元尺寸确定的情况下,图像的横向精度是确定的。

纵向精度与 LCCD 的工作行频和被摄物体的运动速率有关,其计算公式如下:

$$p_l = v_l / (\nu_{\text{work}} \times 1000) \quad (5)$$

式中, p_l 为图像纵向精度(单位为 mm),即图像纵向相邻两行间距代表玻璃板上纵向的实际距离, v_l 为玻璃板的纵向运动速率(单位为 mm/s), ν_{work} 为 LCCD 的工作行频(单位为 kHz)。由(1)式可知,工作行频 ν_{work} 与工作像素时钟频率 ν' 的关系为:

$$\nu_{\text{work}} = 1000\nu' / M \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式可得纵向精度与工作像素时钟频率之间的关系:

$$p_l = v_l \times M / (\nu' \times 10^6) \quad (7)$$

由(5)式和(7)式可知,当玻璃板纵向速率 $v_l = 0$ 时,即使 LCCD 处于工作状态($\nu_{\text{work}} \neq 0$),但由于此时 $p_l = 0$,说明此时只能获取线结构光斑处的横向信息,不能获得玻璃气泡的视觉图像;当玻璃板纵向速率 $v_l \neq 0$ 时,LCCD 将获得的 1 维横向图像信息进行拼接从而采集玻璃表面的 2 维图像信息。

根据(4)式和(7)式,由已知参量便可计算出图像的横向和纵向理论精度,利用获取的玻璃气泡横向和纵向像素数,便可以计算出气泡的横向和纵向尺寸。

$$\begin{cases} s_l = N_l \times p_l \\ s_t = N_t \times p_t \end{cases} \quad (8)$$

式中, s_l 和 s_t 分别为气泡纵向和横向尺寸, N_l 和 N_t 分别为气泡纵向和横向所占像素数。

将(8)式中两式相比得:

$$s_l / s_t = (N_l / N_t) \times (p_l / p_t) \quad (9)$$

对于确定的气泡,比值 s_l / s_t 是恒定的,如图 2a 所示;若 $p_l = p_t$,则 $N_l / N_t = s_l / s_t$,说明图像纵横所占像素比等于实际气泡的纵横尺寸比,图像反映了真实的气泡形状,如图 2b 所示;若 $p_l > p_t$,则 $N_l / N_t < s_l / s_t$,说明图像纵横所占像素比小于实际气泡的纵横尺寸比,图像存在压缩变形,如图 2c 所示;若 $p_l < p_t$,则 $N_l / N_t > s_l / s_t$,说明图像纵横所占像素比大于实际气泡的纵横尺寸比,图像存在拉伸变形,如图 2d 所示。

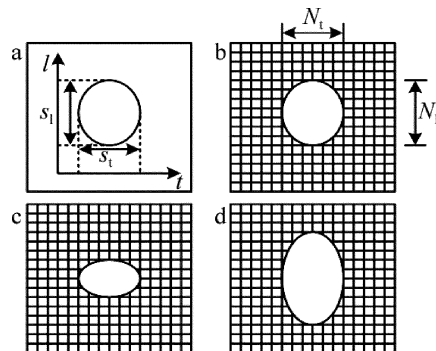


Fig. 2 Sketch of bubble distortion

由(4)式和(5)式可得:

$$\nu_{\text{work}} = f \times v_l / (d \times s) \quad (10)$$

此式为保证图像不失真时, LCCD 当前工作行频 ν_{work} 与玻璃板纵向运动速率 v_1 之间的关系。相机的当前工作行频随纵向运动速率成线性变化, 当纵向运动速率增大时相机的工作行频相应增大, 当物体运动速率减小时相机的工作行频相应减小, 二者比值保持不变。

由(4)式和(7)式可得:

$$\nu' = \frac{f \times M}{d \times s \times 1000} \times v_1 \quad (11)$$

即要保持玻璃气泡不失真, 工作像素时钟频率 ν' 与玻璃板纵向运动速率 v_1 之间必须满足的关系式, 在相机焦距、工作距离、像元尺寸和分辨率确定的情况下, 二者之间亦是一个线性关系, (10)式和(11)式就是 LCCD 与运动系统扫描匹配的关系式。

2 实验系统及参量

实验系统构成如图 3 所示。其参量如下: LLD 是美国 ProPhotonix Ltd 公司生产的 invisio 单线激光光源, 激光强度呈非高斯均匀分布, 强度波动 10% 以内, 功率 19mW, 峰值波长 690nm, 最高工作温度 33℃, 扇角 60°; LCCD 相机由加拿大 Dalsa 公司生产, 型号 P2-22-06K40, 像元尺寸 $7\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$, 分辨率 6144×1 , 最大行频 12kHz, 相机接口采用 Base Camera Link 高速标准接口, 采用相关双采样和嵌入式平场纠错算法保证其输出均匀性, 其波长响应度在 690nm 达到峰值 $38\text{DN}/(\text{nJ}/\text{cm}^2) @ 10\text{dB}$, 可以实现 LLD 和 LCCD 的最佳匹配。数据采集卡采用 Dalsa 公司的 X64-CL iPro 高速图像采集卡, 像素时钟频率达 85MHz, 数据密度为 $(8 \sim 16) \text{bit}/\text{pixel}$, 主机总线为 PCI-X66, 帧缓存为 32MB, 软件为 Sapera LT 32 bit。相机镜头采用 Nikon 尼克尔自动变焦镜头, 焦距 $(24 \sim 85) \text{mm}$ 可调, 浮动光圈 $F/(2.8 \sim 4)$ 。运动平台为东莞市奥普特自动化科技有限公司生产的往返式运动平台, 型号为 OPT-LBLS10, 运动速率 $(0 \sim 200) \text{mm}/\text{s}$, 速率由甘博公司生产的高载频脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 变频控制器调节, 型号 NS32, 可以显示工作频率 f' 为 $(0 \sim 30) \text{Hz}$, 工作台行程 $(240 \sim 340) \text{mm}$, 工作

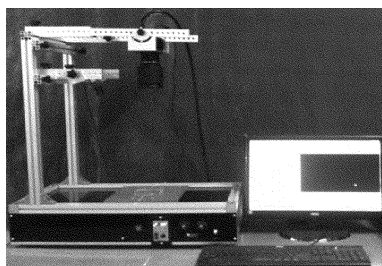


Fig. 3 Experiment system

台尺寸 $220\text{mm} \times 220\text{mm}$ 。

3 实验结果与分析

实验中采用的玻璃样品 (来自耀华玻璃厂) 中心区有一椭圆形气泡。根据平台制造商提供的平台运动参考速率与速率控制器工作频率的数据, 计算得到各工作频率对应的速率近似值如表 1 所示。实验中, 工作距离 $d = 420\text{mm}$, 焦距 $f = 35\text{mm}$, 光圈选择 $F/2.8$, 帧速 $10\text{frame}/\text{s}$, 图像分辨率 $2000\text{pixel} \times 480\text{line}$, 图像压缩率 90%, 工作像素时钟频率 $\nu' = 20\text{MHz}$ 。按表 1 调节运动平台纵向运动速率, 利用 Sapera CamExpert 图像采集软件抓取气泡缺陷图像如图 4 所示, f' 为速率控制器工作频率。可以明显看到随速率的增大, 气泡图像的纵向尺寸逐渐减小, 而横向尺寸几乎不变, 这与 (4) 式和 (7) 式的理论讨论相符。

Table 1 Experiment data

No.	f'/Hz	$v_1/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	p_1/mm	N_1/pixel	p_1/mm	N_1/pixel
1	8	53	0.016	238		25
2	10	65	0.020	181		25
3	12	80	0.025	152		25
4	14	93	0.029	136		26
5	16	106	0.033	126		26
6	18	120	0.037	109	0.084	26
7	20	130	0.040	89		25
8	22	146	0.045	83		25
9	24	159	0.049	73		26
10	26	173	0.053	70		25
11	28	186	0.057	63		25
12	30	200	0.061	56		25

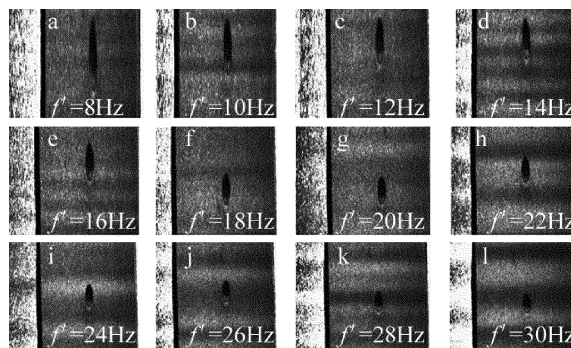


Fig. 4 Bubble images at the different velocities

3.1 气泡图像失真分析

将系统参量 $f = 35\text{mm}$, $M = 6144$, $d = 420\text{mm}$, $s = 7\mu\text{m}$ 和最大纵向运动速率 $v_{1,max} = 200\text{mm}/\text{s}$ 代入 (11) 式得最大工作像素时钟频率 $\nu_{max}' \approx 15\text{MHz}$, 即当玻璃板以最大纵向速率运动时, 需匹配的工作像素时钟频率约为 15MHz, 速率小于 $200\text{mm}/\text{s}$ 时, 工作时钟频率必然小于 15MHz, 然而 Sapera CamExpert 中显示可调

节的最小时钟频率为 20MHz, 因此, 在上述选定的焦距、工作距离内, 所观察到的气泡图像必然发生变形失真。由 (4) 式和 (7) 式计算可得横向精度 $p_t = 0.084\text{mm}$, 最大纵向精度 $p_l \approx 0.061\text{mm}$, 利用表 1 中的数据计算图 4 中各图像的纵向精度, 可知 $p_l < p_t$, 即气泡图像存在拉伸变形。

3.2 气泡尺寸计算与误差分析

利用 Dalsa 公司的 Sapera Architect 软件可获得气泡图像的纵向和横向所占像素数 N_l 和 N_t , 利用 (4) 式和 (7) 式可计算得到 p_l 和 p_t , 列于表 1 中, 进而利用 (8) 式可计算出气泡尺寸。利用表 1 中的数据可得气泡纵向和横向测量尺寸随平台运动速率的变化关系曲线, 如图 5 所示, 可见, 平台运动速率对气泡纵向尺寸测量的影响远大于对横向气泡尺寸的测量, 结果如表 2 所示, 气泡尺寸的横向测量误差较小, 在误差允许的范围; 纵向误差较大, 已超出了误差的允许范围。

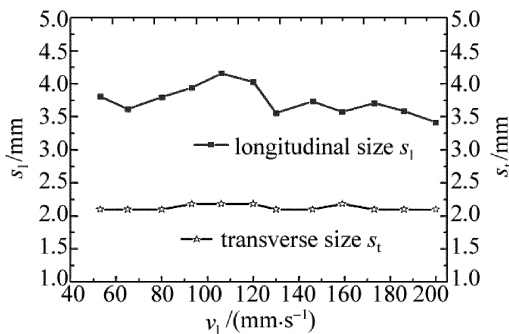


Fig. 5 Influence of platform velocity on bubble size measurement

Table 2 Measurement results of bubble size

	s_l /mm	s_t /mm
average	3.7	2.1
standard deviation	0.3	0.1
measuring value by ruler	4.5	2.2
relative error	0.18	0.05

产生误差的原因是: (1) 计算采用的纵向运动速率只是一个均值, 对于往返式运动平台来说, 必然存在速率或大或小的情况, 这就造成纵向精度其实是随时间变化的; (2) 利用 Sapera Architect 软件获取纵向最大像素数时, 对兴趣区的选择存在一定的主观性, 不容易确定气泡图像的边缘范围; (3) 利用 Sapera CamExpert 抓取气泡图像时, 由于软件响应时间不同, 也会带来纵向测量误差; (4) 玻璃板在平台上不规则的微小移动对横向和纵向测量都会或多或少的产生误差。

4 结论

玻璃气泡等缺陷的测量是玻璃生产过程中的必要

环节, 激光视觉测量是一种缺陷测量的有效手段, 对于线阵 CCD 相机来说, 相机横向扫描和玻璃运动的纵向扫描之间的匹配可以实现气泡图像的采集, 在相机工作距离、焦距和像元尺寸确定的情况下, 横向精度通常保持不变, 但纵向精度却随玻璃运动速率的变化而变化, 当纵向精度大于横向精度时, 图像发生压缩变形; 当纵向精度小于横向精度时, 图像又发生拉伸变形; 只有纵向精度与横向精度相等时, 才能获得无失真的图像。理论分析和实验表明, 纵向尺寸测量误差较大, 而横向精度却不随玻璃运动速率变化, 在误差允许的范围内, 可以有效的测量气泡横向尺寸。可以预见, 该方法对于玻璃中的其它类型缺陷, 如结石、夹杂等的横向尺寸测量同样适用。

参考文献

- [1] WANG S Zh, WANG Zh B, JIN Y, *et al.* Research of recognition technology for glass defect based on BP neural network[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(14):45-48 (in Chinese).
- [2] WANG Y, LIN S B, MIAO X R. Application of machine vision in detection of glass defect based on LabVIEW[J]. Industrial Control Computer, 2011, 24(4):75-77 (in Chinese).
- [3] WEI T, WANG Zh B, JIN Y, *et al.* Study on glass defect inspection technology based on image reconstruction[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37(6):58-61 (in Chinese).
- [4] WANG F, CUI F K, LIU J T, *et al.* The system research for on-line defect inspection of flat glass[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1):95-99 (in Chinese).
- [5] PENG X Q, CHEN Y P, XIE J M, *et al.* Research on online defect inspection and recognition for float glass fabrication[J]. Glass & Enamel, 2010, 38(1):1-6 (in Chinese).
- [6] DU X Q, YU B Y, JIN Y. Study on inspection of glass defect by CCD array[J]. Glass, 2009, 36(3):3-6 (in Chinese).
- [7] SUN Ch K, YE Sh H. Laser measurement technology[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001:129-143 (in Chinese).
- [8] HUO L, ZHANG A J, LIU W J, *et al.* Research on the extraction of laser-knife center based on 3-D vision measuring data with line-structured light[J]. Computer Applications and Software, 2006, 23(10):100-102 (in Chinese).
- [9] LI X Y, LU Ch H, ZHANG J Ch, *et al.* An image acquisition method for raised characters based on laser vision technology[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(2):148-158.
- [10] ZHOU X L, JIANG N D, XIAO W X, *et al.* Measurement method for mean texture depth of asphalt pavement based on laser vision[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3):11-15 (in Chinese).
- [11] CHEN G, ZHAO Ch M, JI R Y, *et al.* Simulation design of semiconductor laser collimation based on ZEMAX[J]. Laser Technology, 2012, 36(3):318-325 (in Chinese).