

基于机器视觉的条形光学玻璃自动计重切割

何峰¹, 周亚同¹, 赵翔宇¹, 王帅², 张忠伟²

¹ 河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401;

² 北京市安视中电科技有限公司, 北京 100871

摘要 基于人工经验对光学玻璃进行的计重切割存在误差较大、效率较低、安全性较差的问题。针对上述问题, 利用机器视觉构建了一套针对条形光学玻璃的自动计重切割设备, 并结合结构光为该设备设计了一套在线自动计重算法。在计重算法中, 高速工业相机采集到光学玻璃的图像后, 首先识别玻璃横截面的位置特征, 并对轮廓进行拟合, 得出当前横截面的面积; 然后结合伺服电机对玻璃推进的进给量, 对面积进行积分, 计算出累计的体积与质量。当累计质量满足切割条件时, 对玻璃进行切割。经实验及工厂实际应用证明, 该系统具有高精度、高效率以及高安全性等特性, 实际切割误差小于 0.3 g。该装置及算法能够高效、精确地进行条形光学玻璃的自动计重切割。

关键词 机器视觉; 自动计重切割; 高速工业相机; 光学玻璃

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.071501

Automatic Weighing and Cutting Method of Strip Optical Glass Based on Machine Vision

He Feng¹, Zhou Yatong¹, Zhao Xiangyu¹, Wang Shuai², Zhang Zhongwei²

¹ School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

² Beijing Anshizhongdian Science and Technology Ltd., Beijing 100871, China

Abstract There are many problems of using weighing and cutting method for optical glass based on artificial experience, such as large errors, low efficiency and poor security. In order to solve the above problems, an automatic weighing and cutting equipment for strip optical glass is built based on machine vision, and an automatic weighing algorithm is designed for the equipment combined with structured light. The position feature of the glass cross section is identified after the optical glass image is collected by the high speed industrial camera. The cross sectional area is calculated by using the location information. Then the area is integrated with the help of the glass propulsion feed of the servo motor. And the cumulative volume and the mass size are calculated. When the cutting conditions are satisfied, the glass will be cut. Experimental results and practical application in the factory show that, the system has the characteristics of high precision, high efficiency and high safety, and the actual cutting error is less than 0.3 g. Therefore, The automatic weighing and cutting method can cut the strip optical glass efficiently and accurately.

Key words machine vision; automatic weighing and cutting method; high speed industrial camera; optical glass

OCIS codes 150.3045; 120.0120; 120.3940

收稿日期: 2017-01-21; 收到修改稿日期: 2017-02-24

基金项目: 中国博士后基金(2014M561053)、河北省自然科学基金(F2013202254)、教育部人文社会科学研究规划基金(15YJA630108)

作者简介: 何峰(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事智能信息处理、机器视觉方面的研究。

E-mail: 315210506@qq.com

导师简介: 周亚同(1973—), 男, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事地震信号处理、模式识别与机器学习等方面的研究。

E-mail: zyt@hebut.edu.cn(通信联系人)

1 引言

光学玻璃因具有良好的透光性、相干性,通常被用于生产相机镜头和显微镜镜头等光学器件^[1]。由于这些器件尺寸较小,且光学玻璃价格昂贵,因此,对光学玻璃的切割技术要求很高。然而受到生产工艺的限制,条形光学玻璃基料的形状并不规则。此外,光学玻璃材质较脆,在切割过程中容易出现崩边等现象,加大了切割难度^[2]。当前对光学玻璃的分块切割主要是依靠人工操作,即凭借经验,根据光学玻璃的截面形状及所需切割质量来确定切割长度,然后手动切割,此种方式难以精确计算玻璃的切割位置。若实际切割质量大于设定质量,切割后的玻璃块需要经过再打磨才能使用;若切割质量小于设定质量,切割后的玻璃块就成为了废料。因此,人工切割不仅会造成很大的浪费,而且对工人经验要求较高、切割效率低,工人的人身安全也难以保证。

机器视觉技术利用机器来代替人眼进行观察,并模仿人脑做出一定的判断^[3]。通常利用工业相机来获取图像,然后基于图像分析目标特征,进而采取下一步动作。随着工业 4.0 时代的到来,机器视觉技术得以应用于各个行业的实际生产中,如缺陷检测^[4-5]、视觉定位^[6]等。而在玻璃类材料的生产应用也有很多,例如,姚红兵等^[7]提出一种基于机器视觉的树脂镜片疵病检测系统算法,针对树脂镜片疵病的自动检测,构建了一套图像采集系统并提出了相应的疵病检测算法。赵善政^[8]设计了一种玻璃边缘定位方法,实现了机器人对玻璃的自动抓取来代替人工搬运玻璃,将边缘提取应用于玻璃切割。白雁兵^[9]将机器视觉系统与玻璃切割机结合,提出了一种液晶显示屏的自动切割算法,该算法主要利用销钉查找,并在该位置进行切割,但其本质只是静态的目标查找。国外也有不少学者进行了相关研究,Liu 等^[10]将机器视觉技术用在玻璃瓶缺陷的智能检测方面,大大地提高了检测的准确率和生产效率。Lee 等^[11]搭建了一个玻璃质量检测系统,该系统可用于检测玻璃种类,且检测正确率较高。

大量研究报道了机器视觉在玻璃缺陷检测、定位和对位等方面的应用。虽然机器视觉已经应用到玻璃生产行业,尤其是玻璃的缺陷检测以及简单的玻璃边缘提取等方面,但是机器视觉应用在动态的玻璃实时计算重量方面却鲜有文献报道。当前普通玻璃自动切割的主要方式为利用可编程逻辑控制器(PLC)作为中央控制系统,控制电机对玻璃每次推进固定的距离,然后进行切割操作。但该方法不适用于价格昂贵、形状未定的光学玻璃。当前常见的光学玻璃切割分块方式仍然是工人凭借经验、按照设定切割质量确定切割长度,手拿条形光学玻璃靠近切割刀片进行切割,该切割方式的危险性极高,且生产效率较低、浪费较大。因此急需一种方便精确的计重方式来实现自动切割。

结构光可用于相机的标定与定位^[12],结构光与机器视觉结合具有高精度的特点。解则晓等^[13]利用结构光与机器视觉构建了一套工业机器人的定位系统,该系统精度较高,且灵活性与稳定性也能满足应用的需求,体现了结构光与机器视觉搭配的高精度优点。基于机器视觉的高精度、高效率以及高安全性,本文构建了一套自动计重切割装置,并结合结构光为该装置设计了一套自动计重算法。经工厂实际使用验证,该装置及算法能够高效、精确地进行光学玻璃的自动计重切割。

2 光学玻璃自动计重切割装置

该切割系统主要用于将条形光学玻璃切割为相等质量的小玻璃块。光学玻璃切割系统的工作原理如图 1 所示。

该切割系统主要包括玻璃图像采集模块、图像处理模块、图像显示模块、运动控制模块及切割模块。图像采集模块包括高速工业相机和红色一字型激光源等;图像处理模块为内装计重切割算法的工控机(IPC);图像显示模块为触摸显示器;运动控制模块包括 PLC 和伺服电机;切割机模块包括玻璃切刀、切刀控制电机以及玻璃夹紧等气动装置。IPC 与 PLC 通过 RS232/485 接口利用处理机/外围设备接口(PPI)协议进行通信,PLC 控制切割刀片驱动电机、玻璃推动伺服电机以及气缸等气动装置。

切割系统中采用 200 万像素高速工业相机,相机帧率设置为 60 frame/s;镜头焦距为 16 mm,光圈调小,保证背景为黑色;激光源外形尺寸为 16 mm×60 mm,光束束散角为 60°,功率为 5 mW;IPC 为研华生产的计算机,配置要求为 4 核 32 位的 Windows 7 操作系统,运行内存为 4 GB,以保证 IPC 网口传输速度大于相机图像数据的传输速度,不会出现丢帧现象;PLC 为西门子 S7-200,PLC 控制伺服电机平稳推动条形光学玻

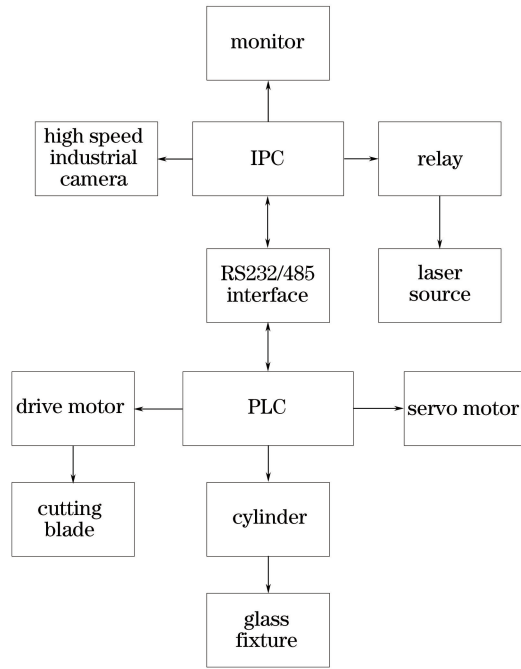


图1 光学玻璃切割系统工作原理图

Fig. 1 Schematic of optical glass cutting system

璃,推动过程中由气缸控制夹具固定玻璃,切割刀片由切割电机驱动。

3 光学玻璃自动计重切割算法

3.1 自动计重切割流程

自动计重切割流程如图2所示。系统上电以后,首先在IPC软件界面设置好各项参数,点击开始按钮,程序开始监控PLC控制器,当PLC控制器通过串口通信向IPC发送开始扫描指令后,PLC控制器开始控制伺服电机平稳推动玻璃运动。同时高速工业相机开始扫描玻璃采集图像,识别光学玻璃横截面位置特征,并对横截面轮廓进行曲线拟合,得出当前横截面的面积,然后结合伺服电机对玻璃的推进,通过对面积积分计算出累计的体积与质量。若累计质量未达到设定分块质量,则伺服电机继续推进玻璃,相机继续扫描玻璃并计算累计的体积与质量。若累计质量达到设定质量,则IPC通过串口向PLC控制器发送切割指令,相机停止采集图像与计算,同时PLC向伺服电机发送停止推进指令,并进行玻璃切割。

3.2 工业相机及激光源的安装

要实现实时自动计重,首先要保证玻璃扫描图像的清晰度。工业相机与激光源的具体安装方式如图3所示。

图3中一字型红色激光与样品垂直,高度为150 mm,该距离的改变对成像效果影响不大,主要是为得到清晰的激光线;高速相机安装在距传送带上玻璃为200 mm的高度处,此时相机成像效果较好;相机与激光源的距离为300 mm,相机与垂直面的夹角为 50° 。传送带背景为黑色,即拍照的背景颜色为黑色。镜头光圈调小,使噪声影响最小,此时轮廓目标最明显,基本没有干扰线条。成像效果如图4所示。图4(a)为光学玻璃未达到激光照射位置时采集的图像,图4(b)为平面光学玻璃通过激光照射位置时采集的图像,图4(c)为弧面光学玻璃通过激光照射位置时采集的图像。

3.3 条形玻璃横截面轮廓拟合

得到图4所示图像之后,为了计算出条形玻璃横截面的面积,首先要识别光学玻璃的位置特征信息,得到横截面的轮廓。如图5所示,利用找到的A、B、C、D 4个特征点进行轮廓拟合。

图5中CD红色曲线为光学玻璃表面反射(磨砂面光学玻璃)或者折射(光滑面光学玻璃)形成的光线。要想获得横截面面积,首先需要拟合AB、AC、BD以及CD 4条直线或曲线,然后获得横截面的轮廓。具体做法为

- 1) 根据图 4 中采集的图像,对图像按列扫描,找到 A、B、C、D 4 个点;
- 2) 利用直线轮廓拟合算法拟合出 AB、AC、BD 3 条直线;
- 3) 根据所切割玻璃为弧面或平面光学玻璃,确定 CD 为曲线拟合或直线拟合。最终得到当前横截面的轮廓。

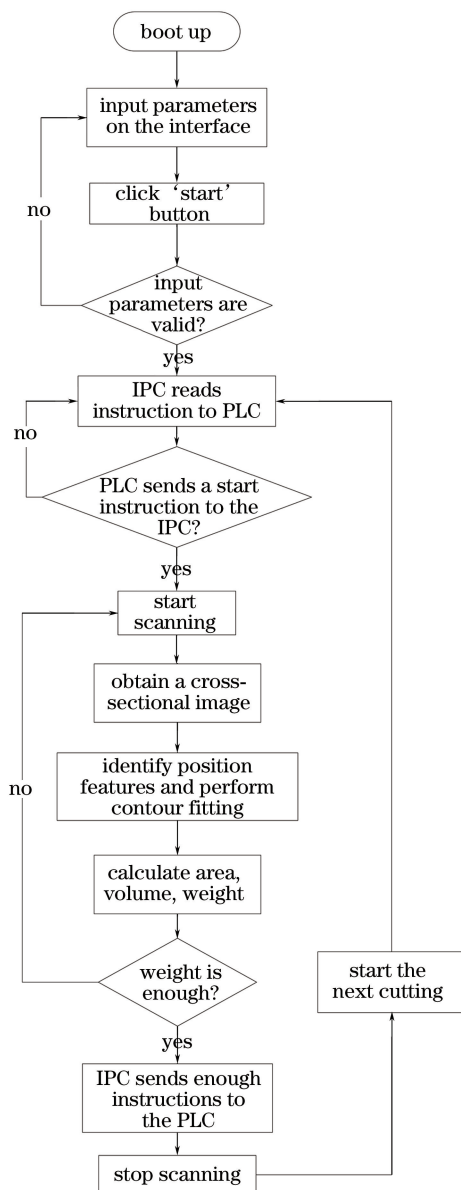


图 2 条形玻璃自动计重切割流程图

Fig. 2 Flow chart of automatic weighing and cutting method for strip glass

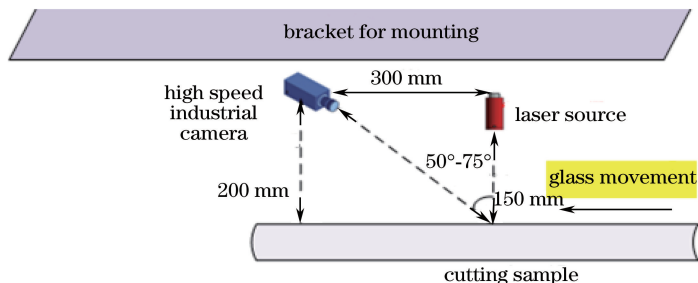


图 3 工业相机及激光源安装方式

Fig. 3 Installation of industrial camera and laser source

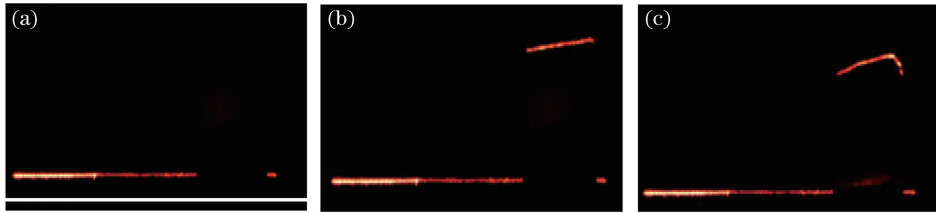


图4 相机采集的图像。(a)条形光学玻璃未到达激光照射位置;(b)条形平面光学玻璃通过激光照射位置;
(c)条形弧面光学玻璃通过激光照射位置

Fig. 4 Pictures collected by the camera. (a) Strip optical glass doesn't reach the laser irradiation position;
(b) strip plane optical glass reaches the laser irradiation position; (c) strip curved optical glass reaches the laser irradiation position

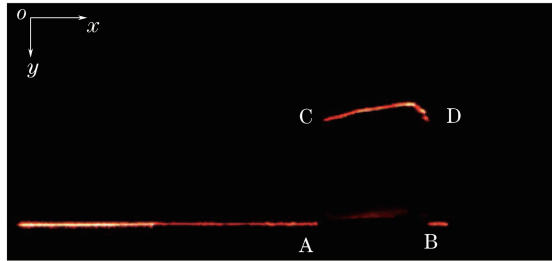


图5 条形玻璃横截面的4个特征点位置

Fig. 5 Location of four feature points for strip glass cross section

3.3.1 直线轮廓拟合

线性插值利用两个端点的数据得到一条直线函数,然后利用此函数可以得到两点间的任何位置的函数值。图5中AB、AC以及BD之间的线段可近似看成直线,因此利用线性插值来对这3段线段的像素坐标进行拟合。以AC段为例,从A、C两点可以确定AC线段之间的函数为

$$\frac{Y - y_C}{y_A - y_C} = \frac{X - x_C}{x_A - x_C}, \quad (1)$$

式中 x_C 、 y_C 分别为点C的横、纵坐标, x_A 、 y_A 分别为点A的横、纵坐标。X为A到C之间的任一数据,Y为与X对应的插值。(1)式还可以写为

$$T(x) = y_C + \frac{y_A - y_C}{x_A - x_C}(x - x_C). \quad (2)$$

线性插值的误差函数为

$$R(x) = f(x) - T(x), \quad (3)$$

式中 $T(x)$ 为(1)式中的插值函数Y, $f(x)$ 为 x 的实际值。

由罗尔定理可知,误差函数的范围为

$$|R(x)| \leq \frac{(x_A - x_C)^2}{8} \max_{x_C \leq x \leq x_A} |f'(x)|. \quad (4)$$

由玻璃横截面图像可知, x_A 与 x_C 之间的像素差值通常较小,且图像采集精度较高,因此基本可忽略此误差。AB与BD之间的插值方式同AC。线性插值效果如图6所示,图6中绿线表示拟合线段。

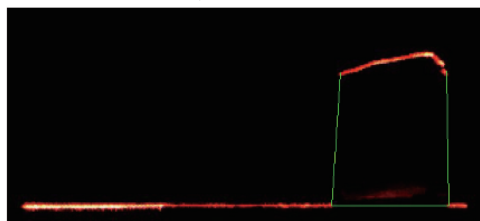


图6 线性插值效果图

Fig. 6 Linear interpolation image

3.3.2 曲线轮廓拟合

图 5 中 CD 为激光照射在光学玻璃表面形成的反射或折射光线。光学玻璃表面分为曲面与平面两种,针对曲面光学玻璃,采用最小二乘法进行曲线拟合^[14]。该拟合方式可以去除一些波动较大的奇异值点,能更真实地反应曲线的趋势,使得曲线偏差达到最小。假设 CD 曲线上的像素点横坐标为 x_1, x_2, \dots, x_n , 对应的纵坐标为 y_1, y_2, \dots, y_n 。误差 $\delta(x) = T(x) - y_i$ 。此时不需要 $T(x) = y_i$, 而是要求 $\sum_{i=1}^n \delta(x_i)$ 达到最小值。

此曲线的轮廓趋势与抛物线相近,故取函数 $T(x) = ax^2 + bx + c$ 。然后得到最小二乘法方程矩阵

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m 1 & \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 y_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据实际的曲线抽样取出 m 个坐标点,由(5)式可以得出拟合函数的系数 a, b, c 的值,基于这些值可求出 CD 曲线之间任意横坐标 x_i 处的 y_i 值。对图像进行直线以及曲线拟合后的效果如图 7 所示,绿色直线与曲线所围成的区域即为光学玻璃横截面区域。

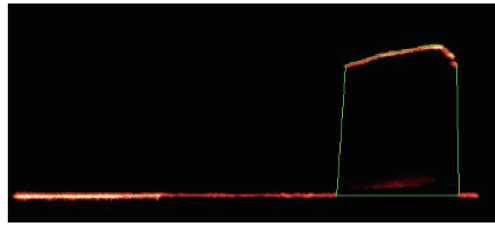


图 7 拟合后得到的横截面图

Fig. 7 Cross sectional image after line and curve fitting

3.4 小玻璃块质量计算

通过 3.3 节的算法已经可以获得较好的光学玻璃横截面轮廓,对轮廓进行二重积分即可得到每帧图像的截面面积。然后结合伺服电机平稳推进的速度与相机帧率,即可计算出每帧图像之间光学玻璃推进的距离,利用面积与距离的积分即可实时求出累计体积。

针对图 7 所示绿色边缘按列积分得出像素面积。即

$$S = \iint_{D_1} dx dy, \quad (6)$$

式中 D_1 表示绿色曲线围成的区域。

由于光学玻璃横截面的像素面积与实际面积存在线性关系,因此,根据实际横截面面积大小与像素横截面面积大小标定^[15]出线性关系的系数 k 。即实际横截面面积为

$$S' = kS = k \iint_{D_1} dx dy. \quad (7)$$

每帧图像之间的体积为

$$dV = S' dl = k \iint_{D_1} dx dy dl, \quad (8)$$

式中 $dl = v dt$, v 为伺服电机的平稳推进速度, dt 为相机帧率的倒数,即采集每帧图像的时间间隔。根据光学玻璃的密度即可算出小玻璃块的累计质量为

$$m_{\text{add}} = \rho V = \rho \int S' dl = k \iiint_{\Omega} dx dy dl, \quad (9)$$

式中 ρ 为光学玻璃密度。

4 实验结果及分析

按照第 3 节所述步骤,构建了一套如图 8 所示的玻璃自动计重切割装置。

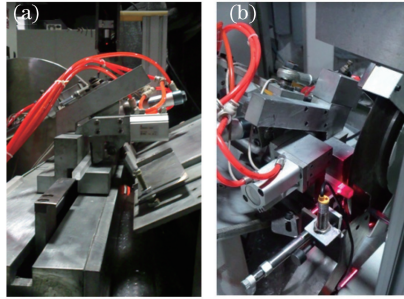


图 8 玻璃自动计重切割装置实物图。(a)侧面;(b)正面

Fig. 8 Images of glass automatic weighing and cutting device. (a) Side view; (b) front view

在 Visual Studio 2010 环境下,为该装置设计开发了一套自动计重切割算法软件。该软件的操作界面如图 9 所示。

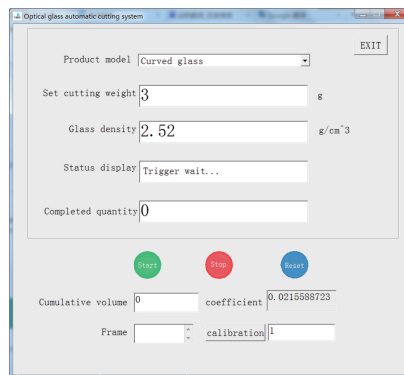


图 9 光学玻璃自动计重切割系统软件操作界面

Fig. 9 Software interface of optical glass automatic weighing and cutting system

图 9 中的产品型号为可选项,包括弧面玻璃与平面玻璃等。切割质量可事先设定,例如图中 3 g 表示将光学玻璃切割为质量为 3 g 的小块。玻璃密度表示当前切割光学玻璃的密度大小。完成数量为实时显示的切割分块个数。累计体积为实时显示达到切割要求之前的玻璃块累计的体积,每切割一次后清零。单位帧数为实时显示达到切割要求之前采集图像的帧数,每切割一次后清零。另外有些新型号光学玻璃首次进行切割之前,先要进行标定,标定编辑框输入的内容为实际横截面的面积。转换系数为伺服电机推动速度与每帧图像采集之间的时间间隔的乘积。在点击开始按钮之前,必须事先选择产品型号,设定切割质量、玻璃密度及转换系数这些参数。

图 10(a)为弧面条形光学玻璃实物图,图 10(b)为平面条形光学玻璃实物图。这两种玻璃的主要区别在于横截面形状。在不考虑切割工艺造成的切割豁口情况下,弧面光学玻璃横截面的上沿为弧形,平面光学玻



图 10 (a)弧面光学玻璃;(b)平面光学玻璃

Fig. 10 (a) Curved optical glass; (b) plane optical glass

璃横截面的上沿为直线。

假设切割质量为 3 g,对条形平面光学玻璃进行切割。实验参数设置为: $v=18.12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,相机帧率为 60 frame/s, $dt=0.0167 \text{ s}$,则 $dl=0.302 \text{ mm}$ 。实验称重使用电子天平的精度为 0.01 g。实验地点为重庆某研究所。实际切割所得到的实验数据如表 1 所示。图 11 为根据表 1 中数据得到的切割质量数据图,蓝色曲线为实际切割质量数据,绿色曲线为设定切割质量与切割误差范围,红点为超出误差范围质量数据。

根据光学玻璃的实际用途与产品特点,实际切割质量可以比设定切割质量稍大,后续工位经过打磨即可得到实际需求质量玻璃块。但若实际切割质量比设定切割质量小,则切割后的产品无法打磨修补,只能回炉重造。由图 12 可知,大部分数据的误差都在 $+0.3 \text{ g}$ (产品误差要求)以内。序号 12 的数据误差较大,达到了 $+0.47 \text{ g}$,造成此误差的原因是切割刀片在切割光学玻璃时,由于切割工艺问题造成了截面形成一个较大斜坡,但通过观察下刀口位置,分析出算法计重得出的切割位置是正确的,在误差范围内。从图 12 也可观察出,当设定切割质量为 3 g 时,切割成的玻璃块基本都保持在误差范围以内,计重方式以及计重误差都可满足实际应用需求。

表 1 光学玻璃的设定切割质量和实际切割质量及误差表

Table 1 Set and actual cutting weight of the optical glass and cutting errors

g

Number	Set cutting weight	Actual cutting weight	Cutting error
1	3.00	3.09	+0.09
2	3.00	3.20	+0.20
3	3.00	3.08	+0.08
4	3.00	3.02	+0.02
5	3.00	2.99	-0.01
6	3.00	3.30	+0.30
7	3.00	3.07	+0.07
8	3.00	3.10	+0.10
9	3.00	3.21	+0.21
10	3.00	3.17	+0.17
11	3.00	3.09	+0.09
12	3.00	3.47	+0.47
13	3.00	3.03	+0.03
14	3.00	3.11	+0.11
15	3.00	3.12	+0.12
16	3.00	3.26	+0.26
17	3.00	3.00	0
18	3.00	3.18	+0.18

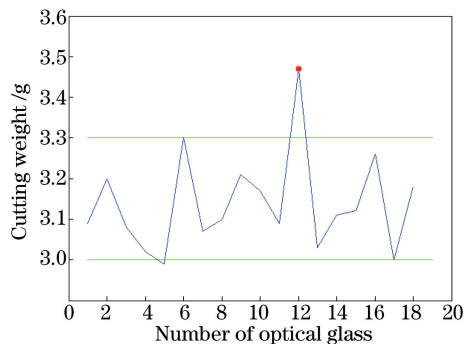


图 11 切割质量数据图

Fig. 11 Data chart of cutting weight

5 结 论

当前条形光学玻璃的切割方式,即凭经验人工对光学玻璃计重并切割,存在误差较大、效率较低、安全性较差等问题。为此,构建了一种基于机器视觉的条形光学玻璃切割设备,设计了一种基于机器视觉联合结构

光的自动计重算法,并对其进行实验验证及应用。实验结果及工厂实际应用表明,该条形光学玻璃自动计重切割设备可以满足对弧面、平面等多种形状光学玻璃的自动切割,计重精度较高,且实际切割误差小于0.3 g,处于生产允许的误差范围以内。与当前人工切割方式相比,该自动计重切割装置不仅能提高生产效率,减少光学玻璃基料的浪费,还能保证玻璃切割操作人员的安全。该装置及算法能够高效、精确地进行条形光学玻璃的自动计重切割。

参 考 文 献

- [1] Wang Yaoxiang. Development and applications of optical glasses[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(5): 61-66.
王耀祥. 光学玻璃的发展及其应用[J]. 应用光学, 2005, 26(5): 61-66.
- [2] Lü Mo, Zhang Feite, Wang Jianhua. Research of cutting process of TP glass[J]. Electronics Process Technology, 2014, 35(4): 242-245.
吕沫, 张飞特, 王建华. TP玻璃切割工艺研究[J]. 电子工艺技术, 2014, 35(4): 242-245.
- [3] Zhang Wei. Development of machine vision and its industrial application[J]. Infrared, 2006, 27(2): 11-17.
章炜. 机器视觉技术发展及其工业应用[J]. 红外, 2006, 27(2): 11-17.
- [4] Su Junhong, Liu Shengli. Measure system of surface flaw and morphology analysis of cylindrical high precision parts [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 041202.
苏俊宏, 刘胜利. 圆柱型高精零件表面缺陷检测及形貌分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041202.
- [5] Guo Meng, Hu Liaolin, Zhao Jiangtao. Surface defect detection method of ceramic bowl based on Kirsch and Canny operator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0904001.
郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于Kirsch和Canny算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0904001.
- [6] Nerakae P, Uangpairaj P, Chamniprasart K. Using machine vision for flexible automatic assembly system[J]. Procedia Computer Science, 2016, 96: 428-435.
- [7] Yao Hongbing, Ma Guidian, Shen Baoguo, *et al.* Flaws detection system for resin lenses based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 111201.
姚红兵, 马桂殿, 沈宝国, 等. 基于机器视觉的树脂镜片疵病检测系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 111201.
- [8] Zhao Shanzheng. Glass online positioning method based on machine vision [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2013.
赵善政. 基于机器视觉的玻璃在线定位方法[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
- [9] Bai Yanbing. Research and development of control system and visual system of glass scribing machine[D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2011.
白雁兵. 玻璃切割机控制系统及视觉系统的开发[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [10] Liu H J, Wang Y N. Development of glass bottle inspector based on machine vision[C]. International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2008: 785-790.
- [11] Lee S, Vachtsevanos G. An application of rough set theory to defect detection of automotive glass[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2002, 60(3-5): 225-231.
- [12] Xie Zexiao, Chi Shukai, Wang Xiaomin, *et al.* Calibration method for structure-light auto-scanning measurement system based on coplanarity[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0308003.
解则晓, 迟书凯, 王晓敏, 等. 基于共面法的结构光自扫描测量系统参数标定方法[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0308003.
- [13] Xie Zexiao, Chen Wenzhu, Chi Shukai, *et al.* Industrial robot positioning system based on the guidance of the structured-light vision[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1015001.
解则晓, 陈文柱, 迟书凯, 等. 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1015001.
- [14] Zhu Kui, Yu Qingcang, Su Bin. Research of surface fitting based structured light measure-spot extracting method[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(10): 2561-2563.
朱擘, 喻擎苍, 苏斌. 基于曲面拟合的结构光测量点提取方法研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(10): 2561-2563.
- [15] Liu Shuntao, Luo Huafen, Chen Xuemei, *et al.* Review of calibration method for structured light measurement[J]. Laser Technology, 2015, 39(2): 252-258.
刘顺涛, 骆华芬, 陈雪梅, 等. 结构光测量系统的标定方法综述[J]. 激光技术, 2015, 39(2): 252-258.