

易开盖刻痕机器视觉检测系统中三维定位算法研究

黄柳¹ 余桂英²

¹中国计量学院现代科技学院, 浙江 杭州 310018

²中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018

摘要 易开盖刻痕深度是决定罐头包装质量的关键参数。为了满足在工业现场自动测量刻痕深度的准确度和稳定性要求,提出了一种基于光切法的机器视觉系统,具有三维精密定位功能和图像测量功能。针对易开盖刻痕光切图像特点,实验分析了在 $x-y$ 平面上不同测量位置与光带斜率之间的几何关系,提出一种平面定位算法来自动检测和矫正光带投射位置;采用6种调焦函数对光切图像进行处理,以单峰型和无偏性为评价标准,提出一种以灰度变化率之和函数为粗调焦函数,Laplacian函数为细调焦函数的调焦算法,来调整被测刻痕在 z 方向上的正确成像位置,实验结果表明该算法具有良好的单峰性、无偏性和灵敏度。

关键词 机器视觉; 三维定位; 自动调焦; 光切法; 易开盖刻痕

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.051501

Research on Three Dimensional Positioning Algorithm on Machine Vision Inspection System of the Nick Depth of Easy Open End

Huang Liu¹ Yu Guiying²

¹College of Modern Science and Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract The nick depth of easy open end is a key parameter in ensuring high packaging quality. In order to realize automatic detection of easy open end in industrial production sites and improve the measurement accuracy and stability, a machine vision system based on light-section method is developed, which has a three dimensional positioning function and an image measuring function. In view of the light-sectioning image properties, the geometrical relationship between the measuring position and the notch slope in the $x-y$ plane is analyzed through experiments to offer a two dimensional location strategy for automatically detecting and adjusting the light projection position. Through analyzing six focusing functions for the light-sectioning images, unimodal and unbiased as evaluation standard an automatic focusing algorithm based on the sum of gray rate of change function as rough focusing function and Laplacian function as fine focusing function is proposed to adjust the notch location. Experimental results show that the proposed algorithm has the strong single peak feature, good stability and high sensitivity.

Key words machine vision; three dimensional positioning; automatic focusing; light-sectioning method; nick depth of easy open end

OCIS codes 150.0155; 150.1135; 100.2000; 110.2970

1 引言

易开盖刻痕深度是决定罐头包装质量的关键参数,深度尺寸在80~200 μm 左右,测量不确定度要求在5 μm 以内。刻痕深度偏小不能达到耐压的要求;刻痕深度偏大,不能达到易开的目的。刻痕深度受刻痕成型模具成形系统中高速运行产生的温升、刻痕刀模的几何形状、环境温度、原材料厚度和硬度等因素的影响,在易开成形过程中,刻痕深度会产生波动^[1-2]。目前易开盖组合成型系统上还没有实时检测刻痕深度波动情况的装置,全靠技术工人现场目测和质检人员定期用百分表抽检易开盖,停机对装备进行调整。一次检测调整平均需要30 min,前后产生的不合格品在1000只以上。这种离线检测和停机调整的方法,对产品

收稿日期: 2014-10-20; 收到修改稿日期: 2014-12-12; 网络出版日期: 2015-04-28

基金项目: 浙江省重大科技专项重点工业项目(2011C12025)

作者简介: 黄柳(1987—),女,硕士,助理实验师,主要从事几何量测量和物理实验方面的研究。E-mail: eveliu87@163.com

质量、生产效率和不合格率影响都很大。然而,国内外易开盖生产中主要关注的是易开盖的模具和冲压设备,在实际生产中都尚未实现对刻痕的实时现场检测^[3]。

随着光电检测技术、视觉传感技术和图像处理技术的飞速发展,机器视觉技术逐渐成熟,已成为现代加工制造业中不可或缺的关键技术^[4],被广泛应用于食品、制药、电子制造、包装以及汽车制造等行业中^[5],大大提高了传统制造装备的生产竞争力和自动化水平。针对现场检测易开盖刻痕深度难,自动化程度化不高和检测效率低等问题,本文研制了一种基于光切法和图像处理技术的机器视觉系统,来实现易开盖刻痕深度的现场测量。

为了保证机器视觉系统在工业现场具有良好的测量重复性和准确度,必须考虑在三维方向上精密定位的问题^[6]。在 $x-y$ 平面上,为了保证每次采集到易开盖刻痕形状完整、正确,需要在机器视觉系统中增加 x 和 y 方向上的精密定位装置,在每片易开盖装夹完后,由计算机自动判断被测刻痕是否在可测视场范围内,形状是否正确,并发送矫正指令来进行二维平面上的微调;在高度方向上,为了保证刻痕光带始终处于系统景深范围内,需要在视觉系统中增加自动调焦装置^[7],配合具有单峰型、无偏性以及高灵敏度^[8]的调焦函数来完成自动调焦功能。

2 易开盖刻痕机器视觉检测系统

针对被测易开盖刻痕特点,结合数码显微图像成像技术、运动控制技术和数字图像处理技术,从光学系统、机械结构、运动执行装置和图像测量软件四个方面综合设计机器视觉系统,将机器视觉系统按功能模块划分为显微视觉系统模块、图像信息处理模块和运动控制执行模块。被测刻痕通过显微光学系统成像到图像传感器上,通过USB接口将光带图像传入计算机中进行保存;在计算机中利用三维自动定位软件,控制运动执行机构来实现 $x-y$ 平面定位、自动调焦以及旋转功能;精密定位后利用专门的图像测量软件,对刻痕光带图像进行准确测量,系统总体框图如图1所示。

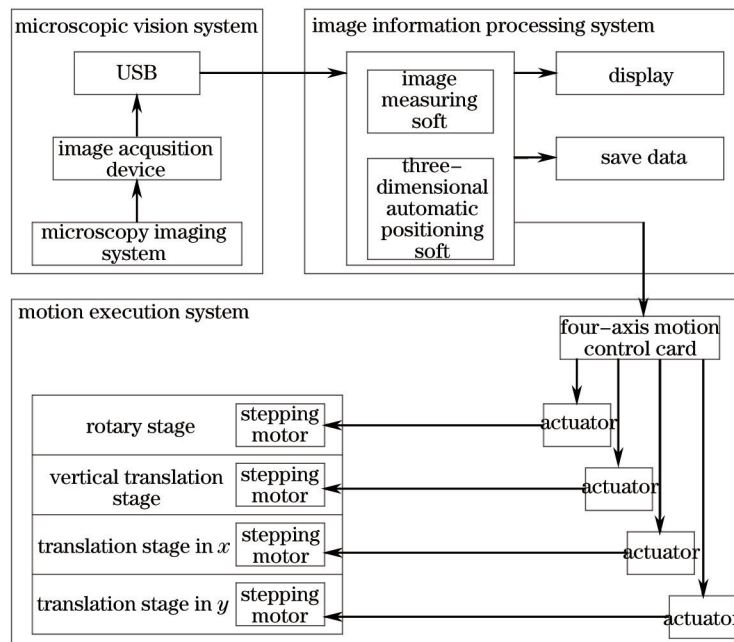


图1 机器视觉系统总体框图

Fig.1 General diagram of machine vision system

显微视觉系统模块主要由显微成像系统和图像采集装置两部分构成,完成光学成像和图像采集功能。从可行性和经济性方面考虑,显微成像系统选择用电子目镜对9J光切显微镜进行视频化改造。采用7×物镜,工作距离大于4 mm,分辨率为2.75 μm 。图像采集装置选用MEM1300电子目镜以及1/2英寸(1.27 cm)、分辨率为1280 pixel×1024 pixel的互补金属氧化物半导体(CMOS),传输速度为16 frame/s,通过USB2.0接口传入计算机可进行显微图像观察。另外,采用单颗5050发光二极管(LED)贴片(光通量为17~20 lm,电流60 mA,电压3.0~3.4 V)作为照明光源,来取代原系统中的白炽灯光源,测试证明能达到同样的照明效果。运

动控制执行模块主要由四轴运动控制卡、4个步进电机驱动器和四轴工作台和组成,完成三维定位和旋转功能。图像信息处理模块主要由安装在计算机中的图像测量软件和三维自动定位软件组成,完成图像预处理、成像位置检测、运动控制指令发送和刻痕深度测量功能,系统工作流程如图2所示。

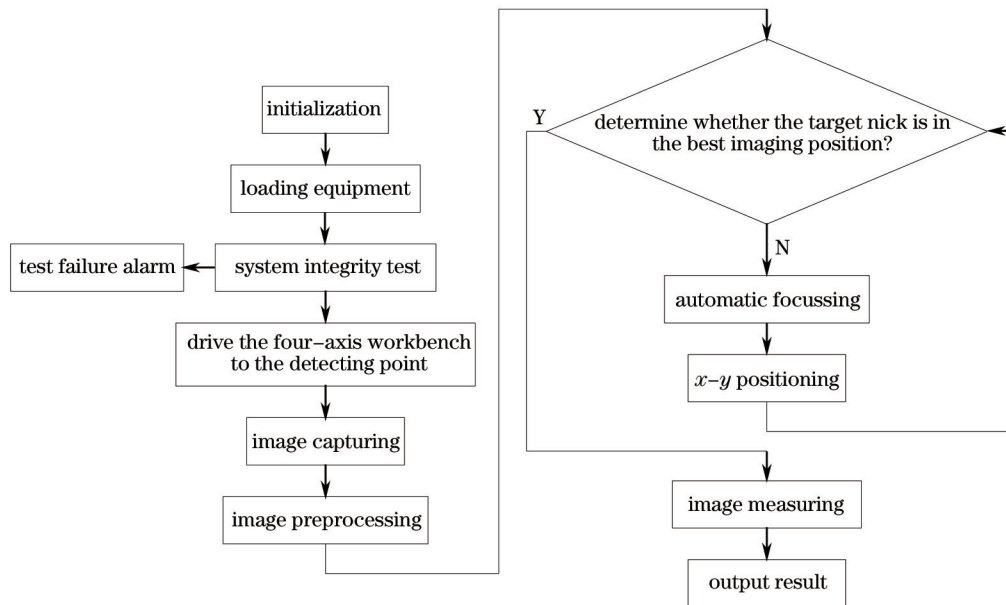


图2 工作流程图

Fig.2 Work flow chart

首先对机器视觉系统进行初始化,加载各种硬件设备,然后对系统进行完整性测试。测试通过后直接运行运动执行机构将易开盖移动到视觉系统下方指定的检测点。视觉系统判别易开盖到达检测位置后,开始进入图像采集状态。首先对采集到的图像进行预处理,根据预处理结果判断目标刻痕是否处于在最佳成像位置上,当刻痕处于最佳成像位置时,直接运行图像测量程序。否则,需要进行自动调焦和 $x-y$ 方向定位操作。位置调整完后,再判断目标刻痕是否处于最佳成像位置,当处于最佳成像位置时,直接运行图像测量程序。否则,需要再次进行自动调焦和 $x-y$ 方向定位操作,直到目标刻痕被判断处于最佳成像位置上为止。图像测量完后保持当前数据,驱动工作台旋转 90° ,进行下一处刻痕深度的测量。

3 易开盖刻痕平面定位算法

机器视觉系统将绿色光带以 45° 方向投射到易开盖被测刻痕处,相当于一把光刀将易开盖沿 45° 方向切开,显微成像系统中的测量光路如图3所示,光源通过聚光镜均匀照明到狭缝上,照明物镜将狭缝成像于被测刻痕表面,照明光束以 45° 方向投射于被测面上,刻痕深度尺寸 H 被放大 $\sqrt{2}$ 倍^[9];成像光路与照明光路成

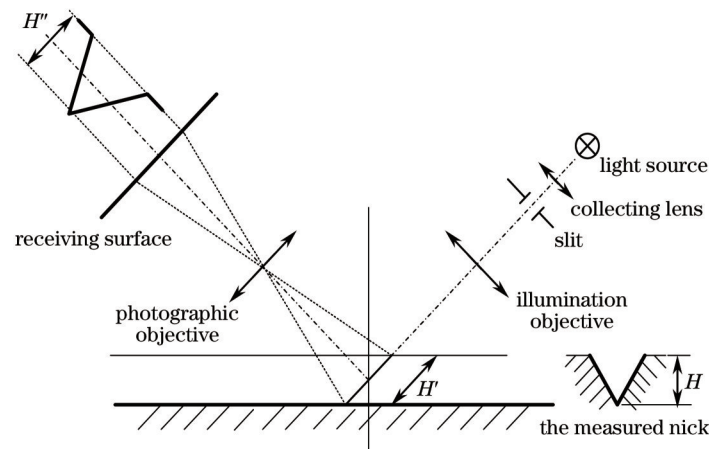


图3 光切法测量原理图

Fig.3 Measurement principle of light-sectioning method

90°,将放大了 $\sqrt{2}$ 倍的深度 H' 图像再放大成像在图像传感器的接收面上,此时接收面上刻痕深度为 H'' [10]。将光带图像信号采集到计算机中,并利用图像测量软件对图像信号进行处理得到 H'' ,就能计算出刻痕实际深度值 H 。

$$H = \frac{H'}{\sqrt{2}} = \frac{H''}{\sqrt{2}V}, \quad (1)$$

式中 V 为视觉系统的放大倍数。

3.1 理论分析

当光带刚好投射到刻痕圆弧 90° 的位置时,刻痕切面的形状如图 4 所示。当光带投射到刻痕圆弧 θ 位置时,刻痕切面形状如图 5 所示。

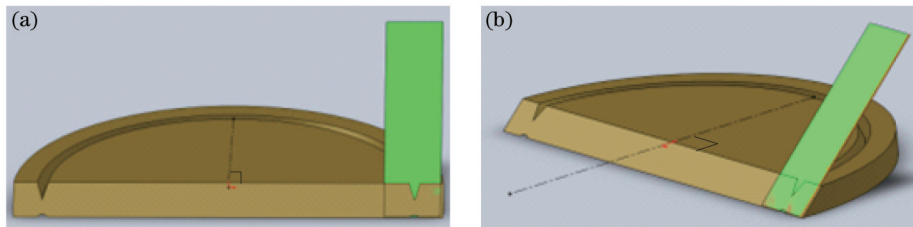


图 4 光刀在刻痕圆弧 90° 位置切割易开盖。(a) 正面图; (b) 侧面图

Fig.4 Cutting an easy open end at 90°. (a) Front view; (b) lateral view

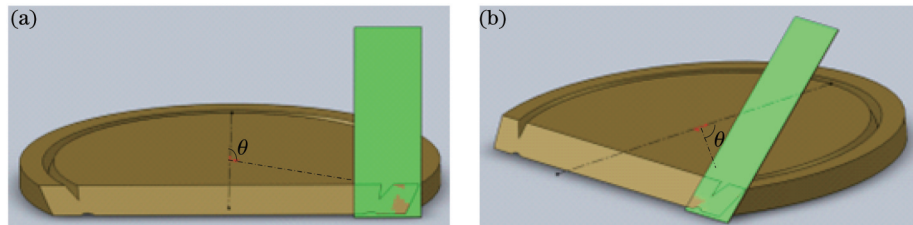


图 5 光刀在刻痕圆弧 θ 位置切割易开盖。(a) 正面图; (b) 侧面图

Fig.5 Cutting an easy open end at θ . (a) Front view; (b) lateral view

由图 5 可知,此位置对应的刻痕形状已经变形,无法反映出刻痕实际形状。在整个刻痕圆弧上,只有 $\theta = -90^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 位置所对应的刻痕形状才能准确反映出深度值。另外,利用机器视觉系统采集不同位置 θ 处的光切图像,如图 6 所示。

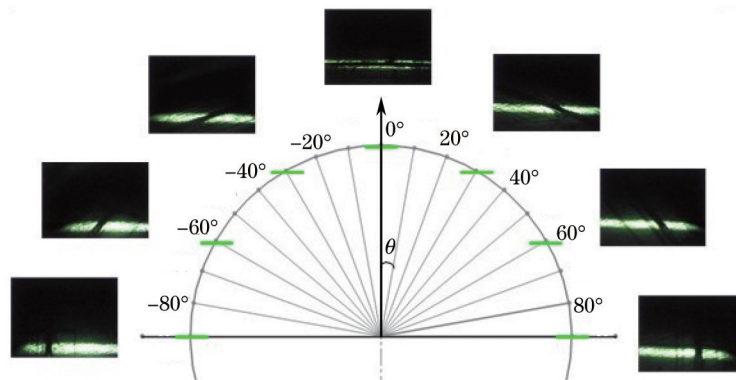
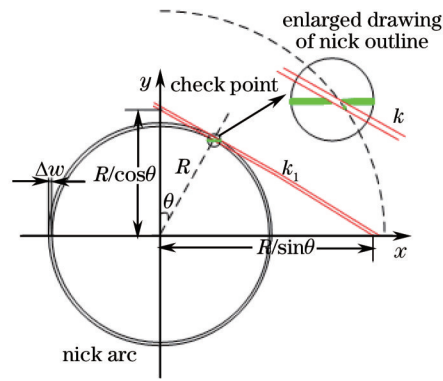


图 6 在不同 θ 位置上采集的光切图像

Fig.6 Light-sectioning images acquired from different position θ

由图 6 可知,不同 θ 位置对应的刻痕光带切口斜率不同;在 $\theta = 0^\circ$ 时,光带切口斜率趋于 0;在 $\theta = 90^\circ$ 或 -90° 时,光带切口斜率趋于无穷大。

易开盖刻痕切口斜率 k 与 θ 的几何关系如图 7 所示,刻痕宽度 Δw 相对于刻痕圆弧半径 R 可忽略不计。过检测点上作刻痕圆弧的切线(两红色直线),由于绿色光带是以 45° 投射到被测面上,将刻痕深度放大 $\sqrt{2}$ 倍。所以刻痕光带切口斜率 k 为

图7 光带切口斜率 k 与 θ 的几何关系Fig.7 Geometrical relationship between the notch slope k and θ

$$k = -\frac{R/\cos\theta}{R/\sin\theta} \times \sqrt{2} = -\sqrt{2} \tan\theta, \quad (2)$$

(2)式是在实际几何坐标系中计算得到的,转换到图像坐标系后表示为

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \tan\theta \approx 0.707 \tan\theta. \quad (3)$$

3.2 实验分析

令 $k'=0.707\tan\theta$,分析(3)式是否成立。实验时, θ 在 $-90^\circ\sim 90^\circ$ 范围内,控制视觉系统每隔 10° 采集一幅光带图像,共采集到19幅图。利用图像软件计算出每幅图中的刻痕光带切口斜率 k ,测量数据如表1所示。

表1 刻痕光带切口数据

Table 1 Light-sectioning notch data of the nick depth

$\theta /(^{\circ})$	θ /rad	k	$k'=0.707 \tan\theta$	$ k-k' $
-90	-1.5700	-5.4915	$-\infty$	∞
-80	-1.3956	-2.4412	-4.0102	0.569
-70	-1.2211	-1.5658	-1.9428	0.377
-60	-1.0467	-0.8128	-1.2247	0.4119
-50	-0.8722	-0.6351	-0.8427	0.2076
-40	-0.6978	-0.5211	-0.5933	0.0722
-30	-0.5233	-0.4311	-0.4082	0.0229
-20	-0.3489	-0.3152	-0.2574	0.0578
-10	-0.1744	-0.1186	-0.1247	0.0061
0	0	0	0	0
10	0.1744	0.1035	0.1247	0.0212
20	0.3489	0.2347	0.2574	0.0227
30	0.5233	0.4122	0.4082	0.004
40	0.6978	0.5742	0.5933	0.0191
50	0.8722	0.8735	0.8427	0.0308
60	1.0467	1.1343	1.2247	0.0904
70	1.2211	2.0185	1.9428	0.0757
80	1.3956	3.5673	4.0102	0.4429
90	1.5700	4.1878	∞	∞

由表1可知,在图8中绘制出横坐标为 θ ,纵坐标为斜率 k 的分布图,红色点表示 k ,蓝色点表示 k' 。可以看出, θ 在 $-80^\circ\sim 80^\circ$ 范围内,由光带图像计算出的切口斜率 k 与(3)式计算结果 k' 基本吻合,所以可以利用该公式来制定 $x-y$ 平面定位策略。

3.3 平面定位算法

由于只有 $\theta=-90^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 位置对应的刻痕形状才能准确反映出深度值,所以平面定位就是要通过微调 x 和 y 方向电动平移台来使视觉系统发出的绿色光带刚好投射在 $\theta=-90^\circ$ 或 $\theta=90^\circ$ 位置处, $x-y$ 平面定位示意图如图9所示。

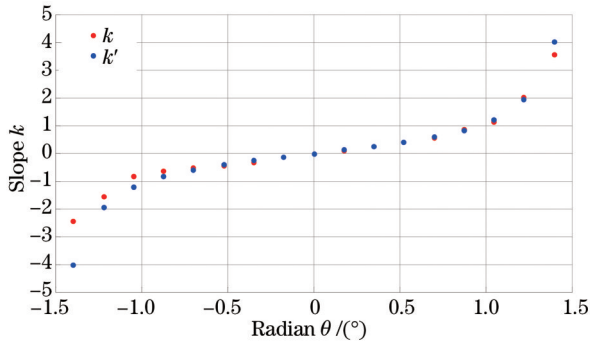
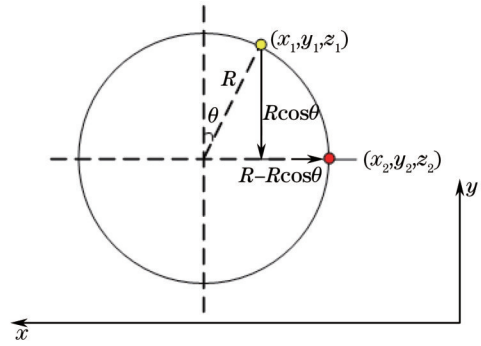
图8 k 和 k' 的分布图Fig.8 Scattergram of k and k' 

图9 平面定位示意图

Fig.9 Schematic diagram of two-dimensional location

由图9可知,由检测点 (x_1, y_1, z_1) 处移至目标位置 (x_2, y_2, z_1) , x 和 y 电动平移台需要移动的距离 D_x 和 D_y 可表示为

$$D_x = R - R \sin \theta, \quad (4)$$

$$D_y = -R \cos \theta, \quad (5)$$

式中 R 为刻痕圆弧半径, $R=33.2$ mm。

结合(3)~(5)式,制定的平面定位策略如下:

- 1) 采集光带图像,利用软件提取出光带切口斜率 k ;
- 2) 根据(3)式,计算出光带斜率 k 对应的 θ ;
- 3) 根据(4)式和(5)式,计算出 x 和 y 电动平移台需要的距离 D_x 和 D_y ;

4) 由计算机发出控制指令,驱动 x 和 y 电动平移台移动 D_x 和 D_y 后,重复步骤1)和2)判断光带是否投射到了 $\theta = -90^\circ$ 或 $\theta = 90^\circ$ 的目标位置,若已投射到,结束平面定位操作;否则,需要循环上述操作,直至光带投射到到达目标位置为止。

4 易开盖刻痕机器视觉系统中自动调焦算法

理想的调焦函数应该具备单峰性、无偏性、灵敏度高和计算量少等特点^[11-12]。为了研究适合于刻痕光带图像的调焦函数,对目前常见的6种基于灰度梯度的调焦函数:4邻域灰度差绝对值之和函数、Roberts函数、Laplacian函数、Variance函数、Tenengrad函数和灰度变化率之和函数^[13]进行实验分析。

设图像中的像素位置为 (x, y) , 对应该像素的灰度值为 $f(x, y)$, 调焦函数值为 $F(k)$, Laplacian函数和灰度变化率之和函数的表达式为

$$F(k) = \sum_x \sum_y [4f(x, y) - f(x-1, y) - f(x, y-1) - f(x, y+1) - f(x+1, y)]^2, \quad (6)$$

$$F(k) = \frac{\sum_x \sum_y |f(x, y) - f(x_0, y_0)|}{f(x_0, y_0)}, \quad (7)$$

其中

$$f(x_0, y_0) = \frac{1}{M \times N} \sum_x \sum_y f(x, y). \quad (8)$$

4.1 调焦函数单峰性分析

在同一检测点,控制视觉系统在调焦范围内每隔0.05 mm采集一幅图像,总距离为1 mm,共获得20幅图像。在不同高度位置-0.50、-0.30、-0.10、0.10、0.30和0.50 mm采集到光带图像如图10所示。分别采用4邻域灰度差绝对值之和函数、Roberts函数、Laplacian函数、Variance函数、Tenengrad函数和灰度变化率之和函数对这一组图像进行处理,首先从单峰性来判断适合于系统的调焦函数。

6种调焦函数的实验结果如图11(a)~(f)所示。其中,横坐标为调焦范围(单位为mm),纵坐标是对应的函数值。

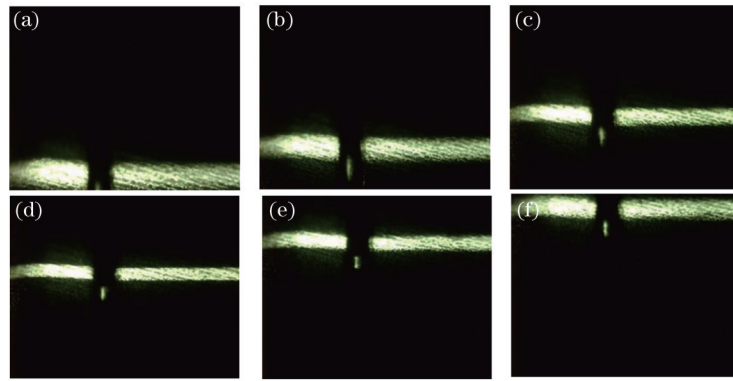


图10 不同高度位置处的光切图像。(a) $z=-0.50$ mm; (b) $z=-0.30$ mm; (c) $z=-0.10$ mm; (d) $z=0.10$ mm; (e) $z=0.30$ mm; (f) $z=0.50$ mm

Fig.10 Light-sectioning images acquired from different heights. (a) $z=-0.50$ mm; (b) $z=-0.30$ mm; (c) $z=-0.10$ mm; (d) $z=0.10$ mm; (e) $z=0.30$ mm; (f) $z=0.50$ mm

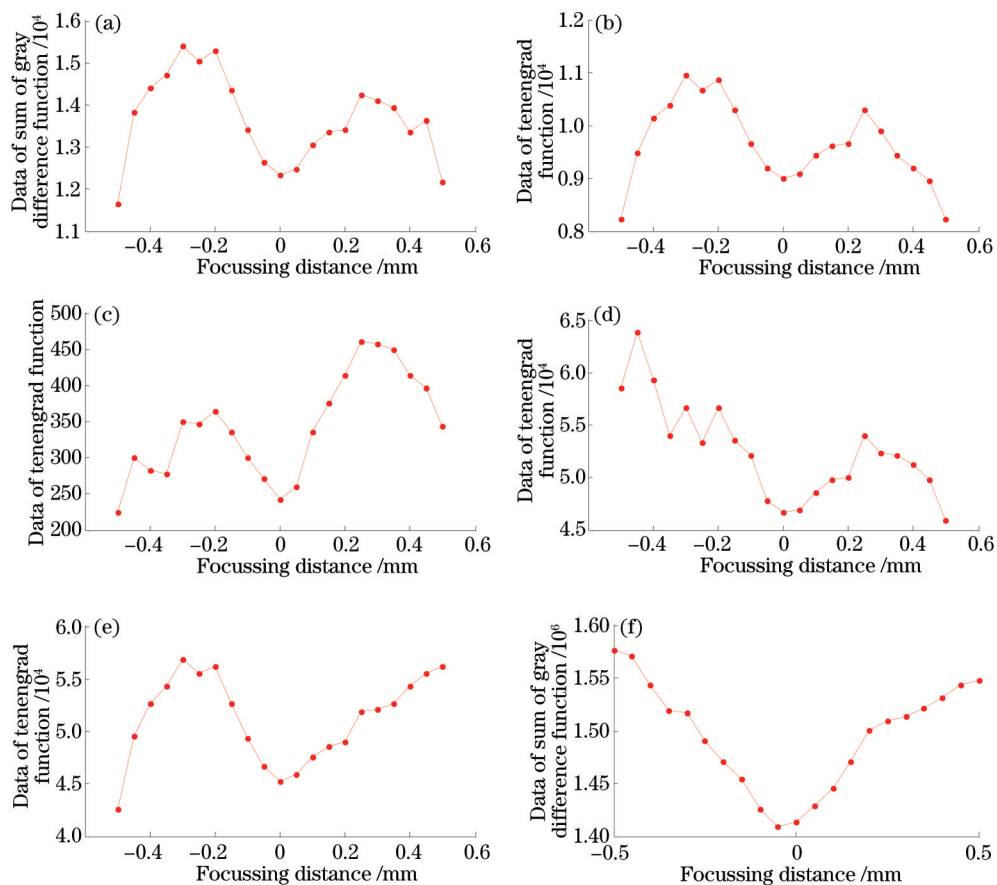


图11 各调焦函数对应的曲线图。(a) 4邻域灰度差绝对值之和函数; (b) Roberts 函数; (c) Laplacian 函数; (d) Variance 函数; (e) Tenegrad 函数; (f) 灰度变化率之和函数

Fig.11 Graphs corresponding to various functions. (a) Sum of gray absolute difference from 4 neighborhoods; (b) Roberts function; (c) Laplacian function; (d) Variance function; (e) Tenegrad function; (f) sum of gray rate of change

由图11六种调焦曲线可以看出,在整个调焦范围内,满足理想调焦函数的单峰性的只有灰度变化率之和函数,其他调焦函数曲线都存在多个极值点,无法利用简单的调焦策略找到聚焦最清晰的位置。此外,从图中也发现 Laplacian 函数虽然有多极值点,但是当它达到最小值时,谷底宽度相对较窄,灵敏度较高,比较适合在小范围内精确调焦。

4.2 调焦函数无偏性分析

无偏性分析采用的实验对象是阶梯尺寸 $H=100.0 \mu\text{m}$ 的阶梯量块,利用 Laplacian 函数和灰度变化率之

和函数分别处理不同调焦距离 z_i 下的阶梯量块图像,通过图像测量软件计算出对应的阶梯尺寸 H_i 和绝对误差 $\Delta H = |H_i - H|$,测量数据如表 2 所示。

表 2 调焦无偏性测量数据

Table 2 Measurement datas of focusing unbiasedness

i	Focussing distance z_i /mm	Data of laplacian function	Data of the sum of gray vate of change function / 10^6	Measuring data of the step gauge blocks H_i / μm	Absolute error ΔH / μm
1	-0.55	77.1039	1.5705	91.4	8.6
2	-0.46	78.8800	1.5415	96.5	3.5
3	-0.37	70.3372	1.5252	97.2	2.8
4	-0.27	71.5168	1.4964	97.7	2.3
5	-0.18	78.7333	1.4714	99.1	0.9
6	-0.08	139.675	1.4489	99.2	0.8
7	0.01	257.6102	1.4146	100.3	0.3
8	0.11	158.2521	1.4598	100.8	0.8
9	0.20	83.3682	1.4489	99.1	0.9
10	0.30	77.2244	1.4748	101.4	1.4
11	0.39	73.3403	1.4725	101.8	1.8
12	0.49	67.2247	1.5174	98.6	1.4
13	0.58	81.2160	1.5552	96.7	3.3

对表 2 中的 Laplacian 函数值、灰度变化率之和函数值和绝对误差值进行归一化处理,绘制出调焦距离与 Laplacian 函数值、灰度变化率之和函数值以及绝对误差值的关系图,如图 12 所示。

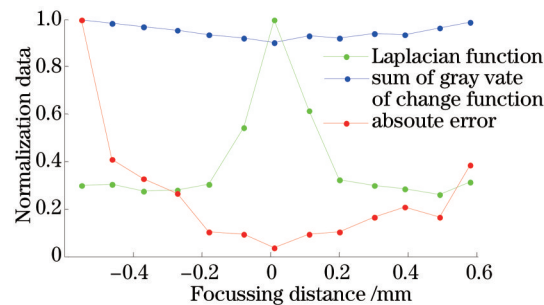


图 12 归一化数据曲线

Fig.12 Curve of normalization data

由图 12 可知,在同一调焦距离处,Laplacian 函数取得最大值,灰度变化率之和函数取得最小值,绝对误差取得最小值。这说明这两种调焦函数都具有调焦无偏性。Laplacian 函数灵敏度高的优点表现得更为明显,和 Laplacian 函数相比,灰度变化率之和函数虽然在整個调焦范围内表现出了单峰性,而且近似于线性,但是灵敏度较低,适合于大范围粗调焦。

4.3 自动调焦策略

综合对比 6 种调焦函数的单峰性和无偏性,选择采用灰度变化率之和函数作为粗调焦函数,首先在整个调焦范围内进行粗调焦,缩小调焦范围;然后选择 Laplacian 函数作为细调焦函数,发挥其灵敏度高的优点在小范围内进行精确聚焦。调焦流程为

1) 粗调焦:采用全局搜索法,设置电机以较大的步长带动 z 方向升降台走遍整个调焦范围;采集每个位置上的光带图像,对其进行灰度化、中值滤波和灰度变化率之和函数值的计算;比较每个位置对应的灰度变化率之和函数值,驱动升降台移至最小值所对应的位置,此时该位置距离最佳成像位置已经不远了;

2) 细调焦:减小电机的步长,采用 Laplacian 函数为细调焦函数,继续驱动升降台移动;比较每个位置上的 Laplacian 函数值,驱动升降台向函数值变小的方向移动,循环寻找最小调焦函数值所对应的位置直至调焦结束。

该调焦策略计算量较小,灵敏度高,能在较短时间内自动调整被测刻痕光带在 z 方向上的成像位置,以

达到测量要求。

5 结 论

针对在工作现场测量易开盖刻痕深度的准确度和稳定性难以保证的问题,提出了一种具有三维精密定位功能和自动图像测量功能的易开盖刻痕机器视觉检测系统。在研究 $x-y$ 平面定位算法时,理论和实验分析了易开盖刻痕切口斜率 k 与 θ 的几何关系,在计算机中建立此数学模型来判断光带是否投射到了 $\theta=-90^\circ$ 或 $\theta=90^\circ$ 的目标位置,并驱动 x 和 y 电动平移台直至光带投射到到达目标位置为止;研究自动调焦算法时,采用6种调焦函数对刻痕图像进行处理,对比分析了6种调焦函数曲线的单峰性和无偏性,提出一种基于灰度变化率之和函数和Laplacian函数作的调焦函数,来实现机器视觉系统的自动调焦。

参 考 文 献

- 1 Huang Liu, Yu Guiying, Zheng Yingjun. Research on in-situ measurement system of micro-depth dimension[J]. Optical Technique, 2011, 37(5): 556-561.
黄 柳, 余桂英, 郑颖君. 微小深度尺寸现场测量系统的研究[J]. 光学技术, 2011, 37(5): 555-561
- 2 Huang Liu. Research on an In-Situ Machine Vision Inspection System of the Nick Depth of Easy Open End[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2012.
黄 柳. 易开盖刻痕现场检测的机器视觉系统研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- 3 Lin Mingshan. Production technology of aluminium easy open ends[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1999, 27(11): 29-31.
林明山. 铝质易开盖生产技术[J]. 铝合金加工技术, 1999, 27(11): 29-31.
- 4 Han Jiuqiang. Machine Vision Technology and Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
韩九强. 机器视觉技术及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- 5 Lee B Y, Juan H, Yu S F. A study of computer vision for measuring surface roughness in the turning process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(4): 295-301.
- 6 Kwon Y, Chiou R, Rauniar S, *et al.*. Performance characterization of precision micro-robot using a machine vision system over the internet for guaranteed positioning accuracy[C]. Optics East 2005. International Society for Optics and Photonics, 2005: 599906-599906-9.
- 7 Liang Cuiping, Li Qing'an, Qiao Yanfeng, *et al.*. On auto-focusing technology of optical system[J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(6): 93-96.
梁翠萍, 李清安, 乔颜峰, 等. 简析光学系统自动调焦的方法[J]. 电光与控制, 2006, 13(6): 93-96.
- 8 Li Qi. Research on the Theory and Implication Method of Digital Auto-Focusing Technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
李 奇. 数字自动对焦技术的理论及实现方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- 9 Yue Lin. Geometric Quantity Measurement Instrument[M]. Beijing: China Machine, 1991: 218-224.
岳 林. 几何量计量仪器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 218-224.
- 10 Takatsuji T, Kirita A, Kurosawa T. A simple instrument for measuring edge angles using a light sectioning method[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(7): 782-786.
- 11 Bao Getang, Zhao Hui, Tao Wei. Algorithm's study on automatic focusing for image measurement technology[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(1): 121-124.
鲍歌堂, 赵 辉, 陶 卫. 图像测量技术中几种自动调焦算法的对比分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(1): 121-128.
- 12 Komatsu F, Motaki H, Miyoshi M. A new auto-focus method in critical dimension measurement SEM[C]. Test Symposium, 1997, (ATS'97) Proceedings, Sixth Asian. IEEE, 1997: 202-207.
- 13 Hu Tao. Research on Auto-Focusing and Shape Recovery in Machine Vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
胡 涛. 机器视觉系统中的自动调焦及形貌恢复技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

栏目编辑: 苏 岑