

# 基于机器视觉的编码器光栅装配偏心调整技术\*

王义文, 裴振成, 刘献礼, 丛艳斌, 金 畅

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 编码器光栅装配的过程中,光栅实际回转中心与编码器主体轴的回转中心很难重合,这样会影响编码器的输出信号的精度。为了解决编码器光栅与主轴的偏心问题,提出一种基于机器视觉的光栅偏心自动调整系统。对光栅表面图像进行分析处理,对边界跟踪提取及基于 Hough 变换圆弧检测等算法进行研究。根据光栅装配要求搭建了偏心计算系统的硬件系统。对光栅图像进行预处理及形态学操作,在分析提取光栅基圆部分圆弧边界的基础上,通过 Hough 变换的圆弧检测原理还原出光栅基圆并标定其圆心。介绍了系统通过多幅光栅基圆圆心拟合回转圆,确定光栅偏心位置。实验结果表明,基于机器视觉的编码器光栅偏心计算方法成功计算出光栅与主轴的偏心位置,为光栅偏心调节奠定了基础。采用光栅偏心计算系统在编码器光栅的装配作业中具有很好的可行性。

**关键词:** 机器视觉; 光栅; 编码器; 图像处理; 偏心计算

**中图分类号:** TP391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2013)12-3814-03

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2013.12.077

## Based on machine vision encoder grating assembled eccentric adjustment system design

WANG Yi-wen, PEI Zhen-cheng, LIU Xian-li, CONG Yan-bin, JIN Chang

(School of Mechanical & Power Engineering, Harbin University of Science & Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In the process of encoder grating assembly, the center of rotation and grating encoder main shaft is difficult to coincidence which will affect the accuracy of output signal from the encoder. In order to solve the eccentric problem of the encoder grating, this paper put forward a grating eccentric automatic adjustment system based on machine vision to analyse and process the image of the surface of grating. It studied boundary tracking algorithm and arc detection algorithm based on Hough transform. At first, it built the hardware system of eccentric computational system according to the requirement of the grating assembly. Then it made the grating image preprocessing and morphological operations. On the basis of the analysis and the extraction of part of the grating base circle's arc boundary, it restored the base circle of the grating and demarcated the center of circle with the principle of arc detection based on Hough transform. At last, this paper introduced the system which fitting turning circle by the centre of grating base circles and determined the grating eccentric position. The experimental results show that the computational method of eccentricity based on machine vision encoder grating calculates the eccentric position of the grating and the main spindle successfully, lays the foundation for grating eccentric adjustment. The grating eccentric computational system has a very good feasibility in the encoder grating assembly operations.

**Key words:** machine vision; grating; encoder; image processing; eccentric calculation

## 0 引言

光栅角编码器在角度测量方面具有精度高、使用方便等优点<sup>[1]</sup>。编码器是一种精密的器件,主要应用在雷达、自动化仪表、精密仪器、机器人等领域,具有体积小、测量范围大、精度高等特点<sup>[2]</sup>。在编码器生产制造的过程中编码器光栅与主体轴的装配是光电编码器生产制造中的一个重要环节,也是保证编码器输出信号精度的关键技术。国内传统的装配方式是工人在电子显微镜下旋转光栅,观察光栅基圆与基准线的相对位置来调节光栅和主轴的同轴度。这种装配方式效率低下,产品质量无法保证,而且受人为因素影响较严重。

基于机器视觉的装配系统以其柔性化装配的特点在提高

装配精度,保证产品质量、稳定性以及提高生产效率等方面,都显现出极大的优越性<sup>[3]</sup>。通常情况下,需装配的零件目标特征会完全落入摄像机的视野当中,检测和装配较容易,然而对于编码器主体与光栅这一类装配精度较高的零件,由于摄像机视野的局限性,视野范围相对较小,对光栅基圆特征不能一次识别完成,须多次采集光栅基圆圆弧图像。如何实现装配件大范围、多参数的自动测量和精密装配,高精度、高分辨率测量视场狭小和装配作业空间较大的矛盾是编码器光栅装配系统研制需要解决的问题<sup>[4]</sup>。

针对编码器生产过程中光栅与主体轴装配工序繁琐、装配精度差等问题,结合机器视觉技术,本文提出了编码器光栅偏心自动计算方法。算法研究过程利用工业摄像机、光学镜头、光栅展开装置的配合,并且对这些硬件设备的控制及硬件本身

**收稿日期:** 2013-01-31; **修回日期:** 2013-04-10      **基金项目:** 国家科技重大专项资助项目(2012ZX04001-041)

**作者简介:** 王义文(1972-),男,辽宁抚顺人,硕士,教授,主要研究方向为数控加工、机械加工表面的无损检测和机电产品的设计与研发(yiwen0451@126.com);裴振成(1988-),男,硕士,主要研究方向为数字图像技术及机电产品开发;刘献礼(1961-),男,教授,博导,主要研究方向为硬态切削、重型切削、清洁切削、刀具开发及机械加工检测;丛艳斌(1986-),男,硕士,主要研究方向为数字图像技术及机电产品开发;金畅(1988-),男,硕士,主要研究方向为数字图像技术及机电产品开发。

的精度都有较高的要求。

## 1 系统的构成及其工作原理

### 1.1 系统的硬件构成

系统研究过程中所涉及到的装配组件为编码器主体和光栅,其装配精度要求为 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ ,在调节光栅的偏心之前光栅预先装配到主体之上并压上止推环,这样光栅在止推环的压力作用下有一个预固定的作用,使得光栅不易在调整的过程中松动,保持调整姿态。结合图 1 所示的待装配零件,设计的光栅偏心计算系统结构组成如图 2 所示。该系统主要由光源、图像传感器(CCD)工业相机、光学可变倍镜头、机械展开装置和支架、运动控制系统以及计算机等组成。进行偏心计算时,由运动控制系统和光栅展开装置配合 CCD 相机采集多幅光栅图像,由软件对图像进行处理计算,最终通过相机位置下的基准位置来定位光栅的偏心位置。

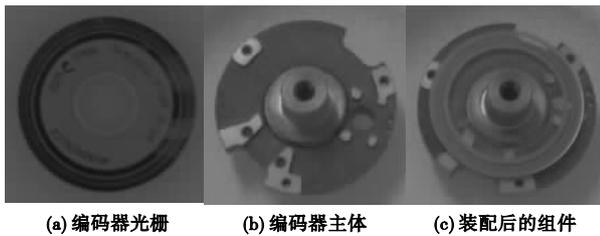


图1 光栅、主体和装配后的组件

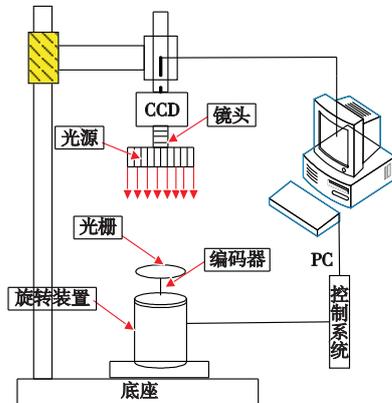


图2 编码器光栅偏心调整硬件系统结构

### 1.2 系统的工作原理

该系统的基本工作原理为:光栅偏心位置确定是通过面阵 CCD 工业相机获取部分光栅基圆图像,然后对图像进行预处理,通过计算软件在图像中对基圆弧特征进行提取,还原出整个基圆。由于落入镜头下的光栅基圆的部分比较小,且拟合回转圆需要多幅图像来完成,所以需要展开装置的配合来实现采集多幅不同位置的光栅图像数据。

由图 2 可知,通过 CCD 获取光栅图像直接输入到计算机,然后由计算软件对图像中需要计算的圆弧特征提取并标定出来,从而实现对光栅基圆的还原。最后通过对多幅基圆的圆心拟合及相机初始位置的标定来实现偏心位置的确定。图像计算软件需要实现的功能包括获取图像、对图像进行预处理(包括滤波降噪、图像增强)、图像边缘粗定位、基圆的计算、圆心的标定、回转圆的拟合、回转圆圆心位置标定等。

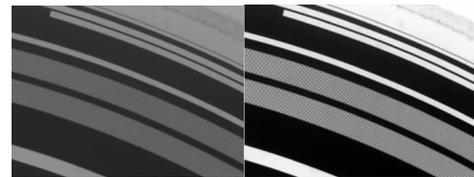
## 2 偏心计算系统软件的关键算法

### 2.1 图像预处理

在图像产生、传输和变换的过程中,由于各种因素的影响,

往往会使图像与被测物体或原始图像之间产生差异。这给从图像中提取特征信息造成了不便。常见的图像噪声包括光学成像及采样过程中常会出现的混叠噪声、插入噪声、抖动噪声、电子噪声等。而边缘的检测和提取往往对噪声比较敏感,因此需要在检测前对图像进行滤波降噪处理<sup>[5]</sup>。

滤波器分为线性滤波器和非线性滤波器两大类。线性滤波器对高斯噪声有较好的平滑作用,但其他噪声的抑制效果较差,而且会模糊边缘。非线性滤波器中的中值滤波器在过滤噪声的同时,还能很好地保护边缘轮廓信息。它对消除孤立点和线段的干扰十分有用,特别是对于二进制噪声尤为有效。这一点特别符合几何测量对边缘精密定位的需求,所以系统中采用了中值滤波器对图像进行滤波降噪。图 3 为去噪前与去噪后的光栅图像对比。

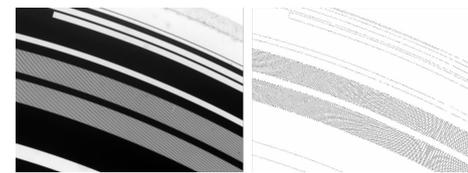


(a) 去噪前的光栅图像 (b) 去噪后的光栅图像

图3 去噪前后光栅图像对比

### 2.2 光栅图像的边缘检测

在图像中,边界是指图像中对象的边界,即反映图像中像素值剧烈变化的曲线。图像边缘检测大幅度地减少了数据量,并且剔除了可以认为不相关的信息,保留了图像重要的结构属性。有许多方法用于边缘检测,它们绝大部分可以划分为两类方法:基于查找和基于零穿越。基于查找的方法通过寻找图像一阶导数中的最大和最小值来检测边界,通常是将边界定位在梯度最大的方向。基于零穿越的方法通过寻找图像二阶导数零穿越来寻找边界,通常是 Laplacian 过零点或者非线性差分表示的过零点。根据光栅图像特征本文采用 Canny 算子对光栅图像进行边界检测处理。Canny 算子是 Canny 于 1986 年提出的一种多级边缘检测算法,其目标是找到一个最优的边缘检测算法。Canny 边缘检测算法具有信噪比大、检测精度高和计算量小等优点<sup>[6]</sup>,算法适用于不同的场合。它的参数允许根据不同图像的特定要求进行调整以识别不同的边缘特性。边缘检测的结果如图 4 所示。



(a) 提取前 (b) 提取后

图4 光栅图像边缘提取前后图像对比

### 2.3 圆弧检测

Hough 变换<sup>[7]</sup>是圆的检测中较为常用的方法,其基本思想是将图像变换到参数空间,用大多数边界点满足的某种参数形式来描述图像中的曲线,通过设置累加器进行累积,求得峰值对应的点就是所需要的信息。其优点是不易受图像中噪声的影响,可提高检测的可信度,便于并行计算;其缺点是计算量大,对于需要快速实时检测圆弧的场合不适应<sup>[8]</sup>。本文采用了一种基于 Hough 变换的新型快速圆弧检测方法,具体检测步骤如下:

a) 设构成圆弧的最小阈值为  $M_{\min}$  ( $M_{\min} = \lambda 2\pi r$ ,  $\lambda$  为比例

系数,  $r$  为圆的半径), 已知圆为  $l$ , 图像中构成边缘的点集为  $M$ , 与圆弧相关的边界累计的点数为  $T$ ,  $M$  中剩余的点数为  $M_l$ 。

b) 构造光栅图像边缘点集  $M$ , 初次采样次数为 0。

c) 从集合  $M$  中随机抽取三个点  $P[i]$ 、 $P[j]$ 、 $P[k]$ , 计算三个点所确定圆弧的参数  $l$ , 采样次数  $k[i]$ , 三点所确定圆弧的半径为  $r[i]$ 。

d) 若  $l$  无解或该圆弧已经存在, 转入 c), 否则利用圆的方程函数判断所得到的圆弧是否为实际圆弧, 如果是, 则执行 f), 不是, 则执行 e)。

e)  $k = k + 1$ , 若  $k > k_{max}$ , 结束; 否则, 转 b)。

f) 检测到参数为  $l$  实际圆弧, 判断已检测到的圆弧是否已达到规定的数目, 若是, 则结束; 否则重置  $k = 0$ , 转 b)。

### 2.4 光栅基圆的还原

检测到光栅基圆圆弧的目的就是通过这段圆弧来计算并拟合整个光栅的基圆, 基圆还原后可以获得光栅基圆的两个主要信息, 即基圆的半径和圆心坐标。在系统中通过光栅上图案圆弧检测和边界跟踪得到光栅基圆圆弧的边界, 找到圆的一段弧后, 逐次取出边界上的数个点, 设定好像素点中的邻阈值, 便可以通过圆的方程式来计算相应的参数, 圆的方程为

$$(x - xc)^2 + (y - yc)^2 = r^2 \tag{1}$$

其中,  $(xc, yc)$  圆心展开得到:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \tag{2}$$

其中:  $a = -2xc$ ,  $b = -2yc$ ,  $c = xc^2 + yc^2 - r^2$ , 可以用最小二乘法计算参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ , 从而求得圆的半径  $r$ 。

$$r = \sqrt{xc^2 + yc^2 - c} \tag{3}$$

如图 5 中的点即为还原后的圆心, 通过上述公式及最小二乘法原理计算得基圆的半径为 3.619 5 mm。

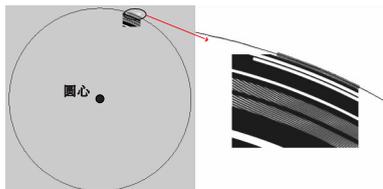


图5 基圆还原结果

## 3 偏心位置的确定

### 3.1 回转圆的计算<sup>[9]</sup>

三个不在一条直线上的点可以唯一确定一个圆, 系统通过展开装置每隔 500 ms 计算出一个基圆, 这样三个基圆的圆心恰好是一个三角形的三个顶点, 通过这三点可以确定一个圆, 其圆心即为光栅的回转中心。把第一个基圆的圆心记为  $A(x_1, y_1)$ , 第二个基圆的圆心记为  $B(x_2, y_2)$ , 第三个基圆的圆心记为  $C(x_3, y_3)$ , 设这三点所确定的圆的圆心为  $(u_0, v_0)$ , 有

$$(x_1 - u_0)^2 + (y_1 - v_0)^2 = (x_2 - u_0)^2 + (y_2 - v_0)^2 \tag{4}$$

$$(x_1 - u_0)^2 + (y_1 - v_0)^2 = (x_3 - u_0)^2 + (y_3 - v_0)^2 \tag{5}$$

转换得

$$(x_1 - x_2)u_0 + (y_1 - y_2)v_0 = (x_2^2 - x_1^2) - (y_2^2 - y_1^2)/2 \tag{6}$$

$$(x_1 - x_3)u_0 + (y_1 - y_3)v_0 = (x_3^2 - x_1^2) - (y_3^2 - y_1^2)/2 \tag{7}$$

根据克莱姆法则求得

$$u_0 = \frac{(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)(y_1 - y_3)/2 - (x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2)(y_1 - y_2)/2}{(x_1 - x_2)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y_1 - y_2)}$$

$$v_0 = \frac{(x_1^2 - x_3^2 + y_1^2 - y_3^2)(y_1 - y_2)/2 - (x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2)(x_1 - x_2)/2}{(x_1 - x_2)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y_1 - y_2)}$$

### 3.2 偏心角的确定

如图 6 所示, 在确定回转中心后, 以回转中心为点作水平基准线记为  $m$ , 直线  $m$  的位置定位调节光栅偏心位置, 直线  $m$  的方程可表示为

$$y = v_0 \tag{8}$$

连接点  $C$  与回转中心  $O$  记为  $n$ , 直线  $n$  的方程为

$$\frac{x - u_0}{y - v_0} = \frac{x_3 - u_0}{y_3 - v_0} \tag{9}$$

转换得

$$y = kx + b \tag{10}$$

其中:  $k = \frac{y_3 - v_0}{x_3 - u_0}$ ;  $b = -\frac{(y_3 - v_0)u_0}{x_3 - u_0} - v_0$ 。

直线  $m$  与  $n$  的夹角记为  $\theta$ , 由平面内两直线夹角公式可求得两直线之间的夹角  $\theta$  为

$$\theta = \arctan \frac{k}{1 + k} \tag{11}$$

其中:  $\theta$  为光栅最后一次旋转停止位置与基准线的夹角。通过上位机串口可以把夹角数据发送给旋转展开装置, 使光栅转过  $\theta$  到达基准位置。

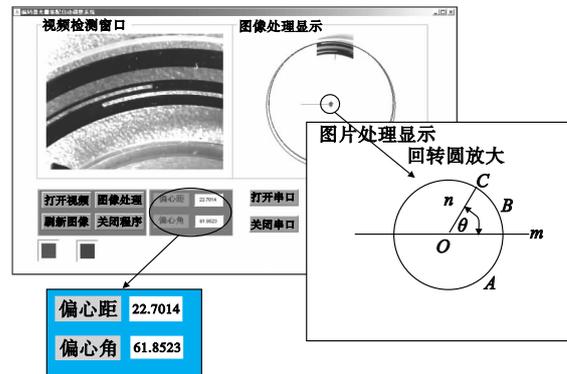


图6 系统计算回转圆结果

## 4 编码器光栅装配偏心调整软件系统

在对以上算法研究的基础上, 完成了编码器光栅装配调整系统的软件系统设计, 其功能可分为图像获取、图像处理、基圆还原与回转中心的计算、串口双向传输、图形用户界面五部分, 各部分关系如图 7 所示。系统界面截图如图 8 所示。

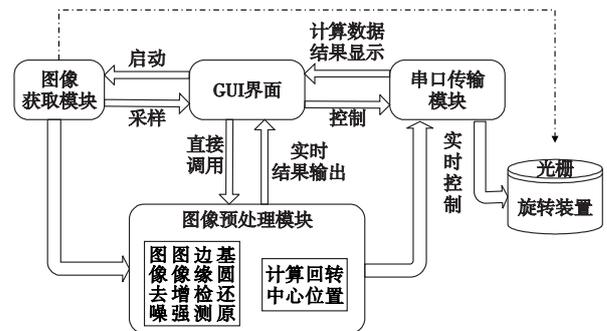
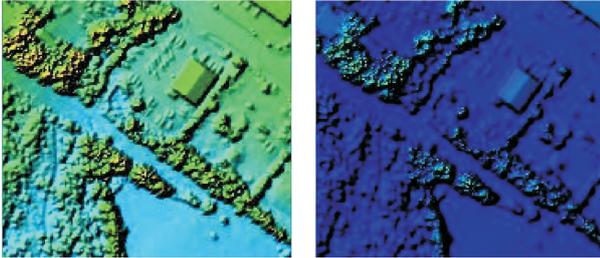


图7 系统软件设计框架

## 5 结束语

本文研究了一种基于机器视觉技术的编码器光栅偏心自动计算系统, 提出了一种圆在转动过程中回转中心精确定位的方法。综合利用图像处理、Hough 变换的思想和自动机电控制等技术, 使系统具有实用性好、识别速度快、(下转第 3827 页)

不必要的噪点,影响了晕渲图的细节效果(这可能是 ENVI 4.5 软件作山体阴影处理时,ENVI 软件自身计算出的山体阴影值与本文方法计算出的山体阴影值有一些差异而导致的)。实验证明,本文方法比 ENVI 4.5 软件作山体阴影处理(同时伴随晕渲处理),地形区分明显、色彩丰富、过渡自然,细节效果更好。



(a)放大图6(a)中某部位 (b)放大图6(d)中同一部位

图7 图6(a)和(d)细节效果对比

## 5 结束语

本文基于 HSV 色彩模型设计了一种彩色晕渲图制作方法。对高程到  $H$  分量、高程到  $S$  分量、反射光强(本文采用 Hillshade 算法计算山体阴影值替代地表点的反射光强)到  $V$  分量采用了线性变换,这样整体效果更加协调。实验表明,利用上述 HSV 模型绘制的晕渲图具有色彩过渡自然、地形区分明显、层次清晰、立体感强的特点,比文献[7]中提出的方法以及 ENVI 4.5 软件制作的晕渲图效果要好,能较好地反映地形形态的变化。尽管如此,计算机地貌晕渲在制图领域还有很多方面需要深入研究,如彩色地貌晕渲的多分辨率表达<sup>[14]</sup>、GPU 加速实现<sup>[15,16]</sup>、如何使地貌自动晕渲能准确表达所有的地貌形态尤其是特殊地貌和微地貌、人机交互编辑数字高程模型以强调整体或局部的地形特征以及基于 DEM 和数字正射影像自动生成大区域任意角度的透视全景图等<sup>[17]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 施祖祥. 地貌晕渲法[M]. 北京:测绘出版社,1983:24-28.
- [2] 段体学,王涛. 地图整饰[M]. 北京:测绘出版社,1985:198-199.
- [3] EGBERT S, DUNBAR M, THAYN J. GICHD fact sheet for mine ac-

tion: hillshades[EB/OL]. (2008-03) [2013-05-11]. [http://www.gichd.org/fileadmin/pdf/IMSMA/fact-sheets/GICHDFactSheet\\_Hillshade%20Imagery.pdf](http://www.gichd.org/fileadmin/pdf/IMSMA/fact-sheets/GICHDFactSheet_Hillshade%20Imagery.pdf).

- [4] 钟佳,王永,张立国. 利用 DEM 制作晕渲图的方法讨论[C]//全国测绘科技信息交流会暨首届测绘博客征文颁奖论文集. 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社,2009:568-572.
- [5] 郭庆胜,王晓廷. 地貌晕渲中光源使用方法与用色规则的研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2004,29(1):20-23.
- [6] EDWARDS K, DAVIS P A. The use of intensity-hue-saturation transformation for producing color shaded-relief images[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, 60(11):1369-1374.
- [7] 黎弘,翟战强,唐树才. 利用 ARC/INFO 制作彩色晕渲图[J]. 计算机工程,1999,25(8):66-68.
- [8] 王克峰,李芹,张兵. 大幅面彩色晕渲图制作技术研究[J]. 测绘与空间地理信息,2010,33(2):176-178.
- [9] BURROUGH P A, McDONELL R A. Principles of geographical information systems[M]. New York: Oxford University Press, 1998: 190.
- [10] Environmental Systems Research Institute. ArcGIS desktop 9.3 help: how Hillshade works[EB/OL]. (2011-09-07) [2013-05-11]. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=How%20Hillshade%20works>.
- [11] 刘学军,龚健雅,周启鸣,等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报,2004,33(3):258-263.
- [12] 李少梅. 数字地貌晕渲理论与技术的研究[D]. 郑州:中国人民解放军信息工程大学,2004.
- [13] 孙家广. 计算机图形学[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,1998: 514-518.
- [14] 王玉辉,郭刚,徐锡山. 多分辨率点状地标实时渲染研究[J]. 计算机技术与发展,2012,22(2):209-212.
- [15] 李伟伟,郭晓新,陈轶. GPU 上具有复杂光照烟雾动画的绘制[J]. 吉林大学学报:理学版,2011,49(4):717-722.
- [16] 钱银玲. 基于 GPU 的快速色阶映射算子实现[J]. 计算机应用研究,2013,30(2):595-597,626.
- [17] 江文萍,毋河海,杜清运,等. 大型彩色地貌晕渲图的自动生成技术研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2004,29(6):496-499.

(上接第 3816 页)识别效率高等优点,解决了编码器光栅装配中偏心调整过程中的繁琐工序,保证了光栅偏心位置的准确定位,为光栅偏心调整奠定了理论基础。



图8 系统界面截图

### 参考文献:

- [1] 朱沛,张大伟. 精密定位光栅尺的研究进展[J]. 激光杂志,2010,

31(1):1-3.

- [2] 高贯斌,王文,林铿,等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学精密工程,2010,18(8):1766-1772.
- [3] 王晓东,宋洪侠,HESELBACH J. 德国微装配技术研究的几个方向[J]. 机械制造,2002,40(9):13-15.
- [4] 王晓东,宋洪侠,刘超,等. 基于机器视觉的微型零件测量与装配控制[J]. 哈尔滨工程大学学报,2011,32(9):1117-1122.
- [5] 张舞杰,杨义禄,李迪,等. 自动影像测量系统关键算法[J]. 光学精密工程,2007,15(2):294-301.
- [6] ILLINGWORTH J, KITTLER J. A survey of the Hough transform[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1988, 44(1):87-116.
- [7] 张震,马驹良,张忠波,等. 一种改进的基于 Canny 算子的图像边缘提取算法[J]. 吉林大学学报,2007,45(2):244-248.
- [8] 雷家勇,达飞鹏,孟广猛. 图像处理中圆心算法研究[J]. 计算机与现代化,2005(3):26-34.
- [9] 王健,王孝通,徐晓刚,等. 基于梯度的随机 Hough 快速圆检测方法[J]. 计算机应用研究,2006,23(8):164-165.