

文章编号 1004-924X(2007)01-0124-07

# 机器视觉的薄片零件尺寸检测系统

伍济钢, 宾鸿赞

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**对基于机器视觉的薄片零件尺寸检测系统进行研究。针对计算机硬盘弹性臂薄片零件的尺寸检测,采用线阵工业相机扫描获取待检零件图像,根据扫描特性提出了标定算法,同时提出了一种轮廓矢量化算法。将经过滤波、标定、二值化、边缘提取和细化的图像进行轮廓矢量化得到待检零件的尺寸参数,并与从设计图 DXF 文件中读取的零件的相应尺寸参数进行对比,判断零件制造质量。实测结果表明,检测系统的轮廓矢量化精度达到 1 pixel,检测精度达到 1  $\mu\text{m}$ ,平均每个零件的检测时间为 1 s,该检测系统是可行的。

**关键词:**机器视觉;薄片零件;尺寸检测;线扫描;轮廓矢量化

中图分类号:TP242.6 文献标识码:A

## Dimensional inspecting system of thin sheet parts based on machine vision

WU Ji-gang, BIN Hong-zan

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University  
of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** According to the dimensional inspection, taking the thin sheet part of Head Gimbal Assembly (HGA) of the computer hard disk as an object, a line type industrial camera is used to acquire the image of the inspected part by line scanning. The calibration algorithm is proposed based on the property of the line scanning, and a contour vectorization algorithm is developed. The dimensional parameters of inspecting part are gained adopting the contour vectorization algorithm in which the image has been processed by filtering, calibration, binarization, edge detection and thinning. The parametric errors are obtained to evaluate the quality of a thin sheet part comparing the dimensional parameters obtained from scanned image to the dimensional parameters obtained from reading the design DXF file. The experimental results indicate that the precision of contour vectorization can reach to 1 pixel, the inspection accuracy can reach to 1  $\mu\text{m}$ , the average inspection time of every part is 1 s and the inspecting system is feasible.

**Key words:** machine vision; thin sheet parts; dimensional inspection; line scanning; contour vectorization

## 1 引言

由于薄片零件很薄,在接触力的作用下会变形而产生很大的测量误差,所以只能用非接触方法进行检测。在薄片零件大批量生产中,检测系统必须具有实时性,而且薄片零件形状不规则且对孔系的相对位置和孔径有较高精度要求,因此,还须对零件的几何尺寸进行 100% 的检测以保证薄片零件的产品质量。检测系统必须具备相应的检测能力。传统的检测技术和设备难以在精度、效率及自动化程度等方面完全满足要求。机器视觉检测技术具有非接触、柔性好、精度高、速度快、自动化和智能化水平高等优点,可以很好地满足薄片零件的检测要求。开发具有自主知识产权的基于机器视觉的薄片零件尺寸检测系统具有十分重要的理论意义和应用价值。

针对计算机硬盘弹性臂薄片零件尺寸检测需求,本文基于机器视觉原理,采用线阵工业相机扫描获取待检零件图像,根据扫描特性提出了图像标定算法。采用边缘保持滤波器进行滤波,根据图像的灰度直方图设置灰度阈值进行图像二值化,运用数学形态学方法进行边缘提取和细化。提出了一种轮廓矢量化算法,通过轮廓矢量化得到待检零件的尺寸参数,与从设计图 DXF 文件中读取的相应参数进行对比,得到各图元的误差值,进而由尺寸的设计公差值判断产品尺寸是否合格。

## 2 系统构成与主要规格参数

系统的硬件组成示意图如图 1,由检测仪器本体和计算机两部分组成,包括相机运动控制系统,图像采集系统,照明系统,检测工作台和支架。相机运动控制系统包括运动控制卡,电机驱动器,伺服电机,运动滑块,导轨和限位开关。图像采集系统包括图像采集卡,线阵工业相机,镜头,光栅尺,分频器。照明系统包括 LED 背光源和光源控制器。检测仪器的实物照片如图 2 所示。

采用深圳固高公司的 GT-400-SP-PCI 型运动控制卡,有编码器读数功能,PCI 接口。采用日本松下公司的 MSMA5AZA1C 型交流伺服电机,转速为 3 000 r/min,带有增量编码器 2 500 P/r,

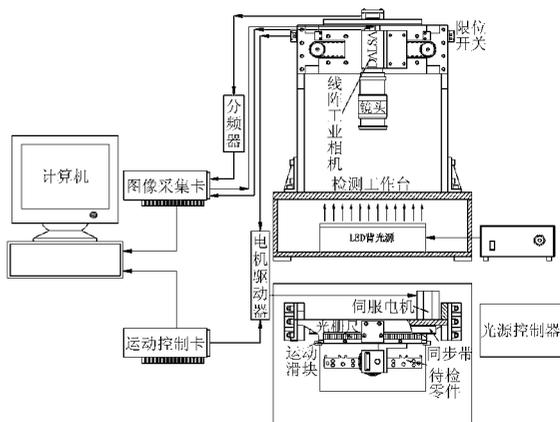


图 1 检测系统硬件组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hardware configuration of inspecting system



图 2 检测仪器实物照片

Fig. 2 Photo of inspecting instrument

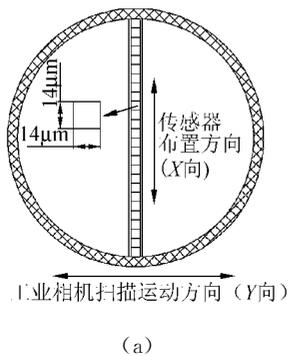
并用该公司电机相配套的电机驱动器。采用霍尔接近开关作为限位开关。采用加拿大 CORECO 公司的 PC-DIG 型图像采集卡,设置为触发采集数据模式,将光栅尺的输出脉冲用分频器分频输入到图像采集卡作为采集线阵工业相机数据的触发信号。采用加拿大 DALSA 公司的 SP-14-02K30 型线阵工业相机,其 CCD 图像传感器呈线形布置,共有 2 048 个传感器,每个小图像传感器的大小是  $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ ,图像传感器之间无间隙。采用尼康的镜头以及奥地利 RSF Elektronik 公司的 MS 6x. x5 GA 型光栅尺,分辨率为  $1 \mu\text{m}$ 。当相机从左至右在待检零件上扫描后,图像采集卡缓冲区便保存了扫描所得的所有数据,按顺序将数据保存为 BMP 文件,即为待检零件的扫描图像数据。

获得待检零件的扫描图像后,依次进行图像预处理,轮廓矢量化和对比检测。

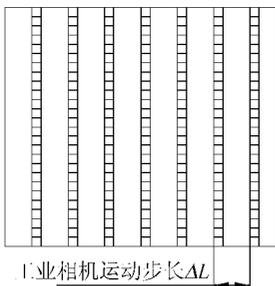
### 3 图像预处理

#### 3.1 图像标定

图 3 为图像标定的原理示意图。由于镜头对物像有缩放而精确的缩放倍数未知,所以扫描所得图像在  $X$  向和  $Y$  向像素点间表示的实际距离是不一致的,因此必须对扫描所得图像进行标定。基于扫描特性,提出了图像标定算法。扫描所得图像在  $X$  向像素点间表示的实际距离是未知的,在  $Y$  向像素点间的实际距离等于相机在一次数据采集时间间隔内的运动距离,可以从分频器的参数设置获得。扫描一个精密的标准件如精密薄片规,计算出该标准件目标图像  $X$  向的像素个数差和  $Y$  向像素个数差,标定系数等于  $Y$  向像素个数差与  $X$  向像素个数差的比值。再根据此标定系数对需要标定的图像  $X$  向像素进行双线性插值,即可得到以  $Y$  向像素点间距为基准的标定图像。



(a)



(b)

图 3 图像标定原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of image calibration principle

#### 3.2 滤波

采用边缘保持滤波器<sup>[7]</sup>进行滤波。对图像中的每一个像素点  $p[i, j]$  取适当大小的一个邻域(如  $3 \times 3$  邻域),分别计算  $p[i, j]$  的左上角邻域,

左下角邻域,右上角邻域和右下角邻域的灰度分布均匀度,然后取最小均匀度对应区域的均值作为该像素点的新的灰度值。计算灰度均匀度的公式为

$$V = \sum f^2[i, j] - (\sum f[i, j])^2 / N, \quad (1)$$

式中,  $f[i, j]$  为像素点  $p[i, j]$  的灰度值;  $N$  为计算灰度均匀值时像素点的点数。

#### 3.3 图像二值化

由于整个检测系统封装在密封罩内处于半封闭状态且照明良好,在得到的目标图像中物体与背景之间对比度较大,因此采用基于图像灰度特性的方法进行图像分割。画出扫描所得图像的灰度直方图。根据灰度直方图设置灰度阈值  $T$ ,灰度值大于等于阈值  $T$  的像素将其灰度值设为 255,灰度值小于阈值  $T$  的像素将其灰度值设为 0。

#### 3.4 边缘提取

边缘提取采用数学形态学的方法实现,用膨胀后的图像减去腐蚀后的图像,得到目标图像的边缘。该边缘不一定是单像素宽,所以必须进行细化。细化也是采用数学形态学的方法实现的。若有一个灰度值为 0 的像素点  $p[i, j]$ ,在  $p[i, j]$  的八邻域中,若灰度值为 0 的像素点的点数大于 2,则  $p[i, j]$  不是边缘,应将  $p[i, j]$  灰度值设置为 255。循环计算遍历整个图像,最后得到单像素宽的边缘,称之为轮廓。

### 4 轮廓矢量化

轮廓矢量化是指将组成轮廓的图元,如直线,圆弧,圆,进行精确分段识别,获得图元尺寸参数的过程。轮廓中的曲线用直线和圆弧拟合。

#### 4.1 邻域法识别和保存轮廓点

基于轮廓是单像素宽并连通的属性,本文采用邻域法识别和保存轮廓点。轮廓点  $P[i, j]$  的八邻域示意图如图 4 所示,八邻域的判别顺序依次为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7。对于扫描所得的图像,规定其左上角为原点。从原点开始,根据从左至右、从上至下的原则搜索轮廓点。当搜索到一个轮廓点作为该轮廓的起始点后标记并保存该轮廓点,按照判别顺序依次判别该轮廓点的八邻域中是否有像素点为轮廓点,若为轮廓点则标记保存。循环计算,遍历整个图像。若某轮廓点的八邻域中没有点为轮廓点,则该轮廓点应为此轮廓的最后一点。

|   |   |   |
|---|---|---|
| 5 | 6 | 7 |
| 4 | P | 0 |
| 3 | 2 | 1 |

图 4 轮廓点八邻域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of eight neighborhood of a contour point

### 4.2 角点识别

本文提出了一种曲率阈值法去掉冗余角点算法。如图 5 所示,设有一角点  $P_i$  为当前点。 $P_i$  的前第  $K$  点为  $P_{i-k}$  和后第  $K$  点为  $P_{i+k}$ ,一共三个点。 $K$  称之为曲率计算区间宽度。将这三个点用最小二乘法拟合出一个圆,可以计算出圆心和半径,那么当前点的曲率就是半径的倒数。计算所有可能称为角点的轮廓点的曲率,然后设置阈值,大于阈值的轮廓点为角点,小于阈值的则为非角点。

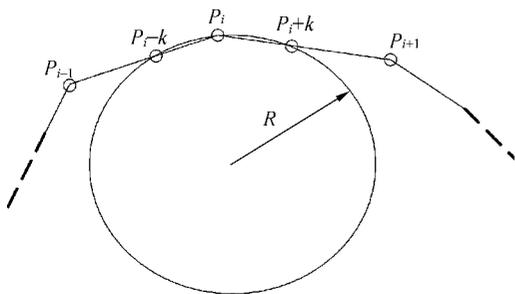


图 5 曲率阈值法原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of curvature threshold method principle

由于曲率阈值法去掉冗余角点是针对每个轮廓点的,这样计算量很大。为了减少计算量,本文提出了一种简便的方法。该邻域值法预先分类轮廓点,将不可能为角点的轮廓点去掉。经过邻域法识别和保存轮廓后,图像中的轮廓是按照从起点到终点顺序排列的轮廓点的集合。假设有轮廓点  $C_i$  及其上一轮廓点  $C_{i-1}$ ,若  $C_i$  的八邻域值与  $C_{i-1}$  的八邻域值相同,则  $C_i$  不是角点,若  $C_i$  的八邻域值与  $C_{i-1}$  的八邻域值不相同,则  $C_i$  为角点。循环计算,即可将可能为角点的轮廓点识别出来。

经过曲率阈值法去掉冗余角点后,在圆弧上依然存在大量的冗余点,且冗余点距离太近不能用圆弧分割与融合方法进行处理,本文提出了角

点间距法去掉冗余角点算法。角点间距是指两角点间轮廓点的点数。设置一个角点间距最大值阈值,若任意两角点的间距大于最大值阈值,则将这两个角点设置为强点,意为不可删除点。设置角点间距最小值阈值,将所有角点后间距在最小值阈值内的所有角点去掉。这样可能会去掉部分强点,然后将强点恢复为角点。

### 4.3 投影高度法分类角点

要对图元进行精确分段识别就必须知道两角点间的图元的类型。基于点到直线的投影高度,本文提出了投影高度法判别两角点间的图元类型,实现对角点的分类。如图 6 所示,设  $P_i$  点为当前点,以  $P_i, P_{i-1}$  做一直线  $P_i P_{i-1}$ ,求得  $P_i$  到  $P_{i-1}$  间所有轮廓点  $C_j$  到直线  $P_i P_{i-1}$  的投影高度。设置阈值  $T$ ,记下轮廓点  $C_j$  中距离大于阈值  $T$  的点数  $n_1$  和距离小于阈值  $T$  的点数  $n_2$ ,若  $n_1 > n_2$  则  $P_i, P_{i-1}$  间的图元为圆弧,若  $n_1 < n_2$  则  $P_i, P_{i-1}$  间的图元为直线。同理,计算出  $P_i, P_{i+k}$  间图元的类型,那么  $P_i$  的类型就知道了。根据直线与圆弧的组合,角点有四种类型:1 型:直线至直线 (line to line), 2 型:圆弧至直线 (arc to line), 3 型:直线至圆弧 (line to arc), 4 型:圆弧至圆弧 (arc to arc)。遍历轮廓中的所有角点,即可将所有角点分类。

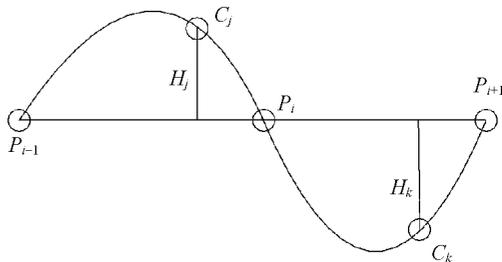


图 6 投影高度阈值法原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of project height threshold method principle

### 4.4 圆弧的分割与融合

在欧氏空间中,对于圆弧而言,其曲率都为一直数。在计算机中,图形是用离散像素点来表示的,从而导致圆弧的曲率并不为常数。经过前述处理后的一段圆弧  $Q_j Q_{j+1}$  分段识别不准确,有较多的冗余角点,如图 7(a)所示。 $P_1, P_2, \dots, P_N$  为 4 型角点,  $Q_j, Q_{j+1}$  为 2 型或 3 型角点。文献[1]提出了一种圆弧分割与融合算法,尚未涉及对圆

的分割与融合。本文对文献[1]提出的算法进行了改进并约定对圆进行圆弧分割与融合后,保留其中一个角点且设置其类型为 4。圆弧  $Q_j Q_{j+1}$  分割与融合结果如图 7(b) 所示,得到了对圆弧  $Q_j Q_{j+1}$  的准确分段与识别。

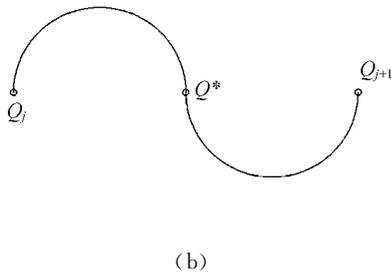
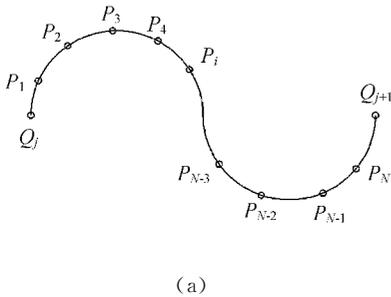


图 7 圆弧分割与融合原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of principle of splitting and merging of arcs

#### 4.5 直线的判别与融合

在欧氏空间中,一条直线上任何一点的曲率都为 0。在计算机中,图形是用离散像素点来表示的,从而导致一条直线上的某些点曲率并不为 0。计算机中的一条直线  $LM$  放大后如图 8 所示,经分段识别后是由一些直线段组成的,其中浅色像素点为 1 型角点。基于点到直线的投影高度,本文开发了直线的判别与融合算法。假设当前角点为  $P_3$ ,计算  $P_3$  到直线  $AB$  的投影高度,设置阈值  $T$ ,若投影高度小于阈值,则应将  $P_3$  融合,设置  $P_3$  为非角点;若投影高度大于阈值  $T$  则不能将  $P_3$  点设为非角点。遍历所有轮廓,即可将本属于一条直线的多条小线段融合成一条直线。

#### 4.6 计算图元参数

按照定义,类型为 1 或 2 的角点其后连接的图元一定是直线,该角点坐标即为直线的起点坐标,下一角点坐标为直线的终点坐标。类型为 3 或 4 的角点其后连接的图元一定是圆弧,将该角

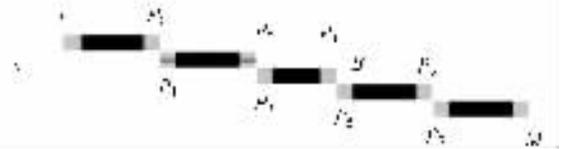


图 8 直线的判别与融合原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of principle of judgment and merging of line

点到下角点之间的所有轮廓点进行最小二乘圆弧拟合,计算出圆心和半径。按照前述约定,若某一轮廓只有一个角点且角点的类型为 4,则该轮廓为圆。将该轮廓的所有轮廓点进行最小二乘圆弧拟合,计算出圆心和半径。

## 5 对比检测

### 5.1 DXF 文件读取

从 DXF 文件中需要读取的参数有,图形各图元的尺寸参数及其尺寸标注参数。从 DXF 文件读取的图元,其排列顺序是随机的,因此首先必须进行图元顺序化,选择某一图元作为首图元,按照连接关系顺序排列图元。保存时采取二级指针方法,一级指针作为轮廓保存图元对象,二级指针作为图形保存所有轮廓对象。

### 5.2 对比计算保存误差及合格判断

轮廓矢量化后的图形的图元和经顺序化后的从 DXF 文件中读取的图元均以二级指针保存。比较基准为零件的设计基准,将这两个图形以比较基准为参照物进行坐标变换。然后按照图元排列顺序逐一比较相应各个图元的误差。将计算得到的图元误差与从 DXF 文件中读取的设计公差值进行比较,判断误差是否在允许范围内,然后将误差保存为一个 TXT 文件。

## 6 实测及其结果分析

以计算机硬盘弹性臂中的某一薄片零件为待检零件,用该检测系统进行尺寸检测。其结果如图 9 所示,(a)、(b)、(c)、(d)、(e)依次表示扫描所得的图像;经过滤波与标定后的图像;二值化处理后的图像;边缘提取与细化后的图像;轮廓矢量化的结果,并用黑点标识了角点的位置。待检零件经生产厂家检验是合格的。用该检测系统进行检

测,如图 10 中尺寸标注所示,选取零件中典型的有公差要求的尺寸进行分析。分析结果如表 1 所示。结果表明各个尺寸误差在公差范围内,是合格产品。

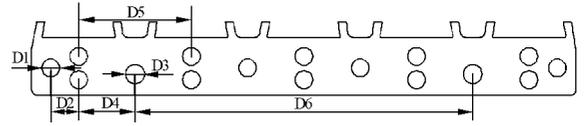
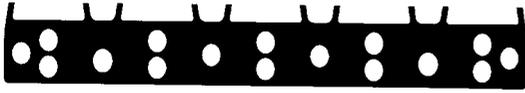


图 10 典型的有公差的零件尺寸示意图

Fig. 10 Schematic diagram of typical dimensions with tolerance of part



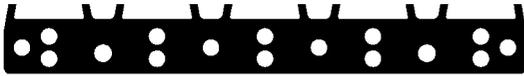
(a) 扫描所得的图像

(a)Image obtained by line scanning



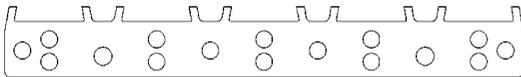
(b) 经滤波和标定后的图像

(b)Image after filtering and calibration



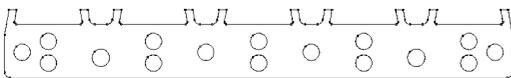
(c) 二值化后的图像

(c)Image after binarization



(d) 边缘提取和细化后的图像

(d)Image after edge detection and thinning



(e) 轮廓矢量化结果示意图

(e)Schematic diagram of contour vectorization

图 9 弹性臂中薄片零件的检测与处理

Fig. 9 Inspection and data processing for a thin sheet part of Head Gimbal Assembly

表 1 零件典型尺寸检测结果分析

Tab.1 Inspection result analysis of typical dimensions of parts

| 序号 | 设计参数(mm) | 设计公差值(mm)        | 测量参数(mm) | 测量参数与设计参数的差值(mm) | 是否合格 |
|----|----------|------------------|----------|------------------|------|
| D1 | 2.375    | +0.013<br>-0.008 | 2.380    | +0.005           | 合格   |
| D2 | 3.810    | ±0.005           | 3.812    | +0.002           | 合格   |
| D3 | 2.540    | +0.013<br>-0.008 | 2.550    | +0.010           | 合格   |
| D4 | 7.620    | ±0.005           | 7.624    | +0.004           | 合格   |
| D5 | 15.240   | ±0.005           | 15.237   | -0.003           | 合格   |
| D6 | 45.720   | ±0.005           | 45.718   | -0.002           | 合格   |

## 7 结 论

本文对基于机器视觉的薄片零件尺寸检测系统进行了研究。在实验室条件下,对多个弹性臂薄片零件进行了实测。检测结果表明,该系统能够精确识别零件扫描图像中的各类图元,轮廓矢量化精度达到了 1 pixel,检测精度达到了 1 μm,平均每个零件的检测时间为 1 s,因此该检测系统是可行的。

致谢:本文得到科瑞自动化技术(深圳)有限公司的资助,在此表示感谢。

## 参考文献:

[1] SHEU H T, HU W C. Multiprimitive segment of planar curves - a two-level breakpoint classification and tuning approach [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intel.*, 1999, 21(8): 791-797.

[2] MALAMAS E N, PETRAKIS E G, ZERVAKIS M, et al.. A survey on industrial vision system, applications and tools [J]. *Imag. Vision Comput.*, 2003, 21: 171-188.

[3] WU W Y. A simple method for dominant point detection [J]. *Imag. Sci. J.*, 2001, 49: 125-134.

[4] KAYGM S, BULUT M M. A new one-pass algorithm to detect region boundaries [J]. *Pattern Recogn. Lett.*, 2001, 22: 1169-1178.

- [5] WU W Y. An adaptive method for detecting dominant points [J]. *Pattern Recogn.*, 2003, 36: 2231-2237.
- [6] JANSSEN R D, VOSSEPOEL A M. Adaptive vectorization of line drawing images [J]. *Comput. Vision Imag. Und.*, 1997, 65(1): 38-56.
- [7] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2000.  
JIA Y D. *Machine vision* [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [8] 王向军, 王峰. 显微精密成像与微型机械尺寸检测技术[J]. *光学 精密工程*, 2001, 19(6):511-513.  
WANG X J, WANG F. Study of micro mechanical size inspection technology by microscope precision digital image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 19(6):511-513. (in Chinese)
- [9] 李佳列, 丁国清, 颜国正, 等. 采用 CCD 的非接触测量中提高精度的一种方法[J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(3): 281-284.  
LI J L, DING G Q, YAN G ZH, *et al.*. Method for improving precision in noncontact measurement by linear CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):281-284. (in Chinese)

作者简介:伍济钢(1978—),男,湖南新邵人,华中科技大学机械科学与工程学院博士研究生,主要从事机器视觉检测、先进制造技术等领域的研究;E-mail:jgwu@smail.hust.edu.cn 或:jgwuhust@gmail.com

宾鸿赞(1940—),男,湖南衡山人,华中科技大学机械科学与工程学院教授,博士生导师,主要从事先进制造技术、精密机械等领域的研究。