

文章编号 1004-924X(2004)06-0619-07

利用数字图像处理技术测量直齿圆柱齿轮几何尺寸

张少军¹, 苟中魁¹, 李庆利², 李忠富¹, 金 剑¹

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083 ; 2. 唐山学院, 河北 唐山 063000)

摘要:研究了采用数字图像处理技术实现对直齿圆柱齿轮几何尺寸的非接触式测量。首先对 CCD 摄像机拍摄的图像进行畸变校正与滤波去噪, 然后对图像进行阈值分割, 采用基于数学形态法的四邻域腐蚀来获得单像素宽的图像边缘。针对齿轮的边缘轮廓形状特征, 运用重心法、最小二乘拟合、Bresenham 画圆法和 Hough 变换等原理, 建立了测量齿轮齿数、模数、中心孔半径、齿顶圆半径、齿根圆半径和变位系数等齿轮几何尺寸参数的测量算法。使用 1280 × 1024 的 CCD 摄像机及黑白采集卡对分度圆直径为 50 mm 的直齿圆柱齿轮进行测量实验, 与人工测量值对比, 绝对误差小于一个像素, 在各测量参数中, 最大尺寸的齿顶圆半径绝对误差值为 13 μm。研究结果表明: 因为 CCD 摄像设备的分辨率越高、被测物体的尺寸越小, 则测量精度越高, 且为线性关系, 所以, 使用高分辨率 CCD 摄像设备并配备光学放大系统, 可实现对高精度和微小直齿圆柱齿轮几何尺寸参数的测量。如使用 1280 × 1024 像素以上的 CCD 摄像设备测量分度圆直径 5 mm 以下的直齿圆柱齿轮时, 测量精度可在 2 μm 以下。

关键词:数字图像处理; 齿轮测量; 最小二乘法; 亚像素

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A

Digital image processing technology for spur gear measurement

ZHANG Shao-jun¹, GOU Zhong-kui¹, LI Qing-li², LI Zhong-fu¹, JIN Jian¹

(1. Mechanical Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China;

2. Tangshan College, Tangshan 063000, China)

Abstract: Non-contact measuring for spur gears using digital image processing technology is studied. At first, distortion correction and filter in the original image captured by CCD camera. Were taken account of edge image of single pixel was achieved after treatments such as threshold segmentation and four-neighborhood erosion based on mathematical morphology. As to the shape character istic of gear, some basic principles such as gravity model, least squares fit, Hough transform, and Bresenham drawing circle were applied synthetically, and the algorithm of measuring numbers of teeth, module, radius of center hole, radius of addendum circle, radius of dedendum circle, modification coefficient, etc. was established. A gear whose diameter of indexing circle is 50 mm was tested using 1280 × 1024 CCD camera and acquisition block, and the results indicated that absolute error of measuring value is less than a pixel compared with manual measurement; the absolute error of radius of addendum circle—the largest size in all the measuring parameters is 13 μm. The research indicates that by high resolution CCD camera and optical amplifying system, minute

收稿日期: 2004-09-22; 修订日期: 2004-10-18.

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目 (No. 95-528-01-01-01c)

gear and high precision gear can be measured, because the higher the resolution of CCD camera is and the smaller the objects are, the higher the measuring precision is, what's more, they are of linear relation. When spur gears whose diameters of indexing circle are less than 5 mm are measured by CCD camera with the resolution of over 1280×1024 , the precision of measurement is below than $2 \mu\text{m}$.

Key words: digital image processing; spur gear measurement; least squares fit; Subpixel

1 引言

齿轮是各种机器设备中经常用到的一种重要的传动零件。齿轮的精度直接影响整台机器的工作性能和使用寿命。齿轮的精度, 不仅与齿轮的设计和加工有关, 也与对齿轮误差的测量、分析及合理控制有关。齿轮形状复杂, 测量参数较多, 因此齿轮测量一直是几何量测量中的难点, 对测试人员的要求也较高。目前已发展了一些测量齿轮的智能化仪器, 但其价格较昂贵, 使用和维修的技术性也较强, 所以大多数企业还是沿用传统的齿轮测量仪器或使用其它机械测量仪器进行齿轮测量。这些传统的接触式机械测量方法, 测量时间长, 工作量大, 且不适合在生产过程中测量。基于数字图像处理技术的图像测量方法具有非接触、高速度、动态范围大、信息量丰富、成本相对低廉等诸多优点, 将可广泛用于各种实时、在线的精密测量, 尤其非常适合于零件几何参数的动态实时精密测量^[1-4]。本文引进数字图像处理技术, 探讨用较低成本的设备组成测量系统, 实现对渐开线外啮合直齿圆柱齿轮几何尺寸的非接触式测量。主要研究测量的算法。

2 图像测量系统

图像测量系统主要由照明系统、CCD 摄像机、图像采集卡、计算机以及相应的图像处理软件等组成, 如图 1 所示。



图 1 图像测量系统框图

Fig. 1 Block diagram of image measuring system

其具体工作过程为, 将被测齿轮置于尽可能均匀照明的可控背景前, CCD 摄像机摄取到齿轮的图像, 经过图像卡把图像数据采集到计算机内

存, 利用研制开发的齿轮图像处理与测量软件实现对齿轮几何参数的测量, 最后由相应的输出设备输出测量结果。

3 图像处理

3.1 中值滤波

由于图像中不可避免地存在噪声, 故在图像预处理过程中需对噪声进行滤除。中值滤波是一种较好的非线性滤波方法, 它在去除图像噪声的同时, 能够有效地保持图像轮廓的清晰。设 $G(x, y)$ 表示原始图像在 (x, y) 处的灰度值, 选用 $N \times N$ 正方形窗口 (N 一般取 3 或 5), $F(x, y)$ 表示滤波后的图像在 (x, y) 处的灰度值, $\text{Med}\{ \}$ 表示对窗口求中值, 则中值滤波的输出可以表达为:

$$F(i, j) = \text{Med}\{ G(x+n, y+m) \mid (1-N)/2 \leq n, m \leq (N-1)/2 \}, \quad (1)$$

3.2 图像二值化

阈值法是一种简单有效的图像分割方法, 它用一个或几个阈值将图像的灰度级分为几个部分, 认为属于同一个部分的像素点是同一个物体。在齿轮图像中, 只有一个目标与背景, 而且目标与背景的灰度分布都比较均匀, 故可以选用某一阈值 T , 把图像的像素分成大于 T 的像素群 (目标) 和小于 T 的像素群 (背景) 两部分。设 $B(x, y)$ 表示对图像二值化的输出, 即:

$$B(x, y) = \begin{cases} 1 & F(x, y) > T \\ 0 & F(x, y) \leq T \end{cases}, \quad (2)$$

此处图像二值化将目标点的灰度值置为 1, 背景点的灰度值置为 0。

阈值 T 的计算方法一般有 P-tile 法、双峰法、Otsu 法、最小错误法和最大熵法等^[5-8]。

3.3 边缘轮廓的提取

图像边缘提取的算法很多, 常用的有边缘算子检测法、边缘跟踪法和数学形态法等^[3, 9]。本文采用数学形态法中的四邻域腐蚀, 可以得到单

个像素宽的图像边缘 $E(x, y)$, 即:

IF $B(x, y - 1) = 1$ and $B(x, y + 1) = 1$ and $B(x - 1, y) = 1$ and $B(x + 1, y) = 1$ THEN $E(x, y) = 0$

ELSE $E(x, y) = B(x, y)$, (3)

经边缘提取处理后的图像下文称为边缘图像。

4 齿轮几何尺寸的测量

4.1 齿轮中心孔半径、齿顶圆半径、齿根圆半径的确定

在二值化图像中进行逐点搜索,找出灰度值为 1 的所有像素点,即为目标点。将所有目标点的横坐标值 x_i 和纵坐标值 y_i 分别累加,再分别除以目标包含的像素点数 n ,作为齿轮的近似几何中心 (x_0, y_0) ,其计算式为:

$$H_x = \sum_{i=1}^n x_i \quad H_y = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$x_0 = \frac{H_x}{n} \quad y_0 = \frac{H_y}{n}, \quad (4)$$

上法一般称为重心法。把用重心法计算出来的近似几何中心作为坐标圆心,分别沿正 x 、负 x 和正 y 、负 y 方向在边缘图像中搜索灰度值为 1 的像素点,搜索到的点一定落在齿轮的内外边缘(齿轮中心孔轮廓线与齿轮廓线)上。先用搜索得到的内边缘上的四个像素点确定齿轮中心孔的近似半径值(实际上采用其中的一个点即可确定一个近似半径值,此处用了四个点是为了使近似性相对较好),用此半径就可以把内外边缘分开,得到齿轮的内边缘像素点列和外边缘像素点列。对于内边缘点列中的每一像素点,在外边缘点列中寻求距离此点最远的像素点即为齿顶圆上的点,最近的像素点即为齿根圆上的点。求得的所有最远点组成齿顶圆像素点列,求得的所有最近点组成齿根圆像素点列,且包含的像素点数都等于内边缘包含的像素点数。对内边缘像素点列、齿顶圆像素点列和齿根圆像素点列分别采用最小二乘算法的圆拟合求得齿轮中心孔半径、齿顶圆半径和齿根圆半径及其相应圆心。

设待拟合圆的边缘点列为 $P_i(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$, 下面给出最小二乘算法的圆拟合公式^[10]:

$$r = \sqrt{x_0^2 - 2x_0x_0 + y_0^2 - 2y_0y_0 + x^2 + y^2}, \quad (5)$$

其中: $x_0 =$

$$\frac{(\overline{x^2x} + x\overline{y^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - (\overline{x^2y} + y\overline{y^2} - \overline{x^2y} - \overline{y^3})(\overline{x} \cdot \overline{y} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{x} \cdot \overline{y} - \overline{xy})^2}$$

$y_0 =$

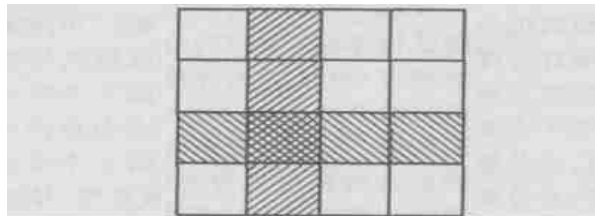
$$\frac{(\overline{x^2y} + y\overline{y^2} - \overline{y^3} - \overline{xy^2})(\overline{x^2} - \overline{x^2}) - (\overline{x^2x} + x\overline{y^2} - \overline{y^2x} - \overline{x^3})(\overline{x} \cdot \overline{y} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{x} \cdot \overline{y} - \overline{xy})^2}$$

式中: $\overline{x^a y^b} = \sum_{i=1}^n x_i^a y_i^b / n, \quad \overline{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n,$

$\overline{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n$

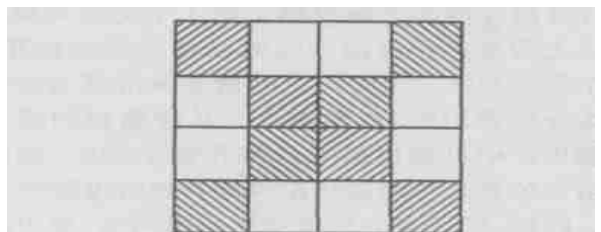
4.2 齿轮齿数的确定

在边缘图像中,以齿轮中心孔的圆心为圆心,以介于齿根圆半径与齿顶圆半径之间的某个值为半径,采用中点画圆法或 Bresenham 画圆法作一个辅助圆,沿此辅助圆搜索,计数该辅助圆与齿轮廓线的交点,交点数目的一半即为齿轮的齿数。由于在位图图像中,线都是由像素点组成,并不满足数学意义上的连续,两条线相交的时候会存在两种情况:(a) 两条线相交有公共的像素点;(b) 两条线相交没有公共的像素点,但两条线的某些像素点相互邻接,如图 2 所示。计数交点的时候要考虑到这两种情况,遇到任何一种情况,交点计数器都增加 1,即认为搜索到一个交点。



(a) 有公共像素点

(a) Have common picture element point



(b) 无公共像素点

(b) Have no common picture element point

图 2 两种相交情况

Fig. 2 Two kinds of intersection

4.3 齿轮模数的确定

考虑到在齿轮加工过程中,齿顶圆的加工精度较高,故采用齿顶圆半径来估算齿轮的模数。另外,经计算可知,齿轮的变位系数对齿顶圆半径的影响很小,可以忽略,故估算齿轮的模数采用下面的公式:

$$m = 2r_a / (z + 2h_a^*), \quad (6)$$

其中, r_a 为齿顶圆半径, m 为模数, z 为齿数, h_a^* 为齿顶高系数。因齿轮模数是标准值,一般来说,通过式(6)估算出来的模数必然最接近某个标准值,所以最接近的那个标准值即是齿轮的模数,并根据此模数计算齿轮分度圆的半径值,看是否落在齿顶圆半径与齿根圆半径之间,如果不是,则取另外一个相近的标准值作为齿轮的模数,再计算齿轮分度圆半径值进行判断。

4.4 其他尺寸的确定

求得齿轮的模数和齿数,就可计算出齿轮的分度圆直径。以齿轮中心孔的圆心为圆心,采用 Bresenham 画圆法作齿轮的分度圆,如图 3 所示。沿分度圆搜索,顺次得到分度圆与齿轮廓线的全部交点(交点标号见图 3),并且要使标号为 1 的交点(作为测量齿厚的基准起点)满足此交点所在的齿轮廓线上的点到圆心的距离沿逆时针方向是由近到远的。第 1 个交点与第 2 个交点之间的距离为分度圆弦齿厚,第 3 个交点与第 4 个交点之间的距离也为分度圆弦齿厚,依次类推。用搜索到的所有分度圆弦齿厚(搜索到的分度圆弦齿厚的个数应与齿数相等)可计算出分度圆平均弦齿厚。第 1 个交点与第 2 个交点之间所夹分度圆的劣弧长为分度圆齿厚,第 3 个交点与第 4 个交点之间所夹分度圆的劣弧长也为分度圆齿厚,依次类推。从搜索到的所有分度圆齿厚中可找出最大齿厚和最小齿厚,同时用搜索到的所有分度圆齿厚可计算出分度圆平均齿厚。第 1 个交点与第 3 个交点之间所夹分度圆的劣弧长为分度圆齿距,第 3 个交点与第 5 个交点之间所夹分度圆的劣弧长也为分度圆齿距,依次类推。从搜索到的所有分度圆齿距中可找出最大齿距和最小齿距,同时用搜索到的所有分度圆齿距可计算出分度圆平均齿距。同理,可计算出分度圆平均齿间宽、最大齿间宽和最小齿间宽。

设齿轮顶隙系数为 c^* , 齿轮分度圆半径为 r_0 , 测得的齿根圆半径为 r_f , 分度圆平均齿厚为

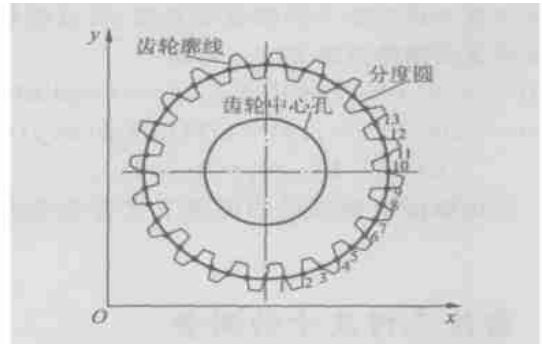


图 3 齿轮参数测量原理图

Fig. 3 Schematic illustration of spur gear measurement

s_0 , 则齿轮变位系数 x 、齿高变动系数 y 和压力角 α 可分别由下列各式求得^[11]:

$$x = h_a^* + c^* - (r_0 - r_f) / m, \quad (7)$$

$$y = h_a^* + x - (r_a - r_0) / m, \quad (8)$$

$$\alpha = \arctan[(s_0 / m - \sqrt{2}) / (2 \times x)]. \quad (9)$$

我国 GB1365 - 87 标准规定分度圆上的压力角 $\alpha = 20^\circ$, 但在生产实际中也有采用其它压力角的齿轮(如 $\alpha = 15^\circ$)。对式(9)计算出来的值需进行圆整取最接近的值。

4.5 带键槽齿轮的测量

齿轮一般都依靠键来传递运动与动力,故齿轮上大多有键槽。对于中心孔带有键槽的齿轮,通过对齿轮内边缘像素点列采用圆的 Hough 变换聚类可以把齿轮中心孔圆周上的点列(优弧)与键槽轮廓上的点列(三条线段)分离开来。齿轮参数的测量方法同上,对于键槽深度与宽度的测量这里不介绍。这种方法在聚类时存在一个问题,圆的 Hough 变换,使用三维累加数组,需要的内存空间很大^[12]。为了避免产生溢出,一个有效的措施是获得齿轮中心孔圆心坐标和半径的初始值信息,以确定其大致取值范围来减少累加数组占用的内存空间。

5 实验结果与分析

实验采用 $1280 \times 1024 \times 8$ bit 的 CCD 摄像机及黑白图像采集卡和工业控制用计算机组成的图像测量系统。照明使用白炽灯照明。测量系统经过校正与标定后拍摄的渐开线圆柱齿轮图像如图 4 所示,图 5 为原始图像经过中值滤波、二值化与四邻域腐蚀处理后输出的边缘图像。

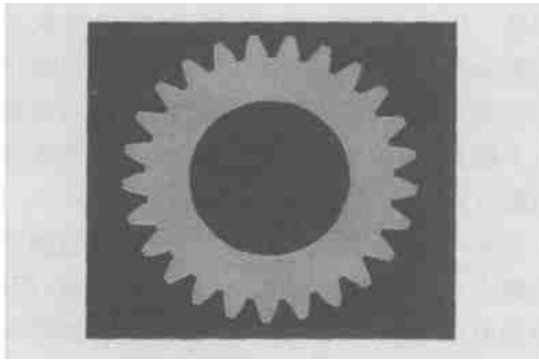


图 4 原始图像
Fig. 4 Original image

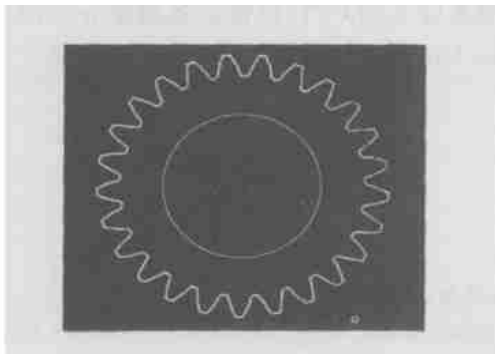


图 5 边缘图像
Fig. 5 Edge image

为了提高测量精度,实现 CCD 测量的亚像素分辨率,本文采用了文献[13]提出的一种基于多项式插值原理的亚像素算法^[13-14]。对于边缘图像上的任一点 (x, y) ,通过插值可以获得它的亚像素坐标 (x_e, y_e) ,其计算公式如下:

$$x_e = x + \frac{R(x-1, y) - R(x+1, y)}{R(x-1, y) - 2R(x, y) + R(x+1, y)} \cdot \frac{W}{2}$$

$$y_e = y + \frac{R(x, y-1) - R(x, y+1)}{R(x, y-1) - 2R(x, y) + R(x, y+1)} \cdot \frac{H}{2}$$

(10)

式中 $R(x, y)$ 是对原始图像采用 Roberts 算子计算得到的梯度图像, W 、 H 分别表示 CCD 摄像机在 x 、 y 方向的像素间距。表 1 给出了部分齿轮参数的人工测量值与图像测量值的比较结果。

改变 CCD 摄像头与被测齿轮表面的距离,多次测量实验结果表明,测量值的绝对误差均小于一个像素。造成测量误差的因素有:

(1) 硬件系统的误差。理论上讲,数字图像测量系统的测量精度主要取决于 CCD 摄像设备的分辨率^[15]。即使用的 CCD 摄像设备的像素数越高、被测目标物的尺寸越小,则测量中的一个像素所代表的实际尺寸就会越小,即可使得测量精度越高。

表 1 人工测量值与图像测量值的比较

Tab. 1 Comparison between hand measuring value and image measuring value

参数	齿数	模数/mm	压力角	齿顶圆半径/mm	齿根圆半径/mm
人工测量值	25	2	20°	28.010	23.500
图像测量值	25	2	20°	28.023	23.509
绝对误差	0	0	0	0.013	0.009
参数	中心孔半径/mm	平均齿厚/mm	弦齿厚/mm	变位系数	齿顶高变动系数
人工测量值	15.010	3.869	3.865	0.5	0
图像测量值	15.021	3.872	3.868	0.508	0.006
绝对误差	0.011	0.003	0.003	0.008	0.006

注:人工测量值指人工使用机械卡尺和千分尺等的测量值。同时,需要指出的是,人工测量值也并非绝对精确值。

另外,系统光照不均会在沿图像边缘留下阴影造成的图像边缘提取误差;CCD 摄像头成像平面与被测零件表面不能完全平行产生不平行测量误差;镜头畸变不能得到完全精确的校正引起图像非线性失真误差。

(2) 软件算法的误差。在测量算法中,齿轮中心孔圆心是各个几何参数计算的基准,而齿轮中心孔圆心是通过提取中心孔边缘点,由最小二

乘法拟合而得,这种算法本身存在一定误差。其二,通过最小二乘法拟合得到的齿轮中心孔圆心坐标通常是小数,而采用 Bresenham 画圆法作圆时需要圆整为整数,这会造成圆心定位误差。同时,把分度圆半径值转化为像素的个数时通常也是小数,在作圆时需要圆整。另外,确定分度圆与齿轮廓线交点坐标时存在交点位置误差。

由此实验结果可证明,若采用本实验系统并

借助光学放大设备,测量分度圆直径在 5 mm 以下的微小齿轮,测量精度将在 $2\ \mu\text{m}$ 以下。如果使用更高像素数的 CCD 摄像设备,或测量分度圆直径更小的齿轮,则测量精度也随之提高。

如果对该算法加以改造和完善,还可以实现对内啮合直齿圆柱齿轮以及圆弧齿轮、斜齿轮等几何尺寸参数的测量。

6 结 论

研究采用数字图像处理技术实现对直齿圆柱齿轮几何尺寸的非接触式测量,建立了测量直齿圆柱齿轮的齿数、模数、中心孔半径、齿顶圆半径、齿根圆半径和变位系数等齿轮几何尺寸参数的测

量算法。使用 $1\ 280 \times 1\ 024$ 的 CCD 摄像机及黑白采集卡对分度圆直径为 50 mm 的直齿圆柱齿轮进行测量实验,与人工测量值对比,绝对误差小于一个像素,在各测量参数中,最大尺寸的齿顶圆半径绝对误差值为 $13\ \mu\text{m}$ 。

因为 CCD 摄像设备的分辨率越高、被测物的尺寸越小,则测量精度越高,且为线性关系,所以,使用高分辨率的 CCD 摄像设备并配备光学放大系统,采用本文算法,可实现对高精度和微小直齿圆柱齿轮几何尺寸参数的测量。如使用 $1\ 280 \times 1\ 024$ 像素以上的 CCD 摄像设备测量分度圆直径 5 mm 以下的直齿圆柱齿轮,测量精度将在 $2\ \mu\text{m}$ 以下。

参考文献:

- [1] 洪海涛,赵辉. 图像技术用于零件尺寸测量的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 213-218.
HONG H T, ZHAO H. Study on the imaging technology for object measuring[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(3): 213-218. (in Chinese)
- [2] 吴晓波,杨永琴. 图像测量技术的新应用[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(3): 11-16.
WU X B, YANG Y Q. Image measuring technique and it's development[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(3): 11-16. (in Chinese)
- [3] 张少军,艾矫健,李忠富,等. 利用数字图像处理技术测量几何尺寸[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 284-287.
ZHANG SH J, AI J J, LI ZH F, et al. Size measurement with digital image processing technology[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, 24(3): 284-287. (in Chinese)
- [4] 张少军,李庆利,李忠富,等. 基于 CCD 的数字图像处理技术在机械测量领域的研究与应用[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(增刊): 132-135.
ZHANG SH J, LI Q L, LI ZH F, et al. Study and application of digital image processing on CCD in industrial measurement[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2003, 25(SUP): 132-135. (in Chinese)
- [5] 韩思奇,王蕾. 图像分割的阈值法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(6): 91-94.
HAN S Q, WANG L. A survey of thresholding methods for image segmentation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(6): 91-94. (in Chinese)
- [6] 王延杰,宋建中. 一种实时自适应图像二值化方法[J]. 光学 精密工程, 1994, 2(5): 17-21.
WANG Y J, SONG J ZH. An Adaptive method for image binarization in real-time[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(5): 17-21. (in Chinese)
- [7] 苟中魁,张少军,李忠富,等. 机械零件图像二值化方法的研究[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(增刊): 16-20.
GOU ZH Q, ZHANG SH J, LI ZH F, et al. Study on Binarization method for machinery pars image[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2003, 25(SUP.): 16-20. (in Chinese)
- [8] 苟中魁,张少军,李忠富,等. 一种 Otsu 阈值法的推广-Otsu 双阈值法[J]. 机械, 2004, 31(7): 12-14.
GOU ZH Q, ZHANG SH J, LI ZH F, et al. A dual threshold based on Otsu method[J]. *Machinery*, 2004, 31(7): 12-14. (in Chinese)
- [9] 赵巨波,孙华燕,杜巍. 一种图像边缘特征提取方法[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(4): 325-327.
ZHAO J B, SUN H Y, DU W. Edge feature extraction method for image[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(4): 325-327. (in Chinese)

- [10] 孔兵,王昭,谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. 红外与激光工程,2002,31(3):275-279.
KONG B, WANG Z, TAN Y S. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002,31(3):275-279. (in Chinese)
- [11] 陈榕林,陆同理. 新编机械工程师手册[M]. 北京:中国轻工业出版社,1994.
CHENG R L, LU T L. *A New editing handbook for mechanical engineering* [M]. Beijing: China Light Industry Press,1994. (in Chinese)
- [12] 刘桂雄,申柏华,冯云庆,等. 基于改进的 Hough 变换图像分割方法[J]. 光学精密工程,2002,10(3):257-260.
LIU G X, SHEN B H, FENG Y Q, et al. Study of image segmentation based on improved Hough transform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002,10(3):257-260. (in Chinese)
- [13] 吴晓波,钟先信,刘厚权,等. 高精度图像测量系统[J]. 光学精密工程,1995,3(1):28-31.
WU X B, ZHONG X X, LIU H Q, et al. High accuracy image measurement system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995,3(1):28-31. (in Chinese)
- [14] 王建民,浦昭邦,刘国栋. 提高图像测量系统精度的细分算法的研究[J]. 光学精密工程,1998,6(4):45-50.
WANG J M, PU Z H B, LIU G D. The research of subpixel algorithms of improving the accuracy of image measuring system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998,6(4):45-50. (in Chinese)
- [15] 吴晓波,安文斗,杨钢. 图像测量系统中的误差分析及提高测量精度的途径[J]. 光学精密工程,1997,5(1):133-141.
WU X B, AN W D, YANG G. Error analysing and approaches of improving measuring precision in image measuring system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997,5(1):133-141. (in Chinese)

作者简介:张少军(1957-),男,内蒙古集宁人,教授,主要研究方向为智能化机械及基于数字图像处理技术的机械测量和识别方面的研究。