

文章编号: 1001-3806(2016)05-0643-05

## 基于机器视觉的螺纹参量测量系统

周策策, 李杏华\*

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了高精度测量螺纹的各项参量, 建立了基于机器视觉技术的螺纹参量测量系统。采用螺纹工件旋转、相机跟随拍摄的方式采集螺纹在平行背光下的轮廓数据, 实现了螺纹的各项参量测量, 扩大了系统的测量范围, 并且降低了相机标定误差的影响。推导了坐标系统转换方程, 通过标定实现了坐标统一, 并推导了螺纹参量计算公式; 针对 CCD 相机光轴和螺纹轴线垂直时螺旋线对螺纹牙投影产生遮挡失真情况建立了数学补偿模型。结果表明, 得到的测量不确定度小于  $2\mu\text{m}$ , 重复性优于  $4\mu\text{m}$ 。该系统可以完成螺纹的各项参量测量。

**关键词:** 测量与计量; 螺纹参量; 机器视觉; 轮廓; 失真; 误差补偿

**中图分类号:** TH741

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.0643

## Measuring system of thread parameters based on machine vision

ZHOU Cece, LI Xinghua

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to measure the parameters for screw thread with high-precision, a measuring system of thread parameters based on machine vision technology was established. Contour data of thread in the parallel back light was obtained by thread workpiece rotation and camera following-shot, and the measurements of thread parameters were realized. The measurement range of the system was expanded and the effect of camera calibration error was reduced. Coordinate conversion equation was derived, and the coordinate system was unified by system calibration. Calculation formulas of thread parameters were derived. Considering the distortion of thread teeth on the projection of screw line when the optical axis of CCD camera and thread axis were vertical, a mathematical compensation model was built. The experiment results show that the uncertainty of system measurement was less than  $2\mu\text{m}$  and repeatability was better than  $4\mu\text{m}$ . The system can measure the thread parameters.

**Key words:** measurement and metrology; thread parameters; machine vision; contour; distortion; error compensation

## 引言

螺纹连接在工业中应用非常广泛, 快速而准确地测量螺纹各项参量, 对保证工业零部件的质量和可靠性有着相当重要的作用<sup>[1-2]</sup>。机器视觉测量技术应用于螺纹参量的非接触测量, 是近些年的研究热点<sup>[4-6]</sup>, 主要有光切法和垂直投影法<sup>[7-8]</sup>。光切法是用与待测螺纹中径螺旋线相切的光线投影螺纹图像, 需要调节 CCD 相机使其倾斜螺纹的螺旋升角; 垂直投影法是采用垂直于待测螺纹轴线的光线投影螺纹图像, 但会造成螺纹螺旋线对螺纹牙型遮挡失真<sup>[9]</sup>。JOSHUA 等人<sup>[10]</sup>利用垂直投影法提出了相机校正、图像处理、数据分析来实现螺纹参量测量和误差分析, 但是并没有

消除图像的遮挡失真。HE 等人<sup>[11]</sup>提出了利用线阵 CCD 采集图像、图像处理, 并使用光切法调节螺纹轴线和光轴的夹角来消除投影遮挡, 实现了锥螺纹的各项参量检测, 但是螺纹轴线和光轴不垂直会造成投影偏差, 并需要高精度的角度调整装置。SHEN 等人<sup>[12]</sup>运用空间几何原理对垂直投影下的螺纹图像进行了遮挡理论分析, 通过逐点重构实现了螺纹牙侧边的失真矫正, 但是运算量大、效率不高。

本文中提出了利用 2 维移动平台精确定位相机和旋转平台精确定位螺纹<sup>[13]</sup>, CCD 采集图像, 扩大测量范围, 可对多种尺寸螺纹进行参量测量。并针对光切法和垂直投影法的不足, 在垂直投影法的基础上, 利用空间几何原理分析并建立遮挡失真模型, 对失真造成的螺纹参量测量误差实现了软件补偿。

## 1 测量原理

视觉测量螺纹参量系统主要是由 2 维工作台、旋转工作台、CCD 相机、图像采集卡以及计算机软件处

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375338)

作者简介: 周策策(1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事机器视觉、图像处理的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: li.xinghua@126.com

收稿日期: 2015-08-21; 收到修改稿日期: 2015-09-28

理组成。如图 1 所示,被测螺纹夹紧在旋转工作台上,背光源照明螺纹,CCD 相机采集螺纹在旋转工作台上角度差为  $180^\circ$  的两幅螺纹单边图像,由计算机进行图像处理,通过坐标转换、系统标定,计算出被测螺纹的几何参量,并对 CCD 相机光轴和螺纹轴线垂直时螺旋线对螺纹牙投影遮挡产生的误差予以精确补偿。

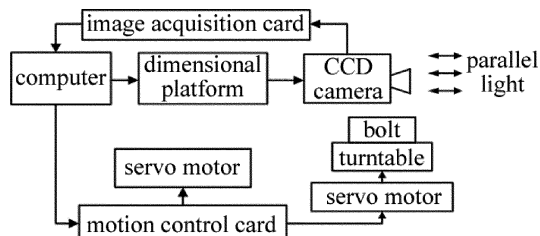


Fig. 1 Measurement system of machine vision thread parameters

## 2 系统标定

### 2.1 图像处理

系统采用中值滤波对图像噪声进行处理,既不削弱轮廓的边缘信息又有效地消除噪声。Canny 边缘检测算法提取螺纹边界,能够在噪声抑制和边缘检测间取得良好的平衡<sup>[14]</sup>。为了提高边缘定位精度,在螺纹牙侧边采用最小二乘直线拟合,在螺纹牙顶和牙底采用二次曲线拟合来实现螺纹牙轮廓的亚像素定位<sup>[15]</sup>。

### 2.2 相机标定

经过轮廓拟合,计算的出的各项参量都是以像素为单位表示的。为了计算出螺纹的实际尺寸,必须对系统的放大倍数进行标定。首先采用张正友标定法对相机内参进行了标定<sup>[16]</sup>,然后在 2 维旋转平台上固定标准参照物,调节 CCD 相机使参照物成清晰的图像,通过 2 维平台水平移动相机,参照物图像相应发生平移,通过内参矫正畸变后计算出图像平移的像素个数  $N$ ,由精密光栅读出相机平移的实际距离  $H$ ,由此计算出系统标定系数  $c$  为:

$$c = H/N \quad (1)$$

式中,  $c$  为一个像素代表的实际尺寸。

在相机视场不同位置多次测量并取其平均值作为测量值,消除随机误差。在测量时,被测螺纹同样是固定在 2 维旋转平台,这样减小了标定面与测量面的位置误差,提高了测量精度。本系统通过标定得到的水平标定系数  $c_x = 0.003472$ ,垂直标定系数  $c_y = 0.003468$ 。

### 2.3 坐标系转换

螺纹参量是通过精密光栅和图像共同计算出来的,首先要将图像坐标系转换到测量坐标系中。坐标转换是通过拍摄已知尺寸的标准圆柱体实现的。如图

2 所示,将半径为  $R$  的圆柱体固定在旋转平台上,  $O_1P_1$  为圆柱体轴线,  $OP$  为转台回转中心线在截面  $ABCD$  上的投影,  $O_1P_1$  与  $OP$  存在偏心误差  $OO_1$  和倾斜角度误差  $\theta$ 。以  $O$  为原点,  $OP$  为  $y$  轴,  $AC$  为  $x$  轴建立测量坐标系。由 2 维平台调节 CCD 相机的位置使圆柱体的母线  $AB$  能够在 CCD 相机上成像,固定相机位置,通过最小二乘法计算出母线  $AB$  所成像  $A'B'$  在图像坐标系的直线方程为  $v = k_1u + b_1$ 。由计算机控制旋转平台转动  $180^\circ$ ,相机采集母线  $CD$  的图像,同样计算出  $CD$  所成的像  $C'D'$  在图像坐标系中直线方程为  $v = k_2u + b_2$ 。

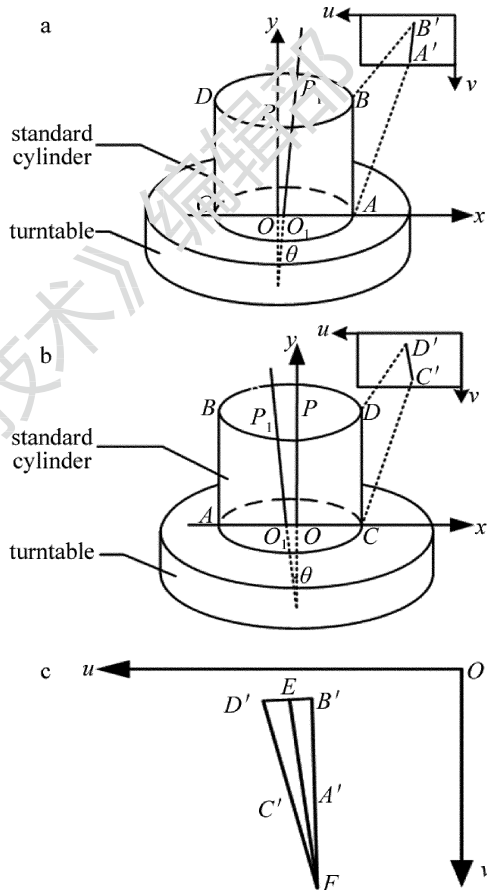


Fig. 2 Calibration standard of cylinder

图像坐标系如图 2c 所示,由几何关系可知,直线  $A'B'$  和  $C'D'$  在图像坐标系中相交,  $EF$  为  $\angle B'FD'$  的角平分线,则直线  $EF$  与  $OP$  平行且到  $OP$  的距离为圆柱体半径  $R$ 。设直线  $EF$  的斜率为  $k$ ,截距为  $b$ ,方程为:

$$v = ku + b \quad (2)$$

则有:

$$(k - k_1)/(1 + kk_1) = (k_2 - k)/(1 + kk_2) \quad (3)$$

$$k = (k_1k_2 - 1 + \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_1^2k_2^2})/(k_1 + k_2) \quad (4)$$

$$b = [k_1b_2 - k_2b_1 - (b_2 - b_1)k]/(k_1 - k_2) \quad (5)$$

图像坐标系和测量坐标系之间的关系可用缩放矩阵  $C$ 、旋转矩阵  $R$  和平移向量  $t$  来描述,  $(x_i, y_i)$  为测

量坐标系中坐标,  $(u_i, v_i)$  为图像坐标系坐标,  $\beta$  为两坐标系夹角, 即:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = RC \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} + t \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x & 0 \\ 0 & c_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_u \\ t_v \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于  $EF$  与  $y$  轴平行, 因此有:

$$\beta = \begin{cases} \frac{\pi}{2} + \arctan k, (k \geq 0) \\ \frac{3}{2}\pi + \arctan k, (k < 0) \end{cases} \quad (8)$$

缩放系数  $c_x, c_y$  通过相机标定得到, 平移矩阵通过  $A', C'$  的中点坐标得到。

### 3 螺纹参量测量

螺纹的参量主要有大径、中径、小径、螺距、牙型角等。螺纹参量计算是通过采集角度差为  $180^\circ$  的两幅单边图像实现的, 中径  $d_2$  是母线通过牙型上沟槽和凸起宽度相等的假想圆柱体的直径, 中径测量如图 3 所示,  $x-O-y$  为测量坐标系,  $l_1, l_2$  分别为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时中径的拟合直线,  $l_3$  为  $l_1, l_2$  的角平分线。由直线拟合得  $l_1$  的方程为  $y = k_1x + b_1$ ,  $l_2$  的方程为  $y = k_2x + b_2$ 。设  $l_3$  方程为  $y = kx + b$ , 由(4)式、(5)式分别得到  $k, b$ 。等间距取  $l_3$  上 5 个点  $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, 5)$ , 则中径为:

$$d_2 = \frac{2}{5} \sum_{i=1}^5 x_i \quad (9)$$

大径  $d$  和小径  $d_1$  的计算与中径同理。

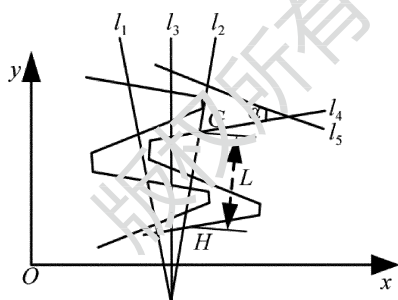


Fig. 3 Calculation of thread parameters

螺距  $L$  是相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离。如图 3 所示, 中径线  $l_2$  和螺纹牙侧边拟合直线相交于  $G$  和  $H$ , 坐标分别为  $(x_G, y_G)$  和  $(x_H, y_H)$ , 则螺距  $L$  为:

$$L = \sqrt{(x_G - x_H)^2 + (y_G - y_H)^2} \quad (10)$$

牙型角  $\alpha$  是指在通过螺纹轴线剖面内的螺纹牙型上相邻两侧间的夹角。如图 3 所示, 牙型侧边已拟合出直线  $l_4, l_5$ , 斜率分别为  $k_4, k_5$ , 则牙型角  $\alpha$  为:

$$\alpha = \left| \arctan\left(\frac{k_5 - k_4}{1 + k_4 k_5}\right) \right| \quad (11)$$

### 4 遮挡误差补偿

当螺纹的轴线垂直于 CCD 相机光轴时, 螺纹牙产生正投影来反映待测螺纹的实际尺寸。但是理论和实验表明, 螺纹的螺旋线对螺纹轴线剖面内的牙形正投影产生遮挡。遮挡会对螺纹参量的测量造成误差, 因此需要补偿。

如图 4 所示, 螺纹为右旋外螺纹, 大径处的螺旋线方程设为:

$$\begin{cases} x = \frac{d}{2} \cos\varphi \\ y = \frac{d}{2} \sin\varphi \\ z = \frac{L}{2\pi} \varphi \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $d$  为大径,  $L$  为螺距,  $\varphi$  为螺旋线上点在  $x-O-y$  平面的投影与  $x$  轴的夹角。

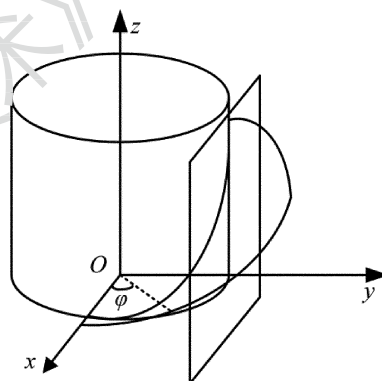


Fig. 4 Space geometry of thread

平行背光光源光线平行于  $x$  轴, 为计算遮挡误差, 做垂直于  $y$  轴的平面  $\Pi$  与螺纹的螺旋面相交, 平面  $\Pi$  的方程为  $y = D$ , 则平面  $\Pi$  与螺旋面的交线  $\Gamma$  的方程为:

$$\begin{cases} x = D \cot\varphi \\ y = D \\ z = \left(\frac{d}{2} - \frac{D}{\sin\varphi}\right) \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{L}{2\pi} \varphi \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $D \in \left(\frac{d_1}{2}, \frac{d}{2}\right)$ ,  $\varphi \in \left[\arcsin \frac{2D}{d}, \pi - \arcsin \frac{2D}{d}\right]$ 。

曲线  $\Gamma$  在图像中的投影为一线段, 曲线  $\Gamma$  在  $z$  轴上的最大值点的投影为线段的上端点, 为求取  $z$  轴上的最大值, 可求  $z$  对  $\varphi$  的导数:

$$z' = L \cos^2 \varphi - 2\pi D \tan \frac{\alpha}{2} \cos \varphi - L \quad (14)$$

令  $z' = 0$ , 可得:

$$\cos \varphi = \frac{\pi D \tan \frac{\alpha}{2}}{L} - \sqrt{\frac{\pi^2 D^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2}}{L^2} + 1} \quad (15)$$

$$\varphi = \arccos \left( \frac{\pi D \tan \frac{\alpha}{2}}{L} - \sqrt{\frac{\pi^2 D^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2}}{L^2} + 1} \right) \quad (16)$$

为正确计算螺纹的参量,系统应该采集  $y$ - $O$ - $z$  截面上的螺纹图像,即  $\varphi = \pi/2$ ,  $\cos \varphi = 0$ ,显然  $y$ - $O$ - $z$  截面处曲线  $\Gamma$  上的螺纹点的  $z$  坐标并不为最大值,因此采集的图像一定产生遮挡误差。设曲线  $\Gamma$  在  $z$  轴的最大值为  $z_{\max}$ ,则:

$$z_{\max} = \left( \frac{d}{2} - \frac{LD}{\sqrt{2\pi D \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{\pi^2 D^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2} + L^2} - 2\pi^2 D^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2}}} \right) \tan \frac{\alpha}{2} + (L/2\pi) \arccos \left( \frac{\pi D \tan \frac{\alpha}{2}}{L} - \sqrt{\frac{\pi^2 D^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2}}{L^2} + 1} \right) \quad (17)$$

令遮挡误差为  $\Delta z$ ,则有:

$$\Delta z = z_{\varphi=\frac{\pi}{2}} - z_{\max} \quad (18)$$

$$\Delta z = \left( \frac{d}{2} - D \right) \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{L}{4} - \left( \frac{d}{2} - \frac{LD}{\sqrt{2\pi D \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{\pi^2 D^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2} + L^2} - 2\pi^2 D^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2}}} \right) \tan \frac{\alpha}{2} + (L/2\pi) \arccos \left( \frac{\pi D \tan \frac{\alpha}{2}}{L} - \sqrt{\frac{\pi^2 D^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2}}{L^2} + 1} \right)$$

(19)

选取 M72 普通三角外螺纹,螺距  $L = 2\text{mm}$ ,牙型角  $\alpha = 60^\circ$ ,绘制出误差曲线。

如图 5 所示,遮挡误差曲线接近线性,且从牙底到牙顶遮挡量变化值为  $0.08\mu\text{m}$ ,遮挡后的牙型侧边与真实侧边基本平行。由螺纹参量的定义可知,遮挡误差对螺纹的螺距,大径和小径的测量没有影响,而对中径和牙型角的测量造成误差。螺纹牙型真实侧边和遮

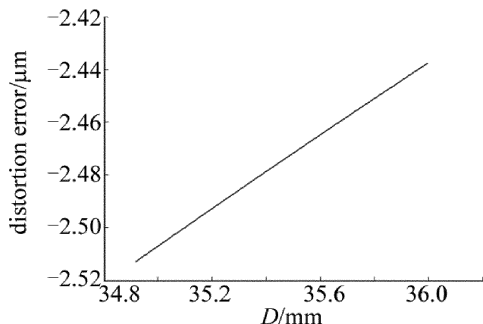


Fig. 5 Tooth type distortion error curve

挡后的侧边接近平行,因此遮挡造成牙型角的误差可忽略不计。由图 6 所示,由于遮挡误差的存在,直接测量中径所得值为  $d_2'$ ,而中径的真实值为  $d_2$ ,设中径的误差为  $\Delta d_2$ :

$$\Delta d_2 = \frac{2\Delta}{\tan(\alpha/2)} \quad (20)$$

式中,  $\Delta$  为中径处的遮挡误差。

中径  $d_2$  通过补偿得到:

$$d_2 = d_2' - \Delta d_2 \quad (21)$$

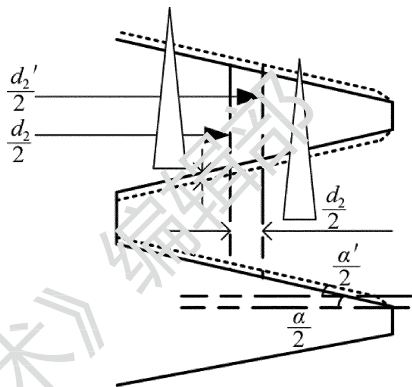


Fig. 6 Parameters compensation of thread

通过对误差的精确补偿,这样无需调节相机与螺纹轴之间的角度,简化了机械结构,提高了测量效率,也不会造成投影偏差。

## 5 实 验

实验中采用灰点 FL2-20S4M-C 相机,像面尺寸为  $1600\text{pixels} \times 1200\text{pixels}$ ,焦距为  $90\text{mm}$  的 Computer 镜头,工作距离  $90\text{mm}$ ,2 维工作台定位精度  $0.1\mu\text{m}$ ,利用上面给出的螺纹参量的测量方法,该系统对 M72,  $P = 2\text{mm}$  的螺纹通规的 5 个螺纹牙分别进行 10 次重复测量,同时给出了荷兰 IAC 公司螺纹扫描测量仪的测量值,表 1 为测量结果,图 7 为第一牙的测量误差曲线。

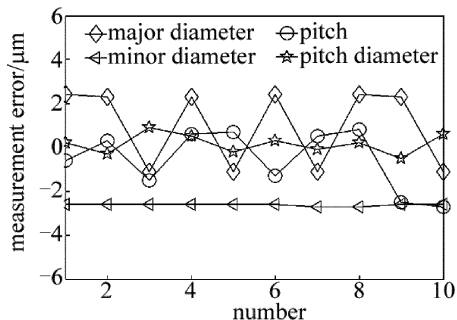


Fig. 7 Measurement error curve of the first tooth

由表 1 可知,本系统与螺纹扫描测量仪的测量值相对误差较小,中径经过补偿后,误差减小了  $8.7\mu\text{m}$ ,基本消除了遮挡造成的误差。利用贝塞尔公式求得第一牙大径测量值的标准差为  $0.0013\text{mm}$ ,极差为  $0.0035\text{mm}$ ;



Table 1 Measurement results of thread parameters

average value	major diameter/mm	minor diameter/mm	pitch/mm	tooth type angle/(°)	pitch diameter before compensation/mm	pitch diameter after compensation/mm
the first tooth	72.0136	69.4076	1.9998	59.93	70.6988	70.6901
IAC measurement results	72.0126	69.4100	2.0004	59.64		70.6899
the second tooth	72.0138	69.4061	2.0017	59.93	70.7035	70.6948
IAC measurement results	72.0150	69.4086	2.0002	59.64		70.6974
the third tooth	72.0156	69.4079	2.0037	59.78	70.7009	70.6922
IAC measurement results	72.0149	69.4103	2.0005	59.60		70.6938
the fourth tooth	72.0181	69.4068	1.9979	60.08	70.7089	70.7002
IAC measurement results	72.0165	69.4108	2.0000	59.64		70.6996
the fifth tooth	72.0086	69.4074	2.0006	59.35	70.6962	70.6875
IAC measurement results	72.0080	69.4102	2.0032	59.26		70.6836

中径的标准差为 0.00042mm,极差为 0.0014mm;小径的标准差为 0.00051mm,极差为 0.0012mm;螺距标准差为 0.0004mm,极差为 0.0013mm;牙型角的标准差为 0.023°,极差为 0.08°。由图 7 可知,所测参量的重复性较好。

## 6 结 论

针对多种尺寸外螺纹的参量测量建立了 2 维移动平台和转台联动的图像采集、坐标测量系统,可实现对螺纹各项参量的测量。从螺纹形成的空间几何出发,对螺纹采集模型的原理性误差进行了分析,得出了失真公式,从公式入手,得到了简化的螺纹参量补偿模型,实现了螺纹参量的精确补偿,简化了机械结构,提高测量效率。实验结果表明,该方法能够满足螺纹参量高精度测量的要求,可以应用于实际测量中。

## 参 考 文 献

- [1] LEI J P, YAN Sh H, SHEN Sh W. Research on measuring system of thread parameters by CCD vision[J]. Manufacturing Technology & Machine Tools, 2010, 32(4):96-99(in Chinese).
- [2] ZHANG H Y, ZHANG G X. Online test system of large screw thread[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12):199-202(in Chinese).
- [3] SHEN Sh W, YAN Sh H, ZHOU Ch L, et al. Research of automatic detection technology of thread parameters based on CCD vision[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(6):865-869(in Chinese).
- [4] YANG L J. Research on image processing method in taper thread-online measuring system[D]. Xi'an:Xi'an Electronic and Engineering University, 2006:1-2(in Chinese).
- [5] WANG W Q, SHAO D X, JIANG J F, et al. Research on optical microscope measuring method of external thread parameters based charge-couple device[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 163(39):39-43(in English).
- [6] WU D X. Research on measurement and evaluation system of the screw thread via machine vision technology[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010:4(in Chinese).
- [7] ZHANG G, ZHU X F. Reading system for thread features based on image recognition[J]. Computer & Digital Engineering, 2010, 38(11):155-159(in Chinese).
- [8] CHEN M L. Vertical projection measuring method for male thread and its application analysis[J]. Laser Technology, 2012, 36(6):793-797(in Chinese).
- [9] CHEN M L. Error analysis of thread measurement with machine vision[J]. Laser Technology, 2014, 38(1):109-113(in Chinese).
- [10] JOSHUA M, YU L J. Application of digital image analysis method in metric screw thread metrology[J]. Journal of Shanghai University (English Edition), 2004, 8(2):208-212.
- [11] HE F J, ZHANG R J, LAN Sh, et al. Measurements of non-contact external tapered thread based on bear array CCD[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(7):1169-1172(in Chinese).
- [12] SHEN M H, SHEN Sh F, WANG X Ch, et al. Distortion calibration of parallel screw thread form based on non-contact measurement[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery, 2011, 42(10):224-229(in Chinese).
- [13] SONG L M, QIN M C, YANG Y G, et al. Gear machining error detection based on laser vision method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(1):1-5(in Chinese).
- [14] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6):679-698.
- [15] YU M Zh. Research on image magnification algorithm based on sub-pixel edge detection[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2013:29-31(in Chinese).
- [16] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.