

文章编号: 1001-3806(2013)02-0227-04

坐标测量机上红宝石轴承视觉自动定位系统

王星¹ 李醒飞^{2*} 黄健³ 黎春宇⁴ 谭文斌¹ 陈诚⁵

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072; 3. 中国船舶重工集团公司 第七〇七研究所, 天津 300131; 4. 中国航天科工集团公司第三研究院 第八三五八研究所, 天津 300308; 5. 天津商业大学 机械工程学院, 天津 300134)

摘要: 坐标测量机中传统的间接定位方法对微小特征定位不够精确, 为了提高微小特征的定位精度, 采用机器视觉技术对微小特征本身直接定位的方法, 进行了理论分析和实验验证。根据红宝石轴承材料的光学特性, 设计了视觉自动定位系统, 通过图像算法提取轴承内孔的图像中心, 并使用测量机的测针端部作为靶标对相机进行标定, 取得了相机图像坐标系与测量机坐标系的转换系数数据。结果表明, 该系统的定位精度达到 0.01mm, 这一结果对提高微小特征的定位精度是有帮助的。

关键词: 图像处理; 自动定位; 轮廓跟踪; 红宝石轴承; 相机标定

中图分类号: TH741 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.022

Vision automatic positioning system of ruby bearing in a coordinate measuring machine

WANG Xing¹, LI Xing-fei², HUANG Jian³, LI Chun-yu⁴, TAN Wen-bin¹, CHEN Cheng⁵

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of MOEMS Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. 707 Institute, China Ship-building Industry Corporation, Tianjin 300131, China; 4. 8358 Institute, China Aerospace Science and Industry 3rd Corporation, Tianjin 300308, China; 5. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: To improve the positioning accuracy of small objects, a direct positioning scheme was proposed based on machine vision. Besides, relevant theoretical analysis and experimental verification were carried out. By analyzing the optical features of ruby bearings, a vision automatic positioning system was designed, and image algorithms were used to get the center of the hole. The top of the probe on coordinate measuring machine was used as an ideal target for camera calibration, so the coefficients of coordinate transformation between camera system and the coordinate measuring machine was calculated. Experiments show that the positioning accuracy of the system is up to 0.01mm, which fulfills the requirement of positioning.

Key words: image processing; automatic positioning; contour tracking; ruby bearing; camera calibration

引言

红宝石轴承是许多精密元件上的关键部分之一, 对于这些带有红宝石轴承孔的精密元件, 要求检测红宝石轴承孔的圆柱度以及与其它特征之间的同轴度等形位公差。坐标测量机 (coordinate measuring machine, CMM) 能实现复杂零件表面 3 维坐标的精确提取^[1], 从而完成对各种形位误差的检测, 是检测红宝石轴承的理想工具。

要在测量机上实现对红宝石轴承孔一类的微小特征的测量, 必须要有精确的定位。最常用的定位方法是间接定位法, 即先对容易获取的特征进行测量, 然后根据工件特征之间的位置关系, 推算出其它特征的位置, 从而实现特征的定位。这种方法要求特征之间的位置关系要足够精确, 如果被测件中出现废品, 就很可能导致测量到错误的点位, 甚至会发生撞针现象, 这在微小特征的测量中尤其突出。为了保护测针并且使测量能够顺利进行, 必须建立基于红宝石轴承内孔自身的直接定位系统。

定位系统的设计要求是: 在现有的坐标测量机上, 实现对圆盘状零件中心的红宝石轴承孔定位, 红宝石轴承孔径 1mm ~ 0.5mm, 要求定位精度高于 0.03mm。

作者简介: 王星 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为机器视觉、三坐标测量机等。

* 通讯联系人。E-mail: lixf@tju.edu.cn

收稿日期: 2012-05-21; 收到修改稿日期: 2012-06-29

作者针对零件的几何特征和红宝石轴承的物理特性,在现有的测量机上,引入机器视觉技术,设计视觉自动定位系统。

1 系统结构设计

系统在移动桥式三坐标测量机上搭建,根据被测工件的几何特性以及三坐标测量机的结构特点,进行系统的结构设计。如图1所示,相机固定在测量机的工作平台上,依靠工装,使轴承孔在视场范围之内,光源固定在测量机的z轴上,视觉系统的光轴与测量机z轴平行。

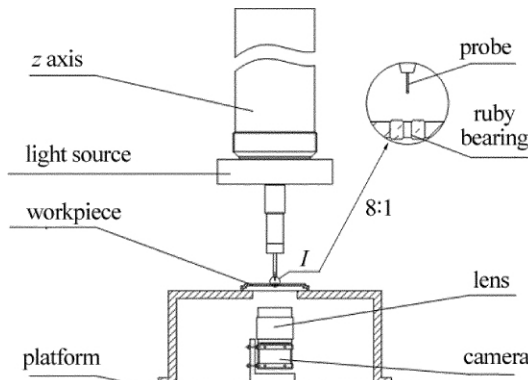


Fig. 1 System architecture

综合系统空间尺寸以及视场、分辨率等因素,确定

镜头的放大倍数为1:1,焦距为20mm;选择CMOS相机,整机高度为25mm,靶面尺寸为5mm×3mm,像素大小为6μm×6μm。最后得到系统高度为130mm,物方分辨率3μm(按半个像素计算)。

2 算法设计

孔心定位包括两部分:一是获取轴承孔中心在图像坐标系中的位置;二是关联图像坐标系和测量机坐标系,通过图像坐标获取轴承中心在测量机坐标系中的位置。具体的算法步骤如图2所示,依次为相机标定、获取目标图像、图像粗定位、图像精定位。

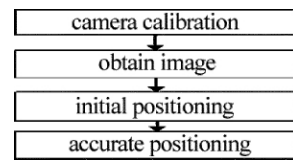


Fig. 2 System algorithm diagram

2.1 图像中内孔粗定位

观察红宝石轴承成像,其中的白色环状透光部分是红宝石结构,中心不透光部分是轴承孔,其透光带具有对称性(见图3a),作者利用这一对称性,使用图像质心算法^[2]来进行圆孔的粗定位。该算法结果只与图像的对称性有关,使粗定位具有较好的鲁棒性。

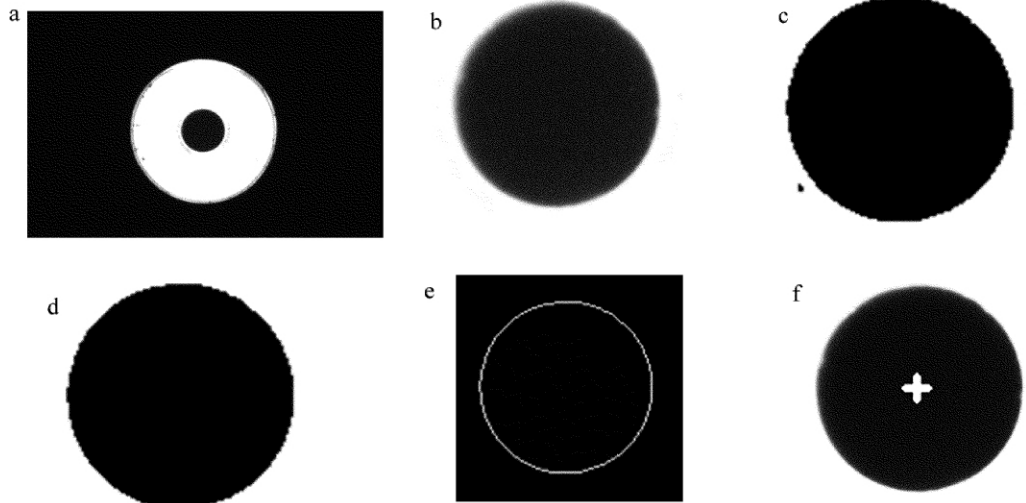


Fig. 3 Process to locate the hole

a—image of ruby bearing positioning b—ROI after rough c—result of image segmentation d—result of image morphology e—result of contour finding f—accurate positioning

2.2 图像中内孔精定位

以粗定位的内孔为参照,设置图像的感兴趣区域(range of interesting, ROI),使其区域成为一个只包括内孔的简单图像,红宝石材料中通常夹有杂质或气泡,因此图像中红宝石部分带有絮状暗斑,对于边缘的精确定位产生影响,见图3b。为了消除这一类噪声的干扰,考虑到絮状暗斑灰度值普遍低于内孔,使用二值化

算法对图像进行分割处理^[3],见图3c,消除了灰度值低于阈值的暗斑噪声,剩余的噪声以孤立点的形式出现(见图3c中共有两处孤立点)。图像形态学算法能在不影响边缘定位的情况下对这种孤立噪声点进行消除^[4],见图3d。再使用轮廓跟踪算法提取小孔的轮廓,得到内孔边缘的图像坐标序列,见图3e。最后,对图像轮廓点的坐标序列进行最小二乘圆拟合,得到内

孔圆心的精确位置^[5] ,见图 3f。

2.3 图像坐标在测量机坐标系下的标定

镜头的放大倍率为 1:1 ,视场小 ,使用时内孔在视场中心附近 ,忽略图像畸变误差 ,使用测量机测针红宝石端部作为靶标对系统进行线性标定 ,三坐标测量机本身的定位精度为 1.8 μm ,测针红宝石球的直径为 0.298mm ,不确定度为 0.001mm ,球度为 1.5 μm ,完全满足视觉标定的要求。设视场中某一点的图像坐标为 (x_i ,y_i) ,对应的测量机坐标为 (x_m ,y_m) ,则两者的线性关系如下^[6] :

$$x_m = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i \quad (1)$$

$$y_m = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i \quad (2)$$

式中 a₀ 和 b₀ 表示的是从图像坐标系到测量机坐标系

的平移量 ,其余参量则与两坐标系的夹角以及像素当量有关^[7]。取 3 个以上的点 ,组成超定方程组 ,使用最小二乘法求解 6 个系数 ,从而实现标定。

3 实验结果

3.1 系数标定

在视场中均匀取 9 个点进行 5 组标定实验 ,数据见表 1。从表中可以看到 a₀ 和 b₀ 多次标定的最大差值在 0.002mm 以下。标定结果中 a₂ 和 b₁ 接近于 0 ,表明两坐标之间夹角接近 0° ,可以近似认为 a₁ 和 b₂ 表示像素当量^[8]。实验结果显示 a₁ 和 b₂ 多次标定的最大差值小于 0.005 μm/pixel。以上数据说明 ,系统标定有很好的稳定性。

Table 1 Repeatability of system calibration

coefficients	1	2	3	4	5	maximum difference/mm
a ₀ /mm	289.2896	289.2887	289.2899	289.2904	289.2889	0.0017
a ₁ /(μm/pixel)	-6.5837	-6.5846	-6.5831	-6.5839	-6.5831	0.0015
a ₂ /(μm/pixel)	-0.0062	-0.0030	-0.0073	-0.0100	-0.0022	0.0078
b ₀ /mm	228.9605	228.9610	228.9608	228.9609	228.9608	0.0005
b ₁ /(μm/pixel)	0.0017	0.0005	0.0014	0.0012	0.0032	0.0027
b ₂ /(μm/pixel)	-6.5842	-6.5843	-6.5861	-6.5846	-6.5885	0.0043

3.2 定位精度实验

使轴承内孔处在视场中的不同位置 ,分别使用测量机和视觉系统测量内孔圆心坐标 ,视觉系统的定位误差使用两圆心的距离来表述 ,数据见表 2。从实验

结果可以看到 ,对于视场中均布的 9 个孔位 ,视觉系统的定位误差最大值在 0.01mm 以下 ,很好地满足了系统定位的要求。

Table 2 Positioning error of the system

CMM value/mm	vision value/mm	position error/mm	CMM value/mm	vision value/mm	position error/mm
(288.2231 226.9712)	(288.2264 226.9673)	0.0051	(288.1136 227.4516)	(288.1159 227.4481)	0.0042
(287.1134 226.9753)	(287.1153 226.9708)	0.0049	(288.1896 227.9570)	(288.1912 227.9651)	0.0082
(285.6675 227.0349)	(285.6627 227.0391)	0.0064	(286.8980 227.9569)	(286.8953 227.9573)	0.0027
(285.6492 227.5155)	(285.6419 227.5128)	0.0078	(285.6228 227.9778)	(285.6157 227.9773)	0.0071
(286.9558 227.5678)	(286.9530 227.5656)	0.0036			

4 定位不确定度分析

由 (1) 式、(2) 式可得到:

$$x_i = \frac{(b_2 x_m - a_2 y_m) - (a_0 b_2 - a_2 b_0)}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (3)$$

$$y_i = \frac{(a_1 y_m - b_1 x_m) - (a_1 b_0 - a_0 b_1)}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (4)$$

则图像坐标点 (x_i ,y_i) 由测量机所引入的不确定度为 (Δx_i ,Δy_i) ,如下所示 ,其中 (Δx_m ,Δy_m) 为测针球心坐标在测量机坐标系中位置的不确定度 ,关系如下:

$$\Delta x_i = \sqrt{\left(\frac{\partial x_i}{\partial x_m}\right)^2 (\Delta x_m)^2 + \left(\frac{\partial x_i}{\partial y_m}\right)^2 (\Delta y_m)^2} \quad (5)$$

$$\Delta y_i = \sqrt{\left(\frac{\partial y_i}{\partial x_m}\right)^2 (\Delta x_m)^2 + \left(\frac{\partial y_i}{\partial y_m}\right)^2 (\Delta y_m)^2} \quad (6)$$

$$\Delta x_m = \Delta y_m = 1.8 \mu m \quad (7)$$

将 (3) 式、(4) 式、(7) 式带入 (5) 式和 (6) 式 ,得到 Δx_i = Δy_i = 0.273 μm。采用标准板对相机标定 ,得到相机焦平面处像素当量 ΔM = 3.5 μm ,轮廓提取误差^[9] ΔP = 7.5 μm。上述 4 项不确定度相互独立 ,将该 4 项不确定度合成 ,得到测针球心在图像坐标系中的不确定度如下:

$$U = \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2 + (\Delta M)^2 + (\Delta P)^2} = 8.3 \mu m \quad (8)$$

这几种误差合成后小于 0.01mm ,满足定位需求 ,

可以有效防止测针在测量微小通孔时发生撞针。

5 结 论

设计了用于三坐标测量机上的宝石轴承内孔自动定位系统,能方便地应用于现有的三坐标测量机上;对相关图像处理算法进行了设计,实现了宝石轴承内孔图像圆心的提取;使用测量机的测针作为靶标进行标定,建立了图像坐标和测量机坐标之间的关系。实验结果表明:标定参量具有很好的稳定性,系统定位精度在0.01mm内,很好地满足了定位要求。

参 考 文 献

- [1] ZHANG G X. Coordinate measuring machine [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999: 14-15(in Chinese) .
- [2] WANG B, ZHI Q Ch, ZHANG Zh X, *et al.* Computation of center of mass for gray level image based on differential moments factor [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(10): 1360-1364(in Chinese) .
- [3] LUO J, LIU X J. Application for inspecting the irregular round and thin hole of parts by using image template measurement [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2007, 43(3): 18-22(in Chinese) .
- [4] ZHANG Y L, LIU G X, CAO D, *et al.* Basic operators of mathematical morphology and application in image preprocessing [J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(3): 356-359(in Chinese) .
- [5] CHEN T, WU H. Space variant median filters for the restoration of impulse noise corrupted images [J]. Circuits and Systems Part II: Analog and Digital Signal Processing, 2011, 48(8): 784-788.
- [6] CHAN V H, BRADLEY C, VICKERS G W. A multi-sensor approach for rapid digitization and data segmentation in reverse engineering [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122(4): 725-733.
- [7] ZHANG J, ZHU D Y, JIA X D, *et al.* Camera lens distortion calibration with co-line points [J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 221-224(in Chinese) .
- [8] SHEN T S, HUANG J B, MENQ C H. Multiple-sensor planning and information integration for automatic coordinate metrology [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2001, 1(2): 167-179.
- [9] CARBONE V, CAROCCI M, SAVIO E *et al.* Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surfaces [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(4): 263-271.

版权所有 ©

《激光技术》编辑部