

应用于微靶装配的显微视觉检测技术

吴文荣 吴倩 黄燕华

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 四川 绵阳 621900)

摘要 针对如何实现微小尺度($\mu\text{m} \sim \text{mm}$)靶零件装配过程中的在线检测,研制了应用于微靶装配的显微视觉检测系统,并对系统的构成与显微成像、图像预处理、特征检测等关键图像处理技术进行了详细论述。提出了针对微靶零件的新型多重滤波除噪算法和几何特征检测算法,并以铝台阶、柱腔等微靶零件为应用实例开展了实验研究。结果表明,该系统采用的算法能有效、快速、准确地对靶零件进行几何特征和实时位置检测,在检测视场为3 mm时,其检测精度 $\leq 3 \mu\text{m}$,角度检测精度 $\leq 0.1^\circ$,适用于ICF微靶等微型器件的微装配。

关键词 微装配;显微视觉;图像预处理;特征检测

中图分类号:TP391 文献标识码:A

Micro-vision measuring technology in microtarget assembling

WU Wen-rong, WU Qian, HUANG Yan-hua

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: To solve the problem of on-line measuring micro-target parts in assembling process, a micro-vision measuring system was designed and developed in this paper. The composition of micro-vision system, implementation of micro image capturing, image preprocessing, and character measurement were described. In the pre-processing, a new refiltering and denoising algorithm and a character measuring algorithm were presented for micro-target parts. Then, the system was used to measure the microtarget parts such as Al sidestep sample, and hohlraums. Experimental results indicate that proposed system can measure the geometric characters and sample positions in real time, high speed and high precision for target parts. When measuring field of view is 3 mm, the geometric measuring precision and angle precision are less than $3 \mu\text{m}$ and 0.1° , respectively, which shows proposed system is suitable for the assembling process of micro-target part.

Key words: micro-assembly; micro-vision; image preprocessing; character measurement

1 引言

ICF微靶是激光核聚变技术中的一个关键元

件,其装配精度直接影响物理实验结果的精度和可靠性。微靶零件的尺寸介于微米与毫米尺度间,长期以来,主要依赖于操作人员手工在体视显微镜下完成装配。在装配过程中缺少在线监测和

精密检测的手段,装配精度得不到很好的保证,尤其是实验样品的位置精度难以精确测量。而激光聚变实验对微靶的装配精度要求越来越高,如何在装配过程中实现靶零件位置的精密在线检测成为迫切需要解决的问题。针对这一问题,本文设计研制了应用于微靶装配的在线显微视觉检测系统,并根据微靶零件的图像特性和检测要求,设计了多重滤波的除噪图像预处理算法和几何特征检测算法。

2 显微视觉检测系统构成

在线显微视觉检测系统主要由水平、垂直两路光学成像系统和图像处理系统组成,每路光学成像采集系统由显微镜头、工业 CCD、光源、图像采集卡等构成。如图 1 所示,靶零件由于尺寸微小($\mu\text{m} \sim \text{mm}$),为金色、白色,在显微镜下表面粗糙度会引起局部反光亮点,同时某些零件为半透明难以成像。针对以上问题经过多次实验,水平成像系统选用蓝色平行背光源和同轴光源,垂直成像系统采用同轴光源和低角度光源实现了各种

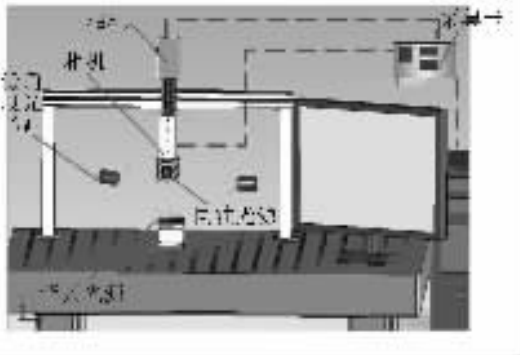


图 1 视觉检测系统组成示意图

Fig. 1 Sketch of micro-vision system

微靶零件均清晰成像。为了实现装配过程中不同尺度零件的同时成像,水平、垂直两路光学成像系统采用 Carl Zeiss (11/11/0.02)远心镜头,系统结构如图 2 所示。

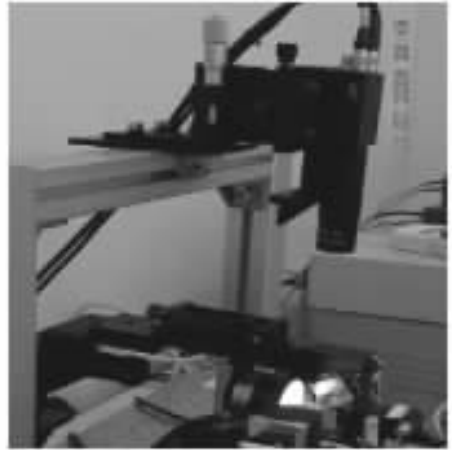


图 2 在线显微视觉检测系统

Fig. 2 Online micro-vision measuring system

系统工作原理:在装配过程中,通过光源、镜头、高分辨 CCD 实现清晰的成像,再由图像采集卡将图像信息传送到图像处理系统进行图像处理,得到靶零件的相互位置信息(角度、长度)和零件几何特征(圆心、中心线、长度等),并在显示屏上实时显示指导装配,从而实现装配过程的精密在线检测。

3 显微图像处理系统

显微视觉检测就是通过显微图像处理系统对成像系统获得的图像进行处理,为操作者提供零件在水平和垂直方向的位置、几何特征信息,是整个系统的关键,图像处理系统工作流程如图 3 所示。

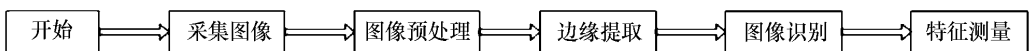


图 3 图像处理流程图

Fig. 3 Flow chart of micro-image processing

3.1 图像预处理

通过工业 CCD 相机摄取到的零件图像在传

输、转换过程中不可避免地产生一些噪声,如工作环境引起的噪声、传感装置的电噪声引起的高斯

噪声、椒盐噪声等,另外显微镜下零件表面粗糙度引起局部反光亮点也表现为噪声,噪声会给图像分割、边缘提取、图像识别等后续处理带来很多困难,因此须先进行消除噪声、图像增强的滤波处理。如果按照通常采用单一滤波器进行图像预处理的方法,往往在消除噪声的同时也模糊了图像,造成一些有用信息丢失。为了克服这一缺点,需在对零件图像进行滤波时,既能最大限度去除图像以外的噪声,又能保持图像的细节,本文设计了多重滤波的除噪算法,其处理流程如图 4 所示。

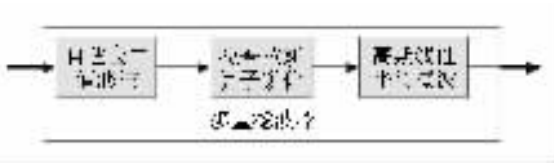


图 4 图像预处理流程图

Fig. 4 Flow chart of micro-image preprocessing

首先采用自适应中值滤波消除零件表面粗糙度等原因引起的噪声,但这会使得零件图像在进行后续边缘特征提取时需要的一些边缘细节信息丢失,因此为了找回前滤波丢失的边缘信息,采用 4 邻域 3×3 拉普拉斯算子(图 5)进行图像锐化处理,采用 5×5 高斯线性滤波器(图 6)进行再次除噪处理,消除锐化产生的噪声,同时消除自适应

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

图 5 4 邻域 3×3 拉普拉斯算子

Fig. 5 3×3 neighborhood Laplacian

中值滤波没有消除掉的高斯噪声。

$[i, j]$	-2	-1	0	1	2
-2	1	2	3	2	1
-1	2	4	5	4	2
0	3	5	7	5	3
1	2	4	5	4	2
2	1	2	3	2	1

图 6 5×5 高斯滤波模板

Fig. 6 5×5 Gaussian mask

3.2 边缘提取与特征检测

边缘是图像的最基本特征,直接影响系统的检测精度,本文对各种边缘算法实验结果进行分析比较后采用 Prewitt 边缘检测算子(图 7)进行边缘特征提取,其总的过程可表示成下式:

$$E = ((F \otimes P_V)^2 + (F \otimes P_H)^2) > T^2 \quad (T \text{ 为阈值})$$

$$P_V = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad P_H = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

图 7 Prewitt 算子

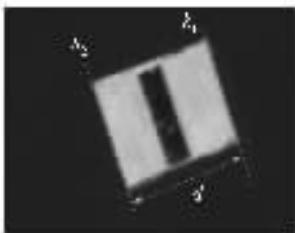
Fig. 7 Prewitt operator

靶零件的边缘主要由直线和圆弧构成。通过拟合图像边缘的办法提取出靶零件的边缘信息,然后根据以下检测原理进行特征检测:

长度检测的基本原理

1)如图 8(a),通过拟合两条平行直线,得到直线间距离 d :

$$d = \frac{|h_1 - h_2|}{\sqrt{k^2 + 1}}$$



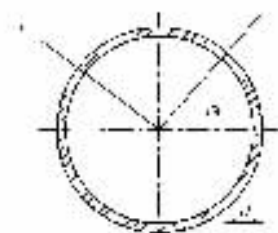
(a) 直线测量检测原理

(a) Principle of linear measurement



(b) 圆检测原理

(b) Principle of circle measurement



(c) 圆弧检测原理

(c) Principle of arc measurement

图 8 特征检测原理

Fig. 8 Principle of character measurement

其中 $k = (k_1 + k_2) / 2$ h_1, h_2 分别为两拟合直线方程截距。

2) 如图 8(b), 拟合圆(或椭圆)方程, 可以得到圆的半径和圆心:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$$

角度检测的基本原理

1) 通过拟合出的直线斜率, 计算得到两直线间夹角:

$$\theta = |\arctan k_4 - \arctan k_3|$$

2) 如图 8(c), 通过将角度转换成距离, 计算靶杆的径向角度:

$$\theta = \arccos(1 - d/r)$$

4 实验研究

4.1 图像处理算法实验

本文以成像不理想的柱腔端面图像对图像预处理算法进行实验验证, 将经过预处理和未预处理的图像分别进行二值化再提取边缘, 两者进行比较, 结果如图 9。从图中可以看出, 经过预处理

后再二值化得到的柱腔端面二值图像(图 9c)比直接由原图得到的二值图像(图 9e)要清晰完整。对预处理后的图像(图 9c)采用 Prewitt 边缘算子得到的边缘图像(图 9d)柱腔端面边缘连续性好、无假边缘产生, 因此本文采用的预处理算法和边缘提取算法是有效的。

4.2 特征检测实验

为了验证系统在装配过程对靶零件相对位置的检测精度, 以装配难度大的柱腔对接为例, 进行柱腔对接装配过程中靶球中心位置、柱腔轴线位置、柱腔相对姿态的检测实验, 结果如图 10(a)、(b)所示, 图 10(a)检测的靶球中心像素坐标为 786.39, 614.82; 图 10(b)检测的靶球中心为 815.3, 644.1, 靶球与左柱腔轴线距离为 22.6 pixel, 两柱腔夹角为 3.92°, 实际夹角为 4.0°。

以铝台阶样品(台阶高度 15 μm)为例进行了外形特征尺寸在线检测实验, 如图 10(c)所示, 样品长度与台阶宽度实际测量值分别为 816, 173 μm , 测量结果像素值为 172.8, 36.25, 测量值为 816, 171.2 μm 。

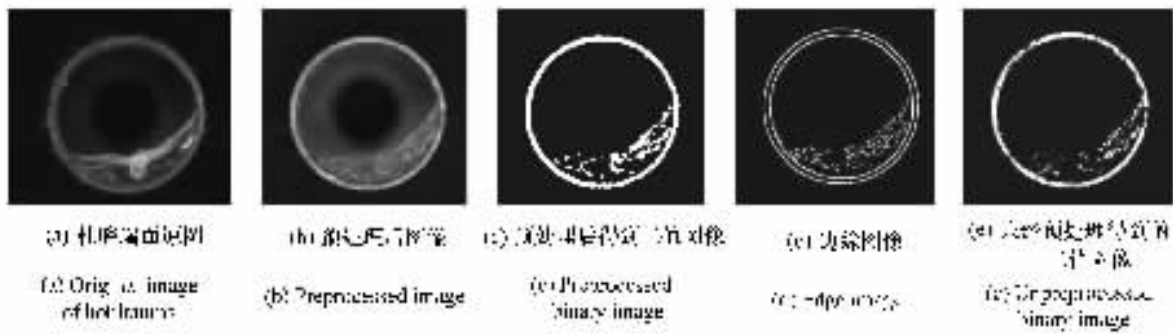


图 9 图像预处理实验结果

Fig. 9 Results of image preprocessing experiment

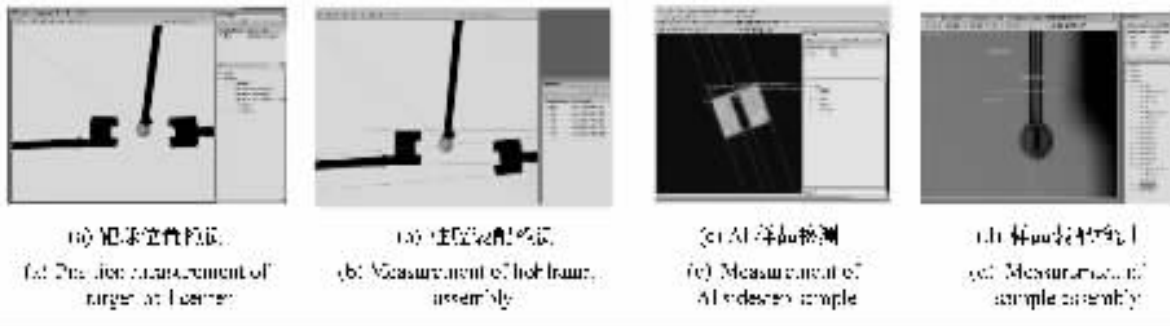


图 10 特征检测实验结果

Fig. 10 Results of character measurement

图10(d)为装配过程中靶杆位置关系的检测实验,主要检测靶杆与台阶样品交线的夹角,检测结果台阶交线与靶杆中心线夹角为 0.967° 。

5 结 论

本文对在线显微视觉检测系统的组成和图像

预处理、边缘提取、特征检测等算法进行了研究和实验。实验结果表明,该系统所采用的算法能有效、快速、准确地对靶零件进行实时的位置和几何特征检测,其测量精度 ≤ 1 pixel,当检测视场为3 mm时,其测量精度 ≤ 3 μm ,角度 $\leq 0.1^\circ$,满足精密靶装配在线检测精度要求。该系统在靶装配中的应用,提高了装配精度,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 荣伟彬,曲东升,孙立宁,等.集成式微操作器的研制[J].机器人,2003,25(3):226-230.
RONG W B,QU D SH,SUN L N *et al.*. Development of integrated micromanipulato[J]. *Robot* 2003,25(8):226-230.
(in Chinese)
- [2] SANO T,YAMAMOTO H. Study of micromanipulation using stereoscopic microscope[J]. *IEEE Instrumentation and Measurement Society* 2002,51(2):182-187.
- [3] 段瑞玲,李玉和,李庆祥,等.一种用于微器件装配的系统设计与研制[J].新技术新工艺,2006,5:30-33.
DUAN R L,LI Y H,LI Q X *et al.*. Design and development of a micro-assembly system[J]. *New Technology & New Process* 2006,5:30-33.(in Chinese)
- [4] VAJDA F. Techniques and trends in digital image processing and computer vision[J]. *IEEE Colloquium on Mathematical Modeling and Simulation of Industrial and Economic Processes*,1994,1:1-3.
- [5] JUN S,DONG H. Statistical theory of ridge detection[A]. *Computer Vision,Graphics,And Image Processing*. San Diego, 1988.

作者简介:吴文荣(1977—),男,湖南涟源人,硕士,工程师,主要研究方向为精密微装配技术。E-mail:rongwvr@163.com.