文章编号　1004-924X(2016)09-2095-06

机器视觉精密测量中的显微光学聚焦

徐　征，陈聿夫，孙　谦，王晓东*，周宗磊
（大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室，辽宁 大连 116085）

摘要：考虑显微光学涉及的聚焦精度对机器视觉精密测量效果的影响，开展了显微视觉环境下对图像聚焦技术综合定量评价的研究。建立了偏移率等系列性能指标，对 13 组清晰度函数在显微视觉条件下的无偏性、单峰性、分辨力等进行了综合评价，优选出方差函数和 Brenner 函数分别用于粗聚焦和精聚焦阶段的清晰度计算。建立了分步爬山搜索法，实现了显微自动聚焦。与传统爬山法相比，提出的方法聚焦时间显著缩短，重复精度提高约 24%。将建立的自动聚焦与图像测量方法应用于某电液伺服阀衔铁气隙测量中，得到的测量均值与工具显微镜结果相近，而测量标准差可达 1.9 μm，测量效率也显著提高。最后对伺服阀加电条件下的气隙动力学特性进行了测试，获得了驱动电流-衔铁气隙之间的关系，为在线装配/装调提供了重要依据。

关　键　词：机器视觉；显微成像；自动聚焦；微装配；微机电系统；综合定量评价
中图分类号：TP242.6；TH742.9　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20162409.2095

Auto-focusing in optical microscopy for machine-vision-based precise measurement

XU Zheng, CHEN Yu-fu, SUN Qian, WANG Xiao-dong*, ZHOU Zong-lei

(*Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian* 116085, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: xdwang@dlut.edu.cn*

Abstract: The auto-focusing precision of microscopy has great influence on the performance of machine-vision-based precise measurement. A comprehensively quantitative evaluation method on image auto-focusing technique in a microscopic vision environment was researched. Several kinds of evaluation indexes were proposed, and the unbiasedness, unimodality, spatial resolution *etc.* of 13 groups sharpness functions were comprehensively evaluated in a microscopic vision condition. Then variance function and Brenner function were chosen to calculate the sharpness functions in coarse and fine focusing processes respectively. A modified Mountain Climbing Searching (MCS) algorithm was proposed to implement the micro-automatic focusing. As comparing to common MCS method, the modified method significantly improves the time consuming and increases the repeatability by about 24%. Finally, the developed auto-focusing algorithm was integrated into the system and was applied to the measurement of armature gap in a servo solenoid valve. The results show that the standard deviation of measurement is 1.9 μm, the precision is similar to that of the universal tool microscope, and the efficiency is significantly improved. Moreover, the system was also utilized for dynamic

收稿日期：2016-03-01；**修订日期**：2016-04-19.
基金项目：国家科技重大专项基金资助项目(No. 2013ZX04001091)

characteristic detection of gaps in the solenoid valve under the condition of power up, the relation between driving current and armature gap is obtained, which provides a reliable evidence for in-situ micro-assembly.

Key words: machine vision; microscopic imaging; auto-focusing; microassembly; Micro-electro-mechanical System(MEMS); comprehensively quantitative evaluation

1 引 言

现代工业的快速发展对微传感器和微执行器的综合性能提出了更高要求。目前,许多微传感器和微执行器的精密装调工作仍依靠手工操作,导致装配精度差和应力分布波动大等问题,影响了它们的服役稳定性。以显微视觉为导引,通过精密定位和微小夹持装置将多个微零件精确组装成系统的微装配技术是解决上述问题的主要途径,而在装配-装调之前,基于显微视觉的在线测量是不可或缺的环节[1-3]。在短景深的显微视觉下,光学聚焦对测量效果的影响显著,离焦偏差会使精密工具误动作,从而导致工具或零件的损坏等问题[4]。此外,受表面涂胶等工艺的影响,留给光学聚焦的时间窗很窄,手工聚焦难以满足需求,亟待发展高效自动的显微光学聚焦技术。

显微自动聚焦技术通常基于图像,要解决图像清晰度计算和合焦面搜索两个问题[5-6]。国内外学者对此开展了大量研究。Li 等以直径为 10 μm 左右的轴-孔装配为应用对象,基于 Sobel 算子设计了先聚焦整体孔、再聚焦中心区的两步搜索法,使注射针尖移动到合焦面,误差小于 0.5 μm[7]。Liu 等设计了一种组合算法,先采用方差函数对微执行器整体聚焦,再以四叉树算法聚焦微执行器的尖端[8]。Qiu 等提出以 Krisch 边缘算子卷积和评价粗聚焦清晰度、以图像高频成分比评价精聚焦清晰度的双重算法,准确度达到±4 μm[9]。Bilen 等以方差函数计算清晰度,选择 Fibonacci 法作为搜索策略对微夹钳聚焦,1 倍镜头下的定位准确度可达 2.7 μm[10]。

上述研究主要是将图像聚焦技术作为不同应用的中间环节,缺乏对该技术在显微视觉环境下的综合定量评价。本文建立了偏移率等系列性能指标,对 13 组清晰度计算函数在显微视觉条件下的无偏性、单峰性、分辨力进行定量评价,选出适用于粗/精聚焦的清晰度函数,并建立分步爬山搜索策略,实现显微自动聚焦。以精密电液伺服阀衔铁气隙为对象,利用测距传感器验证聚焦搜索的重复性。最后,实现了衔铁气隙动力学特性的自动测量,获得了驱动电流-衔铁气隙之间的关系,为其装配/装调提供可靠依据。

2 实验装置组成

本文所用的实验装置是为某企业开发的精密微装调设备的一部分。如图 1 所示,实验装置包括传送微组件的 2 维精密滑台(Y 向和 Z 向滑台,分辨力为2 μm)、用于聚焦的精密直线滑台(X 向滑台,分辨力为 2 μm)、显微镜(Navitar,2.0×)、摄像机(DH-SV2001,单像素为 4.4 μm×4.4 μm)和环形光源组成。为了对比聚焦精度,在显微成像单元旁加装有激光测距位移传感器(ZX2-LD50L,分辨力为 1.5 μm)。

测试对象为某精密电液伺服阀的衔铁区域(12 mm×4 mm)。如图 2 所示,衔铁与基体间的气隙(0.34 mm)是决定流体控制精度的关键,对性能影响显著。实际生产中,需要根据气隙偏差进行衔铁或垫片更换及紧定螺钉调节等装调作业,使静态气隙更为均匀、加电时气隙变化线性度更高。

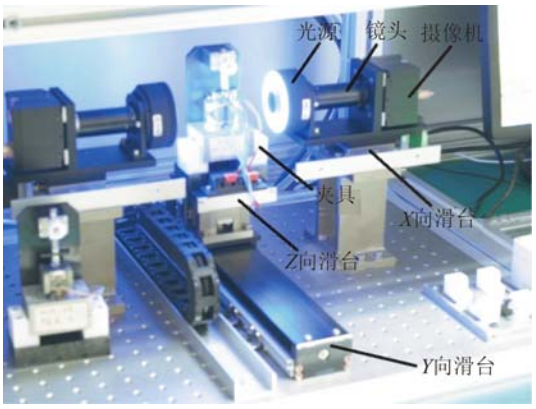

图 1 显微视觉单元的结构组成

Fig. 1 Framework of optical microscopy unit

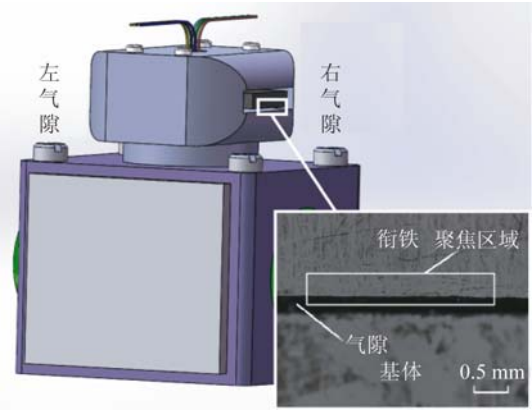

图 2　待测的伺服阀及其衔铁气隙结构

Fig. 2　Servo-valve and its armature gap

系统的工作过程如下：首先由传送滑台将伺服阀组件传送到操作区，再采集衔铁区的图像，并计算图像清晰度，驱动滑台搜索物面，待聚焦准确后测量微小特征，最后根据测量结果对组件进行装配和装调。

3　清晰度函数评价及搜索策略

3.1　清晰度计算函数

本文采用梯度算子类函数、统计函数和图像熵函数 3 类函数计算清晰度，并通过对比这 3 种函数的性能选出最佳函数。

(1)梯度算子类函数：Roberts 算子及衍生函数（$F_{Roberts}$、$F_{Rob\text{-}Energy}$）、Sobel 算子及衍生函数（F_{Sobel}、$F_{Tenengrad}$、F_{SML}）、Prewitt 算子函数 $F_{Prewitt}$、梯度绝对值函数 F_{SMD}、梯度平方和函数 F_{EOG}、Laplace 算子函数 $F_{Laplace}$ 以及 Brenner 算子函数 $F_{Brenner}$。

(2)统计函数：方差函数 $F_{Variance}$ 和自相关函数 $F_{Vollaths}$。

(3)图像熵函数 $F_{Entropy}$。合焦图像与离焦图像之比，熵函数多样性大，即信息熵高。

3.2　清晰度函数的特征参量

为了评价函数的聚焦特性，采用近焦区宽度 W_{close} 和拐点到合焦点距 $D_{I\text{-}to\text{-}F}$ 为设计参量。首先引入近焦区与远焦区的概念。如图 3 所示，以 $F_{Tenengrad}$ 为例，函数顶点处为合焦点。合焦点附近为近焦区，成像相对清晰，曲线陡峭。将成像模糊、曲线平缓的区域称为远焦区。远焦区函数曲线可近似为与位置坐标轴平行的线段：

$$y = b, b = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1} F_i, \tag{1}$$

F_i 是在第 i 个图像采样位置处的函数归一化计算值。临界点（X_n，F_n）到该线段的距离 $d=|F_n-b|$，F_n 为临界点处图像清晰度的计算值，X_n 即为临界点采样位置。当满足 $d>\alpha$，α 为阈值（取 0.001），同样，从右到左可以获取右临界点的坐标。左、右临界点的距离 $W_{close}=|X_R-X_L|$ 为近焦区宽度，X_L，X_R 分别为左、右临界点的采样位置。粗聚焦步长应小于函数近焦区宽度。

一般而言，拐点距合焦点较近，如图 3 所示。以从右侧远焦区开始近焦搜索为例，在拐点与合焦点之间，导数 $F'_{Tenengrad}$ 绝对值减小并趋于零。当导数在右侧远焦区取最小值时，即为拐点，拐点到合焦点的距离为 $D_{I\text{-}to\text{-}F}$。

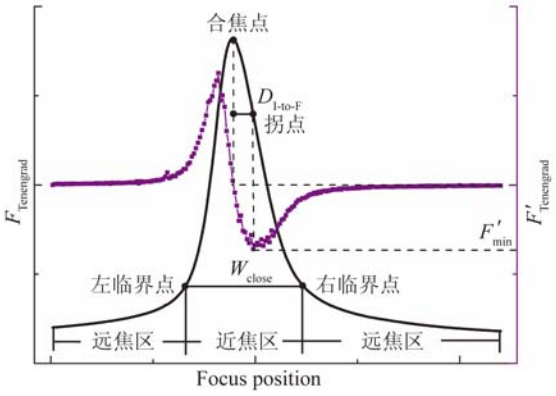

图 3　Tenengrad 函数特征分析

Fig. 3　Mathematical analysis of $F_{Tenengrad}$

3.3　清晰度函数的性能评价指标

在各清晰度函数的近焦区，函数的综合性能指标评价设计如下：

(1)表达函数无偏性的最值点偏移率：

$$R_{offset}=\frac{2\delta|X_{max}-X_0|}{W_{dof}}, \tag{2}$$

其中：X_{max} 为函数取最大值的点，X_0 为真实聚焦清晰点，δ 为相邻采样点的物理间距，W_{dof} 为镜头的景深（～20 μm）。偏移量反映函数是否满足无偏性，若 $R_{offset}>1$，则不满足无偏性。

(2)函数清晰度比率为计算值变化的比值：

$$R_a=F_{max}/F_{min}, \tag{3}$$

其中 F_{max}，F_{min} 分别为函数的最大值和最小值。

(3)综合衡量合焦点附近陡峭程度的参量为：

$$K=(K_L+K_R)/2, \tag{4}$$

$$K_L=\frac{F(X_{max})-F(X_{max}-\varepsilon)}{\varepsilon},$$

$$K_R=\frac{F(X_{max})-F(X_{max}+\varepsilon)}{\varepsilon},$$

其中：K_L，K_R 为清晰度函数在合焦点左、右的陡峭度，X_{max} 为清晰度函数最大值的采样点，ε 为位置偏移量。峰值陡峭度越高，定位准确性越好。

(4)以局部极大值点个数 N_p 衡量抗干扰能力和单调性。在近焦区内的局部极值点越少，搜索落入局部极值的可能性越小。

(5)清晰度的计算时间 T_c。

3.4 分步爬山法

为消除导轨回程误差对聚焦精度的影响，本文改进了传统爬山法，在清晰度函数 2 个特征参量的基础上，建立了分步爬山法，减少往复搜索次数，搜索过程如图 4 所示。搜索步骤如下：

(1)在粗聚焦阶段，以大步长 S_c（$S_c<W_{close}$）搜索清晰度函数的近焦区。

(2)以步长 S_1 搜索清晰度函数的右临界点。由临界点计算公式，定义阈值因子：

$$\rho=d/b, \tag{5}$$

d，b 的定义见式(1)。记录两相邻采样点的函数值 F_1 和 F_2，计算相对变化率：

$$r'=r/F_1, \tag{6}$$

$$r=\delta|F_1-F_2|/S_1, \tag{7}$$

其中 δ 为相邻采样点的间距。当 $r'>\rho$，缩小步长，否则继续搜索。

(3)以步长 S_2 寻找精聚焦清晰度函数的拐点，记录函数值 F'_1，F'_2，F'_3，相邻两计算值的变化量 $\Delta_1=F'_2-F'_1$，$\Delta_2=F'_3-F'_2$。根据拐点的性质，当 $\Delta_2\leqslant\Delta_1$，应缩短步长。

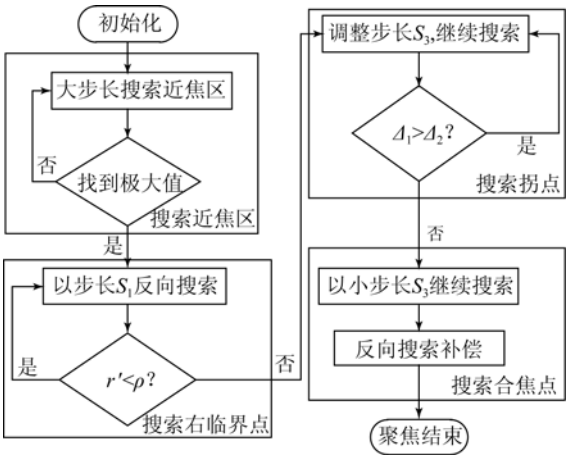

图 4　改进的分步爬山搜索法流程

Fig. 4　Flow chart of Modified Mountain Climbing Searching (MMCS) method

(4)根据 F 函数值，以步长 S_3 搜索合焦点，找到聚焦清晰平面所在的小区域，反向移动一个合焦点偏差估计距离。

4　实验验证与分析

4.1　聚焦清晰度函数的综合性能

应用多种清晰度函数计算采集图像序列(共 220 幅，相邻间隔 4 μm，实例见图 2)，结果见图 5。图中，函数值均进行了归一化处理，F_k 为第 k 个计算值，F_{max} 为最大计算值，F'_k 为归一化值，$F'_k=F_k/F_{max}$。

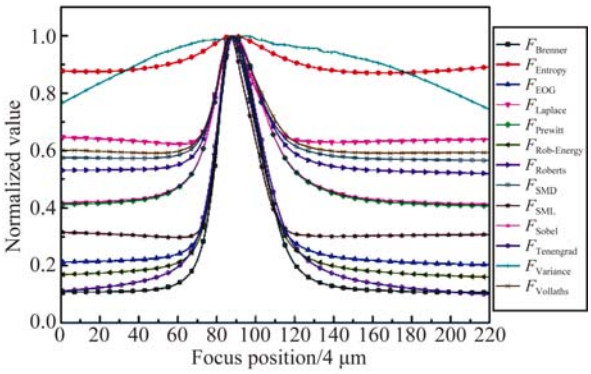

图 5　各函数计算的图像序列清晰度

Fig. 5　Calculation of sharpness from images using different functions

利用 3.3 节中的评价指标对 13 组清晰度函数的计算结果(图 5)进行分析(表 1)，结论如下：

(1) $F_{Variance}$ 近焦区的宽度 W_{close} 最大，为 720 μm，其次是 $F_{Tenengrad}$ 的 W_{close} 为 408 μm，其余函数的 W_{close} 均远小于方差函数。计算各函数的 $D_{I\text{-}to\text{-}F}$，除 $F_{Variance}$ 外，其余 $D_{I\text{-}to\text{-}F}$ 均在 40～72 μm。$F_{Variance}$ 在近焦区波动较大，而且没有明显的拐点。

(2) $F_{Variance}$ 的无偏性 R_{offset} 为 2.4，不满足无偏性。此外，$F_{Laplace}$ 和 $F_{Prewitt}$ 的 R_{offset} 是 0.8，偏移量较大。其余均满足无偏性。

(3) $F_{Tenengrad}$ 和 $F_{Brenner}$ 的清晰度比率较高，分别为 10.06 和 9.43。

(4) F_{SML}，$F_{Tenengrad}$，$F_{Rob\text{-}Energy}$，$F_{Brenner}$，F_{EOG} 函数的陡峭度超过 0.022，这意味着在精聚焦阶段搜索过程中，其合焦面更易分辨。

(5)除 $F_{Variance}$ 外，各函数在近焦区均严格满足单调性。但 $F_{Entropy}$，$F_{Laplace}$，F_{SML} 等在各自的远焦区不是严格单调递增的。

（6）F_{EOG}，$F_{Rob\text{-}Energy}$，$F_{Tenengrad}$ 函数的计算时间分别为 42，43，46 ms，其它函数的计算时间不超过 32 ms，原因是这 3 个函数的平方运算多，计算复杂度高。

综上，方差函数的近焦区较宽，可设置较大的粗聚焦搜索步长，减少采样次数，但无偏性较差，仅适合在粗聚焦阶段使用。对精聚焦而言，$F_{Tenengrad}$ 函数的无偏性、清晰度比率、单调性等均理想，但耗时较长；而 $F_{Brenner}$ 与 $F_{Tenengrad}$ 的性能接近，因此选择 $F_{Brenner}$ 函数在精聚焦阶段计算清晰度。

表 1　清晰度评价指标的计算结果

Tab. 1　Calculation results of sharpness evaluation indexes

	W_{close}/μm	$D_{I\text{-}to\text{-}F}$/μm	R_{offset}	N_p/个	R_a	K	T_c/ms
$F_{Brenner}$	276	60	0.4	0	9.43	0.025 6	21
F_{SMD}	264	44	0.4	0	1.77	0.012 4	16
F_{EOG}	256	64	0.4	0	4.94	0.029 1	42
$F_{Roberts}$	256	44	0.4	0	1.93	0.012 4	16
$F_{Rob\text{-}Energy}$	296	56	0	0	6.26	0.024 7	43
F_{Sobel}	328	40	0	0	2.42	0.011 3	19
$F_{Tenengrad}$	408	54	0	0	10.06	0.022 1	46
$F_{Prewitt}$	332	52	0.8	0	2.45	0.013 5	20
$F_{Laplace}$	152	48	0.8	0	1.61	0.019 8	14
F_{SML}	160	60	0	0	3.36	0.032 7	32
$F_{Variance}$	720	—	2.4	12	1.35	0.001 9	18
$F_{Vollaths}$	204	44	0	0	1.69	0.015 4	11
$F_{Entropy}$	220	72	0	0	1.14	0.001 8	5

4.2　聚焦搜索策略对比实验

按图 4 流程进行衔铁气隙聚焦实验。总搜索范围约为 8 mm，以方差函数计算粗聚焦阶段的清晰度，步长 S_c 取为 640 μm。在精聚焦阶段，以 Brenner 函数和 Tenengrad 函数计算清晰度并进行比较，近焦区搜索步长 S_1 约为 $W_{close}/4$；拐点搜索步 $S_2 < D_{I\text{-}to\text{-}F}$；步长 S_3 为最终聚焦步长。对 Brenner 函数：$S_1 = 70$ μm，$S_2 = 40$ μm，$S_3 = 4$ μm；对 Tenengrad 函数：$S_1 = 100$ μm，$S_2 = 36$ μm，$S_3 = 4$ μm。

用测距传感器测量传感器到激光反射物面的距离，记录聚焦位置到反射面的距离 l_i，每组聚焦 20 次，以聚焦测量结果的标准差 S 衡量重复性（表 2）。其中 T_f 为所耗费的时间。

表 2　自动聚焦实验结果

Tab. 2　Results of auto-focusing experiments

	分步爬山法		传统爬山法	
	Tenengrad	Brenner	Tenengrad	Brenner
S/μm	3.95	4.04	5.61	7.91
T_f/s	14.41	12.72	16.28	14.69

与传统爬山法相比，分步爬山法往复运动次数少，从而抑制了滑台回程误差的影响，聚焦重复精度为 4 μm，为镜头景深的 1/5，重复精度提高约 24%；同时缩短了聚焦时间。此外，Tenengrad 函数的聚焦准确度相对更高，而 Brenner 函数的聚焦效率更高，也间接验证了 4.1 节函数性能的分析结果。

4.3　伺服阀气隙的测试实验

静态气隙尺寸测量的具体过程为：以上述算法对衔铁和基体分别聚焦，提取两者边缘，其中一条边缘以最小二乘法拟合直线，另一条边缘等间隔取点计算到该直线的平均距离，再将其换算为实际气隙值 g_i。用工具显微镜（STM6-F10）对同一气隙测量多点求平均，并与 g_i 进行对比。分析 10 组测量数据发现：本方法的测量值为 358.8～365.1 μm，标准差为 1.9 μm；而工具显微镜的测量值为 352.2～368.4 μm，标准差为 5.37 μm。二者均值的相对偏差为 0.36%。本文中聚焦和测量均为自动化操作，测量一次耗时约 40 s，而用工具显微镜则要手工对焦和取样，耗时约 2 min。

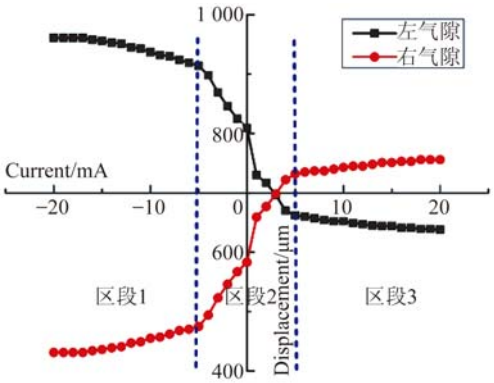

图 6　加电过程中伺服阀气隙变化

Fig. 6　Variation of gaps with applied current

加电状态气隙变化线性度是伺服阀的另一重要指标，本文结合上述算法测量加电（分辨率为 1 mA）状态下的气隙变化，通过模板匹配法获取变化量。由图 6 可知，当电流为 0 时左气隙比右气隙

大将近 226 μm。加电过程中气隙变化可分为 3 段,左右变化率也不相等。在区段 2,左右两侧气隙随电流变化率的绝对值分别为 25.2 μm/mA 和 25.7 μm/mA,气隙位移变化明显;在区段 1,左右气隙的变化率分别为 2.8 μm/mA 和2.6 μm/mA;而区段 3 的变化率分别为 1.5 μm/mA 和。上述结果为微装配/装调提供了实验依据。

5 结 论

本文建立了偏移率等系列性能指标,对多种清晰度计算函数在显微视觉条件下的无偏性、单峰性和分辨力进行了综合评价。其中,方差函数的近焦区域较宽,搜索步长较大,但无偏性较差,适合在粗聚焦阶段使用;而 Tenengrad 函数的无偏性、清晰度分辨力、单调性等性能均较理想,但计算时间偏长;Brenner 函数的性能与 Tenengrad 函数接近,并且计算时间适中,适合在精聚焦阶段计算清晰度。

在传统爬山法的基础上,结合清晰度函数的特征参量建立了分步爬山法。该方法减少了往复搜索次数,消除了滑台回程误差对聚焦精度的影响,提高了聚焦的重复性和效率。

利用自动聚焦算法测量伺服阀气隙,并与工具显微镜的测量结果对比,相对偏差为 0.36%,能满足测量精度要求,而且显著改善了测量效率。

参考文献:

[1] YE X, GAO J, ZHANG Z J, *et al.*. Robotic microassembly for meso-scale application [J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2015, 42(2): 142-148.

[2] WASON J D, WEN J T, GORMAN J J, *et al.*. Automated multiprobe microassembly using vision feedback [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(5): 1090-1103.

[3] 娄志峰,王晓东,由博,等. 精密微小组件压装技术及仪器[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(6): 1605-1611.
LOU ZH F, WANG X D, YOU B, *et al.*. Pressing-fitting technology and instrument for precision small parts [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1605-1611. (in Chinese)

[4] 唐永龙,张之敬,张晓峰,等. 微装配正交精确对准系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(7): 1542-1550.
TANG Y L, ZHANG ZH J, ZHANG X F, *et al.*. Design of precise alignment orthogonal system used in micro-assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1542-1550. (in Chinese)

[5] 周丽平,孙志峻,张泉. 显微视觉系统的自动聚焦及控制[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3): 807-812.
ZHOU L P, SUN ZH J, ZHANG Q. Auto-focusing and control of micro-vision system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 807-812. (in Chinese)

[6] MAIER A, NIEDERBRUCKER G, STENGER S, *et al.*. Efficient focus assessment for a computer vision-based Vickers hardness measurement system [J]. *SPFE*, 2011, 8000(17): 477-526.

[7] LI F D, XU D, SHI Y L, *et al.*. Motion-based microscopic camera calibration and application on micro tube-hole insertion [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 53103-53109.

[8] LIU J, GONG Z, TANG K, *et al.*. Locating end-effector tips in robotic micromanipulation [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(1): 125-130.

[9] QIU Y R, LI Y H, CHEN Y X, *et al.*. Experiments on image processing for micro-assembly [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 333-335(1): 924-928.

[10] BILEN H, HOCAOGLU M A, UNEL M, *et al.*. Developing robust vision modules for microsystems applications [J]. *Machine Vision and Applications*, 2012, 23(1): 25-42.

作者简介:

徐 征(1973—),男,河南郑州人,博士,副研究员,1997 年、2000 年于吉林工业大学分别获得学士和硕士学位,2004 年于大连理工大学获得博士学位,主要从事微纳集成制造的研究。E-mail: xuzheng@dlut.edu.cn

通讯作者:

王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,1989 年于南京航空学院获得学士学位,1992 年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位,1995 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事微装配技术与系统、精密仪器等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)