

文章编号 1004-924X(2006)03-0468-04

# 基于图像处理的微装配自动调焦系统

段瑞玲,段惠波,李庆祥,李玉和,杨再华  
(清华大学 精密仪器及机械学系,北京 100084)

**摘要:**介绍了一个基于图像处理的自动调焦系统,该系统由光学显微镜、CCD、力矩电机和齿轮传动机构等组成。调焦系统中采用粗/精结合的调焦方法,即首先采用基于 Krisch 边缘检测算子的清晰度评价函数对被测物体进行粗调焦,并在计算机上采集了包含目标的大致轮廓和边缘的显微图像;然后针对全景图像上的某个目标区域采用基于高频分量的清晰度评价函数进行精调焦,使得显微图像显示出更多的纹理细节。实验中清晰度评价函数算法均采用 Windows 下的 Visual C++ 实现。实验结果表明,该自动调焦的系统精度可达  $\pm 4.8 \mu\text{m}$ ,基本上满足了微装配任务的调焦精度要求。

**关键词:**微装配;自动调焦;图像平滑;清晰度评价函数

**中图分类号:**TH742.9 **文献标识码:**A

## Micro-assembly auto-focusing system based on image processing

DUAN Rui-ling, DUAN Hui-bo, LI Qing-xiang, LI Yu-he, YANG Zai-hua

(Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on the image processing technology, an auto-focusing system consisted of optical microscope, CCD, moment motor and drive gear etc, was presented. In combination of coarse with fine adjustment method, this system applied Krisch-image edge gradient operator to evaluate the entire microscopic image of the micro-object for its coarse focus position, the system also used the sharpness function based on high frequency component to evaluate the certain domain of the microscopic image for fine adjustment. The sharpness functions used in the experiment were programmed with Visual C++, and the experimental results show that the position accuracy of auto-focusing system is less than  $\pm 4.8 \mu\text{m}$ , which satisfies the focusing requirement of the micro-assembly.

**Key words:** micro-assembly; auto-focusing; image smoothing; resolution evaluation function

## 1 引言

自动调焦是一种保障成像系统获取高清晰度图像的技术,最早应用在照相系统中,随着精密仪器向高精度、自动化方向的发展,它的应用范围也

迅速扩大,并成为显微成像系统中不可缺少的部分<sup>[1]</sup>。在对微器件成像时,对物镜的分辨率要求很高,焦深很小。因此在当前对像调焦清晰后,如果对象稍有位置变动或对稍有误差的其它物体成像,图像就变得模糊,如不采用调焦措施,则会影响微器件的识别和测量,因此必须有一套使显微

收稿日期:2005-04-22;修订日期:2006-04-18.

基金项目:973 国家重点基础研究发展计划“高性能电子产品设计制造精微化、数字化新原理和新方法”的子课题“超精表面制造和改性中的纳米粒子行为与分子迁移机制”(No. 2003CB716201)。

系统快速自动调焦的系统。本文主要介绍的就是为一个微型器件装配系统设计的自动调焦系统。

## 2 系统总体方案

整个自动调焦系统分为三个模块,一是成像模块,由显微镜、CCD 和图像采集卡组成,用于采集微器件图像并传输到计算机中进行处理。第二是信息处理模块,主要由微处理器和信息处理软件组成,该模块负责对采集的图像进行预处理、清晰度评价,最后发出调焦信号,控制驱动电机调节显微镜和物面之间的距离。第三是机电控制模块,由接口电路、驱动电路、调焦电机和传动装置组成,用于接收计算机信号,并驱动电机转动,实现调焦。整个系统如图 1,其结构关系如图 2。

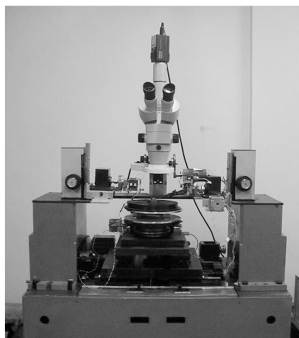


图 1 自动调焦系统总体图  
Fig. 1 Auto-focusing system

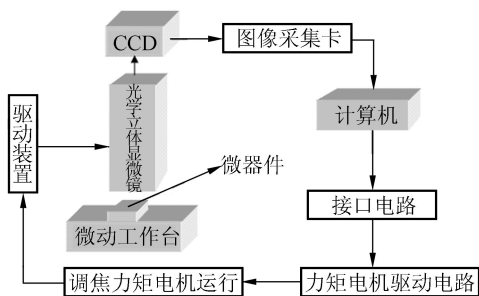


图 2 系统结构关系图  
Fig. 2 System framework

### 2.1 系统硬件平台

系统硬件中光学显微镜采用 NIKON 公司的 SMZ-2T 型立体显微镜,放大倍率较小。照明为可见光,物镜的倍率为(1 × ~ 6.3 ×)。焦深范围 0.019 ~ 0.227 mm,视场范围 0.4 ~ 46.0 mm。

工作距离为 30 ~ 100 mm;CCD 采用 MINTRON 的 MTV-1801C 型,其像素 604(H) × 588(V)、分辨率大于 450 行电视扫描线;采集卡采用北京中自公司的 OK-M20H 黑白图像采集卡。另外还包括 A/D 转换器、调焦力矩电机及其驱动装置、微处理器等。

### 2.2 系统软件平台

整个软件由 Visual C++ 6.0 编写,主要完成清晰度计算、图像数据存储、识别、调焦电机控制以及微处理器的显示等。其中主程序流程如图 3 所示,软件部分主要由输入模块、图像处理模块和输出模块 3 个模块组成。

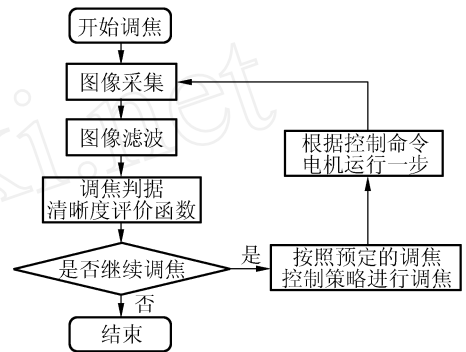


图 3 自动调焦流程图

Fig. 3 Auto-focusing flow chart

#### (1) 输入模块

能够实时连续地采集图像。该模块直接面对硬件部分,把图像采集卡所采集的图像信号存储到计算机中。

#### (2) 图像处理模块

图像处理是软件的核心模块。该模块对输入的图像进行分析得出电机的控制信号。获得的原始图像由于受到噪声的影响,会导致判断离焦状态不准确,因此首先要对图像进行去噪等预处理。

消除噪声后,再对图像的清晰度进行评价比较,并自动给出调焦策略,决定是否要进行调焦,以及给出调焦的方向。

#### (3) 输出模块

图像处理模块给出了调焦信号,该信号由输出模块转化成电机的控制信号,控制电机进行调焦动作。

### 3 系统关键技术

#### 3.1 图像预处理

由于噪声、光照等原因,系统获得的原始图像质量并不高,所以需要进行预处理,以有利于提取系统所感兴趣的信息。图像的预处理既可以在空间域实现,又可以在频域内实现。下面分别介绍本系统中对光线和噪声影响的消除方法。

##### (1) 消除光线影响

由于 CCD 图像传感器在光线较暗时,成像效果较差,因而有必要对它的灰度值进行修正以增强对比度。本文主要采用修正灰度直方图的方法。

##### (2) 消除噪声影响

图像在成像过程中会引入各样的噪声,采取的消除方法也不同。图像信号经过降噪后应满足光滑性和相似性的准则。由于图像的边缘与噪声都是高频分量,如果采取低通滤波器的方法,则在消除噪声信号的同时也降低了图像的对比度,使得物体的边界变得模糊,最终使后续的清晰度评价函数效果受到影响。因此,本文采用小波的图像消噪方法。

如果图像信号  $f(n)$  被噪声污染后为  $s(n)$ ,那么基本的噪声模型表示为:

$$s(n) = f(n) + e(n), \quad (1)$$

其中  $e(n)$  为噪声,  $e(n)$  为噪声强度。

小波变换的目的就是要抑制噪声  $e(n)$  以恢复图像信号  $f(n)$ 。在这个噪声模型下,用小波分析方法对图像信号降噪的过程为:

(1) 小波分解过程:首先选择一种小波,对信号进行 3 层小波分解;

(2) 作用阈值过程:对小波分解得到各层系数选择一个阈值,并对细节系数作软阈值处理;

(3) 重建过程:降噪处理后的系数通过小波重建恢复原始信号。

#### 3.2 清晰度评价函数计算

图像清晰度评价函数选取是自动调焦系统的核心部分。在自动调焦系统中,为了确定正焦位置,需要计算清晰度函数的最大值。本文采用粗、精结合的自动调焦方法,粗调焦用来确定大致的焦平面,精调焦用来检测准确的焦平面。

##### (1) 粗清晰度评价函数

由于光学显微镜具有较短的焦深,采集的图像在离焦时边缘就会变得模糊。图像边缘又是图像的基本特征,因此通过检测图像边缘梯度的变化就能判断出图像的离焦状况。粗调焦函数用于搜索粗略的正焦位置,使采集的图像出现清晰的边缘轮廓。

粗调焦采用 Krisch 清晰度评价函数,它是在 Krisch 边缘检测算子基础上改进的一种函数,即用整幅图像中每个像素的 Krisch 边缘检测算子的梯度值的和作为系统的清晰度评价函数。其计算原理是对图像中的每个像素都用表 1 所示的 8 个模板进行卷积,每个模板都对某个特定边缘方向做出最大响应,所有 8 个方向的最大值作为该点的边缘梯度值  $T(x, y)$ 。最后将图像上每个点的边缘梯度值的和作为图像的清晰度值,即

$$J = \sum_{m, n} T(x, y), \quad (2)$$

Krisch 清晰度评价函数综合考虑了图像中每个像素周围的 8 个方向,把 8 个方向中梯度最大的值作为该点的梯度,这更符合梯度的定义。实验中,首先对采集的图像进行小波去噪处理,然后用 Krisch 卷积核计算每个像素的  $T(x, y)$  值,最后得出每幅图像的清晰度值。

表 1 Krisch 卷积核

Tab. 1 Krisch convolution kernel

-3 -3 +5	-3 +5 +5	+5 +5 +5
-3 0 +5	-3 0 +5	-3 0 -3
-3 -3 +5	-3 -3 -3	-3 -3 -3
0°方向	45°方向	90°方向
+5 +5 -3	+5 -3 -3	-3 -3 -3
+5 0 -3	+5 0 -3	+5 0 -3
-3 -3 -3	+5 -3 -3	+5 +5 -3
135°方向	180°方向	225°方向
-3 -3 -3	-3 -3 -3	-3 -3 -3
-3 0 -3	-3 0 +5	-3 0 +5
+5 +5 +5	-3 +5 +5	-3 +5 +5
270°方向	315°方向	

##### (2) 精清晰度评价函数

粗调焦后图像出现清晰轮廓,开始进入精调

阶段。精调焦是为了使图像中更多细节体现出来。图像细节包含了大部分图像处理中所需的图像特征,而且是图像的高频信息表现。图像中高频信息越多,图像就越清晰,光学系统成像质量就越好。如果系统离焦,就会造成图像中高频信息的丢失,使图像细节变得模糊。因此,精调焦采用了图像的高频分量评价方法。

由采样定理可知,对于由  $N \times M$  像素组成的图像所表示的最高空间频率为  $(N/2 \times M/2)$ , 设采样间隔为单位长度,则最高频率分量为  $G(N/2, M/2)$ , 表示为:

$$G(N/2, M/2) = \frac{\left| \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x, y) \exp[-i(x+y)] \right|}{\left| \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I(x, y) \right|}, \quad (3)$$

粗调阶段图像已呈现清晰的轮廓,因此在精调阶段,只是针对视野中央的一块  $128 \times 128$  的很小区域的  $G(N/2, M/2)$  进行了计算。

### 3.3 电机反馈控制

控制系统是整个调焦系统的重要组成部分,是自动调焦实现的保证。调焦电机按搜索方式进行控制。初始时刻,正确的调焦方向是未知的,因此人为设置一个参考方向。其过程就是在这个方向上移动,然后按反方向移动。同时为了使调焦时间最短,首先粗调,取大步距快速遍历焦距范围,在确定对比度的大致位置后,再精调,再在某一区域内进行小步距的调整,最后达到对焦。

由于实验中对调焦速度有要求,因此对电机的控制有快速和高稳定性要求,从而要求电机的驱动响应快速、稳定。本调焦系统中力矩电机电源采用脉宽调制(PWM)集成芯片 SG3731 的驱动电路,原理图如下:

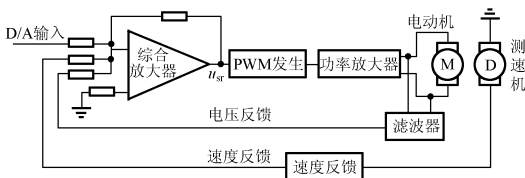


图 4 驱动电路原理图

Fig. 4 Driving circuit principle

## 4 自动调焦精度实验

实验中成像系统是 NIKON 公司的 SMZ\_2T 型立体显微镜,照明为非相干光,物镜的倍率为  $(1 \times \sim 6.3 \times)$ , 焦深范围是  $0.019 \sim 0.227$  mm。实验中调节显微镜使放大倍率为  $6.3 \times$ , 焦深为  $19 \mu\text{m}$ 。

### 实验 1:粗、精调焦算法实验

采集微器件的各个离焦位置图像,在正焦面前后采集了 55 幅图像,采样间隔为  $15 \mu\text{m}$ 。然后分别用粗调焦和精调焦函数进行计算,得到图像清晰度函数曲线如图 5 所示。从理论上分析实验结果表明,粗调后能保证粗调结果在正焦面前后  $30 \mu\text{m}$  的范围内。

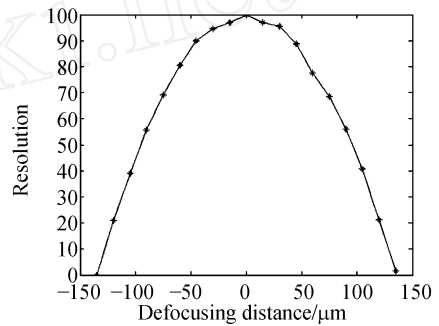


图 5 微器件 Krisch 清晰度函数曲线

Fig. 5 Krisch sharpness function curve

粗调结束后,实际物距在  $[-30 \mu\text{m}, 30 \mu\text{m}]$  的范围内进入精调阶段。精调函数的调焦范围要大于这个范围。精调时对正焦面左右  $40 \mu\text{m}$  的图像进行分析,而且只考虑每幅图像中心  $128 \times 128$  的区域。对 55 幅图像用精调函数进行评价得到的曲线如图 6 所示。从图中可以看到,在较

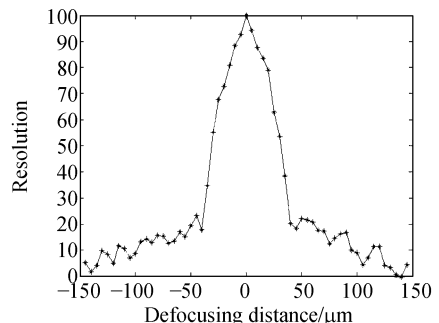


图 6 微器件精调焦函数曲线

Fig. 6 Fine focusing function curve

大的范围内,高频分量法的调焦曲线,并不是一个光滑的单峰,而是含有大量的侧峰。

### 实验 2:自动调焦系统实验

在工作台上放置样品,然后在调焦范围  $\pm 130 \mu\text{m}$  内人为离焦,调焦完成后,记录电感测微仪读数,重复 12 次。测量数据如表 2 所示。数据多次测量平均值为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (4)$$

其中  $n = 1, 2, 3, \dots, n_0$ 。

表 2 测量数据

Tab.2 Measured data

测量次数	1	2	3	4	5	6
离焦位置 $\mu\text{m}$	-129	-127	-134	-130	-129	-133
调焦后焦点位置 $\mu\text{m}$	-3	4	4	5	6	3
测量次数	7	8	9	10	11	12
离焦位置 $\mu\text{m}$	127	133	136	125	133	128
调焦后焦点位置 $\mu\text{m}$	-6	5	3	-4	-2	3
平均值 $\mu\text{m}$	1.5					
标准差	4.0					

多次测量标准偏差为:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (5)$$

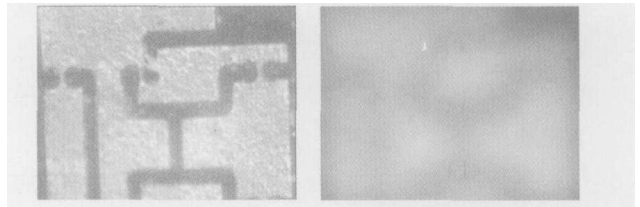
### 参考文献:

- [1] 李庆祥,王东生,李玉和.现代精密仪器设计[M].北京:清华大学出版社,2004.  
LI Q X, WANG D S, LI Y H. *The design of modern precise instruments* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 李玉和.基于光学显微镜的微器件装配系统关键技术的研究[D].北京:清华大学,2001.  
LI Y H. *Research on key technologies for micro-parts assembly system based on optical microscope* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2001. (in Chinese)
- [3] 门涛,陈建安.基于平滑阈值函数的小波图像去噪[J].计算机工程与科学,2004,26(8):50-52.  
MEN T, CHEN J A. Wavelet denoise image based on smoothing threshold function[J]. *Computer Engineering and Scientifics*, 2004, 26(8):50-52. (in Chinese)
- [4] ASHOK A, NEIFELD M A. Information-based analysis of simple incoherent imaging systems[J]. *Opt. Express*, 2003 (11), 2153-2162.
- [5] HUGHLETT E, KAISER P. An autofocus technique for imaging microscopy[C]. *IEEE Int Conf on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1992:93-96.
- [6] YEO T T E, ONG S H. Auto-focusing for tissue microscopy [J]. *Image and Vision Computing*, 1993, 11(10): 629-639.
- [7] 杨再华.显微系统自动调焦方法研究[D].北京:清华大学,2004.  
YANG Z H. *Research on auto-focus technology of microscopy system* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)

作者简介:段瑞玲(1979—),女,汉族,山西省晋城市,现在清华大学攻读博士学位,主要从事微器件装配及微观图像处理工作。E-mail:duanrl03@mails.tsinghua.edu.cn

其中  $n = 1, 2, 3, \dots, n_0$ 。

微器件调焦前后最清晰的图像与调焦前不清晰的图像如图 7 所示。



(a) 调焦后图像

(b) 调焦前图像

(a) A image after focusing (b) A image before focusing

图 7 微器件调焦前后对比图像

Fig.7 Contrast of image on micro-part

## 5 结 论

综上所述,系统精度基本上能满足要求,显微镜的最小焦深为  $19 \mu\text{m}$ ,实验中的标准偏差都小于焦深,使重复调焦时能够保证图像清晰。调焦精度也与微器件的特征有关,从实验结果可知,微器件轮廓明显,空间信息丰富,调焦精度相对就高;而微器件表面特征不明显,灰度变化少,则调焦误差相对就大些。因此,立体显微镜系统适合于空间信息较丰富的三维微器件的自动调焦。