

文章编号 1004-924X(2011)12-2992-07

## 离散噪声图像的光斑质心算法及其硬件实现

樊巧云\*, 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院  
精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要:**针对现有的光斑质心算法无法直接处理含有离散噪声点的图像,提出一种不依赖去噪预处理和噪声点剔除后处理,本身具有抗单点噪声能力的光斑质心定位算法,并通过现场可编程门阵列(FPGA)实现了该算法。首先分别标记背景像素、噪声像素和光斑像素;然后通过对相邻像素标记的判断,完成对当前像素的标记;同时对属于同一光斑的像素进行质心参数累加,但不累加和存储判断为真正噪声点的像素。与现有方法相比,该方法能够充分利用FPGA的并行处理能力,在图像像素输出的同时完成光斑质心提取和噪声点像素去除,而且不需要存储预处理图像和噪声点像素,节省了存储空间。该方法为由于图像传感器长时间曝光而引起的高亮度离散噪声光斑图像的处理提供了有效的途径。

**关键词:**噪声图像;光斑;质心算法;现场可编程门阵列

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111912.2992

## Spot centroiding algorithm for discrete noise image and its hardware implementation

FAN Qiao-yun\*, ZHANG Guang-jun

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology,  
Ministry of Education, School of Instrumental Science and Opto-electronics  
Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

\* Corresponding author, E-mail: fqy2003@aspe.buaa.edu.cn

**Abstract:** A spot centroiding algorithm immune from noise pixels is proposed to improve the existing centroiding algorithms that can not process images with discrete noise pixels directly, and it is achieved by a Field Programmable Gate Array(FPGA). This algorithm does not depend on noise pre-process or post-process to eliminate noise pixels. Firstly, the algorithm marks the background pixel, noise pixel and the spot pixel, respectively, then each pixel is marked after it is compared with the neighbouring one. At the same time, centroid parameters that belong to the same spot are accumulated, while the real noise pixel is bypassed. Compared with currently existing algorithms, this method takes full advantage of the parallel processing ability of the FPGA. It can extract spot centroid coordinates and eliminate the noise pixel simultaneously when the image pixel is output, the pre-process image is not needed and the storage space is saved. This algorithm is especially suitable for processing

收稿日期:2011-03-14;修订日期:2011-04-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61008032)

the spot image with discrete and high-brightness noises caused by long exposure time.

**Key words:** noisy image; spot; centroiding algorithm; Field Programming Gate Array(FPGA)

## 1 引言

光斑图像是图像处理中常见的图像信息,光斑质心是光斑图像的重要特征,常用于航空航天技术中姿态测量部件星敏感器的星点定位、太阳敏感器的太阳光斑定位等。实际应用中所拍摄的光斑图像经常有各种噪声,如电子噪声、环境噪声等<sup>[1]</sup>,其中由图像传感器引起的噪声经常表现为离散的单像素点,其噪声灰度值较大,无法通过阈值去掉,且图像传感器的曝光时间越长,这种噪声点越多,所以在曝光时间较长的应用中如星敏感器,其星点光斑的定位必须有一定的抗噪声能力。

现有技术无法直接对含有噪声点的光斑图像进行光斑质心定位。一种常用方法是:先通过各种滤波或阈值选取方式对图像进行预处理,然后再对图像光斑进行质心定位,但这样无疑要增加较大的数据存储空间来保存预处理的图像;而且,由于事先要对光斑图像进行预处理,所以无法实现光斑质心的实时提取,从而影响了光斑图像的处理速度;此外,由于需要对光斑图像进行预处理,预处理操作通常在 PC 机或 ARM(Advanced RISC Machines)处理器或 DSP(Digital Signal Processing)中实现,影响了器件的集成化和小型化<sup>[2-8]</sup>。另一种光斑质心定位方法为:先将噪声点当作单像素光斑处理,然后根据光斑的总像素个数去除这种噪声点<sup>[9-11]</sup>,由于该方法首先将噪声当作光斑来处理,所以需要预留最大光斑所需要的存储空间,如图像中真实光斑为 6 个,噪声点为 5 个,最大光斑需要的参数存储空间为 12 字节,那么,在处理这幅图像时所需的存储空间为 $(6+5) \times 12 = 132$  字节,所以这种方法处理单点噪声较多的图像将需要很大的存储空间。为此,本文提出一种抗单点噪声的光斑质心定位方法及装置,可在提取光斑质心的同时去除光斑图像中的噪声点,节省数据存储空间,并可实现光斑质心的实时提取。

## 2 光斑质心提取和噪声去除

为了从背景中识别出像光斑,采用不同标记来区分背景像素、噪声像素和光斑像素。首先,将当前像素灰度值与预定的阈值比较,小于阈值则标记为背景标记,大于阈值则标记为噪声标记或光斑标记,具体为:如果相邻像素标记都为背景标记,则当前像素标记为噪声标记,如果相邻像素标记中有光斑标记或噪声标记,则当前像素标记为光斑标记。这里的相邻像素定义为当前像素的左像素、上方像素和右上方像素。然后,根据相邻像素标记就可以识别该像素属于那个光斑,并对该光斑对应的质心参数组值进行累加。如果当前像素标记为背景标记或噪声标记,则不执行相应的识别和累加操作,从而实现在去除噪声的同时提取光斑质心。对整个图像像素处理结束后,根据各个光斑最终质心参数组累加值,按照一阶矩质心计算公式(1)计算其质心行列坐标。

$$X_c = \frac{\sum_{y=1}^m \sum_{x=1}^n I(x, y) \times x}{\sum_{y=1}^m \sum_{x=1}^n I(x, y)}, Y_c = \frac{\sum_{y=1}^m \sum_{x=1}^n I(x, y) \times y}{\sum_{y=1}^m \sum_{x=1}^n I(x, y)} \quad (1)$$

所述质心参数组值就是指公式(1)中的分子、分母的值,即灰度值与坐标值乘积的累加值和灰度值的累加值。公式(1)中, $I(x, y)$ 表示输入图像像素的灰度值, $x, y$ 是该像素对应的行列坐标, $X_c, Y_c$ 分别为光斑质心的行列坐标。

图 1 是该算法的详细流程图。为标记方便,本文背景标记记做 0,噪声标记记做 1,光斑标记记做以 2 为初始值的整数。

步骤 1:将相邻像素,即左方像素、上方像素和右上方像素初始化为背景像素标记 0,之后读取光斑图像的第二个像素。

步骤 2:判断当前像素的灰度值是否大于预设阈值,如果是,则该像素可能为噪声点,也可能为光斑像素,需执行步骤 3 进行进一步判断;如果不是,则执行步骤 8;

预设阈值一般取为图像像素灰度均值加 5 倍

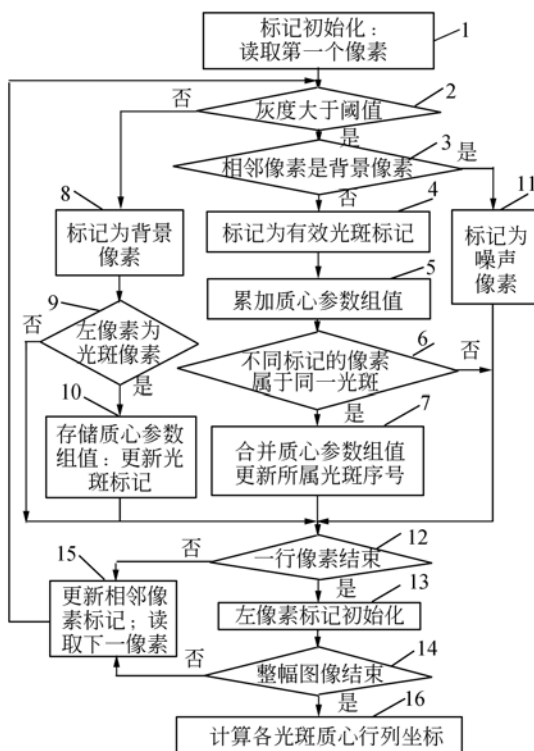


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of centroiding algorithm

噪声均方差,本应用中,图像像素灰度为 0~255,图像像素灰度均值为 1~2,噪声均方差约为图像饱和值的 1%,所以本应用中预设的灰度阈值取 15。

步骤 3:判断当前像素的左方像素和上方像素是否均为背景像素,即判断左方像素和上方像素的标记是否为 0,如果是,当前像素可能是噪声像素,则执行步骤 11;如果不是,则确定当前像素为有效光斑像素,进一步执行步骤 4;

步骤 4:根据当前像素的相邻像素的标记来标记当前光斑像素,之后执行步骤 5,标记当前像素的具体过程为:

A:判断当前像素左方像素的标记值是否大于 1,如果大于 1,说明当前像素和左方像素为同一光斑,则将当前像素标记为左方像素的标记值;否则,执行 B 操作;

B:判断当前像素上方像素的标记值是否大于 1,如果大于 1,说明当前像素和上方像素为同一光斑,则将当前像素标记为上方像素的标记值;否则,执行 C 操作;

C:判断当前像素的上方像素的标记值是否等于 1,如果其值等于 1 且当前像素的右上方

像素的标记值大于 1,说明当前像素和右上方像素为同一光斑,则将当前像素标记为右上方像素的标记值;否则,说明当前像素可能属于一个新的光斑,则将当前像素标记为一个新的光斑标记。

步骤 5:累加与当前像素标记相同的所有像素对应的质心参数组数值,之后执行步骤 6,

步骤 6:判断当前像素的左方像素或上方像素,判断其标记值是否大于等于 1,且标记值与当前像素标记不同,如果是,说明出现了同一光斑有不同光斑标记的情况(如图 2(a)中斜体标记的像素),此时则需要执行步骤 7 进行同一光斑不同标记累加值的合并,如果不满足该条件,则不需要合并操作,直接执行步骤 12。

步骤 7:合并不同标记的同一光斑质心参数组值,如果不是与标记为 1 的像素合并,则需要更新当前像素所属光斑序号。如图 2 中所示的左下方光斑中的第 2 行第 4 个像素,其上方像素的标记值为 4,左方像素标记值为 5,则将标记 5 对应的质心参数组累加值与标记 4 对应的质心参数组累加值相加,结果更新为所属光斑 4 新的质心参数组累加值,并将标记 5 对应的所属光斑序号也更新为 4,如图 3 所示。

步骤 8、9、10:将当前像素标记为背景像素标记 0,然后判断当前像素的左方像素是否为有效光斑像素,即判断当前像素的左方像素的标记值是否大于 1,如果是,则说明光斑的一行有效像素结束,则存储左方像素标记对应的所属光斑质心参数组值,同时光斑标记值加 1 用于标记下一个光斑标记;之后执行步骤 12;否则,左方像素的标记值等于 1 或小于 1,说明左像素为背景像素或噪声像素,所以不进行质心参数组值累加和存储,直接执行步骤 12;

步骤 11:将当前像素标记为噪声像素 1,之后执行步骤 12;

步骤 12、13、15:判断一行像素是否结束,如果是,则将左方像素标记初始化为背景像素,之后执行步骤 14;否则,将当前像素的左方像素标记更新为当前像素标记,将当前像素的上方像素标记更新为右上方像素标记,将当前像素的右上方像素标记更新为当前右上方像素相邻的右方像素的标记,以备读取该行的下一个像素,并存储当前像素的标记值,之后读取该行下一个像素,同时存储当前像素的标记值,之后读取该行下个像素,返

回步骤 2;

步骤 14:判断一幅图像是否结束,如果不是,执行步骤 15,之后读取下一行第一个像素,返回步骤 2;如果是,则执行步骤 16;

步骤 16:根据各光斑的最终质心参数组累加值,按照公式(1)计算各光斑的质心行列坐标。

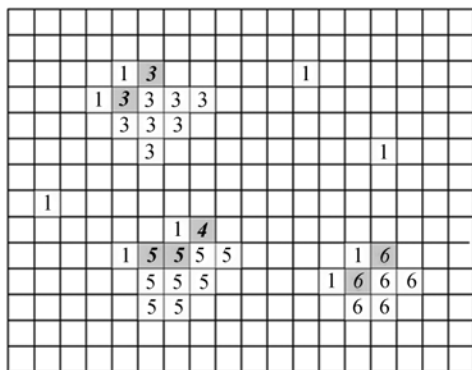


图 2 光斑图像的像素标记示意图

Fig. 2 Pixel flag for spot image

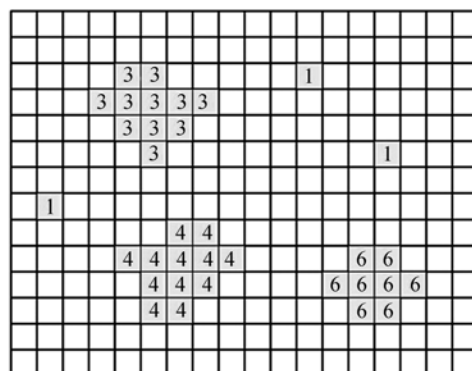


图 3 光斑图像的所属光斑序号图

Fig. 3 Spot index pixel belonging to spot image

图 2 是采用上述方法对某光斑图像标记完成后的示意图,其中阴影覆盖的区域为噪声点或有效光斑,其它没有标记的像素为背景像素。图 3 是根据相邻像素标记判断的噪声和当前像素所属光斑序号结果。

### 3 硬件实现

本文基于 Xilinx 公司的 Virtex 系列现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)芯片 XCV300 实现了抗噪声的光斑质心定位方法,其实现的功能框图如图 4 所示,由光斑识别单元、质心参数组数据累加单元和质心坐标

计算单元组成。光斑识别单元接收图像各像素坐标及灰度信息,输出质心参数组累加控制信号,用于控制所识别的各对应光斑的质心参数组数据正确累加;质心参数组数据累加单元接受灰度值大于阈值的像素的坐标及灰度信息,以及来自光斑识别单元的控制信号,正确累加各光斑对应所有像素的质心参数组数据,并输出到质心坐标计算单元;质心坐标计算单元计算各个光斑对应的质心坐标,并将计算结果输出。

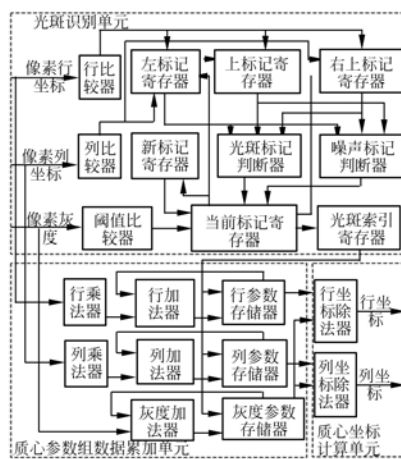


图 4 FPGA 实现功能框图

Fig. 4 Functional diagram implemented by FPGA

光斑识别单元由阈值比较器、左标记寄存器、上标记寄存器、右上方标记寄存器、新标记寄存器、当前标记寄存器、光斑标记判断器、噪声标记判断器、行比较器、列比较器和光斑索引寄存器组成。其中,阈值比较器用于判断当前像素的灰度值是否大于预设值,左标记寄存器、上标记寄存器、右上方标记寄存器、新标记寄存器和当前标记寄存器用于存储并输出对应左像素、上方像素、右上方像素、新的标记值和当前像素的标记值;光斑标记判断器和噪声标记判断器用于判断当前大于阈值的像素是属于某个有效光斑的像素,或者是可能的噪声点像素;行比较器用于判断当前一行像素是否是一幅图像的最后一行,列比较器用于判断当前像素是否是一行像素的最后一个像素;光斑索引寄存器用于存储像素标记对应其所属光斑的序号,从而建立像素标记与光斑序号的索引,以保证各光斑质心参数组数据的正确累加。

质心参数组数据累加单元由行乘法器、列乘法器、行加法器、列加法器、灰度加法器、行参数存

存储器、列参数存储器、灰度参数存储器;其中,行乘法器、列乘法器分别用于计算像素灰度值与行坐标的乘积、像素灰度值与列坐标的乘积;行加法器、列加法器和灰度加法器分别用于累加当前像素灰度值与行坐标乘积、灰度值与列坐标乘积和灰度值与其所属光斑当前所对应的参数组值;行参数存储器、列参数存储器和灰度参数存储器分别用于存储各对应光斑的质心参数组数据。

质心坐标计算单元由行坐标除法器 and 列坐标除法器,其分别用于计算各个光斑对应的质心行坐标和列坐标,具体为计算光斑各像素灰度值与行坐标乘积的累加值除以光斑各像素灰度累加值,所得商为对应光斑质心的行坐标;计算光斑各像素灰度值与列坐标乘积的累加值除以光斑各像素灰度累加值,所得商为对应光斑质心的列坐标。

用型号为 XCV300 的 FPGA 芯片实现上述算法,总的资源占用情况为:499 Slices(16%),467 Slice Flip Flops(7%),838 LUT(14%),7 Block RAM(43%)。

## 4 实验

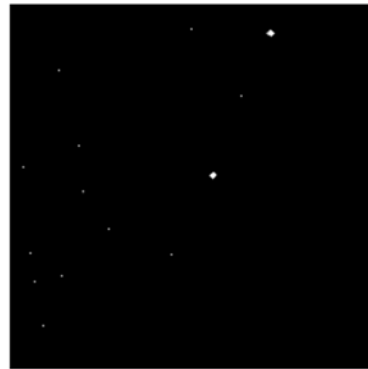
表 1 是本文方法与方法一(先高斯滤波去噪后提取光斑质心,ARM 处理器实现)、方法二(先高斯滤波去噪后提取光斑质心,FPGA 实现)在存储空间和处理时间方面的比较。从表 1 可以看到图像越大,噪声点个数越多,本文方法的效率越高。

表 1 不同方法性能比较

Tab.1 Performance comparison of different methods

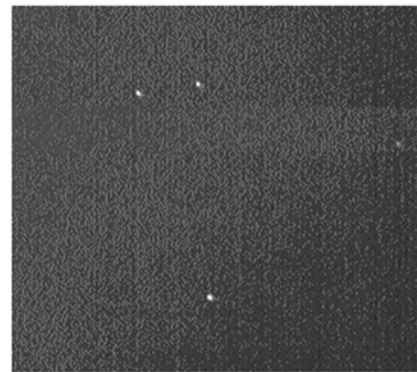
	方法一	方法二	本文方法
存储空间	整幅图+星点数据	整幅图+星点数据 +噪声点数据	星点数据
处理时间	滤波预处理时间+ 串行质心算法时间	滤波预处理时间+ 并行质心算法时间	并行质心 算法时间

图 5(a)是某型号星敏感器在 200 ms 曝光时间情况下拍摄的实际星图截图(截取一部分进行放大),在此基础上,通过修改曝光时间,拍摄到不同噪声点个数的多幅星图。另外,通过去掉遮光罩,拍摄了有明显环境杂光的星图,如图 5(b)所示。表 2 是分别采用现有方法和本文方法对这些图像处理的结果。



(a)正常情况下拍摄的星图

(a)Image captured under normal condition



(b)有明显环境杂光情况下拍摄的星图

(b)Image captured in ambient stray light

图 5 星敏感器实际拍摄图像

Fig.5 Real images captured by star sensor

表 2 不同方法性能比较

Tab.2 Performance comparison of different methods

	噪声点数/ 星点数	512 pixel×512 pixel 图像		
		方法一	方法二	本文方法
耗时/ms(20 MHz)	1	800	32	13
	10	800	32	13
存储空间/kbit	2	2 100	2 116	8
	10	2 100	2 188	8

对于图 5(a)所示的离散噪声图像,当图像大小为 512 pixel×512 pixel,噪声点个数与星点数相当或更高时,存储空间能节省至少 95%,处理时间大概是方法一的 1%~2%,是方法二的 20%~30%。对于图 5(b)所示的星图,即噪声点相接时本文方法不能使用。

## 5 结 论

本文所提出的光斑质心定位方法在处理离散噪声图像过程中比现有方法节省图像存储空间。另外,由于不需要预处理,处理速度能与图像像素的输出同步,从而能够实现图像光斑的实时提取。

### 参考文献:

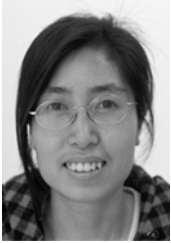
- [1] 张辉,袁家虎,刘恩海. CCD 噪声对星敏感器星点定位精度的影响[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5):629-634.  
ZHANG H, YUAN J H, LIU E H. CCD noise effects on position accuracy of star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5):629-634. (in Chinese)
- [2] GIANCARL R, DOMENICO A. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement[J]. *ACTA Astronautica*, 2003,50:135-147.
- [3] BURNS R B, SHAH J, HONG C, *et al.*. Object location and centroiding techniques with CMOS active pixel sensors[C]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, 50(12):2369-2377.
- [4] 李广泽,刘金国,郝志航. 基于双正小波的星点细分定位方法研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增): 217-221.  
LI G Z, LIU J G, HAO Z H. Research of subpixel subdivision location algorithm for star image based on biorthogonal wavelet[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(Supp.):217-221. (in Chinese)
- [5] 刘丹平,胡渝. 提高光斑图像质心精度的去噪方法[J]. 光电工程, 2005, 32(8):56-58.  
LIU D P, HU Y. Laser speckle image denoising with high accuracy centroid [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(8):56-58. (in Chinese)
- [6] 谌廷政,吕海宝. CCD 细分技术方法研究与应用[J]. 光学学报, 2002, 22(11):1396-1399.  
CHEN T Z, LV H B. CCD subdivision method and application [J]. *Acta Optical Sinica*, 2002, 22(11):1396-1399. (in Chinese)
- [7] 李德良,阮锦. 一种适用于星敏感器的星点提取方法[J]. 激光与红外, 2009, 39(12):1348-1350.  
LI D L, RUAN J. Method adapting to the star sensor's star extraction [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(12):1348-1350. (in Chinese)
- [8] 肖锋钢,刘建国,曾淙泳,等. 一种新型提高光斑图像质心精度的去噪方法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(12):3683-3685.  
XIAO F G, LIU J G, ZENG C Y, *et al.*. New denoising method for improving speckle image centroid accuracy [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(12):3683-3685. (in Chinese)
- [9] 陈兴美,严壮志. 基于 FPGA 的红外光斑中心实时检测[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4):401-405.  
CHENG X M, YAN ZH ZH. Real-time detection of infrared spot based on FPGA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4):401-405. (in Chinese)
- [10] 张广军,江洁,郝雪涛,等. 用于星敏感器的星点图像定位方法及装置:中国,03105743. 8[P].  
ZHANG G J, JIANG J, HAO X T, *et al.*. Star centroiding method and device for star sensor: China,03105743. 8[P]. (in Chinese)
- [11] 张广军,江洁,樊巧云,等. 快速高精度光斑图像质心定位方法及装置:中国,200610114199. 6[P].

但该方法也有一定的适用场合,如无法处理由环境杂光引起的大片连续噪声,但对由于曝光时间长而引起的图像传感器离散噪声很有优势。对于星敏感器的应用,环境杂光引起的噪声可通过遮光罩来消除,所以对需要长曝光时间的星敏感器,采用本文方法是最好的选择。目前,该方法已成功应用于星敏感器的星点提取中。

ZHANG G J, JIANG J, FAN Q Y, *et al.*. Rapid and high precision centring method and system

for spot image; China, 200610114199. 6 [P]. (in Chinese)

#### 作者简介:



樊巧云(1978—),女,山西黎城人,博士,讲师,2008年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事图像处理、光电测量、天体敏感器及天文导航方面的研究。E-mail: fqy2003@aspe.buaa.edu.cn



张广军(1965—),男,天津人,长江学者,教授,博士生导师,1991年于天津大学精密仪器系获得博士学位,主要从事机器视觉、光电精密测量、天体敏感器及天文导航方面的研究。E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn

#### ● 下期预告

## 压电陶瓷动态模型辨识与控制

陈 辉<sup>1,2</sup>, 谭永红<sup>3</sup>, 周杏鹏<sup>1</sup>, 张亚红<sup>4</sup>, 董瑞丽<sup>3</sup>

- (1. 东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096; 2. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;  
3. 上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 200234;  
4. 桂林航天工业高等专科学校 信息工程系, 广西 桂林 541004)

为了提高精密定位系统中压电陶瓷的控制精度,对压电执行器的动态模型及逆模型进行了研究。首先根据 Weierstrass 第一逼近定理,提出了以多项式函数逼近 Duhem 模型中的分段连续函数  $f(\cdot)$  和  $g(\cdot)$ ,并应用递推最小二乘算法辨识 Duhem 模型的参数  $\alpha$  及  $f(\cdot)$  和  $g(\cdot)$  的多项式系数,建立了压电陶瓷执行器的非线性参数化动态模型。接着,利用辨识结果方便地建立压电陶瓷执行器动态逆模型,避免对压电陶瓷执行器复杂的计算逆模型过程。然后介绍了通过逆补偿和 PID 复合控制对压电陶瓷系统进行控制。实验结果表明:仅通过逆补偿,可在  $0\sim 200\ \mu\text{m}$  内使得控制绝对误差小于  $0.8\ \mu\text{m}$ ,在前馈逆补偿和 PID 环控制下,绝对误差可小于  $40\ \text{nm}$ 。得到的结果验证了算法的有效性。