

# 基于VI的疲劳裂纹在线监测摄像头 自动聚焦系统\*

王建淼, 高红俐\*, 陈 蓓

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 为提高疲劳裂纹在线检测的效率和精度,提出了一种基于视觉识别(VI)的疲劳裂纹在线监测摄像头自动聚焦的方法。该系统主要包括CCD 摄像机、镜头、摄像头云台、NI-PCI运动控制卡、光源照明系统、图像采集卡、计算机以及安装在计算机内的图像处理软件和上位机运动控制软件;利用虚拟仪器技术根据摄像头在图像采集过程中的动作要求,设计了一套运动控制方案,进行了基于LabVIEW图像处理自动聚焦技术的研究,并着重研究了清晰图评价函数的选择和寻优算法的设计;最后,对系统进行了软、硬件的调试。调试结果表明,该系统达到了预期的功能需求和精度要求。

**关键词:** 视觉识别系统; 摄像头自动聚焦系统; 在线监测; 疲劳裂纹

**中图分类号:** TH871.3; TH74; TP23 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2012)12-1400-05

## Camera automatic focus system of on-line fatigue crack propagation monitor based on VI technology

WANG Jian-miao, GAO Hong-li, CHEN Bei

(Key Laboratory of E & M, Ministry of Education & Zhejiang Province,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency and accuracy of the fatigue cracks on-line detection, a camera automatic focus system of the on-line fatigue crack propagation test based on visual identity(VI) technology was supplied. The system included CCD cameras, lenses, camera PTZ, NI-PCI motion control card, a lighting system, image acquisition card, computer and installation of the image processing software and PC motion control software. In accordance with the camera movement requirements during the image acquisition, the motion control structure was designed, the technology of automatic focus that based on image processing developed by LabVIEW platform was carefully studied, and the key focused was put on the research of the choice of the clear figure evaluation function and the design of the optimum algorithms. The software and hardware of the system were debugged. The experimental results show that this system achieves the expected function demand and accurate request.

**Key words:** visual identity(VI) system; camera automatic focus system; on-line monitor; fatigue crack propagation

## 0 引 言

近年来,“疲劳裂纹扩展试验”的研究越来越被人们所重视<sup>[1]</sup>。疲劳裂纹的萌生和扩展是一个复杂而缓慢的非线性演化过程,传统的检测往往由人工来完成

或大部分环节需要人工参与,不仅工作效率低,而且易受到检测人员主观因素的影响,不能保证检测的效率与精度。通过采用机器视觉技术的裂纹在线检测方法,研究者可以直观、精确、实时地完成裂纹的检测和进一步的分析处理。机器视觉裂纹检测方法采用

收稿日期: 2012-06-25

基金项目: 浙江省科技计划(面上)科研资助项目(2007C21080)

作者简介: 王建淼(1987-),男,浙江诸暨人,主要从事机器视觉及嵌入式方面的研究. E-mail: 540155859@qq.com

通信联系人: 高红俐,女,副教授,硕士生导师. E-mail: ghl\_zjut@126.com

摄像头作为疲劳裂纹的实时检测机构,以步进电机驱动摄像头实现摄像头的移动和自动对焦的功能。本课题组已提出一些疲劳裂纹的摄像头运动控制技术,如基于 ARM 运动控制技术<sup>[2]</sup>、基于 NI 运动控制技术<sup>[3]</sup>,以及机器视觉技术的疲劳裂纹自动检测实验系统<sup>[4]</sup>等,但都没涉及到摄像头的自动聚焦方面。

本研究提出的系统在摄像头运动控制的基础上加入摄像头自动聚焦技术,所设计的疲劳试验机将大大降低工人的劳动强度,提高效率,减少人为因素的影响,并实现大时间跨度,从而确保完成疲劳性能的一系列测试。

## 1 摄像头自动聚焦系统总体设计

### 1.1 疲劳裂纹机器视觉检测系统框架

高频疲劳试验机自动机器视觉监测系统的框架,包括 CCD 摄像机、镜头、摄像头云台、PCI-7330 运动控制卡、光源照明系统、图像采集卡、计算机以及安装在 PC 机内的 LabVIEW 开发软件和 NI 图像处理工具包 IMAQ Vision<sup>[5]</sup>。

系统总体结构示意图如图 1 所示。

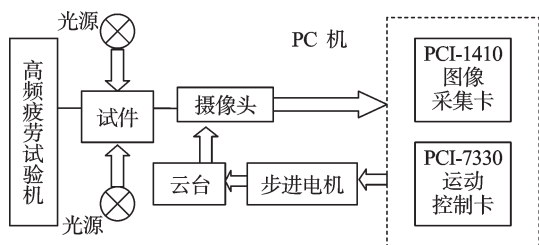


图1 系统总体结构示意图

系统工作流程为:首先使用高频疲劳试验机对试样进行高频疲劳试验,同时将光源照射到试件上,由图像采集卡将 CCD 摄像头采集到的图像传送到计算机内存中,最后通过利用 NI 图像处理工具包 IMAQ Vision 与 LabVIEW 开发软件系统对采集到的数字图像进行处理、测量与判断。

其中,摄像头运动自动调节系统包括开环和闭环两种工作方式。开环方式由用户通过上位机运动控制模块界面操作相应动作按钮来进行摄像头运动调整,闭环方式主要是摄像头的自动聚焦,由图像处理模块计算出图片的聚焦量信号,运动控制根据该信号发命令给运动控制器,运动控制器控制摄像头内置的对焦电机的运动以实现摄像头的自动聚焦。

系统总体流程图如图 2 所示。研究者在进行摄像头自动对焦前,必须调节 XYZ 轴,使得试件的左边缘线出现在摄像头的视野中。

### 1.2 系统功能需求分析

在疲劳试验的进行过程中,裂纹会随着时间的推

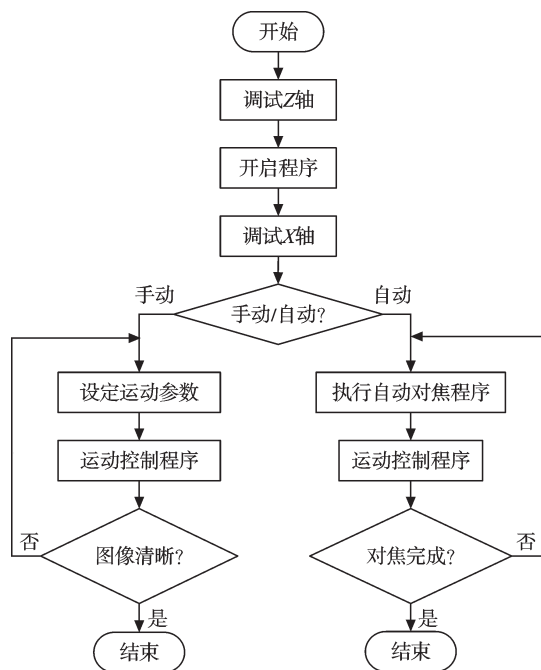


图2 系统总体流程图

移缓慢的扩展,在这个过程中,本研究引入了摄像头在线自动调整技术(主要是摄像头的调焦和对焦)。因此本研究对该系统提出了以下几点要求:

首先,应能在裂纹扩展中更精确地观测裂纹尖端,这就需要通过摄像头的调焦技术实时地放大图像(控制摄像头的变焦电机)和跟踪裂纹(控制摄像头云台的 X 轴和 Y 轴电机,摄像头云台控制已经完成);

其次,应能在裂纹较长的情况下,摄像头的视野不能观测到整个裂纹的时候,适当地缩小图像,实现更好地观测疲劳裂纹的整体情况和扩展趋势;

最后,应解决每回调节焦距后出现的对焦不准的问题,即实现摄像头的自动聚焦(通过 NI-PCI 运动控制器控制摄像头的聚焦电机实现),完善整个系统。

### 1.3 系统关键技术研究

#### 1.3.1 清晰度评价函数

清晰度评价函数主要有图像灰度梯度向量模方和法、Roberts 梯度和、拉普拉斯(8 邻域微分)算子和法这 3 种清晰度评价函数。

第 1 种:图像灰度梯度向量模方和<sup>[6]</sup>。

对于图像序列的第  $K$  幅图像在某图像聚焦窗口  $W$  内的灰度梯度向量模的和为  $G_k$ ,灰度梯度向量模方和为  $G'_k$ 。则:

$$G_k = \sum_{(x,y) \in W} \left\{ [f_k(x,y) - f_k(x+1,y)]^2 + [f_k(x,y) - f_k(x,y+1)]^2 \right\}^{1/2}$$

$$G'_k = \sum_{(x,y) \in W} \left\{ [f_k(x,y) - f_k(x+1,y)]^2 + [f_k(x,y) - f_k(x,y+1)]^2 \right\}$$

$$(K = 1, 2, \dots, M)$$

$G_k$  或  $G'_k$  的值反映了图像系列第  $K$  幅图像在图像聚焦窗口  $W$  内的灰度变化率大小。一幅图像越模糊,图像中灰度变化率越小,  $G_k$  或  $G'_k$  的值越小。最大值的  $G_k$  或  $G'_k$  对应的图像就是最清晰的图像。

第2种:Roberts 梯度和<sup>[7]</sup>。

考虑到像素的交叉位置关系,可采用Roberts 梯度和,具体函数如下:

$$R_k = \sum_{(x,y) \in W} \{|f_k(x,y) - f_k(x+1,y+1)| + |f_k(x+1,y) - f_k(x,y+1)|\}$$

(2)

第3种:拉普拉斯(8邻域微分)算子和<sup>[8]</sup>。

对于图像序列的第  $K$  幅图像,本研究在图像聚焦窗口  $W$  内,对每一个像素在  $3 \times 3$  领域中采用拉普拉斯算子,得到8邻域微分值,然后在  $W$  内求和,得:

$$L_k = \sum_{(x,y) \in W} 8|f_k(x,y) - f_k(x,y-1) - f_k(x-1,y) - f_k(x+1,y) - f_k(x,y+1) - f_k(x-1,y-1) - f_k(x-1,y+1) - f_k(x+1,y+1)|$$

(3)

本研究用3种不同的清晰度评价函数对4组图片进行处理,得到4组数据,接着以聚焦电机行程为  $X$  轴,清晰度评价值为  $Y$  轴建立直角坐标系,并画出坐标图,如图3所示。

图3中,细实线为长裂纹光源暗时图片的曲线,粗实线为长裂纹光源亮时图片的曲线,虚线为短裂纹光源暗时图片的曲线,点划线为短裂纹光源亮时图片的曲线。

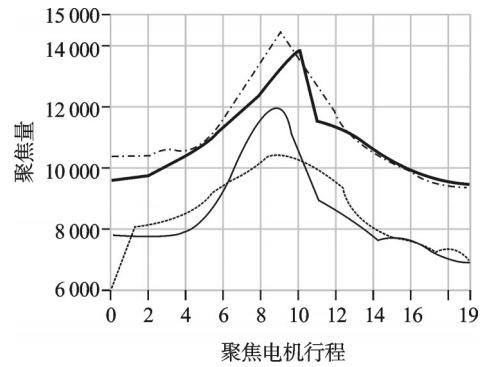
理想的聚焦评价函数的特点<sup>[9]</sup>为:

- (1) 单峰性,即在调焦范围内只有一个极值;
- (2) 无偏性,即只有在系统处于最佳聚焦状态时,聚焦评价函数才能取极值;
- (3) 高信噪比,即在较高的干扰条件下,保证系统能正确检测到离焦信号;
- (4) 计算量小,即通过较少的计算,能快速得出评价函数的结果。

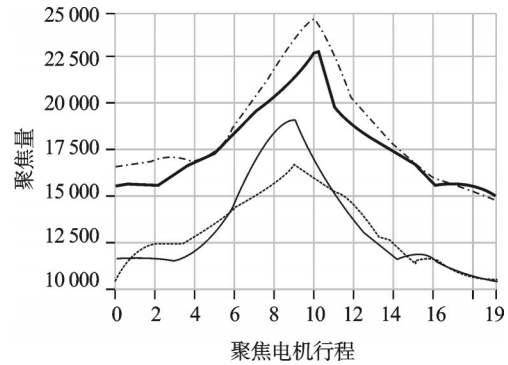
由图3可见,在单峰性和灵敏度上,Roberts 梯度和法在4条曲线上都有明显峰值,效果与另外两种方法相比较好。在计算速度上,本研究对3种评价函数的调焦速度进行测试,结果如表1所示。其中图像灰

表1 清晰度评价函数的速度测试

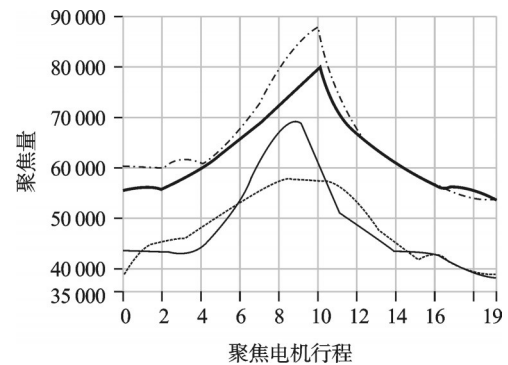
清晰度评价函数	时间/ms
图像灰度梯度向量模方和法	12.14
Roberts 梯度和法	2.28
接普拉斯&邻域微分算子和法	4.66



(a) 灰度梯度向量模方和法



(b) Roberts 梯度和法



(c) 拉普拉斯(8邻域微分)算子和法

图3 3种清晰度评价函数的测试曲线比较

度梯度向量模方函数由于进行大量的平方和开方运算,响应速度最慢,拉普拉斯其次,Roberts 梯度和法不需要复杂的运算,计算量小,速度相对较快。

通过上面的分析可以看出,Roberts 梯度和函数对于该系统来说具有相对较好的调焦特性,更加适用于实时性要求比较高的高频疲劳试验系统,所以该系统选择该函数作为调焦评价函数。

### 1.3.2 搜索方法

本研究采用自适应聚焦搜索算法,该算法可同时实现快速、精确、平滑的视频自动聚焦<sup>[10]</sup>。自适应搜索算法的初始方向示意图如图4所示。

自适应算法初始方向的确定是采用三点比较法来实现的。这里记为  $S_0$ ,  $S_1$  和  $S_2$ 。同时为了在搜索进行的过程中,保持图像聚焦的平滑性,本研究将图像清晰度值归一化之后将清晰度曲线划分成3个不同区

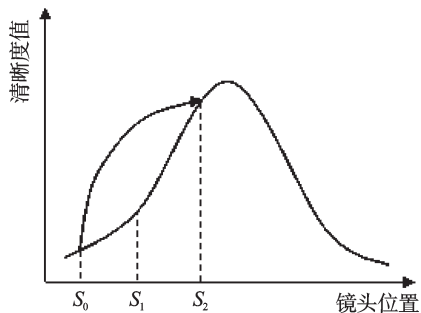


图4 确定初始方向示意图

域<sup>[11]</sup>。步长的自适应调整采用步长系数与基本搜索步长的乘积来实现。计算公式如下:

$$S_{step} = S_{init} \cdot C_{step} \quad (4)$$

式中:  $S_{step}$  —搜索步长,  $S_{init}$  —基本搜索步长。

本研究采用聚焦值连续两次减少来判定聚焦点已过的方法来解决误聚焦现象和离焦现象,并在反方向上以基本步长进行焦点搜索,将清晰度最大值  $S_{max}$  以及与其对应的镜头位置  $P_{max}$  作为聚焦点。

## 2 系统软、硬件设计与实现

### 2.1 系统硬件实现

本研究的机器视觉部分采用图像处理技术和虚拟仪器技术,对试验过程中疲劳裂纹的尺寸进行实时检测。硬件核心器件为NI公司生产的PCI-7330运动控制卡,UMI-7764驱动接口。其他器件为42BYG250FC步进电机、HB202M驱动器、图像采集卡PCI-1410、CCD摄像机等。

该系统的硬件连接示意图如图5所示。

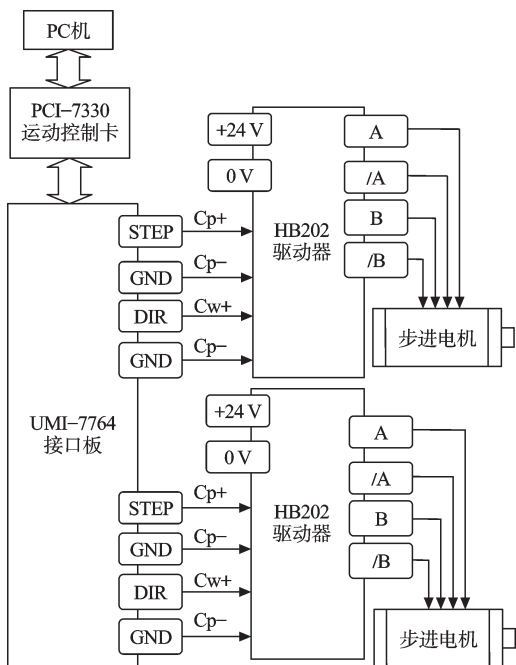


图5 硬件连接示意图

### 2.2 系统软件部分

本研究的软件设计主要是通过摄像头电机的调节实现摄像头的自动聚焦。其总体流程为:上位机采集图像并将图像进行图像处理,并得到图像的聚焦量,系统再将图像的聚焦量信号转化为电机控制信号—串口数据帧,串口数据帧再经串口程序发送至NI-PCI运动驱动器,驱动电机作出相应的电机运动,电机运动完成之后再向上位机发送反馈信号,表明运动已完成并等待下一个串口数据帧,上位机接到串口信号后再进行下一次的图像采集和图像处理,直到得到满足停止条件的聚焦量数组后停止,即完成自动聚焦。

该系统软件整体流程图如图6所示。

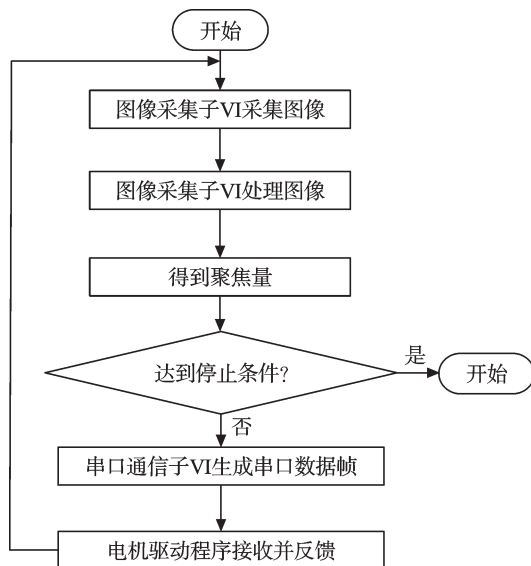


图6 系统软件整体流程图

## 3 试验及实验结果分析

### 3.1 实验

该高频疲劳试验机是由 CCD 摄像头、光源、图像采集卡、云台、运动控制卡、PC 等组成的,其实物图如图7所示。



图7 高频疲劳试验机

测试开始时,试件会被固定在高频疲劳试验机的夹具上,利用激振器(基于DSP技术和FPGA技术研制)产生与系统固有频率一致的激振力,使系统处于共振状态。整个实验过程中,系统将作用在试件上的力通过测力传感器采集转换为电压信号,并经信号调理模块调理后进入现场控制器的数据采集与处理模块,经A/D转换、滤波、数据处理后通过RS232传给上位PC机。在此期间,裂纹图像将会通过PCI-1410和CCD摄像头传入PC。

其测试流程图如图8所示。

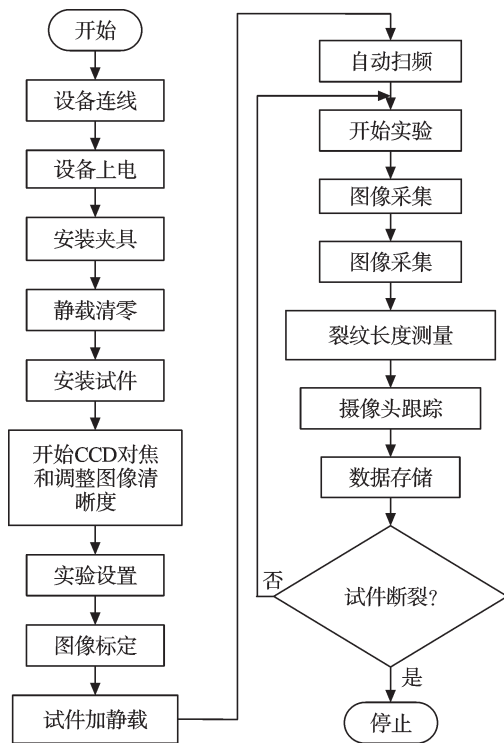


图8 系统实验流程图

### 3.2 实验结果

本研究以Roberts梯度和法作为自动聚焦的核心算法,并根据自适应聚焦搜索算法,结合LabVIEW,在PC机上给出Y方向调焦前后比较效果图,如图9所示。

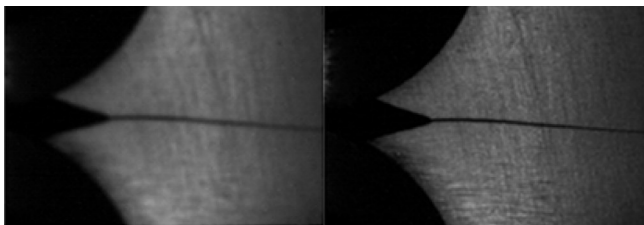


图9 调焦模糊图像(左)调焦清晰图像(右)对比

由以上结果得知,自动对焦点VI对于提高系统的测量精度、减轻工作人员的负担是非常重要的,最后可知该课题的设计基本达到了设定目标。

## 4 结束语

为了实现疲劳实验中对疲劳裂纹的聚焦与跟踪,本研究提出了一种基于VI的疲劳裂纹在线监测摄像头自动聚焦系统。本研究从实际应用的角度出发,采用虚拟仪器LabVIEW,并结合NI的运动控制技术完成了电机运动与聚焦;通过运动控制硬件和LabVIEW软件的编写以进行系统软、硬件和整机的调试实验,并记录实验数据和效果图。

理想的实验结果验证了该系统的可行性,但结果也显现了系统抗干扰能力差的缺点,在该系统运行过程中还不能完全消除电机开启时对CCD摄像头的干扰问题,在一定程度上影响了疲劳裂纹图像的清晰度。因此,接下来的工作就是开展进一步的研究,以求采集到更加清晰准确的裂纹图像,增加疲劳裂纹在线监测系统的准确性和可靠性。

### 参考文献(References):

- [1] 熊峻江. 疲劳断裂可靠性工程学[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 钟建飞,高红俐,周寅. 基于ARM的疲劳裂纹扩展试验摄像头运动控制系统[J]. 机电工程,2011,28(12):1448-1552.
- [3] 周寅,高红俐,钟建飞,等. 基于NI的疲劳裂纹扩展试验摄像头运动控制系统[J]. 机电工程,2011,28(1):58-62.
- [4] 云燕,高红俐,沈姗姗. 基于机器视觉技术的疲劳裂纹自动检测实验系统[J]. 机电工程,2011,28(2):183-187.
- [5] KANCHANOMAIA C. Low cycle fatigue test for solders using solders using non-contact digital image measurement system[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, 17(24):57-67.
- [6] 高赞,姜威. 基于Roberts梯度的自动聚焦算法[J]. 红外与激光工程,2006,35(1):117-121.
- [7] 马武强,何小刚,程永强. 模拟摄像机自动聚焦原理及其电路设计[J]. 太原理工大学学报,2008,39(S2):198-200.
- [8] 盛云,秦亚杰,洪志良. 一种用于数码视频相机的实时自动聚焦算法[J]. 光电工程,2008,35(8):139-144.
- [9] 王欣,安志勇. 基于图像清晰度评价函数的CCD摄像机自动调焦技术研究[J]. 长春理工大学学报:自然科学版,2008,31(1):11-14.
- [10] 周贤,姜威. 基于图像边缘能量的自动聚焦算法[J]. 光学技术,2006,32(2):213-215.
- [11] SACEED M. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

[编辑:张翔]