

The Analysis and Processing of Noise Based on the Embedded Fiber Bragg Grating Image Demodulate System *

BAO Ji-long^{1*}, WU Du-jian^{1,2}, ZHENG De-chun¹, HE Zhong-kun¹

1. Ningbo University of Technology, College of Electronic and Information Engineering, Ningbo Zhejiang 315016, China;

2. East China University of Science and Technology, School of Information Science and Engineering, Shanghai 200237, China

Abstract: With the fast development of embedded technology, the Fiber Bragg Grating (FBG) image demodulate system designed through the embedded microprocessor make it possible to implement real-time and fast processing of a large number of sensory data. Analyzing the characteristics of FBG image captured by the embedded Fiber Bragg Grating (FBG) image demodulate system, this article presents a second-order denoising algorithm unified neighborhood average and distance transform in spatial domain. The experimental results show that using this second-order denoising algorithm inheriting the advantages of neighborhood average and distance transform in image denoising, error of location between light spots would be less than 0.2 pixels, and the demodulate results are satisfactory in the embedded Fiber Bragg Grating image demodulate system.

Key words: demodulation of Fiber Bragg Grating, embedded system, image denoising, neighborhood average, distance transforms

EEACC:7230

嵌入式 FBG 图像解调系统噪声特性分析及处理 *

鲍吉龙^{1*}, 吴都健^{1,2}, 郑德春¹, 何仲昆¹

1. 宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016;

2. 华东理工大学信息科学与工程学院, 上海 200237

摘要: 随着嵌入式技术的迅猛发展, 利用嵌入式处理器构建 FBG 图像解调系统实现大量传感数据的实时、实地快速处理成为可能。分析了嵌入式 FBG 图像解调系统光斑图像特性, 提出基于邻域平均与距离变换相结合的二次空域去噪算法, 实验结果表明, 二次去噪算法继承了邻域平均和距离变换的优点, 用该算法对 FBG 解调系统光斑图像去噪, 并联合光斑定位算法解调 FBG 光斑, 解调精度不超过 0.2 像素, 解调结果十分理想。

关键词: FBG 解调; 嵌入式系统; 图像去噪; 邻域平均; 距离变换

中图分类号: TN919.81; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)01-0092-05

近年来, 光纤光栅传感技术成为研究热点, 因为同电阻应变仪、压电陶瓷应变仪等传统的传感器相比, 光纤光栅传感器具有体积小、结构简单、寿命长、抗腐蚀、抗电磁干扰等诸多优点, 同时还具有传感信息波长绝对编码, 可实现绝对测量及可构成分布传感网络的特点, 使得对大型建筑物、大坝、桥梁等的全方位实时监测成为可能, 应用广

泛^[1-2]。FBG 传感器走向实际应用需要解决的关键技术之一是实现操作方便、成本低廉的 FBG 波长解调技术和设备, 尤其是能进行实时大规模监测的低成本 FBG 传感网络解调技术^[3-4]。现有 FBG 传感网络的复用结构中, 波分复用技术是构成各种复杂和大型 FBG 传感网络的最基本复用技术, 针对这种传感网络的基于 CMOS 的解调技术

基金项目: 宁波市自然科学基金资助 (2006A610004)

收稿日期: 2007-06-13 修改日期: 2007-09-25

也成为目前既经济实用而又比较理想的解调方案^[5-6]。采用 CMOS 图像传感器解调 FBG 光斑时,一般要经过图像去噪、目标定位、距离解调、参量转化等步骤,其中图像去噪是首先需要处理的第一个环节,图像噪声的特性把握和处理的好坏将直接影响到传感信号后续处理的质量,因而也直接影响 FBG 传感网络的测量精度。

图像去噪可以在空域进行,也可以在频域进行,随着嵌入式系统的发展,利用嵌入式处理器构建 FBG 图像解调系统实现大量传感数据的实时、实地快速处理成为可能,在这种系统中空域去噪比频域去噪具有更高的信号处理速度,其算法复杂度也比频域去噪的低。因此,本文针对基于嵌入式微处理器的 FBG 图像解调系统,在分析 CMOS 图像传感器实际捕获的 FBG 光斑图像特征的基础上,提出了基于邻域平均与距离变换相结合的二次空域去噪算法,实验结果表明,用该算法对 FBG 传感系统光斑图像去噪,效果优于单纯的邻域平均法。

1 信号图像噪声特性分析

图 1 为基于嵌入式微处理器的光纤光栅网络解调系统结构图,系统由宽带光源、耦合器、光纤光栅阵列、匹配液、准直镜、闪耀光栅、聚焦透镜、CMOS 图像传感器及 FPGA 片上系统和信息处理软件等组成,在我们的实验中,光纤光栅传感阵列由两个 850nm 波段的光纤光栅组成,图像采集系统在杭州康芯电子有限公司生产的 GW48 系列 SOPC/EDA 实验开发系统上实现,实验得到的传感信号光斑如图 2 所示。

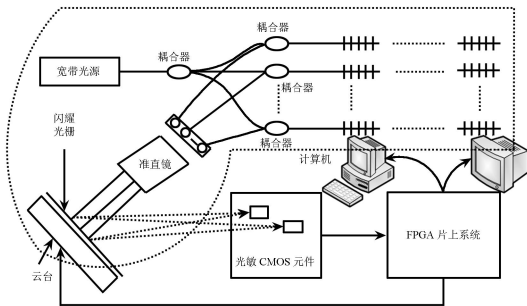


图 1 光纤光栅网络解调系统图

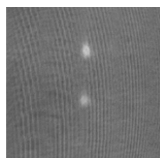


图 2 FBG 阵列传感信号光斑

1.1 图像噪声特征

实际传感信号图像,如图 2 所示,如果未经处

理,都存在着一定程度的噪声干扰。仔细分析 FBG 网络解调系统工作原理、过程和环境,可知图像噪声主要来源于几个方面:(1)系统光路中光学元件制作的不理想,以及系统结构中光学元件相对摆放位置和角度与理想值偏移所带来的噪声;(2)背景光的存在所带来的噪声;(3)电子元器件所固有的电噪声和电路的接触噪声;(4)CMOS 图像传感器像元响应函数不完全一致所带来的噪声。这些图像噪声源的存在,使信号光斑的形状不规则,边缘不清晰;灰度分布规律出现混乱,不再遵从光斑中心到边缘逐次渐减的规律;信号光斑周边出现极有规律的背景噪声,例如星星噪声和衍射、干涉条纹等;此外,由于 CMOS 图像传感器像元响应函数不完全一致,不同 CMOS 像元对同一目标响应的灰度值不同。

噪声源对信号图像综合作用的结果,使含有噪声的图像表现出如下特征:

- (1)光斑灰度总体具有近似对称性,其灰度值分布近似服从高斯分布,光斑边缘部分灰度值小,中心部分光强较强,灰度值大,轮廓形状近似椭圆形;
- (2)光斑边缘轮廓不清晰,细节有闪光,呈现出非对称性;
- (3)信号光斑灰度与背景灰度重叠交叉使图像出现灰度不均匀,边缘处尤其明显;
- (4)当 CMOS 图像传感器连续采集图像时,对同一光栅传感器施加应力前后所对应的光斑会有微小形变。

上面图像特征(1)是 FBG 传感系统信号光斑的典型特征,而图像特征(2)、(3)、(4)正是由噪声引起的,需要我们处理。

噪声的存在恶化了信号图像质量,使信号图像模糊,甚至淹没信号,从而使传感信号的提取、分析变得困难,同时也影响传感系统的测量精度。因此,选择恰当的去噪算法,抑制传感信号图像噪声,是提高传感系统性能,保证测量准确度和精度的重要前提。

1.2 去噪目标

图 2 中每个光斑分别对应着一个不同中心波长的 FBG 光栅传感器,通过测量光斑图像的位移值即可确定该传感器对应的被测对象所发生的变化,所以,FBG 图像解调法的一个主要任务就是确定每个光斑和传感器的对应关系,正确标记光斑,并能实时跟踪光斑的位移变化。

为了实现这个目的,根据噪声特性,可以确定如下去噪目标,其重要级别由高至低:

- (1)去除光斑以外背景噪声,为正确跟踪目标提

供可能;

(2) 去除综合噪声对光斑产生的影响,并弥补光斑强度分布不均匀所带来的干扰;

(3) 消除 CMOS 图像传感器像元响应函数的一致性,使光斑灰度保持原有的连贯性;

(4) 要求去噪算法时间短,去噪后目标定位精度高;

(5) 经过去噪能使图像尽可能恢复出原貌而不发生形变。

需要说明的是,很多文献提出了各种算法去除图像噪声,尽可能恢复图像原貌,而这个目标的重要级别在这里放在最低,这是因为我们研究图像去噪算法的目的,不是拟合图像原貌,满足视觉效果,而是为了准确测定 FBG 图像解调系统信号光斑的位移大小,因此,图像的视觉效果不是我们所关心的。

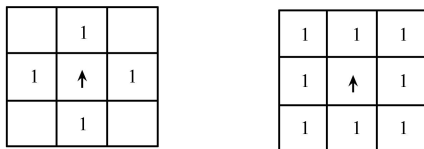
2 图像去噪算法

图像噪声通常与邻域像素有明显差异,去噪算法中常采用邻域加权的方法去除这种差异性,达到去噪的目的。根据对 FBG 图像解调系统图像噪声特性的分析,结合去噪目的,我们借鉴用来求解图像光斑位移的质心法,提出了基于邻域平均与距离变换相结合的二次去噪算法思想,利用二值图像的距离变换原理修正光斑内像素值。

2.1 邻域平均法^[5]

邻域平均法是空域滤波法中典型的一种,是一种线性滤波技术,其基本原理为:对于给定的图像 $P(i, j)$ 中的每个像点 (m, n) ,取其邻域 D ,设 D 含有 M 个像素,取其平均值作为处理后所得图像像点 (m, n) 处的灰度,用一像素邻域内各像素灰度平均值来代替该像素原来的灰度。邻域 D 的形状和大小根据图像特点确定,一般采用 3×3 邻域,分五点邻域平均和九点邻域平均,其模板如图 3 所示。对于 D 为 3×3 邻域的九点邻域平均,点 (m, n) 位于 D 的中心,则像素点 (m, n) 的灰度平均值为

$$\bar{P}(m, n) = \frac{1}{9} \sum_{i=-1, j=-1}^{1, 1} P(m+i, n+j) \quad (1)$$



(a) 五点模板 (b) 九点模板

图 3 邻域平均模板

尽管邻域平均法适合于 FBG 光斑图像去噪、提取光斑,抑制光斑内部灰度值的交叉影响,但是经

处理的光斑内部灰度值分布依然只是近似的高斯分布,灰度交叉影响不能完全消除,导致 FBG 信号后续处理的精度降低。用高斯曲面拟合的方法可以修正这一处理结果,重塑光斑内部灰度分布,可是高斯曲面拟合算法复杂,计算量大,处理时间长,这对嵌入式处理器提出了高要求。因此,为了实现 FBG 图像解调系统大量传感数据的实时、实地快速处理,使这种系统具有更高的信号处理速度,我们提出了基于邻域平均与距离变换相结合的二次空域去噪算法。

2.2 二次去噪算法

国外有学者在对星点光斑定位时采用质心法求解光斑质心位移^[6]。众所周知,质心法可以看成是以灰度为权值的加权形心法。质心法把求解光斑位移转换成求解光斑质心位移,算法简单明确,但是该法将整个目标加权到一点上计算,对于含噪目标,其质心精度难以获得很大提高,计算位移值仍不够精确。为此,我们借鉴质心法的思想,将二维图像的距离变换方法应用于信号去噪,以实现信号二次去噪的目的。

二维图像的距离变换方法是使每个像素的灰度值等于该像素与离其最近的背景像素间的距离。类似质心法,距离变换把光斑中心灰度赋以较大权重,而边缘赋以较小的权重,重塑光斑内部灰度分布,这种做法既避免了传统质心法的片面性,又继承了传统质心法在求解目标位移时原理的正确性和算法稳定性,同时,利用距离变换法重塑光斑内部灰度分布比用高斯曲面拟合法重塑时要快得多。

图 4 说明了一维条件下用两次扫描计算距离变换的概念。其中,(a)为一副一维二值图像,(b)为第一次(前向)扫描的结果,这是从左至右进行的。对每一像素,背景点保留 0,而内部点则用该点到其左面最近的 0 的步数代替。(c)为第二次(后向)扫描的结果,这是从右至左进行的。在这一遍中,每个像素取下列两数中的较小者:(1)该遍扫描的初始值,即第一遍扫描的结果;(2)该点与其右面最近的 0 间的步数值。得到的结果是一副用灰度级反映对象像素与最近边界距离的图像。



图 4 一维距离变换

二维图像的距离变换也采用两次扫描,第一次为前向扫描,自上而下,从左向右,第二次为后向扫描,自下而上,从右向左,变换模板如图 5 所示。其中(a)、(b)为 3 × 3 模板,其衰减因子为 3; (c)、(d)为 5 × 5 模板,其衰减因子为 5。算上衰减因子,模板中的因子是该位置到中心点(模板中 0 的位置)距离的近似值,在模板处理所达的每一位置,模板中的每个元素与其对应的像素值相加而形成两个和的集合。对于模板上的空白位置,则不予处理。扫描处理结果,位于模板中心下方的像素用这些和中的最小值代替。

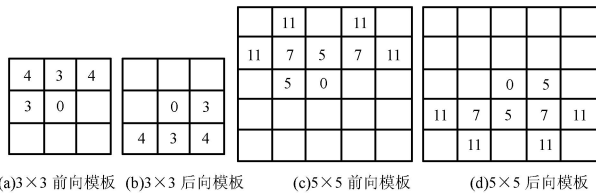


图 5 距离变换模板

2.3 二次去噪算法程序框图

图 6 为应用于嵌入式 FBG 图像解调系统中去噪算法的程序框图。首先,统计由 CMOS 图像传感器采集而得的 FBG 光斑图像的直方图,由于图像中光斑灰度与背景灰度的面积比值不由光斑的移动而改变,面积比值为定值,所以,可以由统计得到的面

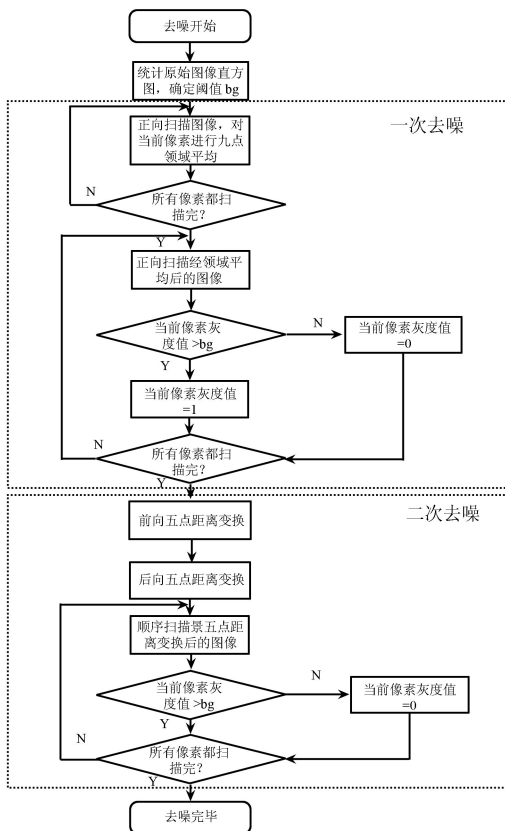


图 6 二次去噪算法程序框图

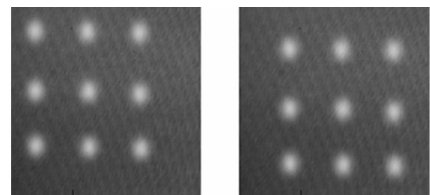
积比值确定阈值 b_g ,提取光斑。图像经九点邻域平均后,利用阈值 b_g 二值化图像,并对此二值化图像顺序实施前向五点距离变换和后向五点距离变换,重塑光斑内部灰度分布。最后,将背景灰度值统一提升为 b_g ,使光斑边缘渐变于背景中,提高后续块匹配的定位精度。

考虑到解调系统中噪声源较多,多种噪声相互叠加,导致图像受噪声的污染程度较深,九点邻域平均模板能使扫描到的像素得到充分平均,抑制噪声的效果比五点邻域模板要好,所以在邻域平均时,选用了九点模板对图像进行平滑。采用距离变换重塑光斑内部灰度时,五点模板的处理点数比九点模板少,能使像素间保持紧密连贯性,重塑后的光斑灰度分布适合块匹配定位,且五点模板的处理速度比九点模板快,所以距离变换时选用了五点模板。

3 实验结果与分析

为了对我们所提出的算法进行评估,我们将二次去噪算法应用于实际传感信号图像的处理和解调。

图 7 为由 9 个不同响应波段的布拉格光栅组成的一个具有对称性的 3 × 3 传感器网络,经由 CMOS 图像传感器采集,显示为 9 个含噪的光斑图像,如图 7(a)所示。给 9 个布拉格光纤光栅施加轴向应力,光栅布拉格中心反射波长将发生位移,由此得出另一副经位移后的传感信号图像,如图 7(b)所示。



(a) 位移前传感信号图像 (b) 位移后传感信号图像

图 7 解调图像

对图 7 所示的两副传感信号图像进行滤波,为了评估算法效果,我们分别采用了空域滤波法中的邻域平均、中值滤波、十字最大值滤波、直方图平滑滤波、插值平滑滤波和经邻域平均与距离变换共同作用的二次滤波,经由后续处理即光斑定位、位移计算后,得到表 1 所示的解调结果。由表 1 可知,九点邻域平均法和插值平滑法效果较好,而经过结合的二次滤波法,在继承了邻域平均和距离变换的优点基础上,其最小绝对误差、最大绝对误差、平均绝对误差项都达到最小值,系统解调精度进一步提高,解调结果十分理想,因此也具有最好的去噪效果。

表1 解调数据

解调结果比对(六种滤波法+块匹配定位)(单位:像素)

距离显示:	标准解调	5点中值	9点中值	5点领域	9点领域	5点二次	9点二次	5点十字	9点十字	直方图平滑	差值平滑
0号光斑	82.6620	81.0042	82.3890	83.0239	82.9955	82.5805	82.7301	82.8834	82.9526	82.9386	82.6474
1号光斑	82.6620	81.8303	82.5394	83.1874	82.7382	82.8314	82.7972	82.9712	82.8842	82.3709	82.4335
2号光斑	82.6620	83.4500	82.5452	83.5363	82.6074	82.5505	82.4892	83.1836	82.9779	82.5918	82.3451
3号光斑	82.6620	83.1663	82.7974	83.1569	82.9647	82.8583	82.7706	82.9782	82.8193	82.8484	82.7669
4号光斑	82.6620	83.2216	82.6431	83.2033	82.8318	82.8328	82.9512	83.0612	82.9224	82.8157	82.5486
5号光斑	82.6620	82.3178	82.4867	82.5014	82.5764	82.8212	82.7772	82.3807	82.5146	82.6025	82.5362
6号光斑	82.6620	83.0604	82.3149	83.1699	82.4516	82.7494	82.6871	82.7713	82.4975	82.4175	82.4375
7号光斑	82.6620	82.4945	82.7526	83.2942	82.7360	82.6539	82.6181	82.7476	82.7034	82.7668	82.8113
8号光斑	82.6620	82.8803	83.1820	82.7339	82.5966	82.6263	82.5870	82.5682	82.5826	82.5161	82.6556
误差显示:											
0号光斑	0.0000	-1.6578	-0.2730	0.3620	0.3336	-0.0815	0.0682	0.2215	0.2906	0.2766	-0.0145
1号光斑	0.0000	-0.8317	-0.1225	0.5254	0.0762	0.1695	0.1352	0.3092	0.2222	-0.2911	-0.2285
2号光斑	0.0000	0.7880	-0.1168	0.8744	-0.0545	-0.1114	-0.1728	0.5216	0.3159	-0.0702	-0.3168
3号光斑	0.0000	0.5043	0.1355	0.4949	0.3027	0.1963	0.1086	0.3162	0.1573	0.1864	0.1049
4号光斑	0.0000	0.5597	-0.0189	0.5413	0.1698	0.1708	0.2892	0.3992	0.2605	0.1537	-0.1134
5号光斑	0.0000	-0.3441	-0.1752	-0.1606	-0.0855	0.1592	0.1152	-0.2812	-0.1474	-0.0594	-0.1258
6号光斑	0.0000	0.3984	-0.3470	0.5079	-0.2103	0.0874	0.0251	0.1093	-0.1644	-0.2445	-0.2244
7号光斑	0.0000	-0.1675	0.0906	0.6322	0.0740	-0.0081	-0.0439	0.0856	0.0414	0.1048	0.1493
8号光斑	0.0000	0.2184	0.5200	0.0719	-0.0653	-0.0357	-0.0749	-0.0938	-0.0794	-0.1458	-0.0064
最小绝对误差:	0.0000	0.1675	0.0189	0.0719	0.0545	0.0081	0.0251	0.0856	0.0414	0.0594	0.0064
最大绝对误差:	0.0000	1.6578	0.5200	0.8744	0.3336	0.1963	0.2892	0.5216	0.3159	0.2911	0.3168
平均绝对误差:	0.0000	0.6078	0.2000	0.4634	0.1524	0.1133	0.1148	0.2597	0.1866	0.1703	0.1427

此外,采用邻域平均法对图像进行滤波,在降低噪声的同时,也使图像变得模糊,特别是边缘和细节处,这通常是这类滤波器存在的缺陷。但有趣的是,邻域平均法存在的这种“缺陷”,却使FBG图像经过平滑去噪后,解调精度反而有所提高,成为一种优势,产生这一奇妙效果的原因来自于我们所研究的图像光斑的特性,及我们的去噪目的与一般的图像处理目的差异。因为邻域平均法模糊了图像细节,也即抑制了光斑细节中的闪光部分,而对于光斑的椭圆形边缘,模糊作用不明显,不会改变光斑的椭圆形状和大小,反而起到纠正边缘灰度值的作用,使光斑边缘得到平滑和渐变效果,同时,邻域平均法采用九点平均,抑制了光斑与背景灰度的交叉影响,采用阈值化法在背景处可以消除噪声,在目标处使光斑灰度自然加权,修正光斑内部灰度值;另外,邻域平均法在一定程度上可以克服前后两帧图像中光斑发生的微小形变。

4 总结

本文对FBG图像解调系统传感信号图像噪声特性及成因进行了深入的研究,在此基础上,在质心法的启发下,充分考虑邻域平均和距离变换的优势,提出了基于邻域平滑与距离变换相结合的二次去噪算法思想。算法继承了邻域平均和距离变换的优点,去噪快速、稳定,对含噪的光斑图像进行解调后,解调距离值的最大绝对误差限制在0.2像素范围内,以至于从光斑距离到波长最后到待测参量的转化时,测量结果具有更高的精度,所以作者所作工作对提高FBG解调系统精度具有实际意义。

参考文献:

- [1] Measures R M. Fiber-optic Bragg Gratings for Bridge Monitoring. Cement Concrete Composites 1997, 9:21-33.
- [2] 李文宏,杨振坤,夏建生. 光纤 Bragg 光栅传感技术及其应用. 传感技术学报. 2002, (3):215-218.
- [3] Simpson Alexander G, Zhou Kaiming, Zhang Lin, Lorna Everall, and Ian Bennion. Optical Sensor Interrogation with a Blazed Fiber Bragg Grating and a Charge-Coupled Device Linear Array [J]. Applied Optics, 2004, 43(1).
- [4] Lee B. Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors [J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2):57-279.
- [5] 鲍吉龙,章献明,陈抗生等. FBG传感网络技术研究. 光通信技术. 2001, 25(2):84-89.
- [6] 李国玉,高宏伟,刘波等. 基于线阵图像传感器的光纤光栅传感解调技术. 传感技术学报. 2006, 19(6):2418-2420.
- [7] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社, 2001.
- [8] Giancarlo Rufino, Domenico Accardo. Enhancement of the Centroiding Algorithm for Star Tracker Measure Refinement [J]. Acta Astronautica, 2003, 53:135-147.



鲍吉龙(1965-)男,工学博士、教授,毕业于浙江大学,现任宁波工程学院教务处处长、电子与信息工程学院院长,浙江省高校中青年学科带头人,兼任华东理工大学硕士研究生导师,美国光学学会会员,主要科研方向为光纤传感技术和信号处理等,baojl@nbut.cn