

文章编号 1004-924X(2008)11-2145-06

靶场测量中多镜头大视场视频图像的拼接

于晓波, 盛 磊

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了得到靶场测量中需要的大视场全景视频图像,建立了多镜头大视场视频图像自动拼接系统,对该系统所采用的图像匹配、标记重叠区、无缝拼接等算法进行了研究。介绍小波变换和小波包原理,分析了根据小波系数进行匹配的小波变换图像匹配算法。然后,分析了比较旋转标记重叠区算法,即先匹配出多个拟重叠区,旋转后再做匹配计算,进而标记出唯一重叠区。最后,分析了基于小波包变换的图像无缝拼接算法,即对图像做小波包变换,按频率融合小波系数,再根据这些系数恢复图像。实验结果表明:本系统将 4 个 $1.1^\circ \times 0.88^\circ$ 的视场拼接得到一个大约 $3.3^\circ \times 1.76^\circ$ 的大视场,拼接图像平滑,无明显裂缝,处理速度可达 10 frames/s,基本满足了靶场测量中大视场视频图像的需求。

关键词:大视场;小波变换;视频图像;图像匹配;无缝拼接;靶场测量

中图分类号:TP391.4;TH745 **文献标识码:**A

Image stitching of multi-lens with large visual field in range instrumentation

YU Xiao-bo, SHENG Lei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to get the video image with large visual field in range instrumentation, a system of auto-stitching multi-lens image with large visual field is established and its applied algorithms, such as image matching, marking lapped area, seamless stitching and so on, are investigated. The theories of wavelet transformation and wavelet-packet are presented. An image-matching algorithm based on wavelet-transformation by matching wavelet parameters of image is analyzed. Then, the comparing and rotating algorithm to mark the lapped area is analyzed, in which the only lapped area is marked after sub-lapped areas are matched and rotated. Finally, the image seamless stitching algorithm based on wavelet-packet transformation is analyzed. After image wavelet-packet transformation, the wavelet parameters are merged by frequency and then the image is reconstructed using the result. Experimental results indicate that the system gets an image with $3.3^\circ \times 1.76^\circ$ large visual field by stitching four images with $1.1^\circ \times 0.88^\circ$ visual field, the stitched image is smooth and seamless, the speed of the system can reach up to 10 frames/s. These results show that proposed stitching method can satisfy the requirements for range instrumentation in getting image with large visual field.

收稿日期:2008-07-24;修订日期:2008-08-22.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA703104)

Key words: large visual field; wavelet transformation; video image; image matching; seamless stitching; range instrumentation

1 引言

随着我国国防工业的不断发展,武器装备的科技含量日益提升,为了测试这些日新月异的高科技武器,需要提供具有更大观测视场,更快视频数据处理速度的新型靶场测量设备。多镜头视频拼接系统用多个镜头分区域采集图像,再利用拼接算法将这些图像按采集时间拼接为全景大视场视频。这种拼接系统靠多个小视场光学系统得到大视场,光机结构相对简单、可靠,可用性和实用性较好,拼接过程依靠图像拼接软件实现,所用算法基于计算机图像图形学、特征识别、图像融合等多种科学,实现时具有灵活、高效、适应性强等特点。由于以上这些优点,目前靶场测量设备大观测视场图像的获得主要采用这种多镜头拼接模式。

近年来,小波分析作为一种先进的数学分析方式被越来越多地使用于数据处理(融合)领域^[1-4]。小波变换是一种时间-频率分析方法,它具有多分辨率分析特点,在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,是一种窗口大小固定不变但其形状可改变,时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法。即在低频部分具有较高的频率分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,很适合于探测正常信号中夹带的瞬态反常信号,被誉为分析信号的显微镜。本文将小波分析及小波包变换引入靶场观测大视场拼接系统,讨论了视频图像拼接软件中使用的小波变换图像匹配,比较了旋转标记重叠区域以及小波包无缝拼接图像等关键算法。实验证明,这种利用小波变换的图像拼接方式,在保证大视场的前提下,拼接得到的图像拼接位置准确,拼接区域平滑无明显裂缝,处理速度也进一步提高。

2 多镜头大视场视频拼接系统介绍

2.1 系统的硬件构成

图 1 为多镜头大视场视频拼接系统原理图。它主要由光学成像子系统、图像采集子系统、调光

调焦子系统、机械控制子系统和计算机管理控制子系统组成。

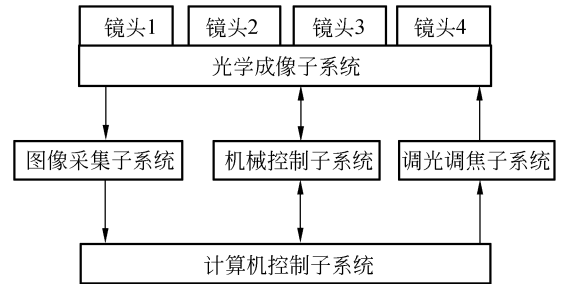


图 1 图像拼接系统原理图

Fig. 1 Block diagram of image stitching system

2.2 系统的工作原理

该系统的基本工作原理:通过光学成像子系统即固定在测量架上的 4 个 CCD 相机及相关的光学成像系统分区域成像,并通过图像采集子系统将光信号转换为电信号,即采集图像到计算机控制子系统,在计算机上进行图像拼接处理,计算机控制子系统也可以通过发送命令到机械控制子系统控制相机转动,并通过调光调焦系统调整相机光焦特性。

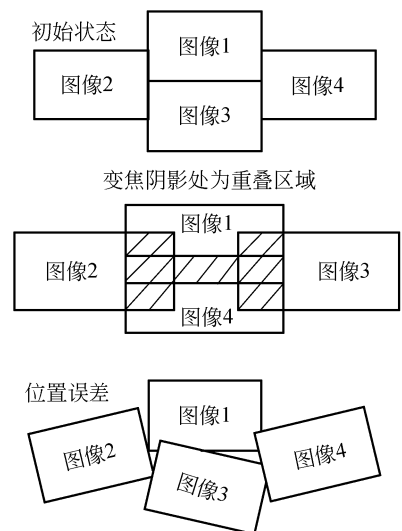


图 2 图像拼接示意图

Fig. 2 Diagram of image stitching

图 2 为图像拼接示意图,虽然相机镜头间距离固定,但由于自动调焦和支架运转时造成的相

机位置误差(轻微旋转),使分区域采集的图像间重叠区域不固定,在自动拼接处理时,每次调焦后和机械架运转一段时间后就需重新判断(标记)重叠区域。自动拼接软件包括重叠区域判断和无缝拼接两大主要功能。

3 系统软件的关键算法

3.1 小波变换和小波包

3.1.1 小波变换

设 $\Psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 为一平方可积的函数,若其傅里叶变换 $\hat{\Psi}(t)$ 满足容许条件:

$$C_g = \int_{\mathbf{R}} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty,$$

则称 $\Psi(t)$ 为一基本小波母函数,由同一母函数 $\Psi(t)$ 经伸缩和平移后得到一组函数称为一族小波,小波的实质也就是用一族小波去表示信号或函数。

小波分析是通过小波变换把信号 S 分解成低频 A 和高频 D 两个部分,在分解中低频失去的信息由高频获得,低频 A 可以继续分解为低频和 高频,以此类推,图 3 为三层小波分解树示意图。

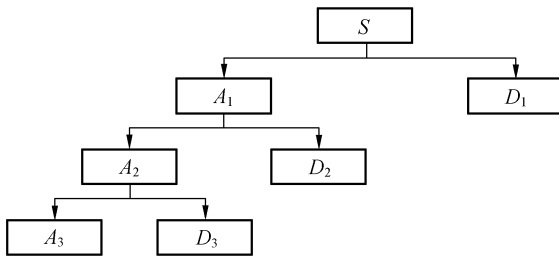


图 3 三层小波分解树示意图

Fig. 3 Tree diagram of three-layer wavelet analysis

小波变换作为一种新的时频分析方法,具有多种变形并适用于各种类型的信号处理领域的特点。在图像处理方面,小波变换被广泛地应用于图像压缩、图像增强、图像匹配、图像镶嵌、图像去噪、图像目标检测、图像细化、图像融合以及图像分解等诸多领域。

3.1.2 小波包

小波分析可以对信号进行有效的时频分解,但由于其尺度是二进制变化的,所以在高频段其频率分辨率较差,而在低频频段其时间分辨率较差。小波包分析能够为信号提供一种更加精细的

分析方法,它将频带进行多层次划分,对小波分析没有细分的高频部分进一步分解,并能够根据被分析信号的特征,自适应的选择相应的频带,使之与信号的频谱相匹配,从而进一步提高了时频分辨率。

图 4 为三层小波包分解树示意图。

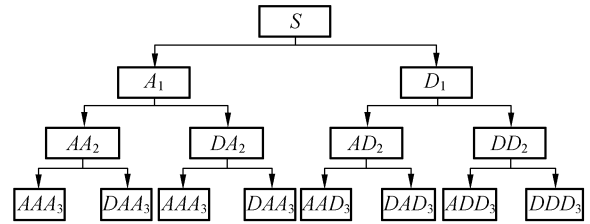


图 4 三层小波包分解树示意图

Fig. 4 Tree diagram of three-layer wavelet-packet analysis

本文将小波包变换应用于视频图像拼接,小波包变换可以看作一组带通滤波器,在不同尺度下选择不同的宽度,把需要拼接的图像先按不同尺度小波包分量分别拼接,再重构整个图像,这样拼接的图像可以有效避免可见边界和两次曝光现象。

3.2 基于小波变换的图像匹配

拼接图像,首先要标记出图像之间的重叠区域。设两幅图像 G_1 和 G_2 ,两幅图像大小分别为 $A_1 \times B_1$ 和 $A_2 \times B_2$, $g_1(x, y)$ 、 $g_2(x, y)$ 分别为两幅图像上相应的灰度值,又设两个图像之间重叠区域起始点坐标分别为 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) ,由于本系统为矩形区域匹配,所以求出一幅图像的重叠区域起始点 (X_1, Y_1) 后,根据图像大小即可求出另一幅图像的匹配区域起始点。两图像匹配区域标记的一般做法为两幅图像的匹配区域灰度值均方差最小,表示为数学公式为:

$(X_1, Y_1) | X_1 \in [0, A_1], Y_1 \in [0, B_1]$ 且满足:

$$\min \sqrt{\frac{\sum_{x_1=X_1, y_1=Y_1, x_2=0, y_2=0}^{x_1=A_1, y_1=B_1, x_2=X_1, y_2=Y_1} (g_1(x_1, y_1) - g_2(x_2, y_2))^2}{(A_1 - X_1)(B_1 - Y_1)}}.$$

图 5 为匹配示意图。

这种普通的均方差算法有以下问题,(a)画幅较大时,处理速度慢;(b)局部最优化区域(局部匹配)导致算法震荡不能收敛,执行效率进一步下降;(c)单个或多个噪点干扰判断精度。

为了解决这些问题,将小波分析引入匹配算

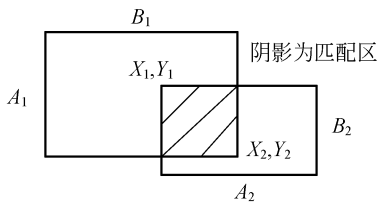


图 5 图像匹配示意图

Fig. 5 Diagram of image matching

法^[5-8],使用小波变换后,图像被分解为高频和低频部分,根据需要可以分解为多级(为了配合无缝拼接操作,使用小波包分解,即对高频部分同样进行下一级分解),其中低频部分保持图像的整体特征,高频部分保持图像的细节特征,先比较低频部分,再比较高频细节,这样的匹配相当于先进行整体匹配,如果匹配度很大,则直接标记为匹配区域,如果有多个近似低频匹配区,则进一步进行细节匹配,最终判断出重叠区域。这种加入小波变换的整体细节分别匹配的算法,缩小了匹配范围,提高了处理效率,根据实际图像频带特性可灵活掌握小波窗大小,消减噪声影响,并克服了局部匹配问题。

具体算法为:

(a) 对图像做小波变换,按实际带宽选择窗口尺寸以及变化层级,得到小波低频和若干高频部分;

(b) 对低频部分,代入公式(1)计算两幅图像判断区域的均方差(匹配度),其中 $g(x, y)$ 表示低频分量值;

(c) 选定均方差小于预设定阈值的拟匹配区域,如果拟匹配区仅有一个,则标记为匹配区域。算法结束;有多个,则比较同级别高频分量,直到判断出唯一一个区域并标记,算法结束。

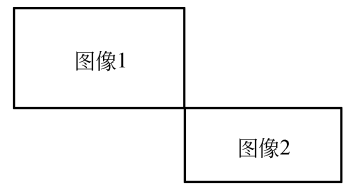
3.3 比较旋转标记重叠区域

根据本系统测量特性,使用比较旋转标记算法判断出两幅图像间的重叠区域。

图 6 为标记重叠区域示意图。

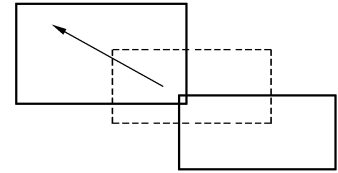
图 6(a) 表示两幅预拼接的图像,实际系统中拼接的四幅图像根据位置的不同,拼接方式也会稍有变化,这里仅以上和右两幅图像的拼接为例。

如图 6(b) 所示,判断时图像 2 以图像 1 的对角线为移动路径,以两个像素(根据图像 1 对角线斜率以及匹配精度要求,可以适当选择步进宽度)



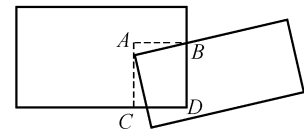
(a) 两幅图像拼接示意图

(a) Diagram of two pictures stitching



(b) 拼接轨迹示意图

(b) Diagram of matching track



(c) 旋转匹配示意图

(c) Diagram of rotated matching

图 6 标记重叠区域示意图

Fig. 6 Diagram of marking the lapped area

为单位向左上方移动,每移动一次,即对相交区域做小波变换匹配,直到图像 2 完全进入图像 1(边界条件也就是比较区域视实际测量情况而定)。匹配出一个或几个如图 6(c) 所示 ABCD 矩形拟重叠区域后,对图像 2 顺时针和逆时针各旋转一定角度(根据实际测量系统误差值可选择每次比较时旋转次数以及最大旋转角度),再对 ABCD 区域进行小波匹配,同时进一步缩小阈值,最终标记出唯一的重叠区域。

本系统在变焦时,图像成比例扩大和缩小,所以使用对角线位移比较;在实际测量试验时,镜头移动和变焦后,由于机械臂的抖动等因素,导致镜头出现旋转误差,经测量,这种旋转是普遍存在但其旋转角度却非常小,为了达到精确匹配,也兼顾考虑处理速度,所以使用这种常规匹配后再旋转匹配的方式。具体算法如下:

(a) 图像步进移位;

(b) 是否达到边界,达到则转到(d);

(c) 小波匹配计算均方差(分级比较,参看小波匹配章节);比较阈值,大于则转(a),小于则阈值设为本次均方差,记录本次匹配区域位置,转到(a);

(d) 根据得到的拟重叠区域,旋转后再做比较,找到匹配度最大的也是唯一的重叠区域并标记,算法结束。

3.4 小波包无缝拼接

多镜头测量时,受光照和空间几何因素的影响,重叠区域的图像会存在差异,两幅拼接图像灰度值的细微差别,会导致出现明显的拼接裂缝,如果对边界简单的插值处理,会导致拼接区产生二次曝光现象。为了得到平滑的拼接图像,本文使用小波包图像拼接算法^[9-12]。

小波包图像拼接即利用小波包变换对信号的频率分析能力拼接图像,首先将两幅拼接图像做小波包变换分解为不同频率下的小波包分量,而后分别拼接不同尺度的小波包分量,最后按这些拼接后的小波包分量重构整个图像,完成无缝拼接处理。

正交小波分解公式表示为:

$$\omega_{2n}^l(i) = \sum_k h(k - 2i)\omega_n^{l-1}(k),$$

$$\omega_{2n+1}^l(i) = \sum_k g(k - 2i)\omega_n^{l-1}(k).$$

重构公式表示为:

$$N\omega_n^l(i) = 2 \sum_k h(i - 2k)N\omega_{2n}^{l+1}(k) + 2 \sum_k g(i - 2k)\omega_{2n+1}^{l+1}(k).$$

拼接 A、B 两幅图像小波因数时,使用公式:

$$\omega_{n,AB}^l(i) = C_{x,y}^l \omega_{n,A}^l(i) + (1 - C_{x,y}^l) \omega_{n,B}^l(i),$$

其中 $C_{x,y}^l$ 为融合因子 $\in [0, 1]$,可以根据镜头位置和占据图像大小定义,也可以根据整个图像能量梯度(走势)逐点定义,这种方式拼接效果更精确,但考虑处理速度,本系统采用简单定义方式。

小波包无缝拼接算法如下:

(a) 对图像进行小波包分解,得到高低频小波系数(小波分解过程在小波变换图像匹配时就已经完成);

(b) 根据融合因子,对不同频率小波系数融合;

(c) 根据融合系数,代入重构公式得到拼接图像。

4 测量实验与结果

本拼接系统算法可灵活变化,在测量试验时,遵循在满足靶场测量实际图像质量要求下,尽量提高处理速度的原则。

以下显示图像都经过降噪预处理。

图 7 为分镜头图像。

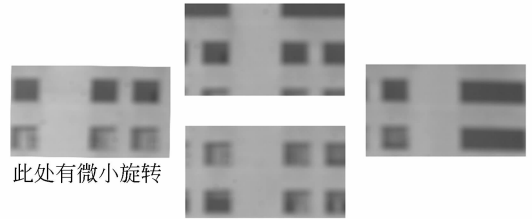


图 7 分镜头图像

Fig. 7 Image of sub-camera

图 8 为拼接图像。



图 8 拼接图像

Fig. 8 Stitching image

图 9 为调焦后拼接图像。

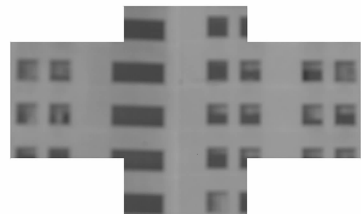


图 9 调焦后拼接图像

Fig. 9 Stitching image after adjusting focus

5 结 论

根据现代化靶场测量设备的大视场快速视频处理需求,开发了多镜头大视场视频拼接系统,并介绍了小波变换和小波包原理。然后研究了拼接

软件中使用的基于小波变换的图像匹配算法,而后说明了比较旋转标记重叠区域算法,最后研究了小波包无缝拼接算法。实验结果证明:本系统将 4 个 $1.1^{\circ} \times 0.88^{\circ}$ 的视场拼接得到一个大约

$3.3^{\circ} \times 1.76^{\circ}$ 的大视场,拼接图像平滑无明显裂缝,处理速度可达到 10 frame/s,基本满足了实际靶场测量工程中 大视场视频图像的需求。

参考文献:

- [1] KENNETH R. *Digital Image Processing*[M]. Prentice Hall Instel,1998:247-283.
- [2] COHEN A, MATEI B. Nonlinear subdivisions schemes; applications to image processing[C]. *Aiske, E Quack, M Floatereds; Tutorial on Multiresolution in Geometric Modeling, Springer*,2002:110-114.
- [3] IRAIN M, ANANDAN P, BERGEN J, *et al.*. Efficient representation of video sequences and their application[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 1996(8):327-351.
- [4] 聂祥飞, 谭泽富, 郭军. 应用小波变换的人脸光照补偿[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(1):150-156.
NIE X F, TAN Z F, GUO J. Face illumination compensation based on wavelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):150-156. (in Chinese)
- [5] GEROMMO J S, HARDIN D P, MASSOPUST P R. Fractal functions and wavelet expansions based on several scaling functions[J]. *J Approx. Theory*, 1994, 78:373-401.
- [6] 曹万鹏, 陈刚, 车仁生, 等. 一种基于小波变换的照明无关边缘检测和模糊增强方法[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(7):1143-1151.
CAO W P, CHEN G, CHE R SH, *et al.*. An illumination-independent edge detection and fuzzy enhancement algorithm based on wavelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1143-1151. (in Chinese)
- [7] MALLAT S. A theory for multiresolution sinagle decomposition; the wavelet representation[J]. *IEEE Trans. On PaMI*, 1989, 11(7):374-408.
- [8] VETTERLI M, KOVACEVIE J. *Wavelet and Subband Coding*[M]. NJ:Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1995.
- [9] 赵向阳, 杜利民. 一种全自动稳健的图像拼接融合算法[J]. *中国图像图形学报*, 2004, 9(4): 417-422.
ZHAO X Y, DU L M. An automatic and robust image mosaic algorithm[J]. *Journal of Image and Graphic*, 2004, 9(4):417-422. (in Chinese)
- [10] 张国柱, 王程, 王润生. 基于小波变换的多分辨率图像匹配方法[J]. *计算机工程于应用*, 2001, 37(13): 113-116.
ZHANG G ZH, WANG CH, WANG R SH. A method of multi-resolution image matching based on wavelet transform[J]. *Computer Engineering and Application*, 2001, 37(13): 113-116. (in Chinese)
- [11] TANG X O, STEWART K. Optical and sonar images classification; wavelet packet transform vs fourier transform [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 79: 25-46.
- [12] 王文波, 费浦生. 基于小波包的图像拼接算法[J]. *激光与红外*, 2006, 36(3): 238-240.
WANG W B, FEI P SH. The algorithm of stitching image based on wavelet packed transform and mathematical morphology[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(3): 238-240. (in Chinese)

作者简介:于晓波(1965—),男,吉林长春人,副研究员,主要从事靶场测量军工项目的开发研究。E-mail: sljlu@163.com

通信作者:盛 磊(1981—),男,吉林长春人,研究实习员,主要从事靶场测量军工项目的开发研究。