

小波变换应用于 DPIV 图象去噪

翁文国 廖光焯 范维澄

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

摘要 数字粒子图象测速技术(DPIV-Digital Particle-Imaging Velocimetry)已在国内外得到广泛的重视和应用,但目前其最大的问题是精度问题.由于 DPIV 的图象数据是用 CCD 摄像机经相应的图象卡采集示踪粒子图象得到的,这样在实验过程中不可避免引入的噪声(主要是示踪粒子大小、示踪粒子数量、诊断窗口大小、诊断窗口内的速度梯度和量化效果等引入的噪声)降低了实验测量的精度.本文应用小波变换的多分辨率特性,对 DPIV 图象(模拟和实际图象)进行去噪处理,并与维纳去噪和中值去噪进行比较.比较结果发现,小波变换能提高 DPIV 测量的精度,因而 DPIV 图象只有通过小波去噪后再进行基于互相关算法重建速度场的计算才是最精确的.

关键词 小波变换 去噪 DPIV

中图分类号: TP317.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)03-0211-05

Image Noise Removing in DPIV Based on Wavelet Transform

WENG Wen-guo, LIAO Guang-xuan, FAN Wei-cheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract DPIV (Digital Particle-Imaging Velocimetry) has been attached importance to and applied wisely inter-iorly and overseas. But at present, its most difficult problem is the precision. Because the tracer particle images of DPIV are sampled by CCD and image digitizer, the noise (mainly the noise of particle image size, the size of interrogation window, local velocity gradients, the number of particles within the sampling window and quantization effects) that is imported inevitably in the process of experiment falls the precision of DPIV experiment. This paper presents the image (simulative and practical image) noise removing in DPIV based on wavelet transform whose characteristic is the multiresolution. This method is compared with image noise removing by Wiener and median filter. The result shows that image noise removing in DPIV based on wavelet transform improves the precision of DPIV experiment, and it is the most precise to rebuild the velocity field based on cross-correlation after image noise removing in DPIV using wavelet transform.

Keywords Wavelet transform, Noise removing, DPIV

0 引言

小波分析是法国科学家 Morlet 于 1980 年首创的,随后经过许多科学家近 20 年的研究,发展了小波变换的几何体系,其基础是仿射群(即平移与伸缩)下的不变性.这使我们能够将一个信号分解成对

空间及尺度的贡献.在这种意义下小波分析又可称为多分辨率分析,它是傅立叶分析发展史上里程碑式的进展.它已经广泛应用于信号处理、图象处理、量子场论、地震勘探、语音识别与合成、音乐、雷达、CT 成像、流体湍流、天体识别、机器视觉、机械故障诊断与监控、分形以及数字电视等科技领域.

数字粒子图象测速技术由于能实时和非接触测

量二维乃至三维流场,所以它在测量流场时,具有不干扰被测流场,且具有动态响应快、精度高、空间分辨率高等特点,已是科研工作中,测量非定常、湍流复杂性及随机性等复杂流场的一种最先进的技术,但由于实验过程中不可避免引入的噪声(主要是示踪粒子大小、示踪粒子数量、诊断窗口大小、诊断窗口内的速度梯度和量化效果)影响了实验测量的精度.由于DPIV图象本身的多边缘特征,传统的线性去噪(维纳去噪)和非线性去噪(中值去噪)不适合DPIV图象的去噪,只有基于空域上的多分辨率分析的小波变换去噪才可以精确地去除其噪声.因此,DPIV图象通过小波变换去噪,可大大提高实验测量的精度.

1 小波去噪原理

简单地讲,小波是一个积分为零的函数,即设 $\Psi(z)$ 是一个复值函数,则当且仅当 $\Psi(z)$ 的傅氏变换 $\hat{\Psi}(\omega)$ 满足下列条件时,是一个小波: $\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(z) dz = \hat{\Psi}(0) = 0$.令 $\Psi_2^j(x) = (1/2^j)\Psi(x/2^j)$ 是在尺度因子 2^j 下的扩展函数,则函数 $f(x) \in L^2(R)$ 的小波变换(二进小波变换)定义为

$$Wf(2^j, x) = f * \Psi_2^j(x) \quad (1)$$

令 $\Psi^1(x, y) = \Theta^1(x, y)/\partial x$, $\Psi^2(x, y) = \Theta^2(x, y)\partial y$, 其中 $\Theta^1(x, y)$ 和 $\Theta^2(x, y)$ 是两个平滑函数.将 $\Psi_2^1(x, y) = 1/2^{2j}\Psi^1(x/2^j, y/2^j)$, $\Psi_2^2(x, y) = 1/2^{2j}\Psi^2(x/2^j, y/2^j)$ 作为这些函数在 2^j 下的扩展,那么 $f(x, y) \in L^2(R^2)$ 在 2^j 下沿水平和垂直方向的小波变换为

$$\begin{cases} W_{\frac{1}{2}}f(x, y) = f * \Psi_2^1(x, y) \\ W_{\frac{2}{2}}f(x, y) = f * \Psi_2^2(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

于是,在固定尺度 2^j 下图象的模值和角度值为

$$\begin{cases} M_{2^j}(x, y) = \sqrt{|W_{\frac{1}{2}}f(x, y)|^2 + |W_{\frac{2}{2}}f(x, y)|^2} \\ A_{2^j}(x, y) = \text{atan}(|W_{\frac{1}{2}}f(x, y)|/|W_{\frac{2}{2}}f(x, y)|) \end{cases} \quad (3)$$

$f(x, y)$ 在尺度 2^j 下的图象边界点即对应于 $M_{2^j}(x, y)$ 沿着梯度方向 $A_{2^j}(x, y)$ 的局域极大值,于是检测出 $M_{2^j}(x, y)$ 的局域极大值也就检测出图象的边缘,由于噪声在多边缘提取中隐藏于图象真正边缘中,形成伪边缘,因此去除其伪边缘即可去除图象的噪声.

一种利用多尺度信息区别图象真正边缘和伪边缘的做法是引入Lipschitz指数 α :设 α 为非整数, $f(x, y)$ 与某区域上Lipschitz指数 α 一致的充要条件

是,存在 $K > 0$,并使对此区域的任何 (x, y) 点有: $M_{2^j}(x, y) \leq K(2^j)^\alpha$.一般来说,图象的Lipschitz指数 α 满足 $0 \leq \alpha \leq 1$,而噪声的 $\alpha \leq 0$,于是当尺度 2^j 减小时,图象的小波变换模值不会增加^[1],相反,对于均方差为 σ_n^2 的高斯白噪声的小波变换模值可以证明^[2]:

$$E| |M_{2^j n}(x, y)|^2 | = \sigma_n^2 (\|\Psi\|^2 + \|\Psi^2\|^2) / 2^j \quad (4)$$

平均而言,随着尺度 2^j 的减小,噪声的小波变换模值将增加.因此,我们可以将随着尺度的减小,而其模值反而增加的边缘点作为噪声点去除.

2 DPIV 图象诊断方法

DPIV的基本原理是预先在流场中撒播一定浓度和大小示踪粒子,用适当的片光源照明二维流场,首先在垂直于片光源的方向用CCD摄像机经相应的图象卡将粒子灰度图象直接摄入到计算机上,然后对图象进行图象诊断,提取出其速度场信息.DPIV技术的计算公式是速度的原始定义: $V = [S(t_2) - S(t_1)] / (t_2 - t_1)$.具体做法是,在图象上找到相关度最大的两个小区域,用它们之间的距离除以两次拍摄之间的时间间隔,就是这个小区域在该间隔时间内的平均速度.

本文用的DPIV图象诊断方法是基于互相关算法^[3],即通过一个采样窗口,在同一的特定位置上,可顺序获取两幅数字图象 $f(m, n)$ 和 $g(m, n)$,于是这个窗口的粒子位移 $s(m, n)$ 可以通过对其进行互相关计算获得.从信号系统的观点出发, $g(m, n)$ 可以看作是 $f(m, n)$ 经 $s(m, n)$ 线性变换后叠加以噪声 $d(m, n)$ 而成:

$$g(m, n) = f(m, n) * s(m, n) + d(m, n) \quad (5)$$

在两图象进行互相关前进行去噪预处理,可以认为 $d(m, n) = 0$.于是根据互相关算法:

$$s(m, n) = f^{-1}\{F^*(u, v)G(u, v)\} \quad (6)$$

其中, $F(u, v)$ 和 $G(u, v)$ 是 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 的傅氏变换, $F^*(u, v)$ 是 $F(u, v)$ 的共轭值, f^{-1} 是傅氏反变换.

为了使位移能达到亚象素的精度,本文用高斯曲线来拟合互相关峰:

$$x = x_0 + \{\ln R(x_0 - 1, y_0) - \ln R(x_0 + 1, y_0)\} \times \{2[\ln R(x_0 - 1, y_0) + \ln R(x_0 + 1, y_0) - 2\ln R(x_0, y_0)]\}^{-1} \quad (7)$$

其中 $R(x_0, y_0)$ 是 (x_0, y_0) 的互相关值,在相关峰所在象素点的横向、纵向、斜向(分母中的2改为 $2\sqrt{2}$)

4 个方向进行拟合, y 方向同理实现, 最终确定的即为相关峰(位移)的精确位置.

3 对 DPIV 图象的处理比较

3.1 DPIV 模拟图象的产生

对 DPIV 模拟的流场是流场中典型的平移和旋转流场(绕图象中心).

为了使 DPIV 模拟图象尽可能地与实际流场相象, 本文先用蒙特卡罗法随机产生粒子的位置和灰度值, 用均匀分布确定粒子的直径, 并事先设定撒播粒子的个数; 再把该图象按要求的位移(角度)大小移动(转动), 然后叠加以高斯白噪声. 为了便于观看图象和计算, 图象大小取为 256×256 (像素). 图 1 就是用本方法模拟的粒子灰度图象. 其中粒子数 $N = 3\ 000$ (个), 粒径 $d = 3 \pm 2$ (像素), 高斯白噪声方差值 $A = 0.1$ (均值为 0).

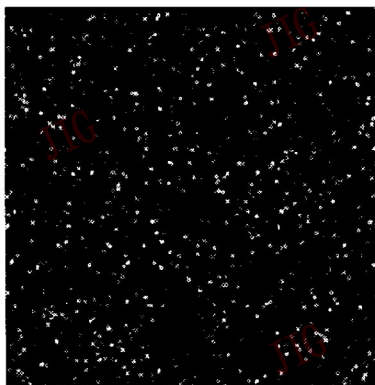


图 1 模拟的粒子灰度图象

3.2 DPIV 模拟图象计算结果比较

分别对典型的流场——平移和转动流场进行模拟计算. 对产生的 DPIV 模拟图象分别进行传统的中值去噪(3×3)、维纳去噪(3×3)和本文的小波去噪(Daubechies-1), 然后进行基于互相关算法的 DPIV 图象诊断方法的计算, 最后进行相对误差(平移)和绝对误差(转动)的计算和比较.

对粒子数 $N = 3\ 000$ (个), 粒径 $d = 3 \pm 2$ (像素), 实际位移 $l_x = 12$ (像素), $l_y = 8$ (像素), 诊断窗口 $W = 64 \times 64$ (像素), 偏置窗口 $P = 16 \times 16$ (像素), 图象大小 256×256 (像素)的连续两幅图象进行平移互相关计算, 并对其得出的位移值用下式进行平均位移相对误差计算, 其计算结果见图 2.

$$\sigma = \sqrt{\frac{l_x^4}{|l_x^2 + l_y^2|^2} \sigma_x^2 + \frac{l_y^4}{|l_x^2 + l_y^2|^2} \sigma_y^2} \quad (8)$$

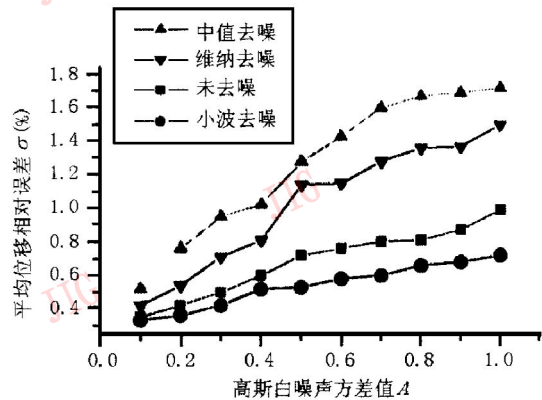


图 2 平移计算结果比较

从图 2 可以看出: 本文小波去噪比传统的中值去噪和维纳去噪更加适合 DPIV 图象去噪, 经小波去噪后, 平均位移相对误差值最小, 而中值去噪和维纳去噪却加大了平均位移相对误差, 这是因为中值去噪和维纳去噪在去除噪声的同时会滤去尖锐的边缘. 这说明传统的非线性去噪(中值去噪)和线性去噪(维纳去噪)并不适合 DPIV 图象去噪, 只有在空域上进行多分辨率去噪的小波变换才是可行的.

对粒子数 $N = 3\ 000$ (个), 粒径 $d = 5 \pm 3$ (像素), 实际转动角度 $\theta = 6^\circ$, 诊断窗口 $W = 64 \times 64$ (像素), 偏置窗口 $P = 16 \times 16$ (像素), 图象大小 256×256 (像素)的连续两幅图象进行转动互相关计算, 并对其得出的位移值用下式进行位移绝对误差计算(由于转动时相对于图象中心点位移极小, 不适合进行相对误差计算), 其计算结果见图 3.

$$dl = \frac{l_x}{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}} dl_x + \frac{l_y}{\sqrt{l_x^2 + l_y^2}} dl_y \quad (9)$$

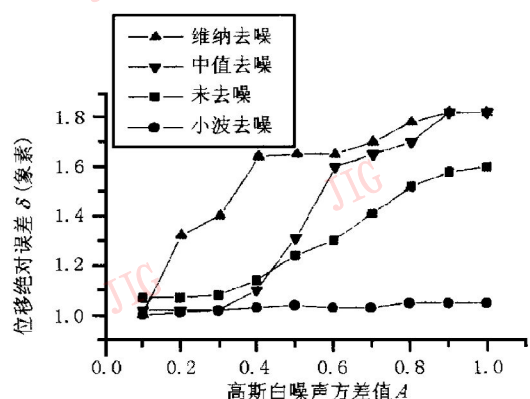


图 3 转动计算结果比较

从图 3 也可以看出: 在转动计算中, 本文的小波去噪也比传统的中值去噪和维纳去噪更加适合 DPIV 图象去噪. 并且随着高斯白噪声方差值 A 的增大, 小波去噪并不象中值去噪和维纳去噪的位移绝对误差 δ 增大, 而是保持一个较稳定的量.

3.3 DPIV 实际图象计算结果比较

重力作用下的水射流运动的实验装置及水流方向如图 4. 立方体容器尺寸为 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 405\text{mm}$, 喷管是直径为 4mm 的有机玻璃圆管. 让水以低速从注入器中流出, 并诱导了水箱中原有水的流动. 这样水箱中的水会以射流方向为对称轴对称地产生卷吸现象.

图 5 是用 DPIV 系统摄得的两幅连续视频图象 (512×512 象素); 图 6 是未去噪的速度场重建结果, 图 7 是中值去噪 (3×3) 的速度场重建结果, 图 8 是维纳去噪 (3×3) 的速度场重建结果, 图 9 是本文

小波去噪 (Daubechies-1) 的速度场重建结果.

从图 6~ 图 9 可以看出: 图 9 比图 6~ 图 8 更加光滑连续, 更能精确地重建重力作用下的水射流运动的流场. 其原因有两个: 一是本文 DPIV 算法是利用 FFT 的互相关算法, 在计算过程中, 采样窗口在图象上的偏置可以近似地认为是一个低通滤波器^[4]; 二是本文计算的流场速度梯度较小, 且应用了小波进行去噪. 所以一些奇异点就被平滑, 无须进行插值等后处理. 这说明在 DPIV 实际图象的去噪计算中, 经小波去噪后进行基于互相关的 DPIV 的重建速度场的计算才是最精确的.

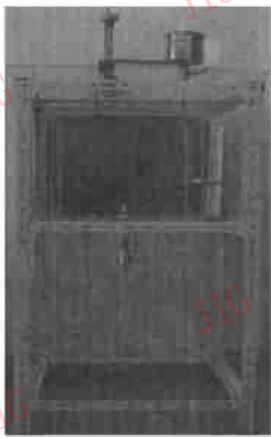


图 4 重力作用下的水射流运动装置示意图

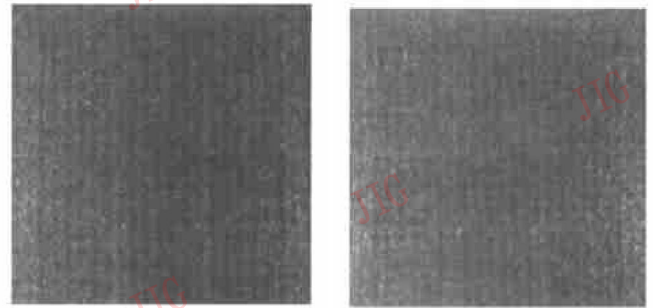


图 5 流场的连续两幅视频图象

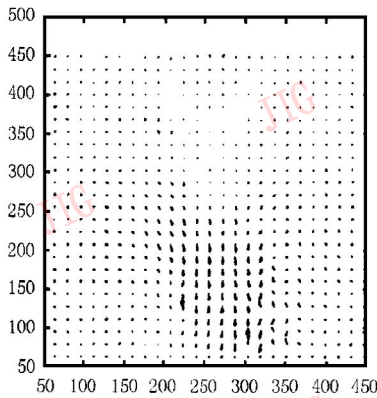


图 6 未去噪重建速度场

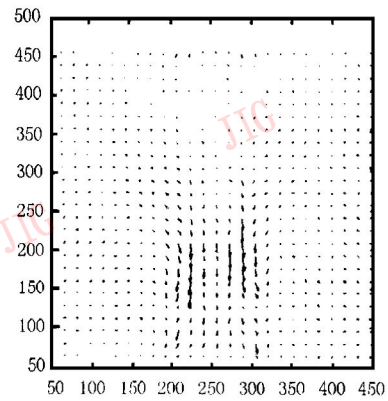


图 7 中值去噪重建速度场

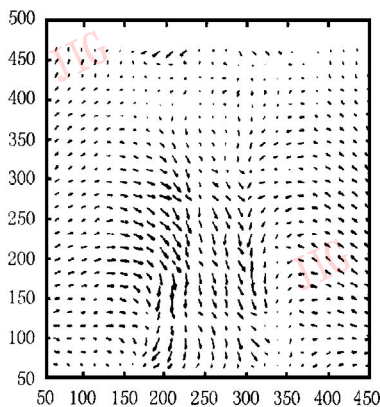


图 8 维纳去噪重建速度场

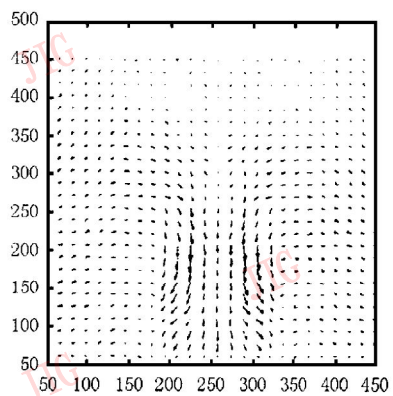


图 9 小波去噪重建速度场

4 结 论

本文通过对 DPIV 模拟和对实际图象进行维纳去噪、中值去噪和小波去噪计算结果比较, 结果发现小波去噪用于模拟图象去噪时比维纳去噪和中值去噪的精度要高, 对实际图象去噪也比两者要准确. 这表明小波变换在 DPIV 图象去噪处理方面有着很好的性能, 它可以提高 DPIV 图象的分辨率和信噪比, 从而提高 DPIV 系统测量的精度.

致 谢 参加本文工作的还有王喜世、秦俊.

参 考 文 献

- 1 Mallat S G, Wen Liang Hwang. Singularity detection and processing with wavelet. IEEE Trans Information Theory, 1992, 38 (2).
- 2 Marr D. Vision. W H Freeman and Company, 1982.
- 3 翁文国, 廖光焯, 王喜世. 基于互相关的 DPIV 图象诊断方法研究. 实验力学, 1999, 14(3): 323~ 329.
- 4 Willert C E, Gharib M. Digital particle image velocimetry, Experiments in Fluids, 1991, 10: 181~ 193.



翁文国 1976 年生, 1998 年毕业于中国科学技术大学工程热物理系, 现为中国科学技术大学工程热物理专业硕士研究生. 研究方向为火灾中典型流场的 DPIV 测量.



廖光焯 1948 年生, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室教授. 主要从事热安全科学与技术、热灾害过程模拟与仿真、燃烧流场诊断等方面的研究.

范维澄 1943 年生, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室教授, 博士生导师. 主要从事火灾科学与安全工程、燃烧与火灾过程的计算机模拟、火灾安全工程学方面的研究.