

基于互相关的气泡速度的测量方法研究*

陈 敏^{1,3} 何俊华¹ 纪延俊² 阎亚东^{1,3} 陈良益¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 山东滨州学院, 山东 256604)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 通过对比互相关技术和多普勒技术的差别, 从一个新的角度把互相关技术应用于尾流测速的研究中. 实验中利用高速 CCD 相机拍摄模拟尾流图像. 利用快速傅里叶变换实现互相关算法, 为提高计算准确度采用高斯曲线拟合互相关函数的峰值并给出拟合公式, 得到了亚像素级的运动速度. 为标定互相关算法的准确度, 文中采用图像平移的方法验证算法的可行性和可靠性. 最后把算法应用于模拟尾流的实验中. 该方法有望在舰船尾流速度信息的实时获取上起到重要的应用价值.

关键词 速度; 互相关; 尾流; 气泡

中图分类号 O436 **文献标识码** A

0 引言

舰船尾流气泡幕的特性可用来推测舰船的运动特征, 尾流自导鱼雷就是利用舰船尾流气泡幕的特性实施对舰船的跟踪打击^[1], 因此, 舰船尾流的研究在军事上有着重要的应用价值. 尾流气泡幕的特性包括: 气泡的最可几直径, 气泡密度分布, 气泡运动速度等参量. 文中主要是针对气泡的运动速度的测量方法展开讨论.

目前流场测速技术主要有两种, 一种是依赖时间、位移转换进行直接测速的方法, 如互相关技术^[2]; 另一种是利用多普勒效应间接测速的方法.

多普勒法测量原理, 是依据声波中的多普勒效应, 其检测量为漂移频率, 且多普勒频移与被测流速成正比^[3]. 基于多普勒效应的 LDV (Laser Doppler Velocimetry) 是在某一测点处一段时间内进行的, 因此所测速度是时均定量值, 只有通过每一点的测量才可以得到整个流场, 这种方式的测量不可同时进行, 因此它不可用于研究非稳态流动^[4]. 一般 LDV 只能测量出频移的绝对值, 不能确定其正负号, 因而不能确定速度方向的唯一性^[5]. 这种技术具有良好的时间分辨率和空间分辨率, 但它是一种单点测量技术, 只适于低密度的测速, 而且, 这种方法对硬件要求较高.

互相关方法是通过测量一定时间间隔内流体体元的位移, 根据定义直接计算速度. 利用互相关方法可以对测量区域进行全场测量, 虽然互相关测速也是一种统计平均意义下速度, 但通过选择合适的

网格和步进量, 就可使网格下的平均速度与实际速度更为接近. 通过互相关计算可得到二维运动速度及其运动方向. 因此利用互相关方法就没有以上多普勒方法的不足. 综合多方面考虑, 我们在实验中采用互相关方法进行气泡的运动速度计算. 互相关技术在许多领域中已经得到成功应用^[6]. 由于尾流在军事上的应用属新兴研究领域且各国都处于保密状态, 关于尾流测速的文献更难获取. 目前国内所见文献报道中, 也没有见到将互相关技术应用于尾流测速方面的资料, 因此我们的工作就是尝试把互相关技术应用于舰船尾流的测速.

1 互相关技术原理及实现

1.1 互相关函数简介

互相关技术基本原理是根据速度的基本定义: $V = [S(t_2) - S(t_1)] / (t_2 - t_1)$, 在算法实现中是对相邻两帧图像进行互相关函数计算, 计算出的互相关函数的最大值所在位置即对应着两帧图像之间的位移, 再根据拍摄时设定的时间间隔, 就可获得运动速度.

1.2 互相关算法实现

互相关算法具体实现时是把两幅图像等同地划分为多个网格, 对两个图像相同位置上的两个网格进行互相关计算. 网格大小的选取在互相关计算尤为重要. 如果网格设得越大, 网格内包含的信息就越多, 会加大相关运算的计算时间, 而且各种噪音的影响也会加大, 降低两个网格内的相关性; 网格设得越小, 网格内包含的信息也越少, 就会使得网格内有效气泡对减少, 甚至无法达到相关分析的必要条件, 这将影响到相关分析结果的可靠性与正确性. 因此, 选择一个合适的网格, 使噪音的影响最小、减少相关分析的计算量, 同时又能有效地提高分析结果

* 中科院创新基金资助项目

Tel: 029-88483821 Email: chenmin@opt.ac.cn

收稿日期: 2005-01-10

的准确度和可靠度。根据奈奎斯特采样定理,当信号采样频率大于等于信号最高频率的两倍时,信号能不失真地重建。因此,网格的大小应选为网格内气泡最大位移的两倍。

采用经典的互相关算法,即利用互相关函数直接进行计算时运算量较大,为提高运算速度通常采用傅里叶变换来实现互相关函数的计算。利用傅里叶变换中的互相关定理进行处理,即互相关函数与功率谱构成傅里叶变换对^[7],如

$$\int f(m, n)g(m-d, n-e)dmdn \leftrightarrow F^*(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n) \times G(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n) \quad (1)$$

式中, $f(m, n)$ 和 $g(m, n)$ 分别对应两个图像相同位置上的亮度分布函数, $F(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n)$ 是 $f(m, n)$ 的傅立叶变换, $F^*(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n)$ 是 $f(m, n)$ 的傅里叶变换的共轭。

对 $f(m, n)$ 和 $g(m, n)$ 分别进行傅里叶变换,把原来空间域的信息转换到频率域

$$F(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n) = \text{FFT}[f(m, n)] \quad (2)$$

$$G(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n) = \text{FFT}[g(m, n)] \quad (3)$$

对以上两个频域结果做卷积,得到两个网格内气泡能量谱

$$P(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n) = F^*(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n) \cdot G(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n) \quad (4)$$

对频率域的能量做一次傅里叶反变换,恢复到原来的空间域上

$$R(m, n) = \text{FFT}^{-1}[P(\tilde{\omega}_m, \tilde{\omega}_n)] \quad (5)$$

就得到两个网格的互相关函数 $R(m, n)$, 最后求互相关函数的最大值 $R(\Delta x, \Delta y)$ 及其所在位置, 就得到网格内气泡的平均位移。

2 速度矢量计算的改进算法

2.1 亚像素拟合

因为数字图像的采集是量化过的, 所获得的位移均为整数值, 也就是说系统对小于一个像素的位移不

响应。因此, 系统的位移动态范围限制在 $1 \sim NB$ (NB 为选定的网格大小) 像素的范围内, 量化效应非常明显, 这对于实际应用显然是不够的。为了获得“亚像素”的准确度, 有必要对计算出的 $R(\Delta x, \Delta y)$ 进行拟合, 得到相关峰在两个像素间的精确位置。

考虑到气泡成像时亮度的分布为高斯分布^[8]

$$I(x) = I_0 \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (6)$$

所以采用高斯曲线拟合峰值。假定互相关峰值所在的像素坐标为 (x_0, y_0) , 取峰值附近的三个像素点 x_{0-1}, x_0, x_{0+1} , 对应的相关值分别为 R_{0-1}, R_0, R_{0+1}

$$x = x_0 + \frac{\ln R_{0-1} - \ln R_{0+1}}{2[\ln R_{0-1} + \ln R_{0+1} - 2\ln R_0]} \quad (7)$$

如图 1 为横向和纵向的拟合示意图。

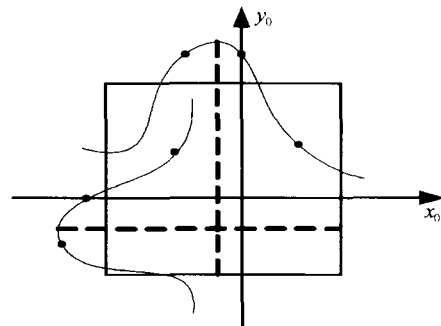


图 1 横向和纵向的拟合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the curve fitting in horizontal and vertical direction

在相关峰所在像素点的横向、纵向、斜向四个方向进行拟合, y 方向同理实现, 最后确定的即为相关峰的精确位置。

2.2 算法实现步骤

图像处理前先进行预处理, 消除噪音的影响, 然后选择合适的网格大小统一划分图像对, 对每一对网格进行互相关计算, 再对互相关峰所在像素点的位置进行横向、纵向、斜向的亚像素拟合, 以获得精确的气泡位移。算法的编程实现是采用 Matlab 软件, 计算步骤如图 2。

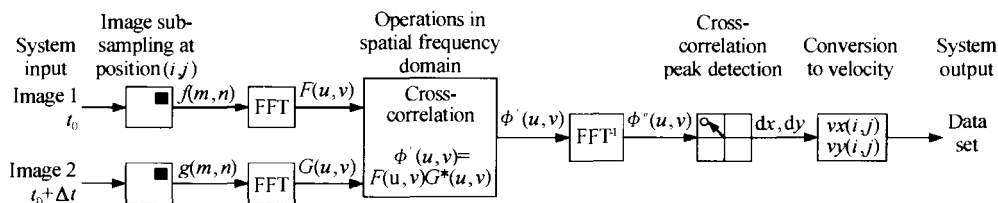


图 2 互相关算法的数据处理流程图

Fig. 2 Numeric processing flow-chart of cross-correlation algorithm

$f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 为在前后相邻两幅图像相同位置上取的子块, 对 $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 进行傅氏变换后得到 $F(\cdot)$ 和 $G(\cdot)$, $F^*(\cdot)$ 为 $F(\cdot)$ 的共轭。

2.3 互相关算法的标定

为了检验本文所编程序的正确性和可靠性, 这里采用如下的方法进行标定:

1) 对系统采用的气泡图像由计算机编程实现图像的平移, 平移后的气泡位移是已知的; 2) 用本文介绍的互相关算法进行验证计算; 3) 将计算结果与实际位移进行比较, 确定计算准确度和误差情况。

表 1 为计算结果的统计分析, 得出计算位移与实际位移的对比, 以及算法的相对误差。

表 1 标定结果

实际位移	计算位移	相对误差
(8, -10)	(7.9537, -9.9819)	0.58%
(-3, -9)	(-2.9606, -8.9984)	1.313%
(11, 12)	(10.8922, 11.7759)	0.980%
(-14, 5)	(-13.9349, 4.9695)	0.465%

3 算法应用

3.1 实验系统

模拟尾流实验装置主要由模拟尾流发生器,光源,图像采集系统,高速 CCD 相机,监视器等组成,实验装置如图 3. 实验水槽中利用气泡发生器模拟尾流,利用监视器先对水槽中气泡进行监视,图像采集时选用 BASLER 公司的 A602f 型 CCD 相机,分辨率为 640×480 ,帧速率 ≥ 100 fps,该款相机的数据输出是通过 IEEE1394 接口,采集的图像数据就直接通过该数据线输入计算机中. 图 4 是运动气泡

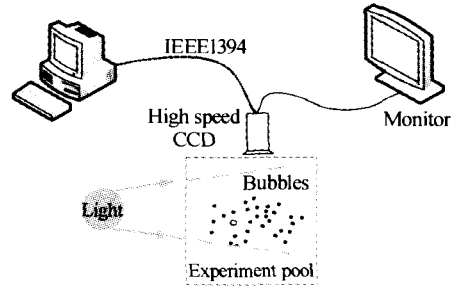


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup



图 4 相邻两帧气泡图像

Fig. 4 Bubble images in time sequences

序列图像中相邻的两帧,图像大小为 640×480 . 表 2 为不同图像对的部分计算结果.

表 2 计算结果*

序号	亚像素拟合前 (x, y)	亚像素拟合位移 (x, y)	x ($\Delta x_{\max}, \Delta x_{\min}$)	y ($\Delta y_{\max}, \Delta y_{\min}$)
1	(3, 7)	(3.0707, 6.6914)	(34.9845, -14.323)	(28.5121, -30.1587)
	(3, 7)	(2.5771, 6.7468)		
	(35, -17)	(34.9845, -16.6258)		
	(2, 11)	(2.0848, 11.1154)		
	(-1, 13)	(-0.96925, 12.6665)		
2	(1, 10)	(0.9.8813)	(37.5207, -24.9858)	(27.8683, -32.9227)
	(4, 8)	(3.5287, 8.2588)		
	(3, 9)	(3.1212, 9.0173)		
	(2, 12)	(2.1495, 12.0756)		
	(-25, -22)	(-24.9858, -22.1315)		
3	(-1, 14)	(-1.0881, 13.925)	(37.5838, -12.0263)	(37.306, -16.8276)
	(1, 10)	(0, 10.4659)		
	(5, 17)	(4.6531, 17.2746)		
	(-6, 37)	(-5.9451, 37.306)		
	(2, 6)	(1.7101, 6.3291)		
	(1, 23)	(0, 23.079)		
	(0, 12)	(0, 11.8629)		
	(-3, 12)	(-2.8265, 11.9103)		

* 表中不同序号的数据是对不同图像对的计算结果, (x, y) 位移是取图像对的部分计算结果, 最大值、最小值和平均值是取一次运算的计算结果.

对每图像对进行互相关计算每次约需 4.48 s. 根据计算出的位移数据, 结合拍摄时光学系统的放大倍率、单个像素的大小、相邻两帧图像的拍摄时间间隔等信息就可计算得到气泡的二维运动速度.

4 结论

互相关算法可应用于尾流气泡幕参量的计算中, 使用自行设计的实验系统获得了实验数据, 再利用自行开发的互相关算法对数据进行处理, 算法中辅以高斯曲线拟合的方法使实验结果达到亚像素的

准确度. 实验采集的图像中气泡运动变化较小, 用肉眼难以准确地判别相关气泡的运动位移, 但是用 FFT 的互相关算法可以迅速、准确地计算出相关气泡的二维运动位移. 随着 CCD 相机的时间、空间分辨率的提高及微机计算和存储速度的提高, 实时、精确地获得尾流中微小气泡的速度数据将不再只是一个梦想. 该算法对尾流气泡幕的研究有重要的应用价值.

参考文献

- 1 纪延俊, 何俊华, 董晓娜, 等. 尾流气泡幕散射光的性质.

- 光子学报, 2004, **33**(8):1018~1020
 Ji Y J, He J H, Dong X N, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):1018~1020
- 2 康琦, 申功烁. 全场测速技术进展. *力学进展*, 1997, **27**(1):106~120
 Kang Q, Sheng G X. *Advances In Mechanics*, 1997, **27**(1):106~120
- 3 杨丰, 杨俊青. 多普勒法测流技术简介. *水文*, 2004, **24**(2):58~59
 Yang F, Yang J Q. *Hydrology*, 2004, **24**(2):58~59
- 4 王嘉骏, 冯连芳, 王凯, 等. LDV 和 CFD 在流体混合中的应用进展. *化学工程*, 2001, **29**(4):62~65
 Wang J J, Feng L F, Wang K, *et al.* *Chemical Engineering*, 2001, **29**(4):62~65
- 5 范洁川. 近代流动显示技术. 北京: 国防工业出版社, 2002. 195~195
 Fan J C. *Modern Flow Visualization*. Beijing: National Defence Industry Press. 2002. 195~195
- 6 康海贵, 王平让, 孙鹤泉. 互相关技术在海洋工程中的应用研究. *海洋技术*, 2003, **22**(4):58~61
 Kang H G, Wang P R, Shun H Q. *Ocean Technology*, 2003, **22**(4):58~61
- 7 孙鹤泉, 康海贵. DPIV 流场测试技术中的数据处理. *大连理工大学学报*, 2000, **40**(3):364~367
 Sun H Q, Kang H G. *Journal of Dalian University of Technology*, 2000, **40**(3):364~367
- 8 Willert C E, Gharib M. Digital Particle Image velocimetry. *Exp Fluids*, 1991, **10**:181~193

Researches on the Measurement of Bubble Velocity Based on Cross-Correlation

Chen Min^{1,3}, He Junhua¹, Ji Yanjun², Yan Yadong^{1,3}, Chen Liangyi¹

1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068*

2 *Binzhou college of Shangdong, Binzhou 256604*

3 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Received date: 2005-01-10

Abstract Through researching on the velocity vector of bubbly wall in the ship wake, the bubble movement character can be found out. Also, the research and realization of the ship wake self-guide torpedo is based upon this character. After comparing the differences between Cross-Correlation and Doppler method, the Cross-Correlation method has been applied to the measurement of bubbly wall parameters in ship wake from a new aspect. The high-speed CCD camera is used to acquire the images of simulating ship wake, the velocity of bubbles in the ship wake is computed from image post-processing. Through improving cross-correlation algorithm commonly used for analysis of flow field, the Fast Fourier Transform (FFT) has been used to compute the cross-correlation function rapidly. In order to enhance the computing accuracy, Gauss curve fitting is used to modify the location of the max value point, and the fitting formula is listed, so the bubble velocity with subpixel accuracy is obtained. In order to calibrate the algorithm, the image transition is used to validate its feasibility and dependability. It is also applied to the experiment of simulative ship wake. The algorithm is expected to be used in acquiring the real-time velocity information in the ship wake.

Keywords Velocity; Cross-Correlation; Ship wake; Bubble



Chen Min was born in Hubei Province, in 1975. She received the B. S. degree in Chengdu University of Technology in 2003. She is now a doctor candidate in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences. Her main research direction is the algorithm research of the parameter in ship wake.