

应用无源仿射模型的 DPIV 新算法

李宏东 刘济林 顾伟康

(浙江大学信电系信息与智能系统研究所, 杭州 310027)

摘要 传统 DPIV(数字微粒成象测速)算法主要基于区域相关运算(area-correlation),此法由于概念简单、操作方便而被广泛接受,但是存在速度慢,错配点多等众所周知的缺点。此文根据 DPIV 的成象特点以及所研究对象的物理性质,提出了流场的无源仿射模型(IAFM),结合修改得到的整体光流模型(TOFC),形成了一种计算 DPIV 的新方法。文中给出了部分实验结果,证明本算法比传统相关法快一个数量级,并能得到更为精细的流场结构,为实时流场测量与可视化显示研究提供了有力的工具。

关键词 数字成象测速 无源仿射流场模型 光流计算 数字图象处理

0 引言

进行流体力学研究很重要的方法是基于对流体现象的实验观测和可视化显示。现代计算技术,特别是数字图象处理技术的进步,带给流体力学研究新的有力的工具。DPIV(数字微粒成象测速)就是利用图象处理技术进行流体场分析研究的重要方法,也是目前极为活跃的研究领域。

DPIV 是通过在流体中引入不可溶性微粒(如

染料,铝粉等),采用频闪氙灯光源或者激光光源两次(或多次)曝光,获取不同时刻流体同一层面的两幅(或连续视频帧)图像,经数字图象采集设备获取数字图像,从而利用图像处理技术得到流体的运动矢量的方法。其实验装置如图1所示。

传统的 DPIV 算法绝大多数基于面积相关运算^[1~3],此法被广泛的采用,不仅因为其概念简单,而且易于实现,有许多标准程序可利用。

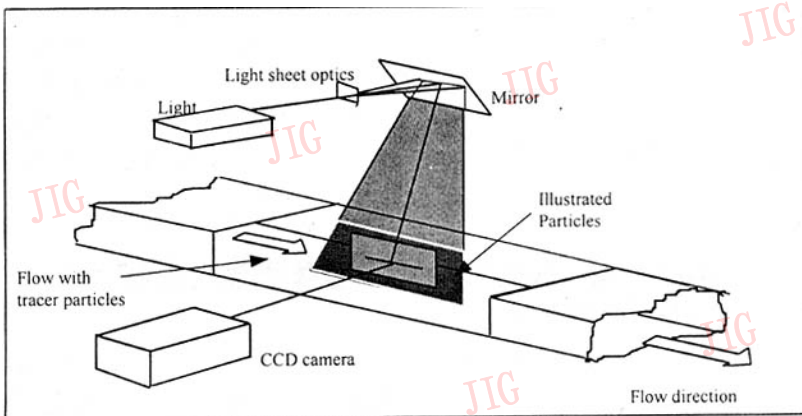


图1 DPIV 获取设备

但是相关法固有的缺点有很多。缺点之一是计算量太大,难以实现实时计算,因而相当多的研究者从如何快速实现二维相关出发提出了许多加速算法,比如SSDA快速相关,FFT快速相关,二值图相关DPIV算法等^[3],但收效并不大,原因在于未能摆脱相关匹配的框架。缺点之二是错配的点较多,这是由于计算中存在不可避免的相关假峰所致。因而研究者不得不发展若干交互的或半自动的后处理矫正技术,修改结果流场。诸如光滑约束^[4],神经网络技术^[5]都被尝试用于后处理,使问题复杂化。

本文考虑到所研究对象,即流体场本身的物理特性,提出了无源仿射模型作为流场模型。而且根据DPIV成象特点,修改传统光流模型为整体光流模型,以此作为观测模型,并与流场模型联立,构成一个DPIV线性系统模型。从而采用最小二乘法求解,极大的加速了DPIV流速场的计算。由于计算中已经嵌入了流体约束,故无须后处理即可得到光滑的流速场。实验表明本文算法可适合很大一类DPIV的计算,速度快而且结果更为精细,对于流体力学研究及实时流场可视化研究是一种有前途的新算法。

1 无源仿射流场模型

由于DPIV研究的是对流体场某个截面成象测速,因此可以用如下的二维矢量方程表示。设 $Z(x, y)$ 是流体矢量,

$$Z(x, y) = p(x, y) \cdot i + q(x, y) \cdot j \tag{1}$$

这里, $p(x, y), q(x, y)$ 分别代表水平方向和垂直方向的流速分量。

根据速度的定义,式(1)又可写作

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = p(x, y) & (2) \\ \frac{dy}{dt} = q(x, y) & (3) \end{cases}$$

其中的 $p(x, y), q(x, y)$,即流速矢量,根据流体力学的理论,应该是如下二维流体方程组的解。

$$\begin{cases} \text{div}(Z) = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 & (4) \\ \rho dZ/dt = -\nabla N + \mu \nabla^2 Z + \rho F & (5) \end{cases}$$

这里, N, ρ, μ, F 分别表示压力、密度、黏度系数及外力。

方程(4)称为“无源约束”,反映了流体的致密性或称为不可压缩性质。

方程(5)是基本的流体运动方程,即Navier-Stokes方程^[6],是从Newton运动定律推导的直接

结果。作为基本方程,式(5)可以描述多种多样的流体现象,甚至有混沌现象被发现。直接求解(5)式是非常困难的,因为它是流速场的高度非线性方程。

在本文中我们对所考虑的流体对象作如下限制(1)流场为定常场,不随时间而改变。(2)流体粘度很小,意味着可以忽略不计。并且,将方程(5)线性化,在局部点 (x_0, y_0) Taylor展开到一阶线性项,有

$$p(x, y) = p(x_0, y_0) + a * (x - x_0) + b * (y - y_0) \tag{6}$$

$$q(x, y) = q(x_0, y_0) + c * (x - x_0) + d * (y - y_0) \tag{7}$$

这里的 a, b, c, d 是各偏导数,用下式表示,

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} & \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial q}{\partial x} & \frac{\partial q}{\partial y} \end{bmatrix}_{x=x_0, y=y_0}$$

于是,原流体方程(5)可以用线性化的方程组表出。

上述限制和线性化是真实流场一个较好的局部近似,并不影响本文算法的有效性,因为很多常见的不同形态的流体现象,比如均匀层流,发散流,涡旋等等,均可用该模型近似表示。方程组(6)(7)被称为二维仿射模型(AFM),在流场可视化领域已有很广泛的应用^[7,8]。在本文中,继续把方程(4)代入方程组(6)(7)中,可以得到如下方程组,我们称之为无源仿射流场模型(Incompressible Affine Flow Model—IAFM),并用它来描述待处理的流场。

$$p(x, y) = p(x_0, y_0) + a * (x - x_0) + b * (y - y_0) \tag{8}$$

$$q(x, y) = q(x_0, y_0) + c * (x - x_0) - a * (y - y_0) \tag{9}$$

对于DPIV应用来说,目的在于根据观测到的图象,计算出每一点的速度值,即 $p(x, y)$ 和 $q(x, y)$,因此下一节中,我们修改了经典的光流计算模型,并代入上述无源仿射流场模型,得到一种DPIV计算的快速算法。

2 整体光流计算模型

DPIV计算一般基于曝光时间很短的假设,即两幅DPIV图象的成象时刻相隔足够短,从而流场中的微粒的象点的位移极小,并且假定外界光照明不变,于是可以认为该象点在前后两幅图中的亮度保持不变。换句话说,图象中某点的亮度变化仅仅由运动引起。这就是经典的光流约束方程^[9],由下式表示。

$$dG(x, y, t) = 0 \tag{10}$$

这里, x, y, t 分别表示位移和时间坐标, d 是微分算子。

然而, 外界光照明强度不变的条件在多数 DPIV 成像情况未必成立。比如很难保证氙灯光源在两次瞬间曝光时的发光强度完全一致。于是, 考虑到照明光源强度的变化, 即 $di \neq 0$, 我们修改式(10)为

$$dG(x, y, t, i) = 0 \quad (11)$$

此式把由于光源变化所引起的图象亮度改变一并考虑进去, 故称之为整体光流计算模型 (Total Optical Flow Computation—TOFC)。

为简化问题, 认为相邻两个时刻的光源亮度变化在图象的局部仅仅呈现线性关系, 即 $i_2 = k * i_1$ 。

用 Taylor 公式展开(11)并代入(2)(3), 得到下式,

$$G_x \cdot p + G_y \cdot q + G_t + \mu \cdot G = 0 \quad (12)$$

其中 $\mu = (1-k)/k$ 为光照改变因子。

到此时为止, 我们已经把要求的流速场与观测到的图象联系起来。

要保证整体光流模型能稳定计算, 如下的 2 个条件必须设法满足。

(1) 两幅图象中对应点的位移应小于该点图象亮度的空间变化梯度, 否则式(11)不能成立。

(2) 图象亮度函数必须是可微分的, 否则各个导数就无法准确计算。

在具体实现中, 条件(1)是通过多分辨率处理来保证, 比如构造一个不同亚采样率的 Gauss 金字塔。条件(2)则是通过较大范围的 Gauss 滤波来保证。实验表明通过调整参数, 可处理很大流速范围的 DPIV 图象。

单独一个方程(12), 由于有 3 个未知数, p, q, k , 所以无法直接求解。但是在上一节中, 方程组(8)(9)给出了描述流场的简化模型。这样, 联立(12)和(8)(9), 并在多点测量构成超定的线性系统方程组。为了获得相容解, 本文利用最小二乘法判据, 在每个位置逐点求解相应的流速 $p(x, y)$ 和 $q(x, y)$, 具体实现请见下节。

3 算法具体实现

本文算法的整体流程, 主要有如下几步。

(1) 预处理操作: 如前所述, 为了满足整体光流计算的两个条件, 须对采集到的 DPIV 图象做预处理操作, 主要有 Gauss 金字塔降维以及 Gauss 滤波

平滑。

(2) 分块分割图象: 在每一块局部内的流场可以用无源仿射模型来表示。分块的数目与每一块的尺寸由欲获得的流场分辨率确定。一般块与块之间有重叠, 避免方块效应。

(3) 选择特征点: 根据文献[10]的工作, 在实际情况下, 只有在图象空间梯度足够大处, 光流约束才能较好地满足。为此, 我们事先对每一分块中的象素点按其梯度幅值排序, 选取较大的若干点作为特征点集。求解时只让特征点参与计算, 可保证结果的稳定性。计算梯度的方法是如下所示的 Sobel 算子。

$$1 \quad 0 \quad -1 \quad 1 \quad 2 \quad 1$$

$$2 \quad 0 \quad -2 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$1 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad -2 \quad -1$$

(4) 最小二乘求解 (LS): 为获得前述超定方程组的 LS 解, 取每一块的中心作为局部坐标原点, 将(10)(11)代入(14), 在特征点集中计算, 未知数为 $X = \{p_0, q_0, a, b, c, \mu\}$, 应用如下伪逆公式求得 LS 解,

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (13)$$

4 实验结果

用给出的模型和算法计算了实测获得的多幅不同流体的 DPIV 图象, 在很少需要调整算法参数前提下, 均获得了很好的结果。不仅计算速度相对有很大的提高, 而且所得到的流场图很光滑, 无须复杂的后处理。并且, 很精细的流场结构也反映出, 同时可给出定量的分析结果。下面, 结合一个实验实例说明。

图 2 是某次 DPIV 实验测得的 2 幅图象, 原始分辨率为 1024×1024 , 经预处理后降维至 256×256 , 平滑所用的 Gauss 滤波参数为 $\sigma = 3.0$, 为获得 256×256 分辨率的流场图, 我们把原图分割为 $8 \times 8 = 64$ 块, 每块尺寸为 24×24 , 因而相邻块有重叠。经梯度排序后选取前 64 个作为特征点, 进行 LS 伪逆计算。

图 3 即是利用本文算法获得的结果流场图。为显示方便, 图中流场分辨率仅画到 32×32 。作为对比, 我们还给出了利用传统相关法的结果, 如图 4 所示。可见本文结果相当光滑, 而相关法的结果则存在较多的假配点。而且在图 3 中, 很多精细的结构被检测出来, 并可得到定量的解析分析。比如图中左下方箭头所示的涡旋, 计算得出的模型为,

$$\begin{cases} p=0.012x+0.064y \\ q=-0.012x-0.012y \end{cases} \quad (14)$$

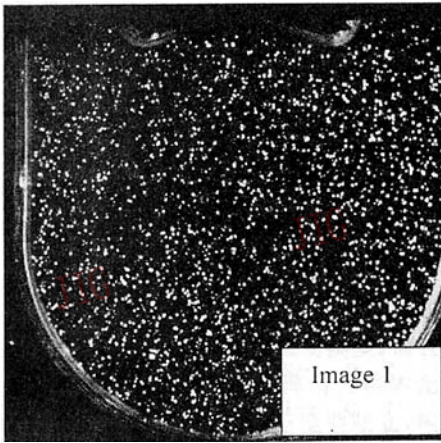


Image1

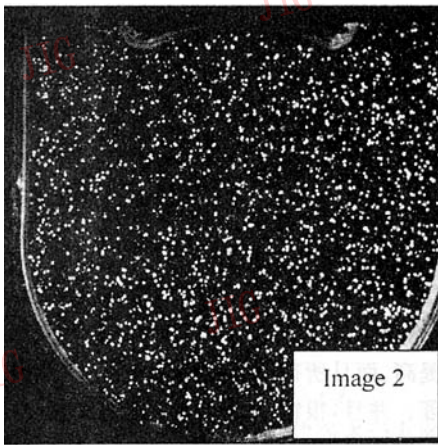


Image2

图2 DPIV 图象

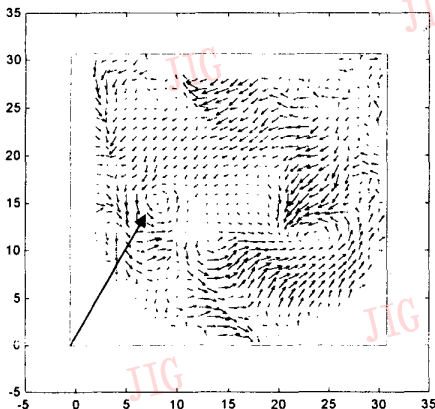


图3 本文算法得到的结果流场图

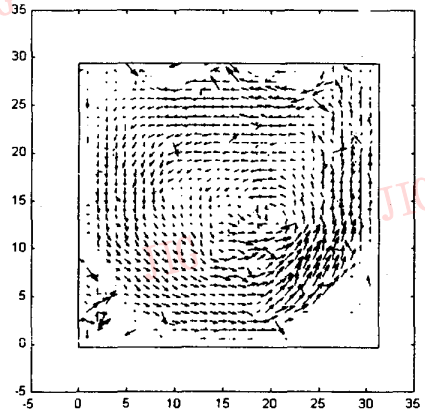


图4 传统相关法得到的结果流场图

本文实验图象均由德国洪堡大学流体实验室提供。对图3的流场结构,经他们反馈回的视频连续帧观测和单点仪器测量的数据已得到了证实。从近似程度上看,传统相关算法实质上是本文算法的一种近似。

对上面2幅 DPIV 流场图的计算,在 Pentium/166MPC 机计算,本文算法仅耗时 2.7 秒(含预处理,计算选取特征点和伪逆求解),而传统的面积相关法则需 37.5 秒。而且,算法结构简单,便于硬件(如 ASIC, DSP 芯片)实现,对实时流场可视化^[6]及流体力学分析^[11,12]很有应用价值。

5 结 论

传统 DPIV 算法多基于面积相关运算,它把流场图象当成普通图象进行相关匹配处理,不仅速度慢,而且效果不理想,常需复杂的后续矫正处理。

本文提出一种简化的流场模型——无源仿射模型,用来描述很大一类常见的流场现象,并且根据 DPIV 成象特点,修改传统光流约束为整体光流模型。二者相结合,从而在计算中直接加入了流体的物理性质约束,通过求解一个过定的线性方程组,无须后处理即可一步得出光滑的流速场。实验表明本文算法的有效性,不仅速度快,而且能给出满意的定性和定量结果。

致谢

本文实验和成文过程中,非常感谢叶秀清教授,蒋伟峰博士的帮助。特别感谢 K. Affeld 教授(德国洪堡大学流体实验室)提供的 DPIV 图象以及很有价值的讨论。十分感谢编辑和审稿人很有价值的修改意见。

参考文献

- 1 Willert C E, et al. Digital particle image velocimetry. *Exp. Fluids* 10, 1991;181~193.
- 2 Yamamoto F, Wada A, Iguchi M, et al. Discussions of the cross correlation method for PIV. *Journal of Flow. Vis & Image Proc*, 1996,3:65~78.
- 3 Fuyuki M, Hanatani K, Kiruma M, et al. Capabilities of small computer as image analyzers for quantitative flow visualization. *Journal of Flow. Vis & Image Proc*, 1995,2:187~194.
- 4 Fujita I, Kaizu T. Correction method of erroneous vectors in PIV. *Journal of Flow. Vis & Image Proc*, 1995,2:173~185.
- 5 Kimura I, Ykino, Ogava M. Application of neural network to quantitative flow visualization. *Journal of Flow. Vis & Image Proc*, 1993,1:261~269.
- 6 Ford R M, Strickland R N. Representing and visualizing fluid flow images and velocimetry data by nonlinear dynamical system. *GMIP* 1995,57(6):462~482.
- 7 Helman J, et al. Representation and display of vector field topology in fluid data sets. *IEEE trans on Computer*, 1989,22(8).
- 8 Rao A R, et al. Computerized flow field analysis: Oriented texture fields. *IEEE tran PAMI*, 1992,14(7).
- 9 Horn B K P. *Robot Vision*, MIT press, 1986.
- 10 Poggio V A. Motion field and optical flow; Qualitative properties. *IEEE trans PAMI-11*, 1989.
- 11 Zhang J, Huang T S, Adrian R J. Salient structure analysis of fluid flow. *CVPR'94*, 1994;310~315.
- 12 Nogawa H, Makajima Y, Sato Y. Acquisition of symbolic description from flow field: A new approach based on a fluid model. *IEEE PAMI-19*, 1997.



刘济林 教授,博士生导师,浙江大学智能与信息系统研究所,研究方向为图象处理,并行处理,计算机视觉。



李宏东 1993年毕业于南京理工大学电子系,1996年毕业于浙江大学模式识别专业,获硕士。1996年免试攻读浙江大学智能与信息系统研究所博士。研究方向为文字识别,计算机视觉。



顾伟康 教授,博士生导师,浙江大学副校长,智能与信息系统研究所,研究方向为模式识别,视觉智能机器人。

A Fast and Efficient DPIV Algorithm Using IAFM Models

Li Hongdong, Liu Jilin, Gu Weikang

(Institute of Information and Intelligent System, Zhejiang Univ. Hangzhou 310027)

Abstract Traditional DPIV (Digital Particle velocimetry) methods mostly are based on area-correlation^[1]. Though proven to be very time-consuming and much error prone, they are widely adopted because of their conceptual simple and easy to be implemented, and also because there is few alternative. This paper provides a non-correlation, conceptual new, fast and efficient approach for DPIV which takes the nature of flow into consideration. An Incompressible Affine Flow Model (IAFM) is introduced to describe a flow that incorporates rational constraint directly into the computation. This IAFM, combining with a modified optical flow method-named Total Optical Flow Computation (TOFC), provides a linear system solution to DPIV. Experimental results on real images demonstrate our method to be a very promising approach for DPIV.

Keywords Affine model, Flow visualization, Optical flow, Computer vision, DPIV