

文章编号: 1001-4888(2016)05-0673-10

基于光流算法的粒子图像测速技术研究和验证^{*}

黄湛¹, 张森², 程攀², 王宏伟¹

(1. 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074; 2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 光流测量技术作为一种新的空气动力学实验技术, 以其像素级分辨率的矢量场测量优势获得广泛的应用。光流测量技术使用光流约束方程, 配合平滑限定条件, 可以进行速度场测量, 获得高分辨率的全局矢量场。本文首先通过研究积分最小化光流测速理论和算法, 采用 C++ 编写光流速度测量程序; 然后通过三种典型的人工位移图像对光流计算程序进行了验证, 并将结果和标准位移分布进行比对分析, 以指导如何在实际应用中获得高精度光流速度场; 最后进行小型风洞后向台阶实验, 利用高速相机拍摄示踪粒子图像, 使用光流计算程序获得速度矢量场, 同采用互相关算法的粒子图像测速计算结果相比较, 体现出光流计算方法像素级分辨率的矢量场测量优势。

关键词: 光流; 速度测量; 粒子图像; 运动估计; 积分最小化

中图分类号: O355

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-151

0 引言

在空气动力学发展过程中, 应用实验手段获得流体的空间运动结构, 获取全场流动信息, 是了解空气动力学诸多流动现象及机理的关键, 同时这一需求也不断刺激空气动力学实验测试技术水平的提升。传统的流动测量方法大多采用单点测量或介入式测量手段^[1], 不能满足复杂流动情况以及全场速度测量的需求。

近年来, 粒子图像测速技术采用拍摄跟随流场运动的粒子图像并通过相关计算获得速度场, 并以其非介入式、全场流动速度测量、测量精度高、测速范围广等优点在全局速度测量方面具有应用优势^[2]。不过, 粒子图像测速得到的速度矢量为其对应的判读区域内粒子群的平均速度, 忽略了此判读区域内速度场的变化, 这使得粒子图像测速方法的空间分辨率受到一定的限制, 并且对于大的速度梯度、速度变化剧烈的区域, 其速度场测量精度是受到制约的。

相机所记录的物体的图像, 本质上是物体所反射的光的分布。当相机连续拍摄运动物体时, 物体所反射的光就会在相机底片上形成一系列连续变化的图像, 由这些图像所组成的连续变化的信息不断“流过”相机底片, 如同光在流动, 这是光流定义的物理基础。物体在光的照射下, 其表面灰度会呈现出一定的分布, 而所谓光流, 就是指图像中灰度模式的运动速度。粒子图像测速技术中拍摄到的粒子图像显示的是粒子浓度的分布, 具有一定浓度的运动粒子群通过其散射光在相机底片上成像, 所以粒子图像测速技术中采用相关方法得到的速度场实际上是光流速度场(Optical flow), 光流速度场能否代表真实速度场要取决于示踪物质能否充分地跟随流体运动。

^{*} 收稿日期: 2015-09-05; 修回日期: 2015-12-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB744805), 国家自然科学基金(11572304)资助

通讯作者: 黄湛(1969—), 男, 工学博士, 研究员。研究方向: 实验空气动力学, 流动显示测量技术及可压缩剪切流。Email: xunfang05@sohu.com

Horn 和 Schunck 早在上世纪 80 年代就开创性地进行了光流研究和计算^[3], Horn 等认为同一运动物体引起的光流场应该是连续的、平滑的, 即同一物体上相邻点的速度是相似的, 那么其投影到图像上的光流变化也应该是平滑的, 根据这一特点 Horn 提出了一种利用加在光流场上的附加速度平滑约束, 即全局平滑约束将光流场的计算问题转化为一个变分问题, 给出像素级分辨率的运动估计方法。随后, 光流技术在发展过程中吸引了各个领域的科研人员进行研究^[4-6], 也产生了很多其他解算方法, 如图像相关测速法、基于能量的方法^[7]、基于相位的方法^[8]和神经动力学方法等。针对 Tianshu Liu 等提到^[9]的微分法在计算较大像素位移时遇到的困难, Corpetti 等人提出在时间步上采用积分形式的光流方程代替微分形式的变分方程^[10], Ruhnau 等使用高斯滤镜生成二元图像金字塔的多分辨率策略^[11]。这些算法都有各自的优势, 不过由于具有一定的适用范围和算法复杂度使其相对于微分法无法获得广泛应用。

本文引入光流计算方法, 编写了光流速度测量程序, 通过人工位移图像对该程序进行验证和分析, 以合理的测速范围和最优的加权值指导如何在实际应用中获得高精度光流速度场; 进行小型风洞实验, 以粒子图像为速度测量载体, 使用光流计算方法获得像素级分辨率的速度矢量场。旨在通过这些研究, 发展以光流技术为基础的全场流动测量技术, 期望在提高空间分辨率和避免速度梯度影响、了解复杂流动的空间结构、获取更多的动力学信息方面获得进步, 以丰富实验流体力学测量技术。

1 粒子图像光流速度场求解算法

Horn 的光流场解算方法是微分法的基础, 它以灰度守恒方程为基础, 附加速度平滑约束条件, 利用连续变化的图像上各点灰度的时间、空间梯度来计算每一点的速度矢量。

光流的灰度约束条件认为, 图像上各点灰度随时间和空间的变化满足如下关系:

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (1)$$

其中 $I(x, y, t)$ 是 t 时刻 (x, y) 位置的图像灰度, $I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ 为原 (x, y) 位置的物体运动到 $(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ 位置的灰度, 令 $u = \Delta x / \Delta t$, $v = \Delta y / \Delta t$, 将上式进行泰勒展开并忽略高阶项可以获得光流约束方程:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (2)$$

其中 I_x 、 I_y 、 I_t 是灰度的二维空间和时间梯度。显然该方程是求解 u 、 v 两个未知数的不定方程, 需要引入辅助约束方程进行求解。

Horn 和 Schunck 指出^[3], 图像灰度模式的每点不应该是独立运动, 而是具有相关性的, 相邻位置上的速度应该是具有连续性的, 即图像灰度模式平滑条件。表述这一额外约束的方式之一是最小化光流速度梯度的平方和 $(\partial u / \partial x)^2 + (\partial u / \partial y)^2$ 和 $(\partial v / \partial x)^2 + (\partial v / \partial y)^2$ 。令灰度变化误差为:

$$\xi_l = I_x u + I_y v + I_t \quad (3)$$

速度梯度平方和判定量为:

$$\xi_v = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (4)$$

实际拍摄的图像灰度将会受到硬件条件和噪声的影响而偏离基本的光流约束条件, 所以不能肯定地认为 ξ_l 恒为 0, 因此有必要找到合适的加权因子 β , 使得两个判定误差在二维空间上的积分为最小, 即对

$$\xi = \iint (\xi_l + \beta \xi_v) dx dy \quad (5)$$

进行积分最小化。通过变分法建立每个因变量的欧拉特征方程:

$$I_x^2 u + I_x I_y v = \beta^2 \nabla^2 u - I_x I_t \quad (6)$$

$$I_x I_y u + I_y^2 v = \beta^2 \nabla^2 v - I_y I_t \quad (7)$$

其中 $\nabla^2 u$ 、 $\nabla^2 v$ 分别为速度 u 和 v 的拉普拉斯算子。获得两个欧拉特征方程后, 需要通过时空离散建立图像灰度关于时间和空间微分的离散表达式, 并建立两个速度分量的迭代计算格式, 最终得到光流速

度场(u, v)^[12]。

2 基于人工位移图像的光流速度场求解算法验证

本文基于微分法编写了光流速度场计算程序,拟用于风洞实验速度场测量。为了验证光流算法的精度,本文选取灰度图像,通过人工位移获得标准速度场,然后采用所编写的光流计算程序对该图像进行处理,将光流计算结果与标准速度场进行比较。实际计算中,采用1个单位的时间梯度,所得的速度值将直接反映图像像素位移值,同时,也可考察两张图像的像素位移对光流计算精度的影响。

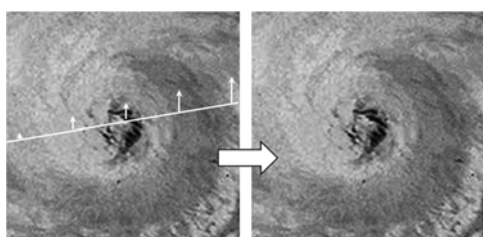


图1 灰度原图与一次函数速度型位移后的图像

Fig. 1 The original and its image shift(linear function)

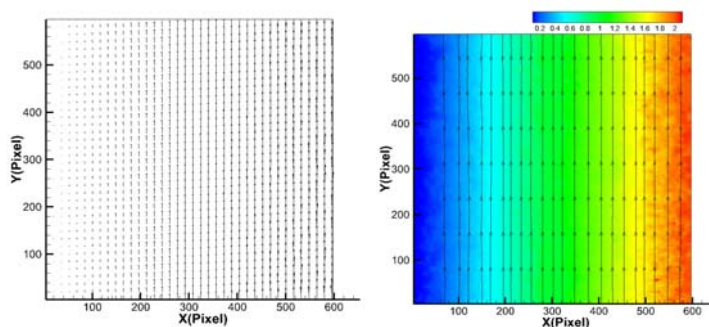


图2 光流计算得到的一次函数位移速度矢量图和流线图

Fig. 2 The velocity vector and the streamlines(linear function)

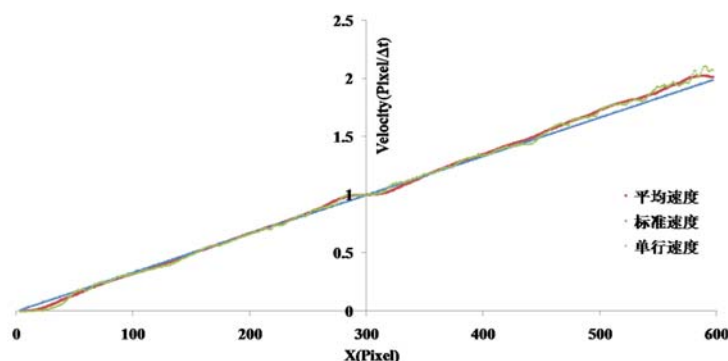


图3 单行速度、平均速度与标准速度比较分析(一次函数速度型位移)

Fig. 3 Single linear velocity, average velocity and standard velocity distribution(linear function)

首先考察第一组图像(图1),采用一次函数速度型进行人工位移,处理得到的速度矢量分布(Skip 16×16pixels,下同)和流线如图2。同样横坐标X下的速度理论上应一致,但由于图像本身灰度梯度存在差别,将对全部Y单行上X位置速度进行平均,与Y=300单行上X位置速度进行比较,通过统计平均,单行速度、平均速度与标准速度比较如图3。第二组图像(图4)采取二次函数速度型 $y = -2[(x-300)/300]^2 + 2$ 进行了人工位移,处理得到的速度矢量分布和流线分布如图5,单行速度、平均速度与标准速度比较如图6。第三组图像(图7)为采用正弦函数速度型 $y = 2\sin[(x/300) \cdot \pi]$ 进行人工位移的图像,通过计算获得的速度矢量和流线分布图如图8,单行速度、平均速度与标准速度比较如图9。

通过将光流计算的速度矢量和标准速度进行比较,可以发现,图像位移量不超过1.5个像素部分的计算结果与标准速度结果十分吻合,偏差很小,图像位移量超过1.5个像素部分的计算结果则出现了明显的偏差,这很好地说明了位移量小的区域速度偏差较小,平滑性好;而位移量大的区域速度偏差较大,平滑性较差。这在很大程度上对如何在实际测量应用中保证光流计算获得高精度的结果有一定指导作用。

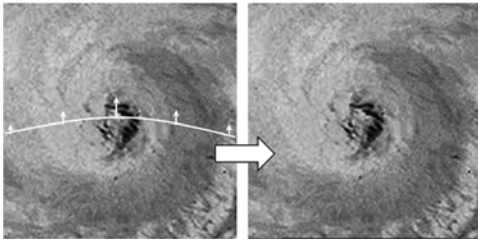


图 4 灰度原图与二次函数
速度型位移后的图像

Fig. 4 The original and its image
translation(quadratic function)

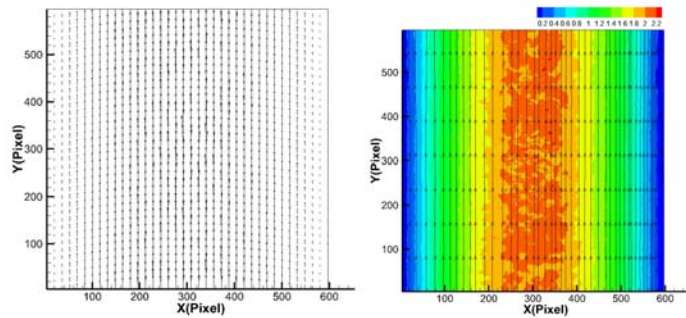


图 5 光流计算得到的二次函数
位移速度矢量图和流线图

Fig. 5 The velocity vector and the
streamlines(quadratic function)

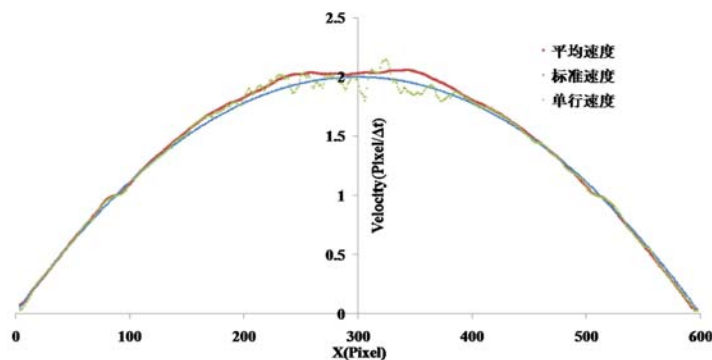


图 6 单行速度、平均速度与标准速度比较分析(二次函数速度型位移)

Fig. 6 Single linear velocity, average velocity and standard velocity distribution(quadratic function)

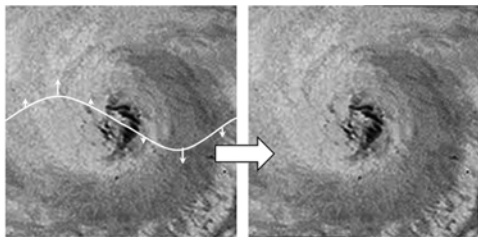


图 7 灰度原图与正弦函数
速度型位移后的图像

Fig. 7 The original and its
image shift(sinusoidal fuction)

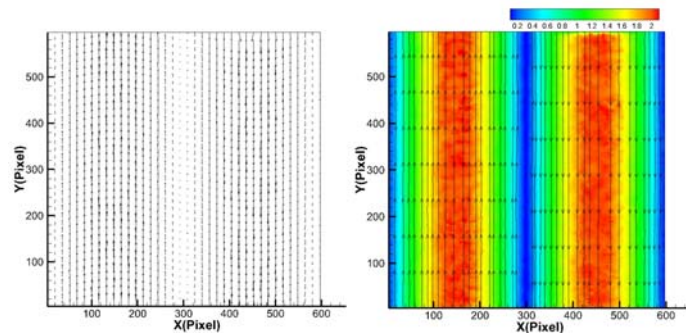


图 8 光流计算得到的正弦函数
位移速度矢量图和流线图

Fig. 8 The velocity vector and the streamlines(sinusoidal fuction)

从验证结果来看,当位移在一个像素左右时,验证结果较好,这是因为光流算法是以灰度守恒方程为基础的,图像上各点灰度随时间和空间变化满足灰度约束条件,在进行时间空间离散时,以像素为单位计算各像素位置上的灰度时空微分;引入额外的平滑约束方程时,也是以一个像素为步长进行计算,光流灰度约束方程和平滑约束方程能够保证以一个像素为步长进行计算时仍具有很高的精度,同时计算的速度场具有像素级分辨率,这也是目前 PIV 互相关算法所无法达到的(像素位移最佳为判读区大小三分之一左右)。未来还可以通过金字塔算法的引入来改善较大像素位移时的速度计算误差。

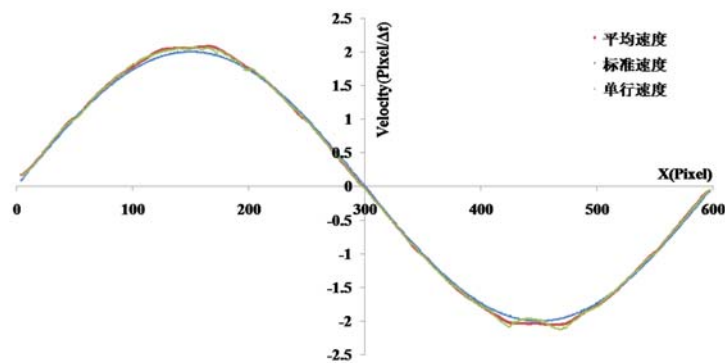


图9 单行速度、平均速度与标准速度比较分析(正弦函数速度型位移)

Fig. 9 Single linear velocity, average velocity and standard velocity distribution(sinusoidal fuction)

3 加权因子的影响

β^2 作为加权因子表征了实验和数值离散噪音的相对大小,在实际计算中 β^2 通过调整速度梯度平方和比重来影响计算结果的平滑性,即通过选取不同的加权值获得不同平滑程度的流场速度分布,太小则无法起到约束作用,太大则平滑性过强易抹去流场细节。下面将以旋转灰度图像(图 10)为计算基础,在不同 β^2 值下对光流计算结果(图 11)纵向考察线速度分布与标准速度分布进行比较(图 12~16)。

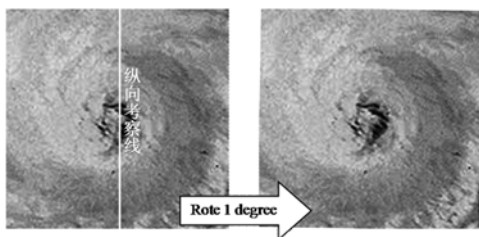


图 10 灰度原图与旋转 1° 后的图像

Fig. 10 Grayscale image and its rotting image

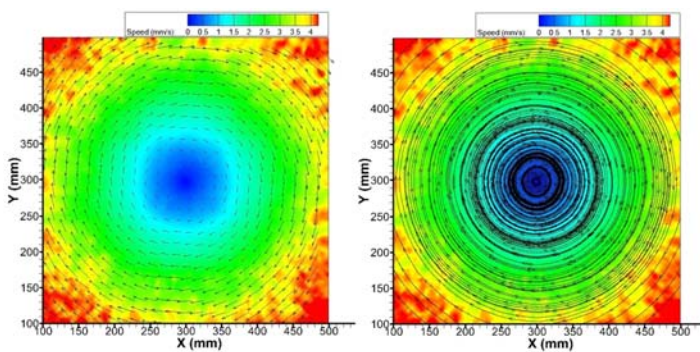
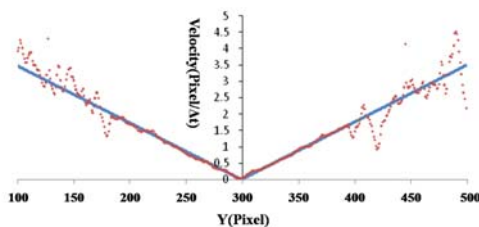
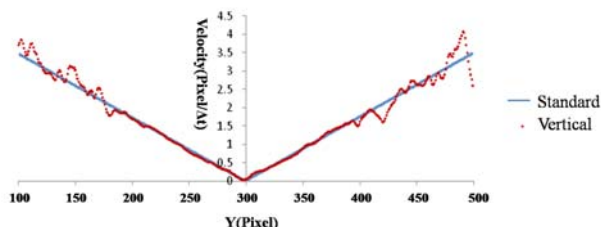


图 11 采用光流计算方法得到的速度矢量图和流线图

Fig. 11 Velocity vectors and the streamlines

由图 12~16 数据可以看出,随 β^2 增大,纵向考察线上速度场的分布能够更好地与标准速度分布吻合。在实际应用粒子图像进行光流速度场计算时, β^2 相对较大,说明噪音较大,这与粒子图像不同于激光诱导荧光这类图像有关,粒子图像的灰度分布存在一定的间断性,需要大的加权值来限定误差。

图 12 $\beta^2 = 1$ 时纵向考察线速度分布与标准速度分布比较Fig. 12 Velocity distribution when $\beta^2 = 1$ 图 13 $\beta^2 = 4$ 时纵向考察线速度分布与标准速度分布比较Fig. 13 Velocity distribution when $\beta^2 = 4$

为了进一步分析 β^2 的选取对速度场特性的影响,我们根据不同 β^2 值解算出的光流速度场与标准速度分布之间的相关系数 r 来表现 β^2 对解吻合的影响。根据图 17 中数据结果可以看出,相关系数 r 在 β^2 增长初期会迅速增加,在 10~18 之间达到平稳阶段并取得极值,超过 20 以后,反而会下降,因此选取

适当的 β 值将对光流算法获得的速度场的准确性有很大帮助。不过这里 β 是与灰度的时间和空间梯度间隔相关的常数,实际应用中应结合具体参数进行选取计算。

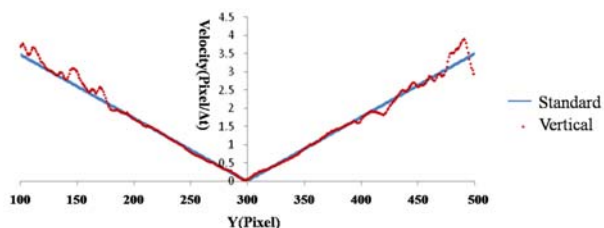


图 14 $\beta = 7$ 时纵向考察线速度分布与标准速度分布比较

Fig. 14 Velocity distribution when $\beta = 7$

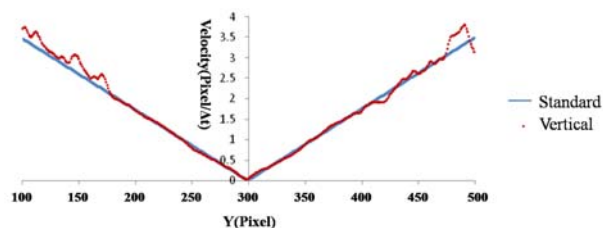


图 15 $\beta = 10$ 时纵向考察线速度分布与标准速度分布比较

Fig. 15 Velocity distribution when $\beta = 10$

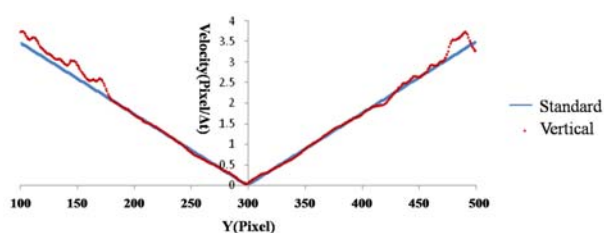


图 16 $\beta = 13$ 时纵向考察线速度分布与标准速度分布比较

Fig. 16 Velocity distribution when $\beta = 13$

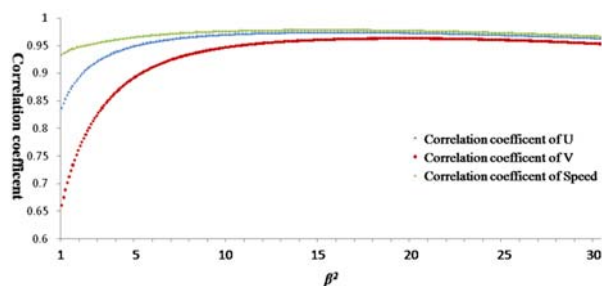


图 17 相关系数随 β 的变化曲线

Fig. 17 Correlation coefficient curve

4 光流速度场测量风洞实验与结果

本文针对光流测速算法对流场的要求,进行了后向台阶内流场涡结构观测实验。

4.1 光流速度场测量实验

实验的难点在于如何保证实验条件满足光流流场计算的约束方程。根据前述分析,应用如上微分法对光流流场进行解算时,要求连续拍摄的每张图像具有相同的光照条件,相邻图像对应像素点的位移不致太大,最好采用高速相机拍摄保证位移在两个像素以内,从而进行有效的光流速度场计算。

实验在实验室自行搭建的小型低速风洞系统内进行,整个系统由风洞主体及流动控制系统、示踪粒子发生和播发系统、激光照明及附属光路系统、图像采集系统和计算机处理系统组成。实验布局如图 18。

风洞主体通过其前段可控转速的涡轮风扇电机控制流动速度,通过调节变频器可以将流经中部试验段的流动速度控制在 $1 \sim 20 \text{ m/s}$ 的范围内;风洞主体通过其尾部的蜂窝整流器吸入混有示踪粒子的气流并进行整流,保证来流的稳定条件,并与三个示踪粒子播撒管共同工作使示踪粒子与吸入气流混合均匀。为保证恒定的光照条件,实验采用氩离子激光器输出的连续激光通过扩束镜和片光源为流场提供连续的片光照明;为保证相邻图像间位移不致太大,实验采用高速相机进行图像采集,观测流场前先对标尺进行拍摄用以标定空间尺度,采集结束后传输到计算机上存储并处理。

4.2 粒子图像光流场分析与图像均一化

高速相机拍摄的后向台阶内流场粒子图像如图 19,大量连续拍摄的粒子图像记录了连续变化的光流流场信息,虚线框内为计算区域。为了对实际拍摄示踪粒子图像的光流场特性进行验证,本文将实际拍摄的光流场图像进行旋转获得标准位移场,如图 20。采用与前述光流解算方法验证相同的比较方式对计算获得的速度场进行考察,如图 21 和图 22,并分析了速度分布与标准速度分布间的相对误差和绝对误差,如图 23。

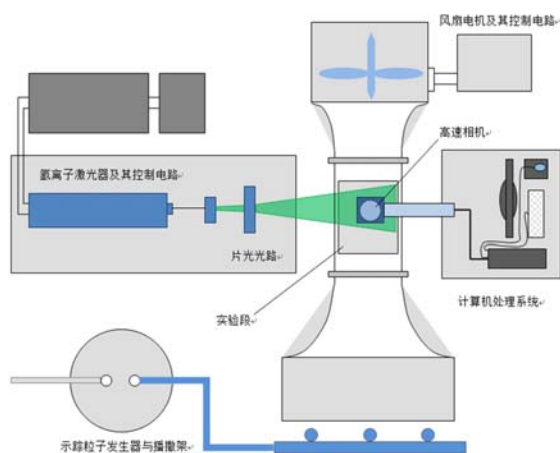


图 18 光流测速实验布局

Fig. 18 Schematic of experimental set-up

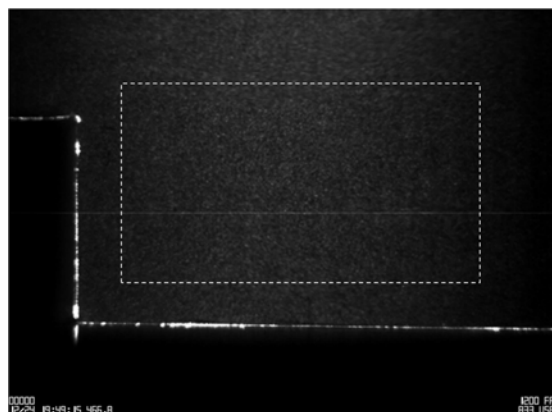


图 19 后向台阶流场粒子图像及流场计算区域

Fig. 19 Flow field image of Backward facing step

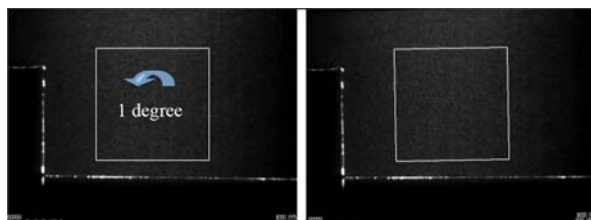
图 20 使用示踪粒子图像旋转 1° 前后
图像及验证计算区域

Fig. 20 Tracer particle image and verification region

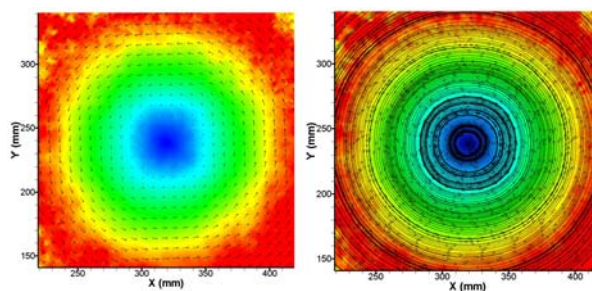


图 21 旋转前后粒子图像计算的速度矢量与流线图

Fig. 21 Velocity vectors and the streamlines

从图 21、图 22 和图 23 可以看出，在示踪粒子图像上，当像素位移小于一定值时，计算获得的速度分布能够很好地与标准值吻合；横向考察线和纵向考察线上速度分布绝对误差基本处于 5% 线以下，不过由于靠近 0 位移位置时，速度绝对值较小，故而相对误差较大；在 $\pm 1\text{pixel}$ 位置绝对误差和相对误差最小，都达到了 1% 左右，该位置 $\pm 0.5\text{pixel}$ 邻域是速度相对精度和绝对精度都比较高的区域。

由于激光经过柱透镜制造的片光存在一定的扩张角度，在激光片光传播过程中，片光的宽度始终在变大，所以激光片光在展开区域的能量分布随时空变化也会有一定的差异。此外还由于实验段的有机玻璃制造存在许多细微的气泡或表面有轻微划痕，当激光入射进有机玻璃遇到这些气泡或划痕时，激光就要被削减一部分能量，导致射入流场里的激光片光含有大量的条纹，即激光片光的能量分布是不连续的，自然所得的灰度场里也含有大量的条纹。

由于上面提到的两个原因，我们通过摄像机得到的灰度场不能反映真实的浓度场，必须对拍摄得到的灰度场进行修正。采用的修正方法是在实验前或实验后拍取一张均匀示踪粒子灰度场，虽然这张灰度场图像上的灰度分布也不均匀，但这张图像记录了各点的光照条件，所以我们可以将实验中拍摄的灰度场 I 除以均匀灰度场 $\hat{I}$ 得到一个相对灰度场 I' ，如式(8)所示：

$$I' = I/\hat{I} \quad (8)$$

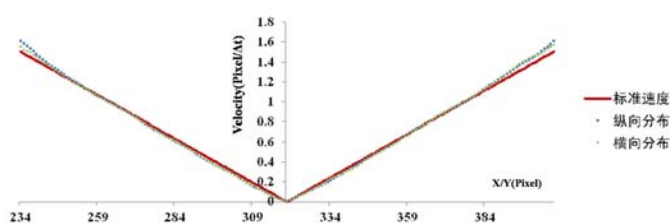


图 22 横向速度分布和纵向速度分布与标准速度比较

Fig. 22 Horizontal and Vertical velocity distribution

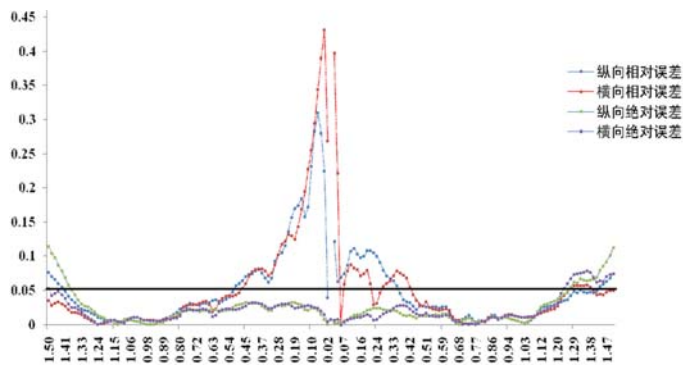


图 23 考察线上速度分布的绝对误差和相对误差

Fig. 23 Absolute error and relative error

2.2pixels,表明区域内速度计算结果基本位于可信区间内。

由于所观测流场的绝对速度较低($<1\text{m/s}$),后向台阶内流场结构不具有典型性,所以将计算区域内的光流处理结果(图 24)同采用互相关算法的 PIV 结果(图 25)进行比较。在同样像素分辨率下,光流算法的结果在速度大小、方向和等速度线分布上基本与 PIV 计算结果基本一致,大尺度涡结构和位置也与其基本无差异,但光流计算结果中可以观测到更小尺度的涡结构,等速度线更加平滑。

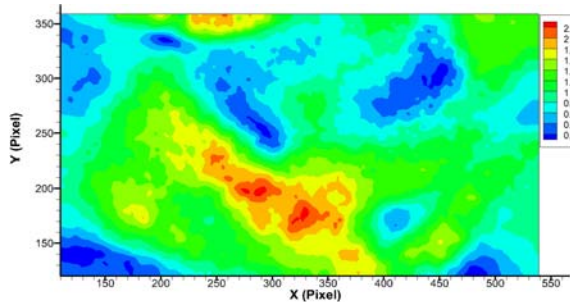
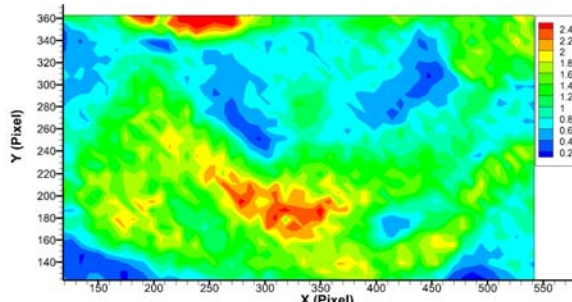
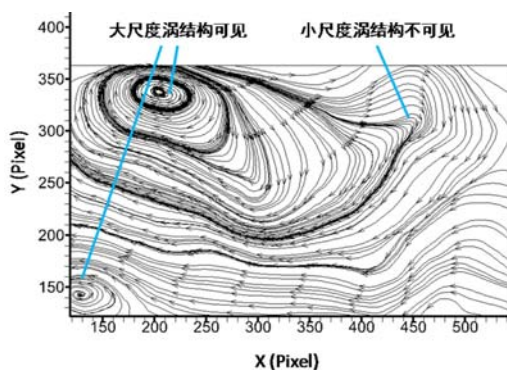
图 24 光流计算结果(skip $8 \times 8\text{pixels}$)Fig. 24 Optical flow result(skip $8 \times 8\text{pixels}$)图 25 PIV 计算结果($8 \times 8\text{pixels}$ 判读区)Fig. 25 PIV result($8 \times 8\text{pixels}$ interrogation area)

图 26 PIV 计算获得的流场结构

Fig. 26 Flow structure obtained by PIV

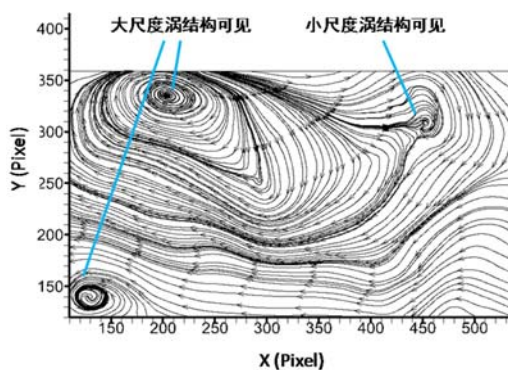


图 27 光流计算获得的流场结构

Fig. 27 Flow structure obtained by optical flow

比较两者流线图(图 26 和图 27)可以看出,在同样像素分辨率下,PIV 算法的计算结果中,较大尺度的涡结构可以显示出来,但是对于比较小尺度的涡结构显示却不明显,而光流算法计算结果中的小尺度涡结构被明显地显示出来。

为进一步分析,将两者小尺度涡结构区域图像放大(图 28 和图 29),可以看出,光流计算结果在每个像素上都获得一个速度矢量,可以显示更加精细的流场结构,而 PIV 算法由于采用了 $8 \times 8\text{pixels}$ 的

判读小区,其流场结构的精细显示受到限制。

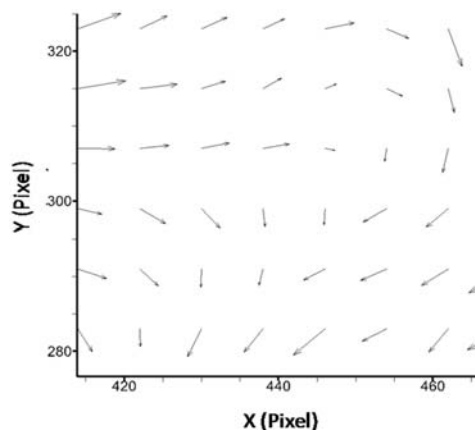


图 28 PIV 结果中小尺度结构区域放大

Fig. 28 Region magnification of small scale structure of PIV

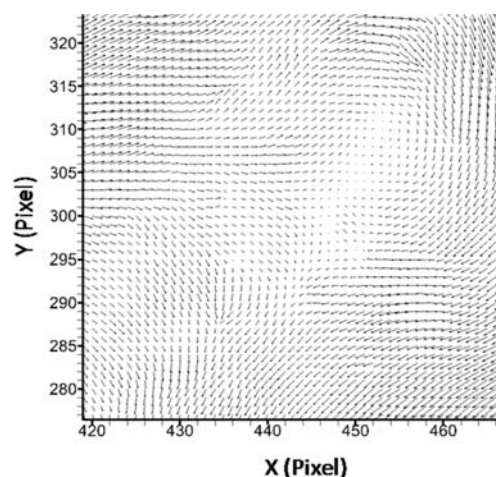


图 29 光流结果中小尺度结构区域放大

Fig. 29 Region magnification of small scale structure of optical flow

光流测速技术在流场测量中对设备要求较高,例如在低速流场中,如果想显著地提高速度测量能力,可以放大拍摄区域(相当于提高像素所代表的空间区域大小),或降低像素分辨率(例如 $1K \times 1K$ 的分辨率降为 100×100 的分辨率)。另外,光流测速技术也可以和 PIV 设备相结合,利用图像校准,获得像素灰度的修正方法,再利用同步延时系统,实现对高速流场测量。此外,还可以通过金字塔算法的引入来提高速度测量能力。

5 结论与展望

通过对光流算法研究与编程实现,成功搭建了可用于光流测速的实验平台,进行了小型风洞内的光流速度场测量实验,比较光流算法和 PIV 对拍摄的粒子图像处理得到的速度场,可以得出结论:在本实验流动条件下,光流算法可以在像素级分辨率情况下获得优于 PIV 获得的速度矢量场,适合用于复杂流动的速度场测量。不过基于微分法的光流解算方法在计算较大位移区间时存在缺陷,未来将进一步通过算法研究和实验手段进行改进。

参考文献:

- [1] Lang D B. Laser doppler velocity and vorticity measurements in turbulent shear layers[D]. California: Caltech, Pasadena, 1985.
- [2] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental mechanics [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23(1):261—304.
- [3] Horn B K P, Schunck B G. Determining optical flow[J]. Artificial Intelligence, 1981, 17:185—203.
- [4] Liu T, Shen L. Determination of velocity and skin friction fields from images by solving projected motion equations [C]. 22nd International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF), Pacific Grove, CA, June 2007.
- [5] Liu T, Sullivan J P. Pressure and temperature sensitive paints experimental fluid mechanics(Chap. 3)[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [6] Tikhonov A N, Arsenin V Y. Solutions of ill-posed problems[M]. Winston: Washington, D. C. , 1977.
- [7] Heeger D J. Model for the extraction of image flow[J]. Optical Society of America, 1987, 4:1455—1471.
- [8] Fleet D J, Jespon A D. Computation of component image velocity from local phase information[J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 5:77—104.
- [9] Tianshu Liu, Lixin Shen. Fluid flow and optical flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 614:253—291.

- [10] Corpetti T, Heitz D, Arroyo G, et al. Fluid experimental flow estimation based on an optical flow scheme[J]. Experiments in Fluids, 2006, 40(1):80—97.
- [11] Ruhnau P, Kohlberger T, Schnorr C, et al. Variational optical flow estimation for particle image velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2005, 38(1):21—32.
- [12] Zhan Huang, Hongwei Wang, Yu Ma. The research of particle image velocimetry based on optical flow (ISFV16-1098)[C]. 16th International Symposium on Flow Visualization, June 24-27, 2014.

On the PIV Technology and Validation Based on Optical Flow Algorithm

HUANG Zhan¹, ZHANG Miao², CHENG Pan², WANG Hong-Wei¹

(1. China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Optical flow measurement technology, as a new aerodynamic experimental method, has been widely used in vector field measurement due to its advantage of pixel scale resolution. By means of optical flow scalar constraint equation, combining with smooth limit condition, optical flow experimental technique can measure global velocity vector field with high space resolution. Firstly, integral minimization optical flow velocimetry theory and algorithm were studied and programmed by C++; then, in order to verify the optical flow algorithm accuracy, three kinds of typical grayscale image shifted from artificial displacement were used for processing by the optical flow algorithm; finally, the obtained results were compared with the distribution of standard displacement to guide how to obtain optical flow velocity field in practical application. A backward step experiment in small wind tunnel was carried out. High speed camera was used to shoot tracer particle image; the velocity vector field was calculated by optical flow algorithm. Calculated results from optical flow algorithm were compared with result calculated by PIV correlation algorithm. Results show that optical flow experimental technique presents the advantages of pixel scale resolution.

Keywords: optical flow; velocity measurement; particle image; motion estimation; integration minimization