

基于双目视觉多曝光的粒子轨迹测速方法研究

周骛^{1,2*}, 王芳婷^{1,2}, 王宵宵^{1,2}, 唐欣然^{1,2}, 蔡小舒^{1,2}¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093;²上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093

摘要 提出双目视觉结合单帧多曝光技术的粒子轨迹测速(PSV)方法,通过长短曝光组合判断速度方向,采用灰度拟合法识别轨迹特征,并采用轨迹中心点进行速度计算以提高速度测量的准确性。该方法采用最近点匹配及倾斜角约束对同一颗粒的多段轨迹进行匹配与排序,利用极线约束对轨迹特征点进行双目匹配,对三维重建后的特征点进行 B 样条拟合以计算粒子的三维速度,而多曝光粒子轨迹法可以降低双目匹配的难度。形成了双目多曝光 PSV 的实验系统及相应图像处理流程。采用发光小孔进行了不同三维速度下的验证实验,分析了不同轨迹特征点选择对速度测量结果的影响。结果表明,利用轨迹中点计算速度,得到的平均相对误差小于 4.2%,同时其标准偏差较小,故采用轨迹中点相较于采用轨迹端点的速度计算方法更优。并对一射流流场进行了实测,结果表明此方法能够可靠地用于三维流场测量。

关键词 机器视觉; 双目视觉; 粒子轨迹测速; 多曝光; 灰度拟合; 三维速度

中图分类号 TH815

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1215001

Particle Streak Velocimetry Method Based on Binocular Vision and Multiple Exposure

Zhou Wu^{1,2*}, Wang Fangting^{1,2}, Wang Xiaoxiao^{1,2}, Tang Xinran^{1,2}, Cai Xiaoshu^{1,2}¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;²Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Power Engineering, Shanghai 200093, China

Abstract The particle streak velocimetry (PSV) method based on binocular vision and single-frame multiple exposure was proposed in this paper. To be specific, the velocity direction was judged by the combination of long and short exposure and the gray-level fitting was used to identify the trajectory features. In addition, the trajectory midpoint was employed to calculate the particle velocity in order to improve the measurement accuracy. This method adopted nearest neighbor matching and angle of inclination constraints to match and sort multiple trajectories of the same particle, epipolar constraints to accomplish binocular matching based on trajectory feature points, and B-spline fitting of the three-dimensional reconstructed feature points to calculate the three-dimensional velocity of particles. The multi-exposure PSV method can simplify binocular matching. As a result, an experimental system and the corresponding image processing flow were formed for binocular multi-exposure PSV. We applied the small luminous holes to verification experiments at different three-dimensional velocities and analyzed the influence of different trajectory feature points on the velocity measurement. The results show that the average relative error obtained by the trajectory midpoint is less than 4.2%, and the standard deviation is small, demonstrating the advantage of velocity calculation with the midpoint rather than with the end. The actual measurement of the flow field in a water jet test bench indicates that this method can be reliably used for three-dimensional flow field measurement.

Key words machine vision; binocular vision; particle streak velocimetry; multiple exposure; gray-level fitting; three-dimensional velocity

收稿日期: 2020-11-10; 修回日期: 2020-12-21; 录用日期: 2021-01-18

基金项目: 国家科技重大专项(2017-V-0016-0069)、国家自然科学基金(51576130)

* E-mail: zhouwu@usst.edu.cn

1 引言

流动是自然界中普遍存在的现象,获得流场准确及定量的实验数据是对其进行研究的前提。三维速度场的定量获取是目前流场测量研究的重点和难点,其中基于粒子示踪的流体流动测量技术应用最为广泛。按示踪粒子浓度和图像处理方法的的不同,粒子示踪流场测量技术可分为以下三种^[1]:激光散斑测速(Laser Speckle Velocimetry, LSV)、粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)^[2]、粒子追踪测速(Particle Tracking Velocimetry, PTV)^[3]。粒子轨迹测速(Particle Streak Velocimetry, PSV)可认为是 PTV 中的一种,但从方法原理和图像处理角度上来说,也可以单独将其分为一类;其主要原理是通过测量一定曝光时间内示踪粒子的轨迹,根据轨迹长度及曝光时间计算粒子速度。该方法获取的是流场的拉格朗日信息。PSV 技术不需要高帧率的图像采集系统,采用普通工业相机即可实现,因此成本较低、操作简单。在成像过程中,常规 PIV 或 PTV 技术需避免粒子运动模糊,采用高能量脉冲光源,而 PSV 可以利用粒子的运动模糊信息,因此同样的测量系统条件下,PSV 技术的测量速度上限更高。

粒子轨迹测速(PSV)有时也称为条纹摄影或颗粒条纹跟踪(Particle Streak Tracking, PST)^[4],其发展历史可追溯至最简单、最古老的流场可视化方法。1932 年, Fage 等^[5]采用该方法对圆形及矩形管道中的流动特征进行了可视化拍摄;1981 年, Dimotakis 等^[6]利用粒子轨迹图像获得流场的定量信息,根据轨迹信息提取二维平均速度;1995 年, Herpfer 等^[7]将一个较薄的双短脉冲激光片光和一个较厚的单长脉冲激光片光组合,将二维平面的速度测量推广到三维速度测量,适用于第三分量速度有明显变化的流场;2011 年, Dixon 等^[8]使用 PSV 结合全息实现了对微米级胶体球三维速度方向及大小的提取;2012 年, Garbe 等^[9]使用光场相机结合 PSV 技术对湍流流场进行了初步测试;更常见的三维流场测量方法则是结合双目视觉系统实现^[10-11],其优点在于实验装置简单,并且基于双目视觉在深度方向上进行测量的理论比较成熟^[12]。

但 PSV 技术的局限性在于其存在方向二义性问题。为了解决这个问题,研究者们提出了不同的

解决方法:Wung 等^[13]通过在曝光过程中改变颗粒条纹颜色来判别二维流场的流动方向;Sun 等^[10]为两台相机设置不同曝光时间,通过不同曝光时间内颗粒轨迹长短的差异来判别速度方向。Wang 等^[11]提出一种彩色序列颗粒条纹测速技术,用不同颜色标记轨迹的起点、中点及终点,以此判定流动方向,同时结合双目视觉系统测量三维流场。

PSV 方法的另一个主要问题是轨迹端点(或特征点)位置识别的准确性。PSV 速度测量是通过粒子轨迹长度和轨迹成像的曝光时间获得的,而目前文献中粒子轨迹长度的获取一般是通过先对灰度图进行二值化,然后识别二值化后轨迹的端点来实现。上述二值化过程一般采用全局阈值分割、自适应阈值分割^[14]、最大类间(Otsu)阈值分割^[15]等算法,而阈值的选择将直接影响轨迹端点位置识别的准确性。

本文基于 PSV 流场测量方法,采用双目视觉获取粒子三维速度信息,结合单帧多曝光技术解决方向二义性问题;采用基于粒子轨迹灰度拟合的轨迹端点识别方法和轨迹中心点进行速度计算,提高了速度测量的准确性。文章将首先说明双目 PSV 测量方法的基本原理和图像处理流程,其次介绍所搭建的双目 PSV 测量系统、验证实验平台及实验结果;然后分析了不同轨迹特征点选择对速度测量结果的影响,最后将上述系统应用于射流流场的测量研究。

2 双目多曝光 PSV 原理

2.1 PSV 方法及轨迹端点识别

粒子轨迹测速(PSV)方法是指粒子成像过程中适当延长相机曝光或光源照明的持续时间,获得粒子运动轨迹图像,并基于轨迹图像长短和曝光时间 T 获取粒子运动速度的方法。图 1 为一粒子在运动时由于积分效应形成的一条轨迹图像。

采用文献[16]提出的二值化结合抽骨架的方法

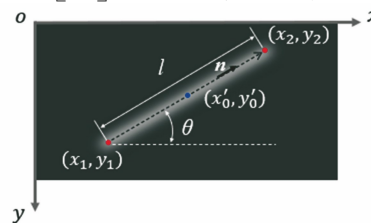


图 1 粒子轨迹图

Fig. 1 Trajectory image of a particle

对轨迹端点进行识别,发现某些轨迹存在骨架分叉的情况。如图 2(b)所示,对图 2(a)的原图选取 0.1 的阈值进行二值化并抽骨架处理后,轨迹右端出现两个端点。该方法与常用的直接二值化处理存在类似的问题,即不同阈值将导致不同的端点位置或轨迹长度。因此本研究采用 Hering 等^[17]提出的轨迹图像灰度分布拟合的方法,轨迹灰度分布在曝光时间内可表示为

$$g_s(\mathbf{x}') = A \frac{G\left(\frac{1}{\sigma} |\mathbf{x}' \times \mathbf{n}|\right)}{l\sigma} \int_{1/\sigma(\mathbf{x}' \cdot \mathbf{n} - l/2)}^{1/\sigma(\mathbf{x}' \cdot \mathbf{n} + l/2)} G(\tau) d\tau, \quad (1)$$

式中: \mathbf{x}' 为以质心为原点的图片二维坐标向量; \mathbf{n} 为粒子运动方向向量 $\mathbf{n} = \mathbf{v}/|\mathbf{v}|$, 即代表了粒子运动角度 θ ; l 为曝光时间下粒子运动长度; σ 则表征了

轨迹图像的宽度或宽度方向上的灰度分布程度; A 为归一化参数, 表征了图像灰度值的总和; $G(x)$ 为方差为 1 的一维高斯分布, 即

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), \quad -\infty < x < \infty. \quad (2)$$

如图 1 所示, 根据(1)式, 对粒子的轨迹图像进行拟合, 可以得到相应参数 l, θ 和轨迹质心位置 (x'_0, y'_0) , 进而计算出轨迹端点坐标为

$$(x_1, y_1) = \left(x'_0 - \frac{l}{2} \cos \theta, y'_0 + \frac{l}{2} \sin \theta\right), \quad (3)$$

$$(x_2, y_2) = \left(x'_0 + \frac{l}{2} \cos \theta, y'_0 - \frac{l}{2} \sin \theta\right). \quad (4)$$

采用上述灰度拟合方法对图 2(a) 进行处理, 可以得到如图 2(c) 所示的拟合结果, 并可准确识别出轨迹端点, 如图中标注圆点所示。



图 2 轨迹端点不同识别方法对比。(a) 轨迹原图; (b) 二值化抽骨架结果(阈值取 0.1); (c) 灰度拟合结果
Fig. 2 Comparison of trajectory endpoints between different recognition methods. (a) Image of a trajectory; (b) result of image binarization and skeletonizing (threshold for 0.1); (c) result of gray-level fitting

2.2 多段曝光轨迹的匹配与排序

单帧多曝光^[18]是指在相机曝光时间内为激光器添加多次脉冲信号, 或采用具有多曝光模式的相机配合连续激光器, 在一幅图像中形成同一粒子的多段轨迹图像。本研究将长曝光与短曝光相结合, 长曝光用以确定速度大小, 短曝光用以判定运动方向。同一粒子的多段轨迹的匹配是首先需要考虑的

问题。

本研究采用最邻近点匹配及倾斜角约束对单帧图片中同一颗粒的多段曝光轨迹进行匹配。首先基于二值图像, 通过连通域大小判定短曝光点或长轨迹; 其次基于 2.1 小节所述的灰度拟合方法获取长轨迹端点坐标, 然后根据短曝光点位置对长轨迹进行排序。匹配与排序原理如图 3 所示。

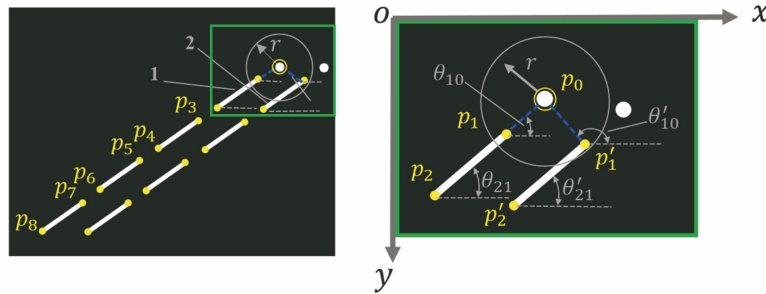


图 3 单帧多曝光轨迹匹配示意图

Fig. 3 Schematic of single-frame multi-exposure trajectory matching

图 3 中以某一短曝光点 p_0 为圆心, 以半径 r (r 值选取与流速和多曝光时间间隔相关, 在本文实验中 r 取 7 pixel) 画圆作为搜索区域, 寻找该区域内的长轨迹端点(如图中 p_1 和 p'_1), 并计算与短曝光点连线的倾斜角(如 θ_{10} 和 θ'_{10}), 分别与相应长轨迹的倾斜角(如 θ_{21} 和 θ'_{21})进行比较, 若相应角度值一

致或接近, 则表示该端点与上述短曝光点匹配。如图 3 中 $\theta_{10} \approx \theta_{21}$, 而 θ'_{10} 与 θ'_{21} 相差较大, 因此判断 p_1 点为与 p_0 匹配的端点。根据 p_1 点所对应轨迹的另一个端点 p_2 继续进行上述搜索, 直到找到点 p_8 为止, 即完成了轨迹的匹配与排序。本文实验中选择 5° 为可以匹配的倾斜角最大差值绝对值。

2.3 特征点双目匹配及三维重建

多曝光的优势之一,体现在双目匹配时同一颗粒轨迹的多个端点可以形成更多的约束条件,从而利于左右视角图像的匹配。本研究采用轨迹特征点进行极线约束^[19]匹配。Macháček^[20]提出在轨迹匹配的实际操作过程中,只要 3 个轨迹端点能够匹配,则整条轨迹就能匹配;由于相机标定及端点识别的误差,端点与对应极线的距离(记为 d)误差大约在 1~2 pixel 以内。计算时选取该距离小于 2 pixel 为约束条件。结合该约束条件和轨迹特征点顺序,即可完成双目匹配。

图 4 为双目轨迹匹配示意图,对于图 4(a)中的某一粒子轨迹(共四次长曝光,四段轨迹的端点已排序),需在图 4(b)中寻找对应该粒子的另一视

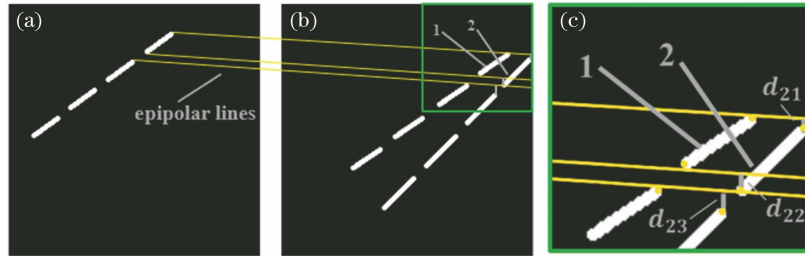


图 4 多曝光 PSV 图像双目匹配示意图。(a)左相机轨迹图;(b)右相机轨迹图;(c)局部放大图

Fig. 4 Schematic diagrams of binocular matching of multi-exposure PSV images. (a) Trajectories from the left camera; (b) trajectories from the right camera; (c) drawing of partial enlargement

角轨迹图像匹配完成之后,依据双目系统的投影关系进行轨迹特征点的三维重构^[21]。已知左右图像对应的匹配点,在获取系统标定参数后即可求得这一特征点的世界坐标。

2.4 样条曲线拟合及三维速度计算

获取特征点世界坐标后,采用三维三次 B 样条曲线^[22]拟合三维轨迹,并进行速度计算。三次 B 样

条函数具有光滑性、连续性、局部不变性等特征,是工程上常用的构造曲线的方法,尤其适用于流场三维轨迹的表征。

$$D_i = \sum_{j=1}^3 d_{i,j}, \quad (5)$$

式中: i 表示候选轨迹条数, $i=1,2,\dots,n$,图 4 中 i 为 1 和 2; j 表示轨迹上的端点,本研究只选择前 3 个端点,即 $j=1,2,3$ 。选取 D_i 最小的轨迹并判定其大小,若小于 6 pixel,则为最终匹配轨迹。如图 4 中轨迹 1 为最终匹配轨迹。

粒子轨迹速度可由每段拟合曲线长度及曝光时间决定,其计算公式为

$$v_i = \frac{s_i}{t_i}, \quad i=1,2,3,\dots, \quad (6)$$

$$s_i \approx \sum_{j=1}^k \sqrt{(X_{i,j+1} - X_{i,j})^2 + (Y_{i,j+1} - Y_{i,j})^2 + (Z_{i,j+1} - Z_{i,j})^2}, \quad (7)$$

式中: i 为轨迹段序号,本研究选取 8 个轨迹端点进行拟合,由于两段曝光轨迹之间也可视为一段轨迹,因此 i 取 1~7; j 为每段轨迹上的插值点,为了尽量逼近真实曲线的长度,每段轨迹的插值点总个数取 9; k 在本文中为线段数,故 k 取 10; t_i 为设置的相机曝光时间或间隔时间; X 、 Y 、 Z 为插值点世界坐标。

3 双目多曝光 PSV 图像处理流程

基于上述原理,构建了双目 PSV 图像处理流

程,如图 5 所示:主要包括双相机标定、图像预处理、双目匹配、三维重建、轨迹拟合及速度计算等部分。其中图像预处理过程包括对原始图像的畸变校正[图 6(a)为畸变校正后的图,原图与之相差不大];二值化后根据连通域面积判定短曝光点及长轨迹[图 6(b)为短曝光点位置,图 6(c)为长轨迹位置];在原图中对长轨迹进行最小外接矩形提取[图 6(d)],在所提取区域内进行灰度拟合并获取其端点坐标[图 6(e)中两端标注点为长轨迹端点

位置];根据短曝光点位置匹配并排序同一颗粒轨迹[图 6(f)中两端标注点为长轨迹端点位置];最后,根据拍摄时设置的多曝光时序,可知流动方向。

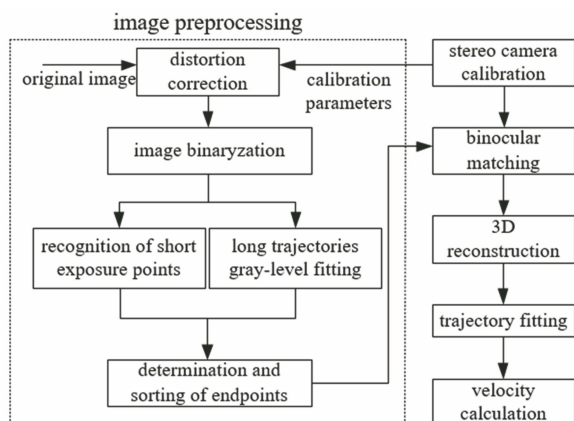


图 5 双目 PSV 图像处理流程

Fig. 5 Image processing flow for binocular vision PSV

4 测量系统及实验验证

如图 7 所示,双目多曝光 PSV 流场测量系统主要由双相机及镜头、光源、信号发生器和计算机组成。双相机的布置应使两相机有尽量大的公共视场。采用相交光轴^[23]的结构布置双相机,两相机放置角度约为 20°。由于实验室资源有限,采用型号不同的两台工业相机(左相机型号 VCXU-53M、像元大小为 4.8 μm;右相机型号 VCXU-51M、像元大小 3.45 μm)进行双目拍摄;两镜头均采用 YVSION 镜头(型号 HF-5MPC12、焦距 12 mm)。光源采用定制的功率为 4 W、波长为 450 nm 的连续激光器,通过柱面镜将其调制为片光,根据实验需求调节激光片光的厚度,如在本文中采用 3 mm 厚度。信号发生器型号为普源 DG1022U,其作用是控制双相机与光源同步,同时为光源提供方波电压信号,即通过光源的亮暗实现多曝光。

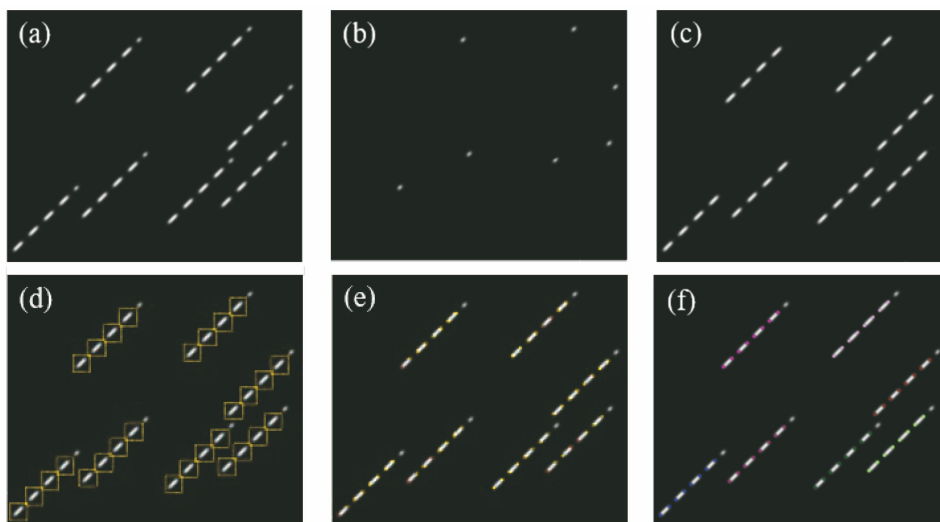


图 6 图像预处理流程。(a)畸变校正后图像;(b)短曝光点识别图;(c)长轨迹识别图;

(d)每段子轨迹原图的提取;(e)灰度拟合获取的端点图;(f)多段轨迹的匹配图

Fig. 6 Image processing process. (a) Image after distortion correction; (b) recognition of short exposure points; (c) recognition of long trajectories; (d) extracted original image of every sub-trajectory; (e) image of obtaining endpoints from gray-level fitting; (f) image of multiple trajectories matching

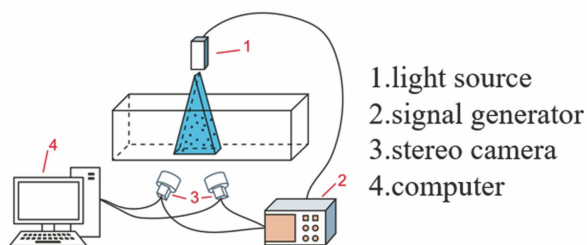


图 7 实验系统图

Fig. 7 Photo of experimental system

4.1 系统标定

采用张正友标定法^[24]获取双相机内外参数、畸变系数等,其标定结果的好坏由重投影误差(即棋盘格标定板角点的计算投影点与实际投影点的像素坐标距离)来判定。采用格子数量为 12×9、单格边长为 1.5 mm 的黑白棋盘格标定板,将其放置于两相机的公共视场范围内,调节标定板角度,保证其占满两相机 2/3~3/4 的视场。改变标定板角度,共拍摄 16 张不同位置下的标定板图像用于标定。标定结

果显示,双相机对于每张图像的平均重投影误差均小于 0.11 pixel。

4.2 系统验证

针对上述测量系统,采用直径为 5 μm 的发光小孔(由点光源和 5 μm 光阑组成),使其在电动轨道上分别进行 30, 40, 50, 60 mm/s 的匀速直线运动,轨道与左相机成像面分别成 0° 和 30° 。对这 8 种工况进行小孔速度测量实验,每个工况重复试验 8 次。

图 8(a)和图 8(b)分别为 0° 、60 mm/s 工况下左右相机上的轨迹图像,图中圆形空心点代表长轨

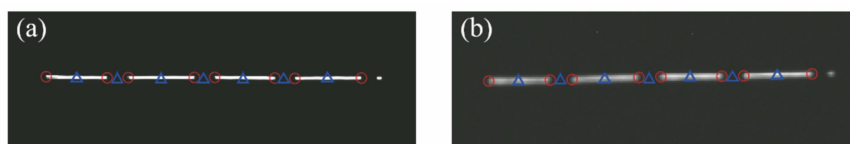


图 8 0° 、60 mm/s 工况下轨迹图像。(a)左相机拍摄图;(b)右相机拍摄图

Fig. 8 Trajectory images for the condition of 0° and 60 mm/s. (a) Image from the left camera; (b) image from the right camera

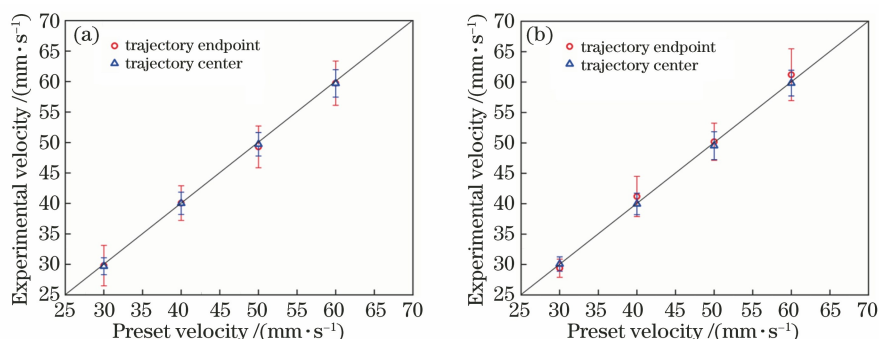


图 9 不同设定速度下测量结果及其标准偏差。(a)轨道与左相机成像平面夹角 0° 时;(b)轨道与左相机成像平面夹角 30° 时

Fig. 9 Measurement results and standard deviations under different setting velocities. (a) Rail is parallel to the imaging plane of the left camera; (b) rail has an angle of 30° with the imaging plane of the left camera

5 流场实验及结果

5.1 实验系统

采用第 4 节所述的测量系统,对一圆管淹没水射流流动进行三维速度场测量,如图 10 所示,采用注射泵作为动力系统,将带有 15 μm 标准颗粒的水

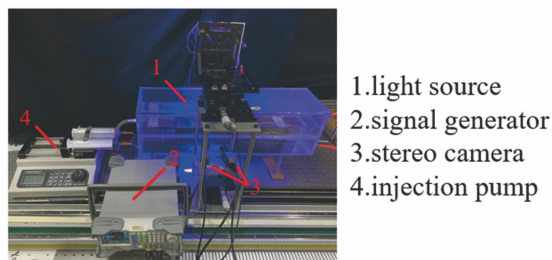


图 10 实验装置图

Fig. 10 Photo of experimental device

迹端点(每张图片共 8 个)、三角空心点代表两两端点的中点(每张图片共 7 个)。图 9(a)和图 9(b)分别为轨道与左相机夹角 0° 和 30° 时,不同速度下的测量结果统计数据[共 8 次重复性实验,每个工况 56 (7×8) 个基于端点的速度测量结果,48 (6×8) 个基于轨迹中点的速度测量结果]。可见,选择轨迹中点的速度测量结果更接近于设定的速度值,其速度的平均相对误差均小于 4.2% (采用端点时为 9.7%)。同时,采用轨迹中点测量结果的重复性标准偏差也较小,均小于 2.3 mm/s (采用端点时为 3.6 mm/s)。

通过一细小圆管注入 160 mm \times 160 mm \times 600 mm 的有机玻璃容器中,圆管内径为 0.8 mm。拍摄位置为距圆管出口 230 mm 处。激光器片光厚度调节为 3 mm 左右;两相机拍摄时截取的成像区域均为 608 pixel \times 500 pixel,由于相机像元大小不一致,左右成像系统中物体通过透镜在焦平面上的成像大小与物体实际大小的比值分别调为 0.13 和 0.10,以尽量使视场范围一致。每帧图片拍摄时,为产生多曝光信号,信号发生器为光源提供 4 次 20 ms 和 1 次 5 ms 的高电平信号,每次间隔 10 ms;同时使相机和光源同步触发。实验时射流出口位置平均流速约为 208.9 mm/s,雷诺数约为 167.1;拍摄时相机相对于有机玻璃容器静止。

5.2 结果分析

图 11(a)和图 11(b)为由双相机拍摄的经图像

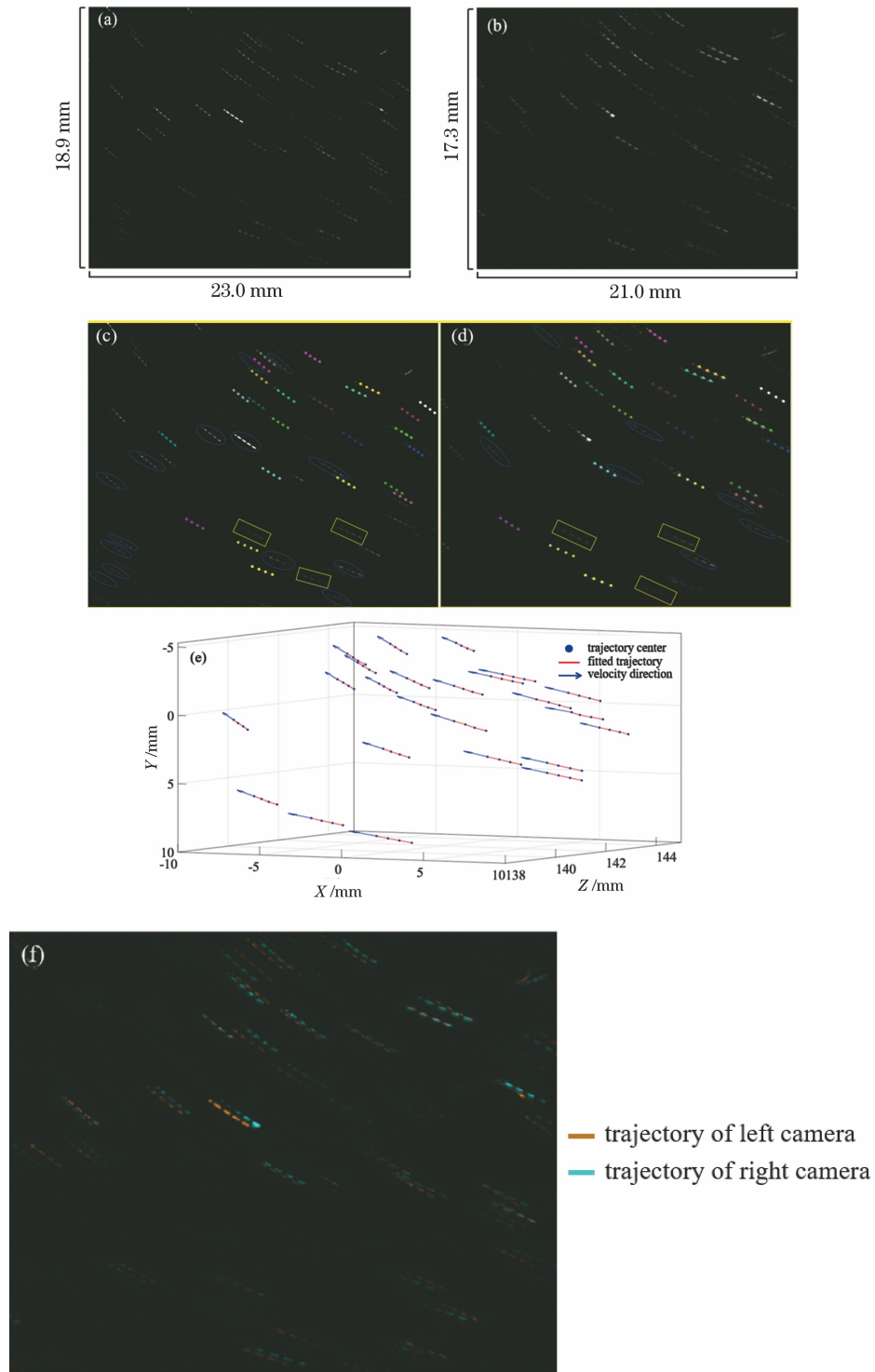


图 11 实验测量结果。(a)左相机拍摄图;(b)右相机拍摄图;(c)左侧轨迹识别图;(d)右侧轨迹识别图;
 (e)三维坐标系下粒子轨迹图;(f)视差图

Fig. 11 Experimental measurement results. (a) Image from the left camera; (b) image from the right camera;
 (c) identified trajectories on the left image; (d) identified trajectories on the right image; (e) trajectories of
 particles in three-dimensional coordinate system; (f) disparity map

增强处理的典型图片对(在图像上已标明视场大小),图 11(c)和图 11(d)是在图 11(a)和图 11(b)的基础上标出的所识别和匹配到的轨迹,标注点代表

左右图片分别识别且匹配成功的轨迹(标注点为单段轨迹的中点),圆圈圈出的是在本图中识别到而在另一张图片中没有识别出的对应轨迹,方框标出的是

在两幅图像中都识别到但没有匹配成功的轨迹。为深入分析对轨迹识别和处理的性能,针对图像处理的不同步骤,定义了单轨识别率(能够被成功识别的单次曝光轨迹数量与存在于图片上的单次曝光轨迹数量比率)、多段匹配率(单帧图像上能识别且匹配正确的多曝光轨迹数量与图片上存在的多曝光轨迹数量比率)、双目识别率(能够在另一视角图片中识别到相应轨迹图像的多曝光轨迹图像数量与该图中已识别出的多曝光轨迹数量比率)和双目匹配率(双目匹配正确的多曝光轨迹数量与双目图片中均已识别出的多曝光轨迹数量比率),在本文中分别约为86.1%、86.2%、76.4%和90.5%。图11(e)为匹配成功后计算所得的粒子三维位置与轨迹,其中圆点表示4段轨迹的中点,连接线为B样条拟合曲线,箭头表示速度方向。计算结果表明,粒子在X、Y、Z方向的速度分别在 $-13.6\sim-8.7$ mm/s、 $-9.2\sim-6.3$ mm/s、 $-8.9\sim0.3$ mm/s范围内。

所拍摄区域为圆管出口射流偏下方的卷吸区,从结果可以看出,流动方向为从右下往左上,由远及近,即图片右侧的大部分轨迹离世界坐标系原点(以左相机CCD中心为世界坐标系原点)较远,右侧大部分轨迹与世界坐标系原点较近。这与图11(f)中所示出的视差图显示结果是一致的,图中左相机拍摄轨迹位于右相机拍摄轨迹的左方时,说明该轨迹是较远的,反之较近。

6 结 论

针对粒子轨迹测速(PSV)方法,采用双目视觉与单帧多曝光,实现了粒子三维速度大小和方向的测量与判断。与粒子图像测速(PIV)和与粒子追踪测速(PTV)相比,基于多曝光轨迹的PSV方法能够提供更多的约束,能够更好地处理双目匹配的问题。给出了完善的图像处理流程,包括最邻近点匹配及倾斜角约束的多段轨迹匹配与排序算法、多曝光双目匹配算法,将基于灰度拟合法识别的轨迹中点作为长曝光轨迹的特征点,与采用轨迹端点进行计算相比,测量误差和标准偏差都有所降低。搭建了双目多曝光PSV测量系统,并采用张正友标定法进行了系统标定,通过测量发光小孔的平移运动进行系统验证,并对一射流流场进行实测,获得粒子可靠的三维运动轨迹。但该方法在粒子识别率上还需进一步提高,其途径包括实验中多曝光次数与时间的优化配置、示踪粒子浓度的合理选取、交叉轨迹的处理等方面。

参 考 文 献

- [1] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23(1): 261-304.
- [2] Yu C D, Bi X J, Han Y, et al. Particle image velocimetry based on a lightweight deep learning model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (7): 0720001.
于长东, 毕晓君, 韩阳, 等. 基于轻量化深度学习模型的粒子图像测速研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40 (7): 0720001.
- [3] Liu H F, Zhou W, Cai X S, et al. Three-dimensional particle tracking velocimetry based on light field imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (1): 0111014.
刘慧芳, 周骛, 蔡小舒, 等. 基于光场成像的三维粒子追踪测速技术 [J]. *光学学报*, 2020, 40 (1): 0111014.
- [4] Muller D, Muller B, Renz U, et al. Three-dimensional particle-streak tracking (PST) velocity measurements of a heat exchanger inlet flow. A new method to measure all three air-flow velocity components in a plane is applied to a steady-state three-dimensional flow [J]. *Experiments in Fluids*, 2001, 30(6): 645-656.
- [5] Fage A, Townend H C H. An examination of turbulent flow with an ultramicroscope [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1932, 135(828): 656-677.
- [6] Dimotakis P E, Debussy F D, Koochesfahani M M, et al. Particle streak velocity field measurements in a two-dimensional mixing layer [J]. *Physics of Fluids*, 1981, 24(6): 995-999.
- [7] Herpfer D C, Jeng S M. Planar measurement of three-component velocity by streaked-particle-imaging velocimetry [J]. *Applied Optics*, 1995, 34 (13): 2301-2304.
- [8] Dixon L, Cheong F C, Grier D G, et al. Holographic particle-streak velocimetry [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4393-4398.
- [9] Garbe C S, Voss B, Stapf J, et al. Plenoptic particle streak velocimetry (PPSV): 3D 3C fluid flow measurement from light fields with a single plenoptic camera [C] // 16th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, July 9-12, 2012, Lisbon, Portugal. Napoli: Archivio della ricerca-Università degli studi di Napoli Federico II, 2012.
- [10] Sun Y G, Zhang Y H, Zhao L Y, et al. An algorithm of stereoscopic particle image velocimetry for full-scale room airflow studies [J]. *Ashrae*

- Transactions, 1999, 110(1): 75-80.
- [11] Wang H, Wang G J, Li X T, et al. High-performance color sequence particle streak velocimetry for 3D airflow measurement[J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1518-1523.
- [12] Wang J H, Han H Y, Wang C P, et al. Theoretic research on double-CCD stereoscopic measurement system[J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(4): 94-96, 116.
王建华, 韩红艳, 王春平, 等. CCD 双目立体视觉测量系统的理论研究[J]. 电光与控制, 2007, 14(4): 94-96, 116.
- [13] Wung T S, Tseng F G. A color-coded particle tracking velocimeter with application to natural convection[J]. Experiments in Fluids, 1992, 13(4): 217-223.
- [14] Bradley D, Roth G. Adaptive thresholding using the integral image[J]. Journal of Graphics Tools, 2007, 12(2): 13-21.
- [15] Goh T Y, Basah S N, Yazid H, et al. Performance analysis of image thresholding: zheg daxie technique [J]. Measurement, 2018, 114: 298-307.
- [16] Wu F, Zhou W, Cai X S, et al. Image processing algorithm for particle trajectory image and reconstruction study on flow field [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2019, 33(4): 100-107.
吴凡, 周骛, 蔡小舒, 等. 粒子运动轨迹的图像处理及流场重构算法研究[J]. 实验流体力学, 2019, 33(4): 100-107.
- [17] Hering F, Leue C, Wierzimok D, et al. Particle tracking velocimetry beneath water waves. Part I: visualization and tracking algorithms [J]. Experiments in Fluids, 1997, 23(6): 472-482.
- [18] Chen J L, Li C, Cai X S, et al. Research on the single frame imaging method for measuring multi-parameter fields in flow field [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015, 29(6): 67-73.
陈晶丽, 李琛, 蔡小舒, 等. 流动多参数场的单帧图像法测量方法研究[J]. 实验流体力学, 2015, 29(6): 67-73.
- [19] Shu A, Pei H D, Ding L, et al. Binocular visual position and attitude measurement method for a spatial non-cooperative target [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1712003.
束安, 裴浩东, 丁雷, 等. 空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1712003.
- [20] Macháček M. A quantitative visualization tool for large wind tunnel experiments [D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2003: 69-71.
- [21] Zhao C X, Xu J L, Zhang Y L, et al. Three-dimensional reconstruction of free-flying insect based on single camera [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(1): 61-66.
赵创新, 徐进良, 张永立, 等. 基于单摄像机的昆虫自由飞行参量三维重构[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 61-66.
- [22] Fang Y X, Liu W X. Description of cubic uniform B-spline curve construction based on the geometric properties [J]. Journal of Engineering Graphics, 2006, 27(2): 96-102.
方忆湘, 刘文学. 基于几何特性的三次均匀 B 样条曲线构造描述[J]. 工程图学学报, 2006, 27(2): 96-102.
- [23] Gaydon M, Raffel M, Willert C, et al. Hybrid stereoscopic particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 1997, 23(4): 331-334.
- [24] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.