

基于光场成像的三维粒子追踪测速技术

刘慧芳^{1,2}, 周骛^{1,2*}, 蔡小舒^{1,2}, 周雷^{1,2}, 郭延昂^{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 将光场成像理论与三维颗粒追踪测速(PTV)技术相结合,实现了单相机三维流场的测量。结合高斯光学和相似原理,推导出了深度与最优重聚焦系数的关系。搭建了光场标定与流场测量系统,提出基于光场成像理论模型的深度标定方法,并与泰勒多项式拟合方法进行对比,证明了其具有较高的稳健性。利用清晰度最大原理,获得原始光场图像的全聚焦图,采用最小特征值角点检测算法对全聚焦图上的颗粒进行定位,结合三维粒子追踪技术,得到颗粒的三维速度。形成了光场 PTV 的图像处理流程,并对后向台阶流场进行了实测,结果表明光场 PTV 技术能够较好地测量三维流场。

关键词 成像系统; 光场成像; 颗粒追踪; 深度标定; 后向台阶

中图分类号 V211.71

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0111014

Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry Based on Light Field Imaging

Liu Huifang^{1,2}, Zhou Wu^{1,2*}, Cai Xiaoshu^{1,2}, Zhou Lei^{1,2}, Guo Yan'ang^{1,2}

¹ School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

² Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China

Abstract In this study, light field imaging theory and three-dimensional (3D) particle tracking velocimetry (PTV) are combined to evaluate a 3D flow field using a single camera. Further, a relation is derived between the depth and the optimal refocusing coefficient based on the Gaussian optics and the similarity principle. Subsequently, the light field calibration and flow field measurement systems are established. A depth calibration method is proposed based on the theoretical model of light field imaging. When compared with the Taylor polynomial fitting method, the proposed method is proved to have high robustness. An all-in-focus image is obtained based on the principle of maximum sharpness. The particles in the all-in-focus image are positioned using the corner detection algorithm based on the minimum eigenvalue; further, the 3D velocities of the particles are obtained using the 3D PTV technology. A processing flow is established for the light field images and applied to the flow field measurement on a back step. The results prove that the light-field-imaging-based PTV technology can reconstruct the volumetric flow field.

Key words imaging systems; light field imaging; particle tracking; depth calibration; back step

OCIS codes 110.6880; 150.0155; 350.1270; 100.2000; 150.1488

1 引 言

近年来,光场成像技术因其单相机单曝光可获得三维信息的优势引起科研工作者的广泛关注,如Liu等^[1]开展了光场降噪等图像处理技术方面的研

究,何宇龙等^[2]通过光场相机波前传感器的数值仿真,分析了光场相机的线性度和波前传感精度,陈琦等^[3]对光场图像水印加密进行了研究,Xu等^[4-5]在基于光场成像的三维温度场测量方面进行了开创性的工作,李浩天等^[6]也将光场成像应用于压力场测

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-08-08; 录用日期: 2019-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(51576130,51327803)

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

量方面。在流场测量领域有以获取欧拉信息为主的光场粒子图像测速(PIV)技术和以获取拉格朗日信息为主的光场粒子追踪测速(PTV)技术。美国的Thurrow^[7-8]团队、中国上海交通大学的施圣贤团队^[9]在光场PIV流场测量方面均取得了不错的进展,即采用类似于层析PIV的流场重构方式,将流场划分为多个体素,利用光线追迹结合乘积代数(MART)方法重构出流场三维信息,结合三维互相关算法得到了流场的三维速度。而基于互相关的PIV技术仅能提供流场的欧拉信息,无法识别单个颗粒的运动。对于液固、气固两相流等需要获得流场拉格朗日信息的场合,能够追踪单个颗粒运动轨迹的三维PTV技术具有一定优势,而光场PTV的研究相比于光场PIV的研究较少。Bajpayee等^[10]研究了高速光场相机拍摄流场的颗粒定位方法,对流场图像进行多次重聚焦,对每张重聚焦图像进行自适应单阈值分割以识别颗粒,对所能检测到的同一颗粒的重聚焦图像所在的最大深度与最小深度进行求和取平均,将所得值作为该颗粒的深度,与三维PTV技术结合,证明了光场PTV流场测量的可行性。Ohmi等^[11]从光场原始图像中提取出两个不同视角图并求出视差,采用泰勒多项式拟合方法标定出深度与视差的关系,结合三维PTV技术,对方形水槽中的流场进行了测试。虽然目前已经将光场成像结合粒子追踪技术应用到三维流场测量上,但在深度测量方法与精度方面仍需进行较细致的工作。

本文主要对光场PTV技术进行了研究。首先介绍了光场的基本概念,包括基于光场重聚焦的深度测量原理等。其次介绍了深度标定方法和聚焦型光场相机参数的标定方法^[12];搭建了相应光场成像系统,进行了标定实验和误差分析。最后介绍了三维粒子追踪原理以及后向台阶流场测量实验系统,并展示了光场PTV三维瞬态流场测量结果。

2 光场的基本概念

2.1 光场的参数化与重聚焦

对光场可用光线及与其在空间中相交的两个平行平面进行参数化表征^[13]。如图1(a)所示, $U-V$ 平面为微透镜所在平面, $X-Y$ 平面为光学探测器所在平面。 $L(u, v, x, y)$ 表示经过 $U-V$ 平面上点 (u, v) 和 $X-Y$ 平面上点 (x, y) 的光束的辐射强度,其法向夹角为 θ 。引入近轴近似,并忽略两平面间距离变化,则点 (x, y) 接收的来自光束 $L(u, v, x, y)$ 的总能量 $I(x, y)$ 为

$$I(x, y) = \iint L(u, v, x, y) du dv. \quad (1)$$

光场原始图像是一张记录光场二维位置和传输方向的二维图像。重聚焦是从原始二维光场图像中提取得到四维光场,再重新投影到新的成像面,得到不同平面位置的二维图像^[14]的过程,图1(b)为简化的二维光场的重聚焦原理图。

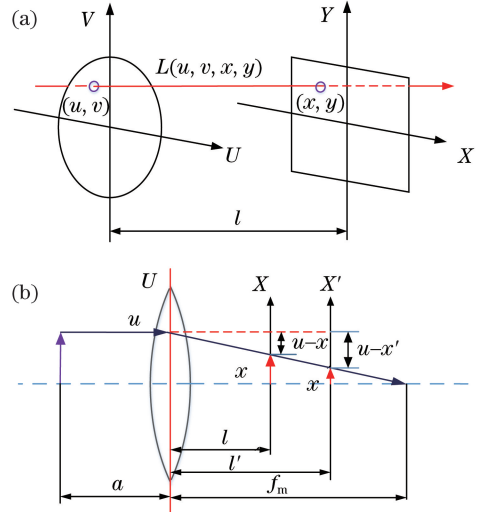


图1 光场原理图。(a)光场双平面参数化图;
(b)重聚焦原理图

Fig. 1 Light field schematic. (a) Diagram of light field biplane parameterization; (b) refocusing schematic

图1中 u, x, x' 分别为光束 L 与微透镜平面 U 、探测器平面 X 以及重聚焦平面 X' 的交点横坐标, l, l' 分别为微透镜平面与探测器平面 X 和重聚焦平面 X' 之间的距离, a 为微透镜平面到主镜头成像面的距离, f_m 为微透镜焦距。同一光束的光束强度 $L(u, x) = L(u, x')$,令 $l' = \alpha l$ (α 为重聚焦系数),由相似原理和坐标关系,可以得到

$$x = \frac{1}{\alpha} x' + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) u. \quad (2)$$

同理可得四维光场的另外两维中,光束与重聚焦平面 Y' 交点 y' 的坐标与光束和探测器平面交点的坐标 y 之间的关系为

$$y = \frac{1}{\alpha} y' + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) v. \quad (3)$$

联立(2)式、(3)式与(1)式得到重聚焦公式:

$$I(x', y') = \iint L \left[u, v, \frac{1}{\alpha} x' + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) u, \frac{1}{\alpha} y' + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) v \right] du dv. \quad (4)$$

2.2 光场的传输与采样

由(4)式可知可通过改变重聚焦系数 α 的值改变

成像面的位置,以得到聚焦在不同深度位置下的图像。图像处理上的重聚焦是几个单视角图像平移相加的结果^[15],而不同类型的光场相机又有不同的单视角采样方式。光场相机主要由主镜头、微透镜阵列(MLA)和成像探测器组成,根据安放位置可将三者分为非聚焦型光场相机和聚焦型光场相机^[16]。非聚焦型光场相机的主镜头平面和成像探测器关于微透镜阵列共轭,聚焦型光场相机的主镜头成像面和成像探测器关于微透镜共轭。图 2(a)、(b)分别为非聚焦型与聚焦型光场相机的传输采样原理图示。

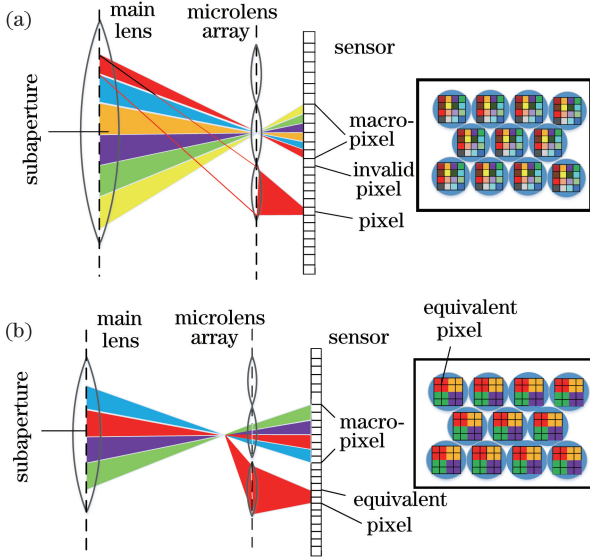


图 2 两种光场相机光线传输采样示意图。

(a)非聚焦型;(b)聚焦型

Fig. 2 Schematics of light transmission sampling of two plenoptic cameras. (a) Unfocused plenoptic camera; (b) focused plenoptic camera

每个微透镜对主镜头成像并在探测器上形成一个宏像素,非聚焦型光场相机中一个宏像素代表一个空间位置采样,宏像素中的每一个像元对应一个角度采样。聚焦型光场相机的一个角度采样是几个像元组成的像素块,即等效像元,与非聚焦型光场相机相比,牺牲了角度分辨率,换取了较高的空间分辨率。每个宏像素中相同位置的像元(等效像元)按照所在微透镜的顺序拼接成一个视角下的图像^[17]。图 3 为聚焦型光场相机在等效像元为两个像素时聚焦在两个不同深度平面的景深板图,虚线为相对清晰位置。

2.3 深度测量原理

图 4 为聚焦型光场相机光线传输原理图。物点 o 经主镜头成像为像点 o_L , o_L 经微透镜在传感器上成像为 o_m , o_r 为 o_m 重聚焦变换后的点。

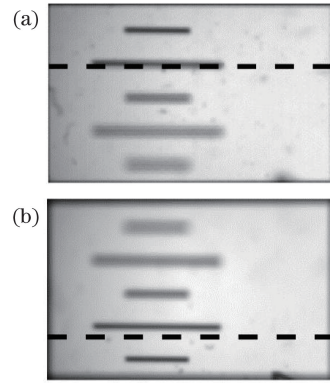


图 3 重聚焦图片。(a)聚焦在远处;(b)聚焦在近处

Fig. 3 Refocusing images. (a) Focus on far;

(b) focus on near

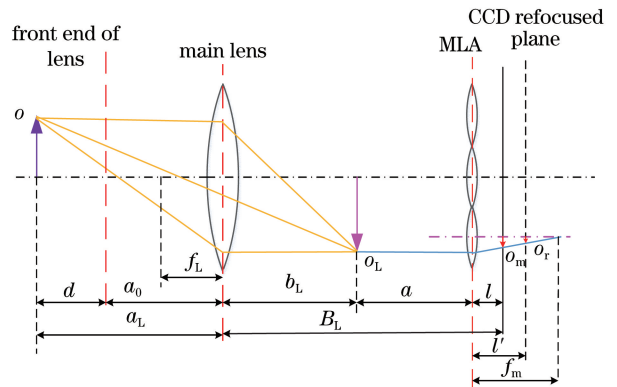


图 4 聚焦型光场相机光线传输简化示意图

Fig. 4 Simplified diagram of light transmission of focused plenoptic camera

由高斯公式可得

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{\alpha_{opt}l} = \frac{1}{f_m}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{a_L} + \frac{1}{b_L} = \frac{1}{f_L}, \quad (6)$$

式中: a 、 l 分别为微透镜平面到主镜头成像面与探测器平面的距离; a_L 、 b_L 分别为主镜头主平面到物点与主镜头成像面的距离; f_L 、 f_m 为主镜头的焦距和微透镜的焦距; $(a + b_L)$ 为主镜头主平面到微透镜的距离, α_{opt} 为物点成像最清晰位置的重聚焦平面所对应的重聚焦系数(最优重聚焦系数)。令 $a_L = a_0 + d$, 其中 a_0 为主镜头(透镜组)前端面到主镜头主平面的距离, d 为主镜头前端面到物点的距离,即为本文提到的物体深度,则

$$d = \{f_L^{-1} - \{B_L - [f_m^{-1} - (\alpha_{opt}l)^{-1}]^{-1}\}^{-1}\}^{-1} - a_0, \quad (7)$$

式中: f_L 、 f_m 、 B_L 、 l 和 a_0 均为光场成像系统的固定参数。当相机和镜头确定后, d 与 α_{opt} 为唯一对应关系,随 α_{opt} 的增大而减小。

3 光场成像系统与标定

3.1 深度标定

3.1.1 基于光场成像理论深度标定

基于光场成像理论深度标定(后文中称为方法 1)即基于(7)式,令 $u = d\alpha_{\text{opt}}$, 整理可得

$$d = c_1 u + c_2 \alpha_{\text{opt}} + c_0, \quad (8)$$

式中:

$$c_0 = \frac{f_m B_L a_0 - f_m B_L f_L - f_m f_L a_0}{f_m f_L - f_m B_L}, \quad (9)$$

$$c_1 = \frac{l f_m + l f_L - l B_L}{f_m f_L - f_m B_L}, \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{l B_L f_L - l f_m f_L - l B_L a_0 + l f_m a_0 + l f_L a_0}{f_m f_L - f_m B_L}. \quad (11)$$

该方法考虑(7)式中的物理参数,深度 d 为 u 和 α_{opt} 的线性组合。

可由实验得到的一系列 d 、 u 和 α_{opt} , 利用最小二乘法拟合出系数 c_0 、 c_1 和 c_2 的值:

$$(\hat{c}_1 \hat{c}_2 \hat{c}_0)^T = (\mathbf{X}_S^T \mathbf{X}_S)^{-1} (\mathbf{X}_S^T \mathbf{y}_S), \quad (12)$$

$$\mathbf{y}_S = (d^{(0)} \quad d^{(1)} \quad \cdots \quad d^{(N)})^T, \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_S = \begin{pmatrix} d^{(0)} \alpha_{\text{opt}}^{(0)} & d^{(1)} \alpha_{\text{opt}}^{(1)} & \cdots & d^{(N)} \alpha_{\text{opt}}^{(N)} \\ \alpha_{\text{opt}}^{(0)} & \alpha_{\text{opt}}^{(1)} & \cdots & \alpha_{\text{opt}}^{(N)} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}^T. \quad (14)$$

得到系数 c_0 、 c_1 和 c_2 的具体数值后,代入(8)式可计算得到 d , (8)式也可表示为

$$d = \frac{c_2 \alpha_{\text{opt}} + c_0}{1 - c_1 \alpha_{\text{opt}}}. \quad (15)$$

3.1.2 基于泰勒拟合的深度标定

基于泰勒曲线拟合的深度标定(后文中称为方法 2)不考虑(7)式中的各物理参数,仅考虑 d 与 α_{opt} 唯一对应性关系,采用

$$d \approx \sum_{k=0}^K p_k \alpha_{\text{opt}}^k \quad (16)$$

对实验得到的一系列 d 和 α_{opt} 进行泰勒拟合,其中系数 p_0 到 p_K 采用最小二乘法拟合得到, K 为标定点的个数。

3.2 相机等效参数标定

光场全聚焦图像上的每个像素点的强度值为其对应物点在理想成像平面成像时的值^[18],即像素点清晰度最大,本文采用点锐度函数(EAV)梯度^[19]表征像素点的清晰度。对原始光场图像进行多次重聚焦,计算每张重聚焦图像中每一点的清

晰度,清晰度最大值所在的重聚焦图片的像素值,即为全聚焦图像上该点位置的像素值。图 5(a)和(b)分别为圆点标定板的原始光场局部放大图和全聚焦图。

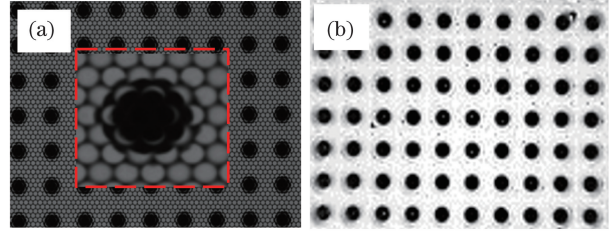


图 5 原始光场图片及全聚焦图片。

(a)光场原始图局部放大图;(b)全聚焦图像

Fig. 5 Raw light field image and all-in-focus image.

(a) Partial enlarged raw light field image; (b) all-in-focus image

本文光场相机等效参数的标定是在中心视角的全聚焦图像上进行的。通过拍摄不同角度的已知尺寸的平面棋盘格标定板,采用 Zhang^[20] 标定相机的方法标定出光场相机等效内参矩阵 \mathbf{A} 与不同标定图像对应的外参矩阵 $[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]$ 。光场相机等效内参矩阵 \mathbf{A} 的表达式为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \eta & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

式中: η 、 β 为相机的等效焦距在 x 、 y 方向上像素的表示, γ 为图像坐标轴的扭曲参数, (u_0, v_0) 为相机的主点。 $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2]$ 、 \mathbf{t} 分别对应于世界坐标系到图像坐标系的旋转和平移。设世界坐标系下物点 $\mathbf{M} = [X \quad Y]^T$ 且模型平面 $Z = 0$, 其对应的像点在像素坐标系下可表示为 $\mathbf{m} = [u \quad v]^T$, 由平面单应性有

$$s\mathbf{m} = \mathbf{H}\mathbf{M} = \lambda\mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}]\mathbf{M}, \quad (18)$$

式中: s 为尺度因子; $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3 \quad \mathbf{h}_4]$ 为单应性矩阵。由旋转矩阵正交且任意向量模为 1 可得

$$\mathbf{h}_1^T (\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 = \mathbf{0}, \quad (19)$$

$$\mathbf{h}_1^T (\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T (\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2. \quad (20)$$

令

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}^{-1})^T \mathbf{A}^{-1} \equiv \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

给定一幅图便可得到一个单应性矩阵,联立(19)~(21)式,利用最小二乘法可得到 \mathbf{B} 的值,再联立(17)、(18)式可得到相机的内参:

$$u_0 = \gamma v_0 / \beta - B_{13} \eta^2 / \lambda, \quad (22)$$

$$v_0 = (B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23}) / (B_{11} B_{22} - B_{12}^2), \quad (23)$$

$$\eta = \sqrt{\lambda / B_{11}}, \quad (24)$$

$$\beta = \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11} B_{22} - B_{12}^2)}, \quad (25)$$

$$\gamma = -B_{12} \eta^2 \beta / \lambda, \quad (26)$$

$$\lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0 (B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23})] / B_{11}. \quad (27)$$

得到 \mathbf{A} 后,便可以估计出每张图片的外参,而后引入畸变系数,并利用 Levenberg-Marquardt^[21] 优化以使利用估计内参计算得到的投影点的像素坐标与实际像素坐标的距离最小,最后得到优化后包含畸变在内的相机参数。

3.3 标定实验

本文深度标定与相机等效参数标定采用同一套实验系统,图 6 为装置图。

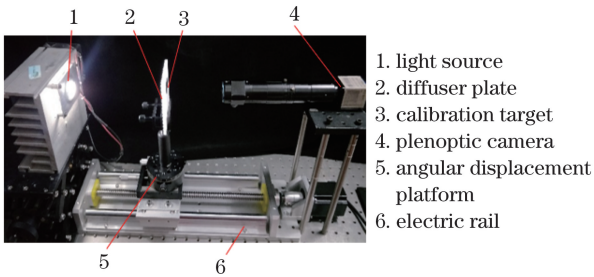


图 6 标定实验装置图

Fig. 6 Diagram of experiment device for calibration

实验系统由 Raytrix R12 光场相机、VSZ-M0108S 镜头、LED 背光灯、角度位移平台和电动导轨等组成。深度标定时使用圆点直径为 0.16 mm、相邻圆点中心距为 0.32 mm 的二维圆点标定板,相机参数标定时采用边长为 0.2 mm 的正方形平面棋盘格标定板。标定过程中,在标定板靠近光源侧放置平面散射板,以保证光照均匀。

3.3.1 深度标定实验

固定好圆点标定板,使标定板平面与主镜头前端面平行。通过电动位移平台改变主镜头前端面和标定板之间的距离,在 100 mm 到 104.5 mm 间,每隔 0.1 mm 用光场相机拍摄 5 张图片,取平均后(以减少噪声)作为该位置的原始光场图片。对每张原始光场图片,在 $\alpha \in (0.1, 5)$ 范围内等间距进行 500 次重聚焦,得到相应 500 张重聚焦图片,比较每张重聚焦图片的清晰度,清晰度最大的图片所对应的 α 即为该深度 d 对应的 α_{opt} 。采用代表各像素与整幅图像平均灰度值的离散程度^[22] 的图像标准差 δ 表征图像清晰度,可表示为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \bar{r}]^2}, \quad (28)$$

式中: $f(x, y)$ 为图像在像素点 (x, y) 处的灰度值; \bar{r} 为整幅图像的平均灰度值,图像标准差最大即图像最清晰, M 和 N 为图像 x 方向和 y 方向的像素数。分别采用 100~104 mm 范围内等间隔的 7 个、9 个数据点与 100~104.5 mm 范围内的 46 个数据点对 $d - \alpha_{opt}$ 进行标定,两种情况分别采用前面提出的两种标定方法标定,其中方法 2 的深度标定又分别采用 3 次多项式和 5 次多项式进行拟合。

3.3.2 相机等效参数标定实验

首先固定平面棋盘格标定板于某一合适高度与距离处,调节角度位移平台使标定板平面尽可能与主镜头前端面平行,以便后面移动角度位移平台拍摄不同角度的图片时,标定板上的棋盘格图像均能充满相机的整个视场。调节好位置后拍摄 5 张图片,取平均作为该角度下的图片。此后旋转角度位移平台调节旋钮,以使标定板沿顺时针(或逆时针)方向转动,旋转一次,拍摄多张该位置下的标定板图片。

3.4 标定结果与分析

3.4.1 深度标定结果分析

图 7 所示为 d 分别为 102、103、104 mm 时 α_0 与清晰度的对应曲线, δ_{max} 对应为 55.46、58.42、62.63, 相应的 α_{opt} 分别为 2.86、2.33、1.53。 d 越大, α_{opt} 越小,与 2.3 节理论分析一致。

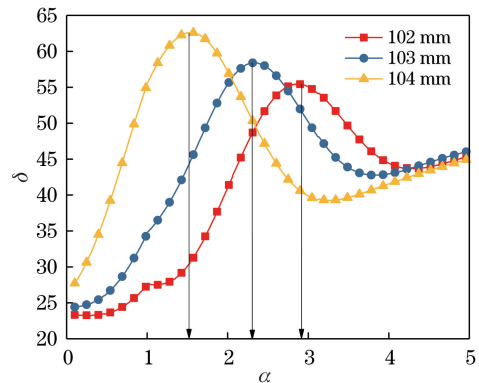


图 7 重聚焦系数清晰度曲线图

Fig. 7 Curve of refocusing coefficient-sharpness

图 8 所示为深度标定的结果图。其中矩形代表标定过程中所用到的数据点,圆形点为包含标定点在全部测量点。实线为方法 1 标定的结果曲线,点划线和虚线分别表示用泰勒 3 次多项式和 5 次多项式标定的结果。

得到拟合曲线后,为验证较少标定点深度标定

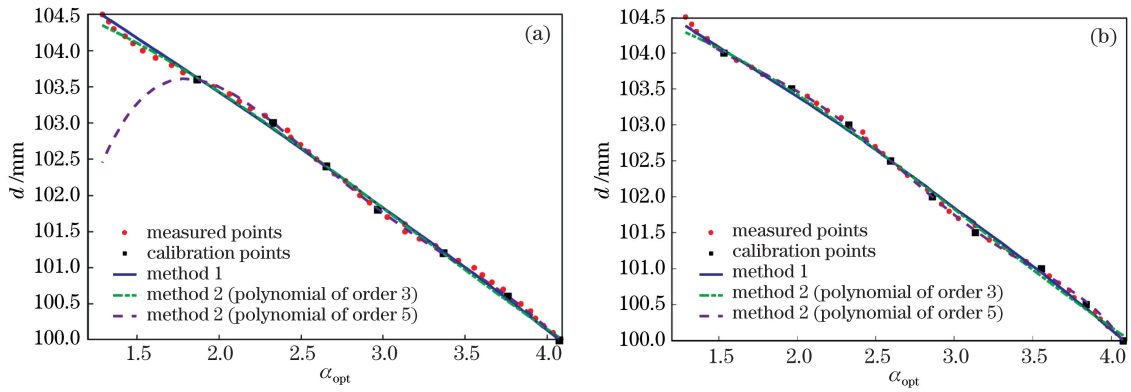


图 8 标定结果图。(a) 7 个点;(b) 9 个点

Fig. 8 Results of depth calibration. (a) 7 points; (b) 9 points

的可行性,对不同标定模型进行比较,计算每种方法的平均绝对误差 E ,表达式为

$$E = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t |d_{Me}^i - d(\alpha_{opt}^i)|, \quad (29)$$

式中: d_{Me}^i 根据标定结果得到的测量深度, $d(\alpha_{opt}^i)$ 为真实深度值, t 为测量点的总数,在此处即为 46 个。表 1 所示为不同标定方法下全部测量点(文中为 46 个)的平均绝对误差。采用两种方法标定时,较少点标定与 46 个点标定的平均绝对误差均相差较小,在微米级别,方法 1 采用 9 个点与 46 个点标定时的满量程误差分别为 1.08% 和 1.06%,相差 0.02%,证明了用较少点进行深度标定的可行性,同时能节省时间,操作简单。采用 9 个点标定时,方法 1 标定比泰勒 3 次多项式误差小,比 5 次多项式误差大。随着泰勒多项式次数增加,泰勒拟合精度会相应增加,但是需要以较多的标定点为前提。当数据点较少时,泰勒较高次多项式标定稳定性较差,如泰勒 5 次多项式在采用 7 个点与 9 个点标定时误差分别为 0.2084 mm 与 0.0262 mm。又由图 8(a)可知,采用泰勒拟合标定时所得曲线在左上角处有明

显的偏离。综上,方法 2 关于多项式的次数比较难选,在实际应用中无法确定其具体次数,而方法 1 标定由理论推导得到,而且对数据点个数的敏感性较低,标定结果相对泛化能力较强,在实际应用中将具有相对较好的稳健性。

表 1 不同深度标定方法平均绝对误差

Table 1 E of different depth calibration methods

Method	Mean absolute difference /mm		
	7 points	9 points	46 points
Method 1	0.0543	0.0486	0.0479
Method 2 (polynomial of order 3)	0.0528	0.0532	0.0504
Method 2 (polynomial of order 5)	0.2084	0.0262	0.0202

3.4.2 相机等效参数标定结果分析

令模型投影点的计算投影点与实际投影点的欧式距离作为重投影误差。图 9(a)显示了采用 4 个不同角度棋盘格所拍摄的每张图片中 276 个角点的重投影误差。图 9(b)每张图像的平均重投

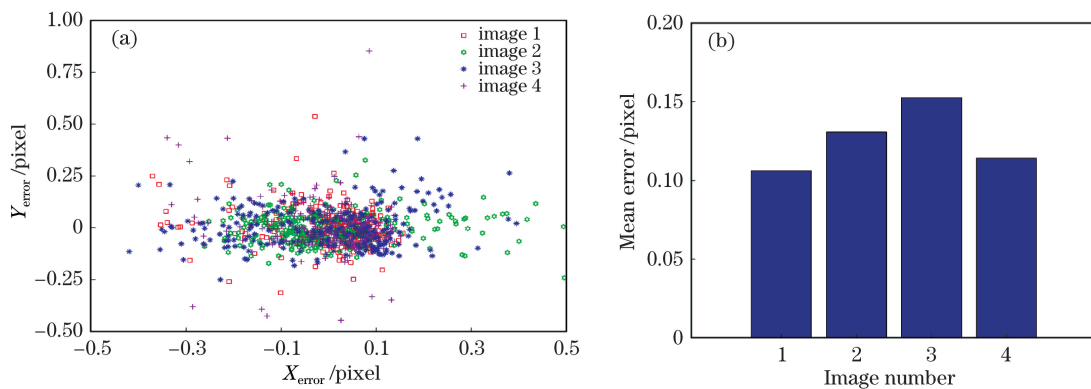


图 9 重投影误差图。(a)角点误差;(b)平均重投影误差

Fig. 9 Reprojection error. (a) Corners error; (b) average reprojection error

影误差,均小于 0.15 pixel,得到相机等效内参与畸变系数后,可以对拍摄的图片进行校正。

4 光场 PTV 技术

4.1 三维粒子追踪原理

本文采用由运动相似性等约束的迭代算法^[23]对相邻帧间颗粒进行三维追踪,图 10 为三维颗粒追踪流程图。首先输入相邻两帧颗粒的三维坐标与迭代次数 n_M ,颗粒匹配的第一步是根据

$$|x_i - y_j| < R_s, \quad (30)$$

和

$$|x_i - x_k| < R_n, \quad (31)$$

分别筛选出第一帧图像中颗粒 x_i 在第二帧图像中的 D 个待匹配颗粒 y_j 以及在第一帧图像中的邻域颗粒 x_k 。其中 R_s 表示示踪颗粒从第一帧到第二帧间可能发生的最大位移, R_n 为邻域半径。

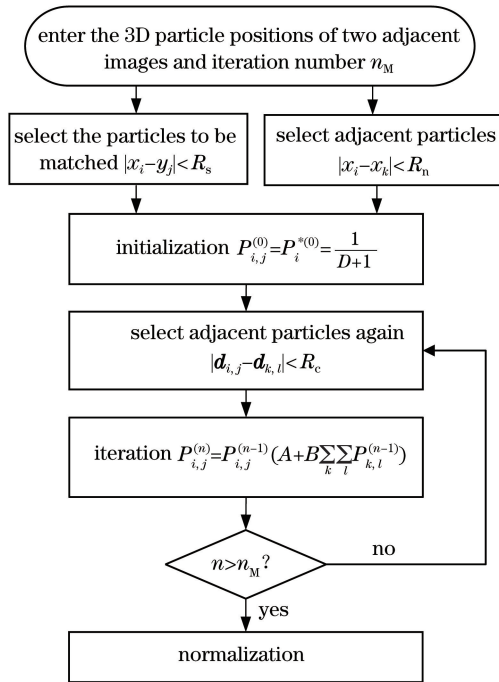


图 10 颗粒追踪流程图

Fig. 10 Flow chart of particle tracking

而后根据每个待匹配颗粒与特定颗粒匹配的概率和特定颗粒得不到匹配的概率相等进行初始化,即令

$$P_{i,j}^{(0)} = P_i^{*(0)} = \frac{1}{1 + D}, \quad (32)$$

式中: $P_{i,j}^{*(0)}$ 与 $P_{i,j}^{(0)}$ 分别为第 0 次迭代时颗粒 i 得不到匹配的概率与颗粒 i 匹配到颗粒 j 的概率。迭代初始化之后,再进行邻域颗粒的二次筛选,对应表达式为

$$|d_{i,j} - d_{k,l}| < R_c, \quad (33)$$

式中: $d_{i,j}$ 与 $d_{k,l}$ 分别为颗粒 i 运动到颗粒 j 与颗粒 k 运动到颗粒 l 产生的位移向量; R_c 为二次筛选的邻域半径,为相似运动所允许的偏差。二次邻域颗粒筛选后根据

$$P_{i,j}^{(n)} = P_{i,j}^{(n-1)} [A + B \sum_k \sum_l P_{k,l}^{(n-1)}] \quad (34)$$

进行迭代。式中: A 、 B 为经验常数,迭代次数满足设定值时,迭代终止。

根据某颗粒得到匹配与未得到匹配的概率和为 1 进行归一化,归一化后颗粒 i 与颗粒 j 匹配和得不到匹配的概率分别为

$$\bar{P}_{i,j}^{(n)} = \frac{P_{i,j}^{(n)}}{\sum_j P_{i,j}^{(n)} + P_i^{*(n-1)}}, \quad (35)$$

$$\bar{P}_i^{*(n)} = \frac{P_i^{*(n-1)}}{\sum_j P_{i,j}^{(n)} + P_i^{*(n-1)}}. \quad (36)$$

4.2 光场 PTV 追踪技术

光场 PTV 技术主要包括深度测量和三维追踪两个关键环节,图 11 为主要处理流程简图。首先对光场相机拍摄的深度已知的标定板图片进行多次重聚焦,提取出每个深度位置对应的最优重聚焦系数 α_{opt} ,采用 3.1 节中方法标定出深度与最优重聚焦系数的关系。同时,对多张标定板全聚焦图像采用张正友相机标定方法标定出相机等效内参与畸变等参数。流场测量时,对流场原始光场图像进行多次重聚焦,根据清晰度最大原理得到流场图的 α_{opt} 图与全聚焦图,结合深度标定曲线,得到流场的深度图。采用最小特征值角点检测算法对畸变校正后的流场全聚焦图进行颗粒检测,得到流场中颗粒的二维位置,结合深度图得到颗粒的三维坐标。而后对多帧颗粒进行三维追踪,得到流场中颗粒的三维运动轨迹和速度等。

5 流场实验和结果

5.1 系统介绍

本文对低速后向台阶流场进行了测量,实验系统如图 12(a)所示。循环泵抽吸水箱中携带示踪粒子的水,经进水管进入带有台阶的实验管道,水流过实验管道后经调节阀门和流量计回到水箱,形成自循环。观测浮子流量计读取流量示数,通过流量调节阀调整流量。信号发生器发出触发信号给光场相机和激光器,以保证二者同步。实验管道为宽 48 mm,总长 336 mm 的有机玻璃组成的矩形流道。流道进口距台阶 95 mm,出口距台阶 236 mm,台阶

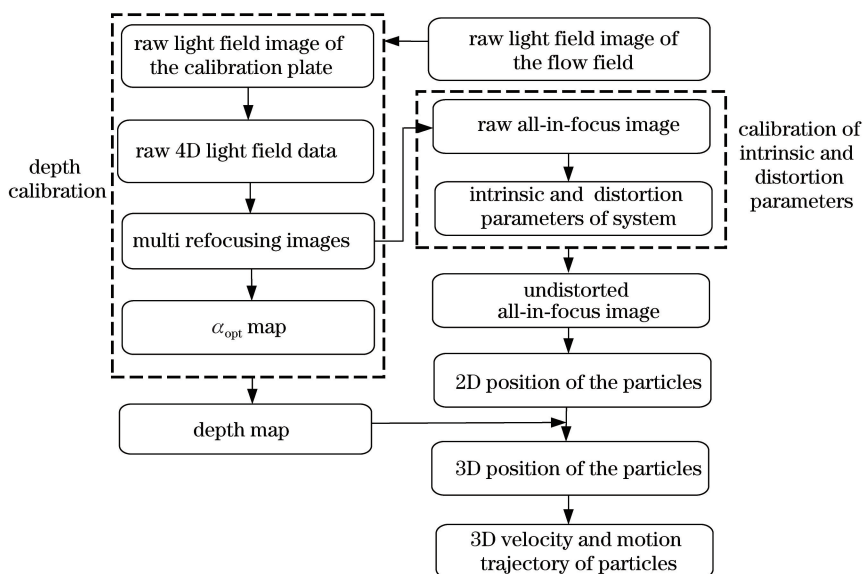


图 11 光场 PTV 技术的流程简图

Fig. 11 Simplified flow chart of light field PTV technology

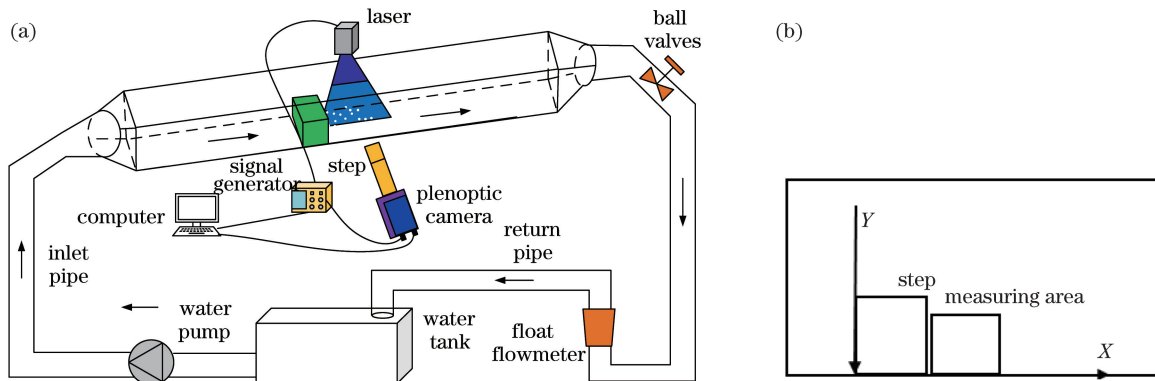


图 12 实验系统示意图。(a)实验装置;(b)测量区域

Fig. 12 Schematic of experimental system. (a) Experimental device; (b) measuring area

宽为 5 mm, 高为 4 mm。示踪粒子选用平均直径为 $3 \mu\text{m}$ 、比重为 3.2 和折射率为 2.65 的碳化硅。测量部分由像元大小为 $3.1 \mu\text{m}$ ，且具有双曝光功能的 Raytrix R12 光场相机、VSZ-M0108S 镜头和 4.8 W 中心波长为 450 nm 的激光器组成。参考课题组以前所用的单帧长曝光方法^[24]，流道流量为 180 L/h 时，在台阶下游处能够观察到涡，测量区域如图 12(b)所示，测量工况下雷诺数为 207。

5.2 结果及分析

最小特征值角点检测算法^[25]可直接计算出像素自相关矩阵的特征值，用最小的特征值与阈值比较，大于阈值的即为特征点，具有较高的稳定性。本文采用该方法在校正后的流场全聚焦图像上对颗粒进行二维定位，索引该位置的最优重聚焦系数，结合

前文中方法 1 的深度标定曲线，计算得到颗粒的深度，从而得到颗粒的三维坐标。图 13 为对相邻两帧图像颗粒追踪后得到的样本点执行 Delaunay 三角剖分^[26]插值后的效果图，其中 x 轴正向为主流方向， z 方向为深度方向， u 为主流方向速度。在后向台阶流动中，台阶上游来流和台阶下游两种不同流速平行流接触后，因黏性作用而发生剪切，剪切层比较薄，沿垂向流速的梯度远大于沿流向的速度梯度。由于剪切层流的不稳定性，在剪切层发展和演化的过程中，在流场中将自发地卷起形成展向涡^[27]。图 13(a)、(b)分别为 z 方向(深度)切面与 y 方向切面流线图，与理论分析具有较好的一致性，且 z 方向切面流线与文献^[27]中二维 PIV 对应的时均结果较相似。

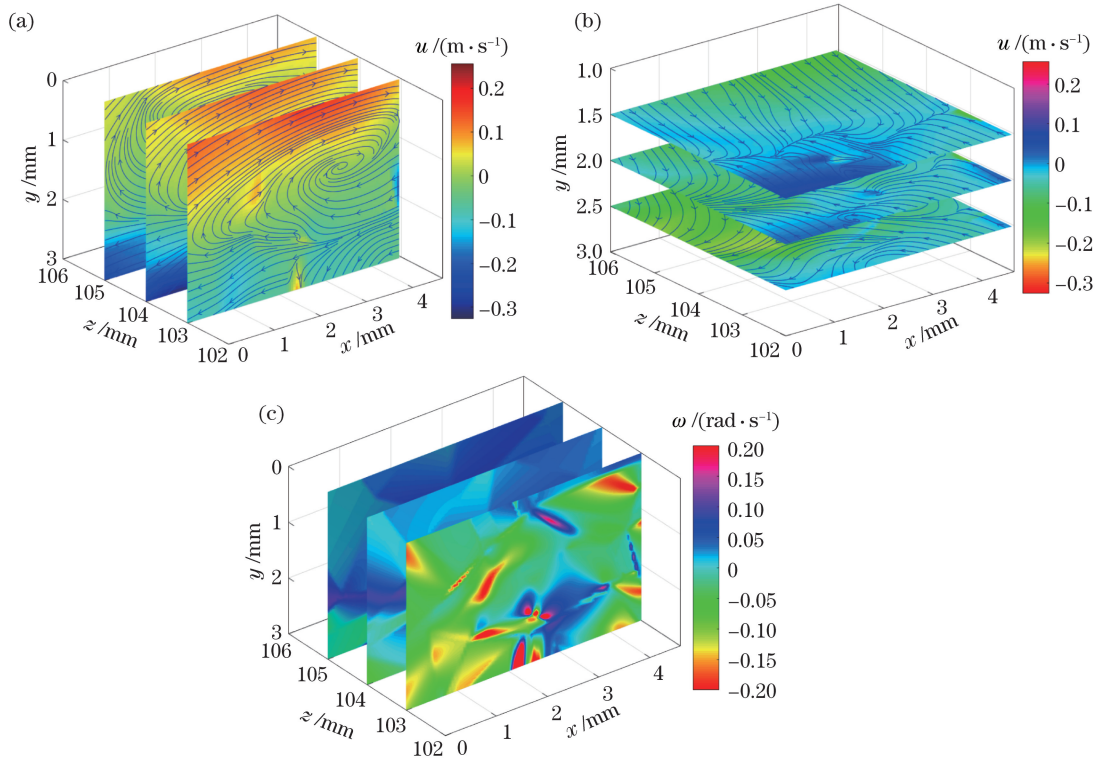


图 13 相邻两帧颗粒追踪效果图。(a) z 方向速度切面;(b) y 方向速度切面;(c) 角速度
 Fig. 13 Tracking results of two adjacent frame particles. (a) Velocity slices in z direction;
 (b) velocity slices in y direction; (c) angular velocity

6 结 论

结合高斯光学和相似原理,推导出深度 d 与最优重聚焦系数 α_{opt} 的关系。采用标准差表征图像清晰度,标定出每个深度位置所对应的最优重聚焦系数, d 随 α_{opt} 的增大而减小,与理论分析一致。提出了基于光场成像原理的深度标定方法,与传统泰勒拟合 3 次多项式和 5 次多项式标定对比,基于光场成像原理的深度标定具有较好的稳健性。方法 1 满量程误差为 1.08%;采用 9 个点标定、46 个点计算,与采用 46 个点标定、46 个点计算的结果相差较小。证明较少点标定的可行性,为深度标定提供一种新思路。

采用张正友标定结合 Levenberg-Marquardt 优化方法在光场全聚焦图像上对相机进行标定,采用得到的等效内参与畸变系数对光场全场全聚焦图像进行校正,以降低流场测量中 x, y 方向物理尺度的误差。使用单光场相机结合 3D 颗粒追踪技术测量后向台阶流场,将追踪后稀疏颗粒点的三维速度采用 Delaunay 三角剖分插值,获得测量空间区域流场速度、角速度等数据,所测后台阶三维瞬态流场与理论分析具有较好的一致性,为流

场测量提供了新的方法。

参 考 文 献

- [1] Liu J D, Xu T F, Yue W R, et al. Light-field moment microscopy with noise reduction[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29154-29162.
- [2] He Y L, Ning Y, Jiang Z F, et al. Numerical simulation of plenoptic camera wavefront sensors with dynamic modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0728008.
何宇龙, 宁禹, 姜宗福, 等. 动态调制型光场相机波前传感器的数值仿真[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0728008.
- [3] Chen Q, Xu X P, Jiang Z G, et al. Watermarking scheme for four dimensional light field imaging based on light field camera and its evaluation [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0411003.
陈琦, 徐熙平, 姜肇国, 等. 基于光场相机的四维光场图像水印及质量评价[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0411003.
- [4] Sun J, Xu C L, Zhang B, et al. Three-dimensional temperature field measurement of flame using a single light field camera[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 1118-1132.
- [5] Xu C L, Zhao W C, Hu J H, et al. Liquid lens-based

- optical sectioning tomography for three-dimensional flame temperature measurement[J]. *Fuel*, 2017, 196: 550-563.
- [6] Li H T, Xu S M, Zhao Z, et al. Curved surface pressure measurement based on light-field imaging and PSP[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2018, 32(3): 75-81.
李浩天, 许晟明, 赵洲, 等. 基于光场三维重构和 PSP 的曲面压力测量技术[J]. *实验流体力学*, 2018, 32(3): 75-81.
- [7] Fahringer T W, Lynch K P, Thurow B S. Volumetric particle image velocimetry with a single plenoptic camera[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(11): 115201.
- [8] Fahringer T W, Thurow B S. Filtered refocusing: a volumetric reconstruction algorithm for plenoptic-PIV[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(9): 094005.
- [9] Shi S X, Ding J F, Atkinson C, et al. A detailed comparison of single-camera light-field PIV and tomographic PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(3): 46.
- [10] Bajpayee A, Techet A H. 3D particle tracking velocimetry (PTV) using high speed light field imaging[C]//PIV13; 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry, July 1-3, 2013, Delft, The Netherlands. [S.l.: s.n.], 2013.
- [11] Ohmi K, Tuladhar S, Hao J. Light field camera based particle tracking velocimetry[C]//18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, July 4-7, 2016, Lisbon, Portugal. [S.l.: s.n.], 2016.
- [12] Sun J Y, Sun J, Xu C L, et al. A calibration method of focused light field cameras based on light field images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0515002.
孙俊阳, 孙俊, 许传龙, 等. 一种基于光场图像的聚焦光场相机标定方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0515002.
- [13] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]//Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH'96, August 4-9, 1996, New Orleans, LA, USA. New York: ACM, 1996: 31-42.
- [14] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[J]. *Computer Science Technical Report CSTR*, 2005, 2(11): 1-11.
- [15] Levoy M, Chen B, Vaish V, et al. Synthetic aperture confocal imaging[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 825-834.
- [16] Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera[C]//2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), April 16-17, 2009, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2009: 11499059.
- [17] Georgiev T G, Lumsdaine A. Focused plenoptic camera and rendering[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(2): 021106.
- [18] Tao M W, Hadap S, Malik J, et al. Depth from combining defocus and correspondence using light-field cameras[C]//2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE, 2013: 673-680.
- [19] Li Q, Feng H J, Xu Z H, et al. Digital image sharpness evaluation function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(6): 736-738.
李奇, 冯华君, 徐之海, 等. 数字图像清晰度评价函数研究[J]. *光子学报*, 2002, 31(6): 736-738.
- [20] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [21] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory[M]//Watson G A. Numerical analysis. Lecture notes in mathematics. Berlin, Heidelberg: Springer, 1978, 630: 105-116.
- [22] Fang X Y. Image quality assessment system based on resolution detection and human-computer interaction [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(4): 32-35.
方小艳. 基于清晰度探测与人机交互的图像质量评价算法[J]. *国外电子测量技术*, 2017, 36(4): 32-35.
- [23] Ohmi K, Li H Y. Particle-tracking velocimetry with new algorithms[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(6): 603-616.
- [24] Qu N N, Cai X S, Zhou W, et al. Experimental measurement of coherent structures of turbulent boundary layer by motion single frame imaging method[J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(11): 4088-4094.
曲宁宁, 蔡小舒, 周鹭, 等. 运动单帧图像法湍流边界层相干结构的实验测量[J]. *化工学报*, 2017, 68(11): 4088-4094.
- [25] Grbić T, Jovanović A, Medić S, et al. A note on feature extraction based on Kanade-Shi-Tomasi procedure and Kalman filters[M]//Ronzhin A, Potapova R, Delic V. Speech and computer. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2014, 8773: 66-73.
- [26] Amidror I. Scattered data interpolation methods for

- electronic imaging systems: a survey[J]. Journal of Electronic Imaging, 2002, 11(2): 157-176.
- [27] Qi E R, Huang M H, Li W, et al. Investigation of the starting flow over a backward facing step flow via PIV[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(4): 533-539.
- 齐鄂荣, 黄明海, 李炜, 等. 应用 PIV 进行二维后向台阶流流动特性的研究(2)二维后向台阶流起动流的研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2004, 19(4): 533-539.