



面向高速流场成像的聚焦纹影研究进展*

田立丰^{1,2}, 付双旭¹

1. 中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107
2. 深圳市智能微小卫星星座技术与应用重点实验室, 广东 深圳 518107

摘要: 相较于传统的光学流动可视化技术, 聚焦纹影技术能对非聚焦区域的流场信息进行模糊化处理, 从而反映窄景深内的流场信息, 具有高空间分辨率、抗干扰能力强、无需播撒示踪粒子、低成本等特点, 这些特点使得聚焦纹影十分适用于高速流场的流动显示和流场测量。本文在对聚焦纹影系统成像的基本原理进行介绍的基础上, 以传统聚焦纹影在格栅对准和非定常流动多平面测量方面面临的挑战为出发点, 总结了聚焦纹影的国内外相关研究, 并进一步展望了聚焦纹影的未来发展。

关键词: 聚焦纹影; 流动显示; 流场成像

中图分类号: V211.74 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2025)01-0238-12

Advances in focusing schlieren technology for high-speed flow field imaging

TIAN Lifeng^{1,2}, FU Shuangxu¹

1. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China
2. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Microsatellite Constellation, Shenzhen 518107, China

Abstract: Compared to traditional optical flow visualization technology, focusing schlieren technology can blur the flow field information in the non-focused region to reflect the flow field information in a narrow depth of field. It possesses high spatial resolution, strong anti-interference ability, does not require tracer particles for broadcasting, and is cost-effective. These characteristics enable focusing schlieren highly suitable for high-speed flow display and flow field measurement. Based on the introduction of the basic principle of focusing schlieren imaging system, this paper summarizes the research progress of focusing schlieren at home and abroad based on the challenges faced by traditional focusing schlieren in grid alignment and unsteady flow multi-plane measurement, and further looks forward to the future development of focusing schlieren.

Key words: focusing schlieren; flow visualization; flow field imaging

可视化边界层转捩、激波边界层干扰等现象对于飞行器外形设计、热防护设计等具有重要价值。然而, 基于示踪物的粒子成像技术, 如基于米氏散射和基于分子示踪的粒子成像技术, 在对带有激波和漩涡的流场进行成像时, 存在粒子跟

随性不够、信噪比低等问题(田立丰, 2011)。纹影、阴影、干涉和背景导向纹影等基于折射率的光学流动显示技术虽然适用于高速流动可视化, 但是难以捕捉到湍流边界层、分离泡等精细结构(易仕和等, 2011), 且其测量的是整个光路上流场

* 收稿日期: 2024-05-31 录用日期: 2024-06-11 网络首发日期: 2024-10-14
基金项目: 深圳市科技计划(ZDSYS20210623091808026)
作者简介: 田立丰(1979年生), 男; 研究方向: 空气动力学; E-mail: tianlf5@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20240182

折射率的积分信息。然而, 风洞壁面产生的马赫波、环境噪声等不相关信息会掩盖真实流场。聚焦纹影可模糊化聚焦平面外的流场扰动, 突出聚焦平面内流场的密度信息, 具有较高的空间分辨率, 现已被广泛应用于常规高超声速流场、高温燃烧流场以及等离子体流场的流动可视化(Cauty et al., 2012; Kouchl et al., 2015; Förster et al., 2016; 岳茂雄等, 2021a, 2021b; Duong et al., 2022)。基于聚焦纹影的流场信息定量处理原理与传统纹影完全一致, 因此可沿用传统纹影所采用的量化方法, 实现基于聚焦纹影图像的目标流场密度、温度和速度的量化(Hargather et al., 2009; 谢爱民等, 2013; Choi et al., 2017; Martínez-González et al., 2018)。

根据系统整体布局的不同, 聚焦纹影系统分为三类: 透射式、反射式和投影式(Settles, 2001; Weinstein, 2010; Fagan et al., 2014)。系统光源可以是单个白光光源、面阵光源之类的一般光源, 也可以是激光、激光诱导荧光、氙气灯等瞬态光源(谢爱民等, 2018; 周芮旭等, 2020)。相机则可以选择 CCD 相机、高速相机、数码相机等。在相机前增置中继透镜可以扩展视场, 但需考虑中继透镜像差累积效应带来的成像分辨率损失和景深增大问题。以带有光纤传感器的透明丙烯酸平板作为成像屏, 可以感知湍流引起的图像光强波动, 实现聚焦纹影与光电探测技术的结合(Alvi et al., 1993)。

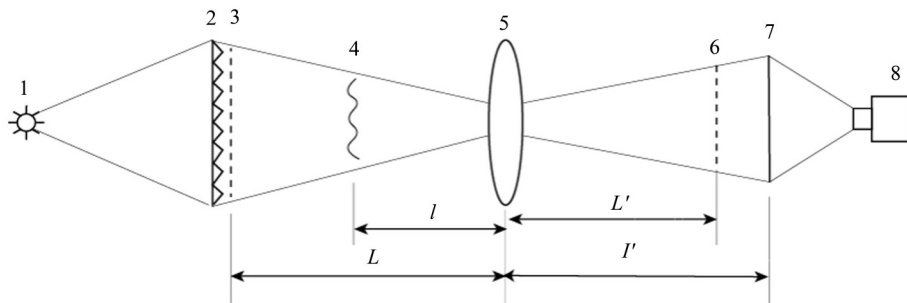
迄今为止, 关于光源设计(Ahmed et al., 2017; Ozawa et al., 2018)、格栅参数(Goulding, 2006; Kashitani et al., 2019; Passmann et al., 2020; 席锋等, 2021)等因素对图像质量以及系统主要性能参

数的影响已有不少研究, 但在格栅对准和非定常流动的多平面测量方面仍存在不足。Downie (1995)和Downie et al.(1996)就提出以 D96N@T46V 变体 BR 膜来创建截止格栅, 利用该膜的光致变色特性进行实时的光学传输。然而, BR 膜记录的图像持续时长取决于变体膜的 M 态寿命, 可操作性很低。手动将曝光胶卷或相片底片制作的截止格栅放入截止平面的方法, 难以实现格栅之间的精准匹配, 会导致系统灵敏度下降等问题。Doggett et al.(1993)提出将激光全息技术与聚焦纹影结合, 以观察流场不同平面的扰动, 但其成像分辨率很低, 且目前相关研究较少。多次移动成像屏和相机位置虽然可以获取不同焦平面下的流场信息, 但该措施仅适用于定常流动, 对于非定常流动则很难适用。为了解决以上两个问题, 国内外研究者开展了大量研究, 发展出了多种类别的聚焦纹影系统。本文对聚焦纹影系统成像的基本原理进行了介绍。然后, 以传统聚焦纹影在格栅对准和非定常流动多平面测量方面面临的挑战为出发点, 总结了聚焦纹影的国内外相关研究。最后, 展望了聚焦纹影的未来发展。

1 聚焦纹影技术原理

以图1所示的典型透射式布局系统为例, 对聚焦纹影成像原理进行简要说明。聚焦纹影系统通常包括光源、菲涅尔透镜、源格栅、待测平面、聚焦透镜、CCD 相机等。 L 为源格栅到聚焦透镜的距离, L' 为聚焦透镜到截止格栅的距离, l 为测试平面到聚焦透镜的距离, l' 为聚焦透镜到中继透镜的距离, f 为聚焦透镜焦距, 各参数之间满足薄透镜方程

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{L} + \frac{1}{L'} = \frac{1}{l} + \frac{1}{l'}$$



(1.光源;2.菲涅尔透镜;3.源格栅;4.待测平面;5.聚焦透镜;6.截止格栅;7.中继透镜;8.图像记录装置)

图1 透射式聚焦纹影系统示意图

Fig. 1 The diagram of transmissive focusing schlieren system

光源发出的光线经菲涅尔透镜后, 亮度和均匀性显著提升, 后通过源格栅均匀照亮流场。系统中存在两对共轭平面: 源格栅平面和截止格栅平面、待测流场平面和成像屏所在平面。因此, 聚焦透镜可以将源格栅像传输至截止格栅处, 而流场扰动则被呈现在成像屏上。源格栅整体可看作一个二维狭缝光源阵列, 最终的聚焦纹影图像由所有狭缝光源像重叠而成。只有聚焦平面处的像能精确重叠在成像面上, 非聚焦平面的扰动由于偏离焦平面, 光源像之间进行的是偏移性叠加。因此, 失焦平面的扰动在成像面上被不同程度地模糊化, 最终以背景信息的形式呈现在聚焦纹影图像上, 以此突出聚焦平面内的流场信息。在无扰动时, 成像屏呈现出一个亮度均匀的光斑; 而有扰动时, 光线经过非均匀流场产生不同程度的

偏折, 致使原光线相对截止格栅的状态发生改变, 由此在成像屏上显示出亮暗不均的光斑, 这些光斑则代表着流场扰动。此处光线状态是指光线通过截止格栅或被截止格栅阻挡。

系统灵敏度的调节通过改变截止格栅对于源格栅像的截止量实现, 在单个截止格栅条纹周期内, 相对截止量越大, 意味光线状态改变所需的偏折量越小, 系统灵敏度越高, 图像整体亮度越低, 反之则灵敏度越低, 图像越亮。聚焦纹影可以采用反射式布局 and 投影式布局, 成像原理与透射式基本一致, 其结构如图 2 所示。与透射式布局相比, 反射式和投影式布局的系统在一定程度上突破了菲涅尔透镜口径对观测视场的限制, 但其背景均匀性有所下降, 通常需对图像进行背景减除。

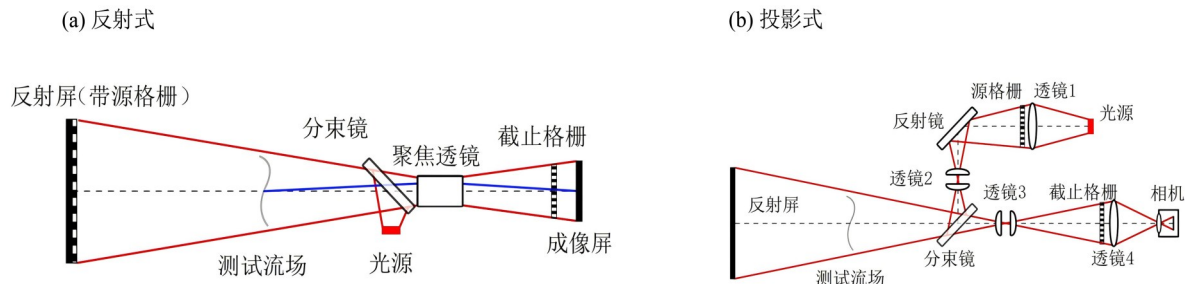


图 2 反射式和投影式聚焦纹影示意图

Fig. 2 The diagram of retroreflective focusing schlieren system and projective focusing schlieren system

2 高速流场聚焦纹影系统

2.1 数字聚焦纹影系统

数字聚焦纹影系统首先通过相机记录下截止格栅的网格模式, 由专有的网格校准程序执行截止格栅轮廓坐标在相机与数字设备间的数学变换, 映射到数字显示器上的像素或经投影仪投影至反射屏, 生成一个与截止格栅完全互补的源格栅 (Buckner et al., 2015; L'esperance et al., 2017)。图 3 所示的基于背光数字显示器的数字聚焦系统中, 光线在成像前虽仅产生单次偏转, 但由于消除了投影通道和分束镜, 光利用率显著提高。

图 4 所示是基于数字投影仪的双通道数字聚焦纹影系统, 光线经过来回两次偏转, 灵敏度得以提升, 但却降低了光利用率。由于数字显示设备和计算机显示设备通常使用相同的接口协议, 因此网格校准软件对于以上两种配置均适配。

以二维截止图像和彩色编码的源图像分别取

代截止格栅和源格栅, 可增加关于光束偏转的方向性信息, 其中源图像通过 TFT 面板进行显示。Schoegl et al. (2016) 根据图 5 的色星所示的颜色混合规律, 使用图 6 所示三种配色方案对源图像进行彩色编码。图 7 显示了 $0^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内, 不同编码方案对丁烷火焰流场的定向编码效果 (Schoegl et al., 2016)。结果表明, GB 方案的方向敏感性最差; B 方案由于截止图像相对于源图像存在右上角的偏移, 从而缺乏明显的黄色特征; CMY 方案采用的颜色在色星上分布最均匀, 所以整体变化最为平滑, 不易受到格栅轻微错位的干扰。

数字聚焦纹影系统依赖于相机空间坐标和网格显示设备空间坐标之间的精确映射, 而光学系统中的高阶畸变造成的图像失真会对映射造成干扰。基于 OpenCV 图像处理库的简单透视变换, 完全可以满足小视场系统的要求。但是, 在大视场和高灵敏度的条件下, 则必须引入校正项。而在

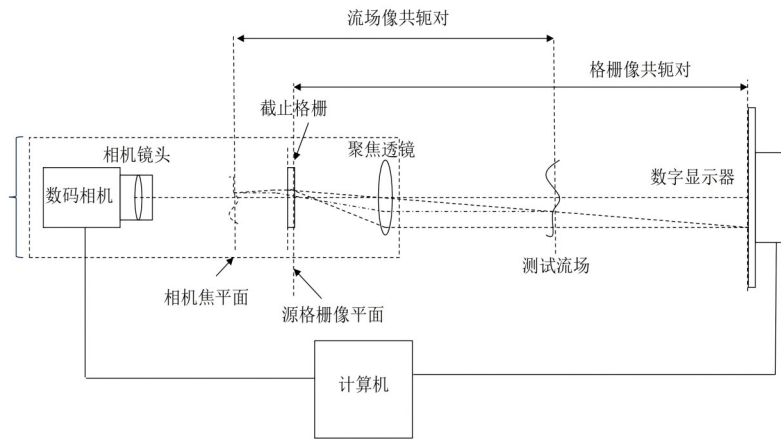


图3 基于背光数字显示器的单通道数字聚焦纹影系统

Fig. 3 Backlit digital display based digital focusing schlieren system

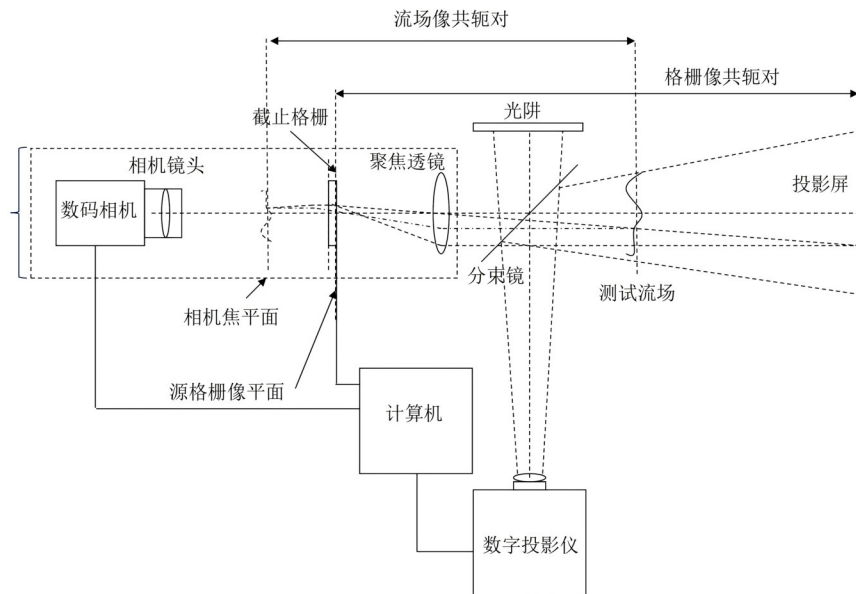


图4 基于数字投影仪的双通道数字聚焦纹影系统

Fig. 4 Digital projector based digital focusing schlieren system

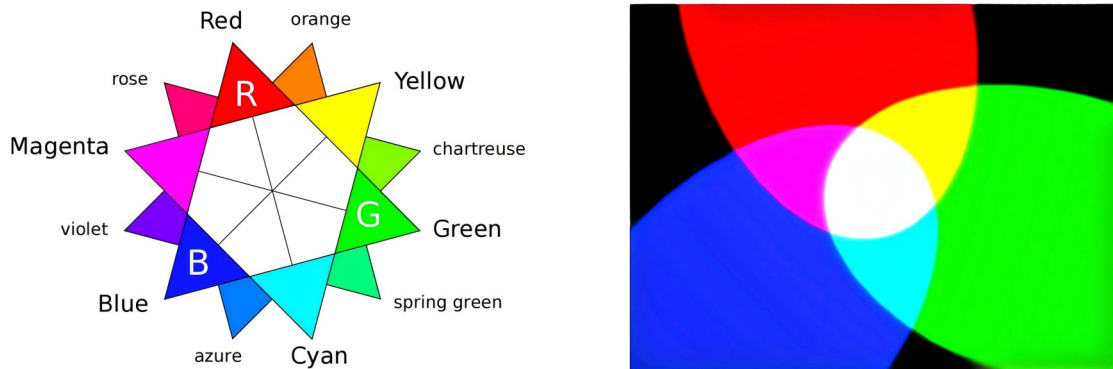


图5 标准 RGB 配色方案和根据加色混合规则混合成白色的互补色光

Fig. 5 The standard RGB scheme and light of complementary color mixes to white according to additive color mixing rules

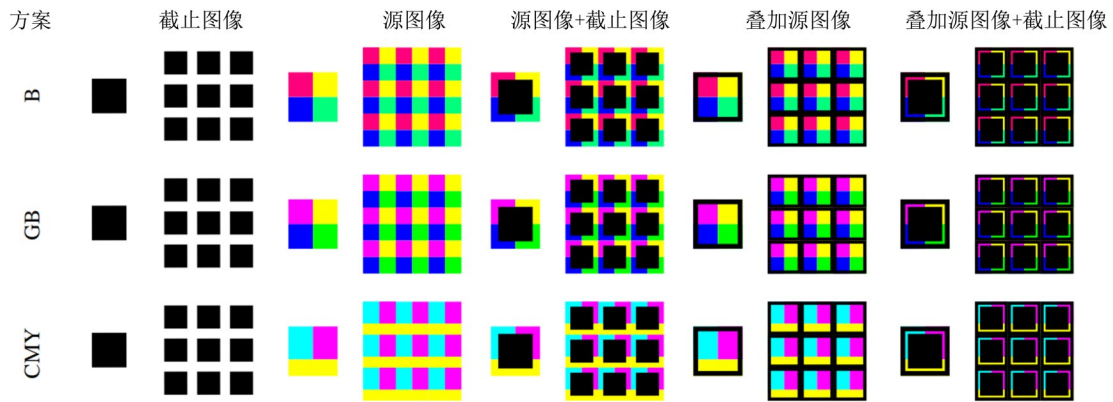


图6 Schogel使用的不同配色方案以及对应的截止图像和源图像
 Fig. 6 Cutoff and source images for different color schemes in Schogel's work

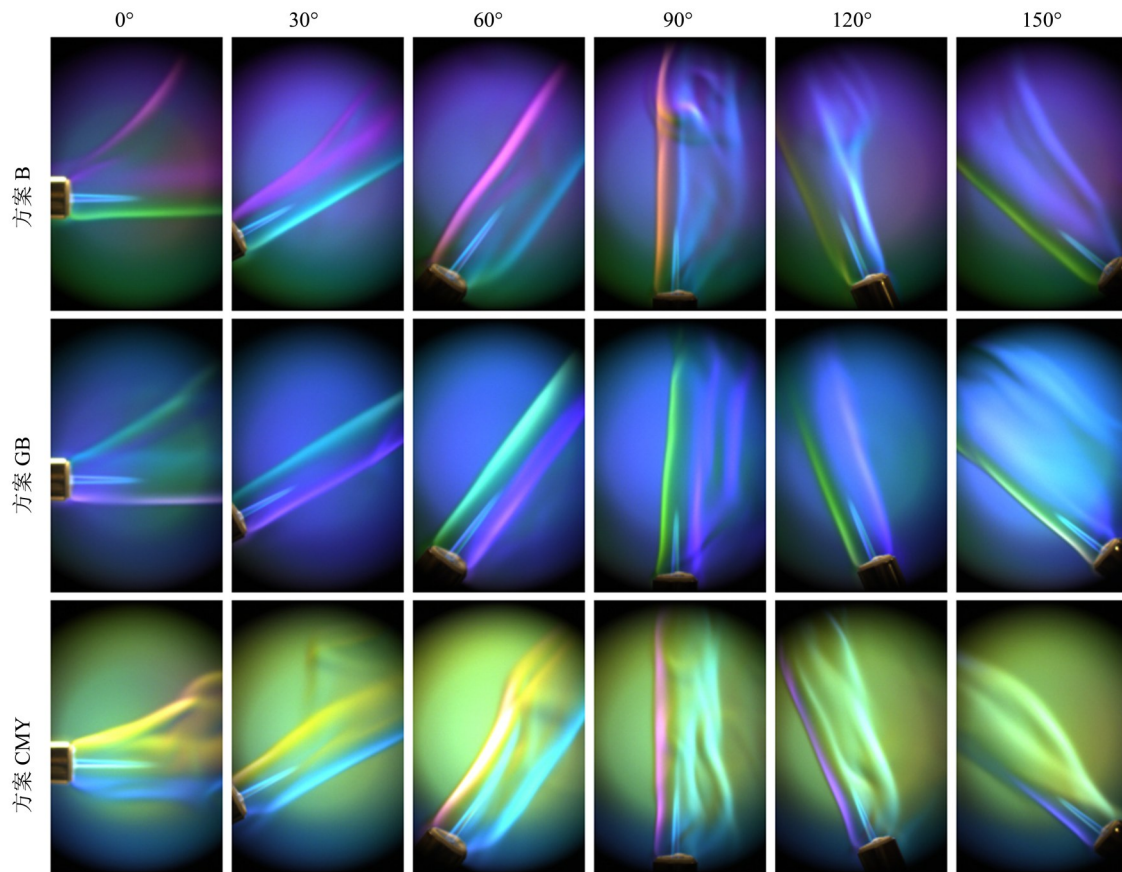


图7 不同角度下彩色编码方案的方向编码效果
 Fig. 7 Directional dependence of color coded ray deflection

广角镜头下，基于 Brown-Conrady 模型 (Duang, 1971) 的相机镜头畸变校正方法伴随有严重的残差。为了解决该问题，Buckner et al. (2019) 根据图像移位测量结果来确定初始映射与最佳映射之间的偏差，通过经验优化了纹影滤波性能，在满足暗场纹影灵敏度要求时，还提高了低分辨率相机

系统格栅生成的弹性。总的来说，数字聚焦纹影系统利用计算机可以进行任意形状源格栅的生成和显示，将格栅校准时间最小化。但其对于网格校准程序的要求过高。此外，虽然使用数字调制器或者数字微镜反射调制器可以实现高速成像，但由于其存在复位周期，可能需要特殊的处理来适应特定的时序需求。

2.2 单格栅型自对准系统

单格栅型聚焦纹影系统 (SAFS, self-aligned focusing schlieren) 通过改变 RP (Rochon prism) 与 RR (Ronchi ruling) 之间的距离改变 RP 对 RR 投影像的切割量, 消除了创建或匹配截止格栅的需要, 利用单个格栅实现双格栅的功能 (Bathel et al., 2021, 2022; Weisberger et al., 2022)。如图 8(a) 所示, LVP、LCP、RCP、LHP 分别代表光的四种偏振状态: 线性垂直偏振、右圆偏振、左圆偏振和线性水平偏振 (Bathel et al., 2022)。CD (condenser lens) 用于提高光的明亮度和均匀性, LP (linear polarizer) 确保耦合到仪器轴上的光高度线性偏振, 通过旋转透射轴可以控制耦合到仪器轴上的光量。PBS (polarizing beam-splitter) 反射 LVP 光至仪器轴, 同时允许 LHP 光通过并被回收。RR 充当源格栅, 并对源格栅投影像进行切割。RP 使 LVP 光通过未折射, LHP 光通过并产生偏折, 具体偏折角度与 RP 分束角相关。QWP (quarter-wave plate) 将光偏振状态从线性偏振改变为圆偏振。FL (field lens) 用于对测试段聚焦成像。RBG (retroreflective background) 用于反射 RR 投影像的同时改变光的偏振状态。图 8(a) 所示部分组件的顺序和位置不是

固定的, 可以进行适当改变。例如, 在不对系统成像造成影响的情况下, RP 可以位于 QWF 和 RR 之间的任何位置; 此外, QWF 可以位于 RBG 和 RP 之间的任何位置, 只需确保所有光线在其光圈内即可 (Hill et al., 2023)。如图 8(b) 所示, 在 SAFS 中相对偏折量 δ_{cutoff} 是关于 RP 厚度 t_{Rochon} 、RP 分束角 β 以及 RP-RR 之间距离 $\tilde{z}_{\text{Rochon}}$ 的函数。系统灵敏度的调节通过改变 $\tilde{z}_{\text{Rochon}}$ 实现。

为了评估 SAFS 性能及其在风洞设施中的应用前景, Weisberger et al. (2023) 探究了测试段观测窗口、反射背景种类及尺寸等因素对系统可视化能力的影响, 并且验证了激光差分干涉与 SAFS 相结合以提供互补数据集的可能性。在此基础上, Hill et al. (2023) 研究了每毫米网格线对数、场镜焦距、测试平面与场镜距离等多项系统参数对于光线截止量、成像灵敏度、景深以及可观测视场的影响, 并使用了两种 SAFS 配置可视化了马赫数为 6 时轴对称锥体和几何圆柱体的流场结构。与传统 Z 型纹影结构相比, SAFS 具有更高的清晰度和信噪比, 不仅对湍流等精细结构具有良好的捕捉能力, 还能观察到图 9(b) 所示的与第二模态不稳定性相关的绳状结构 (Hill et al., 2023)。

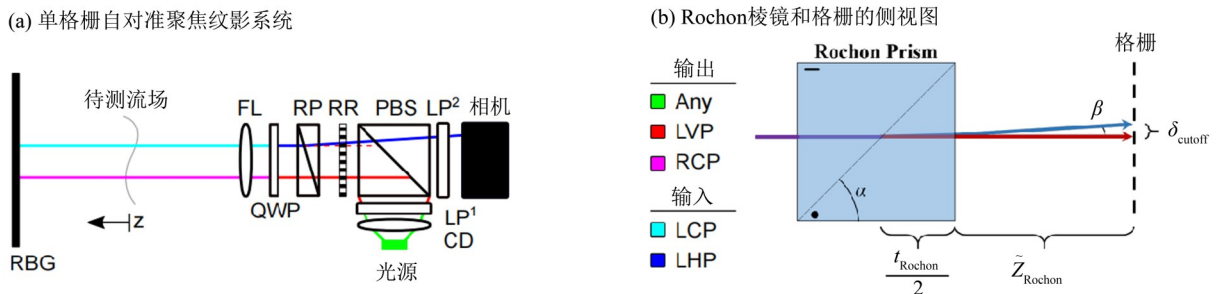


图 8 单格栅自对准聚焦纹影系统以及 Rochon 棱镜和格栅的侧视图
Fig. 8 Self-aligned focusing schlieren and side view of Rochon prism, grid element

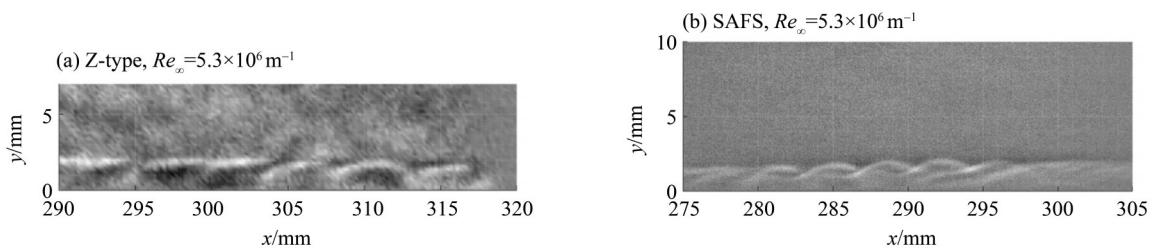


图 9 尖头体的绳状扰动 (经时间平均和背景减除处理)
Fig. 9 Rope-like disturbance over sharp tip (time-average subtracted)

然而,SAFS只显示单方向的密度梯度,若需观察不同方向的扰动情况,需手动调整RR方向。针对这个问题,Bathel et al.(2024)用透明微型液晶显示器替换RR,以实现截止模式的实时更改,系统布局如图10所示。由于光的衍射效应,原始纹影图像中通常会出现图11(a)所示的重复伪影,背

景减除处理显著减轻了模型伪影,但射流伪影仍然存在。Bathel et al.(2024)基于对系统点扩散函数的测量,利用正则化去卷积对图像进行去模糊处理,得到图11(c)所示的解卷积图像;与图11(b)所示结果进行比较,该方法有效抑制了射流在顶部和底部的纹影伪影。

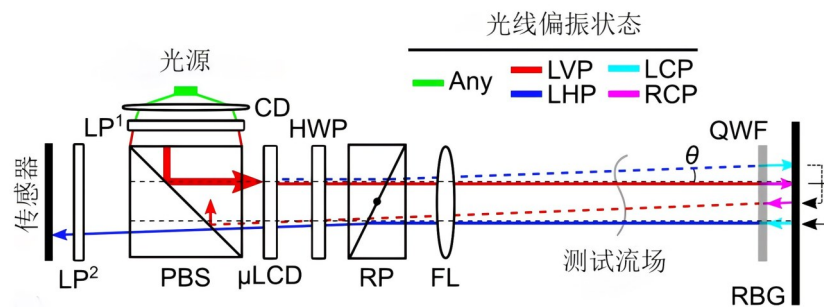


图10 数字单格栅自对准聚焦纹影系统

Fig. 10 Digital self-aligned focusing schlieren system

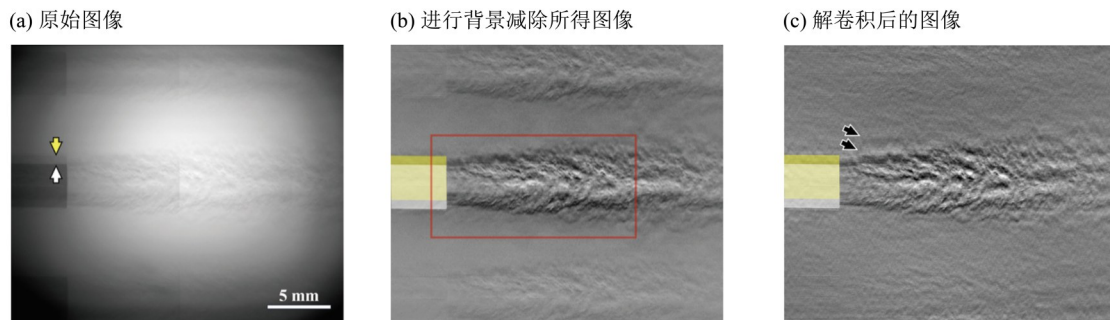


图11 数字单格栅自对准聚焦纹影系统得到的纹影图像

Fig. 11 Schlieren image from digital single-grid self-aligned focusing schlieren system

SAFS通过控制光的偏振状态保证投影光束路径与反射光束路径一致,投影到背景的RR像沿反射路径以原始大小投影至RR位置,利用单个格栅就能实现源格栅和截止格栅的完美匹配和缩放。仪器的偏振特性不仅能确保系统在网格轻微失焦时也能获得足够质量的纹影图像,振动环境中也具有较好的鲁棒性,还能削弱窗口眩光或者反射对结果的影响,使系统在没有优质光学通道的风洞中依旧适用。Mejia et al.(2023)提供了所搭建的SAFS的组件列表,以及研究团队遇到的各种问题和对应解决方案,方便后续研究者参考借鉴。

2.3 基于色差效应的聚焦纹影系统

由于透镜的色差效应,不同波长的光经过同一透镜后会聚焦在光轴上不同位置。彩色数码相机由三个颜色通道组成,每个颜色通道的峰值强

度检测以红、绿、蓝为中心。以数码相机对流场纹影图像进行记录,后将红、绿、蓝三个颜色通道分离,即可通过单次纹影实验实现三个流场平面的同时测量。Martínez-González et al.(2021)以色差透镜进行流场成像,并采用RGB离轴照明进行景深优化(Ahmed et al., 2017),在对数码相机串扰效应(Ahmad et al., 2019)进行校正的基础上,开展了三个流场平面的同时测量,图12展示了其所使用的系统布局。

校准载玻片被固定在电动平移台上,控制其进行微量运动,以确定每个颜色对应的最佳聚焦平面及景深。测试结果如图13所示,红、绿、蓝三个通道的景深分别为0.82、0.76和0.70 mm,可以对 $z = -5.5$ 、 $z = 0.0$ 、 $z = 4.7$ mm处的三个平面进行测量。此外,通过拟定像素强度和截止格栅位

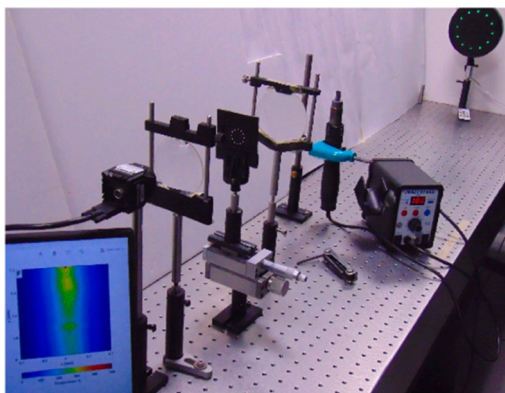


图12 Martínez-González采用的聚焦纹影系统布局

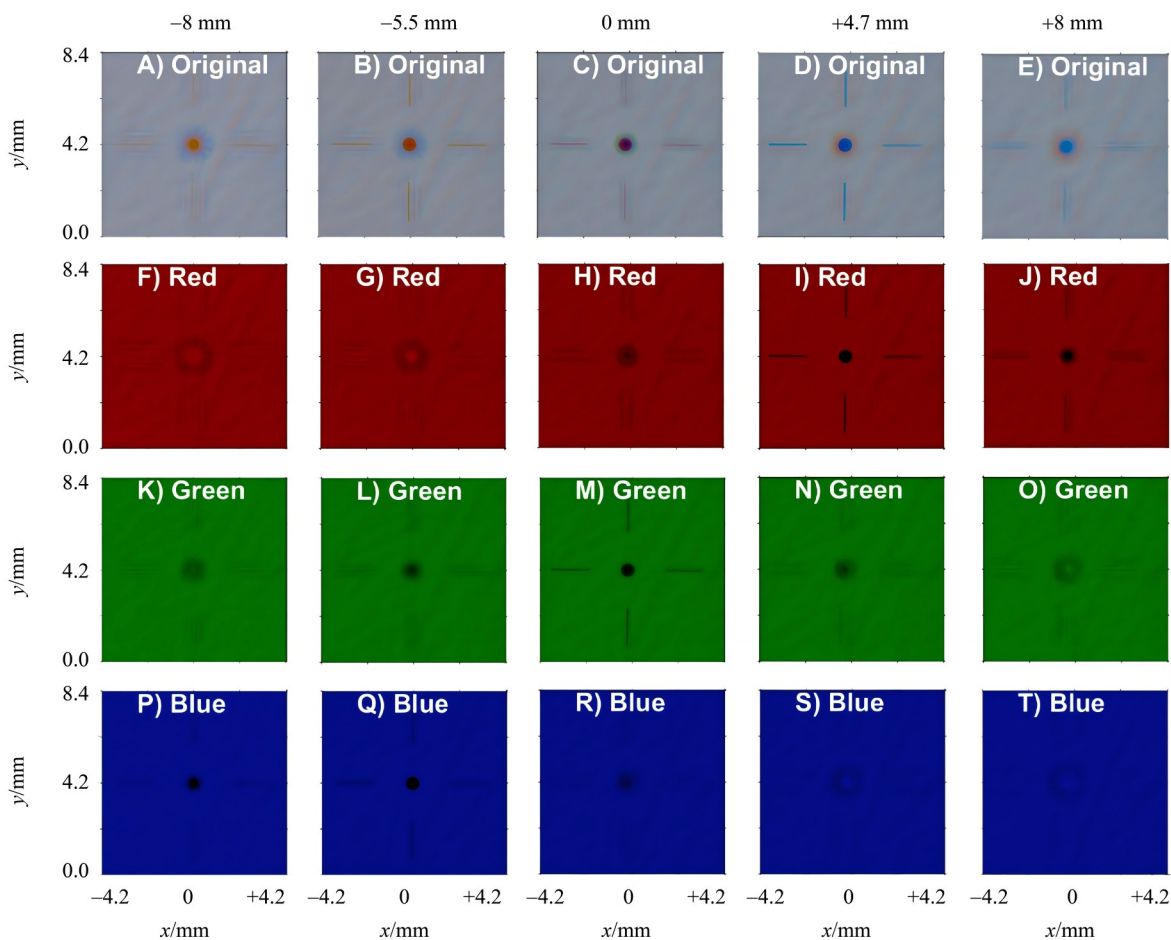
Fig. 12 Color focusing schlieren setup
in Martínez-González's work

置之间的关系 (Alvarez-Herrera et al., 2009;
Martínez-González et al., 2018), Martínez-

González et al. (2018)开展了热风枪流场三个平面的温度测量, 与热电偶测量结果相比, 误差维持在10%以内。

2.4 基于光场相机的聚焦纹影系统

基于微透镜阵列的光场相机是目前最常用的光场记录设备, Levoy et al. (2023)提出光场渲染理论, 并使用如图14(a)所示的两个平行平面对四维光场进行参数化表征。如图14(b)所示, 四维光场函数在空间中的传播相当于一个切变变换 (Ng et al., 2005; Ng, 2005), 由透镜面和传感器面定义的光场函数与由透镜面和重聚焦面定义的光场函数之间的关系可通过几何变换获得 (Kerth et al., 2019), 即



(A-E: LED灯原始图像; F-J: 红色通道图像; K-O: 绿色通道图像; P-T: 蓝色通道图像)

图13 校准载玻片上单个圆点的聚焦效果 (Martínez-González et al., 2018)

Fig. 13 Focusing effect of a dot of a calibration slide (A-E: Original images illuminated with a smart LED; F-J: Red color channel images; K-O: Green color channel images; P-T: Blue color channel images)

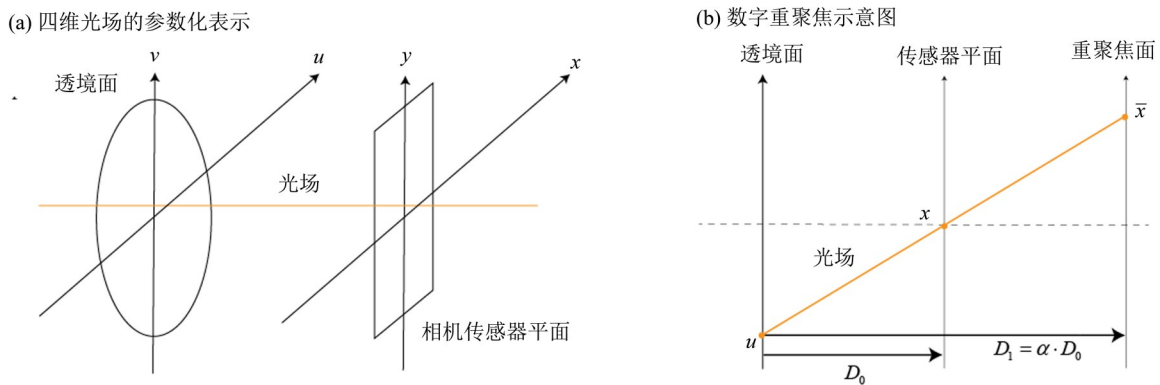


图 14 四维光场的参数化表示和数字重聚焦示意图

Fig. 14 Four-dimensional parametric representation of light field and schematic diagram of digital refocusing

$$L_{D_1}(\bar{x}, \bar{y}, u, v) = L_{D_0}\left(u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{\bar{x}}{\alpha}, v\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{\bar{y}}{\alpha}, u, v\right).$$

因此, 通过改变焦距参数 α 实现数字重聚焦 (Tao et al., 2013; Jeon et al., 2015), 可以在不受主透镜景深的限制下获得多个平面图像。

在光场相机中, 偏离焦平面的点将分散在传感器的多个像素, 在图像中将出现模糊化, 模糊化程度与点至焦平面的距离有关, 可根据点扩散函数进行估计。纹影图像实质是测试段真实体积与点扩散函数的卷积, 利用数字重聚焦获得的每个焦深下的二维图像切片都包含了邻近平面贡献的噪声, 需要对其进行去除。Kerth et al. (2019) 将 Lytro Illum 光场相机应用到聚焦纹影系统中, 参考 Levoy et al. (2006) 描述的受限迭代算法, 引入修正因子以减小体积减法的强度, 采用 Richardson-Lucy 迭代方案 (Richardson, 1972; Lucy, 1974) 获取体积的初始猜测值, 通过比较猜测体积和测得体积, 迭代得到真实体积。图 15(a) 显示了有无气流情况下, 对两个管道所在平面进行数字重聚焦的成像情况。在此基础上, Kerth et al. (2019) 通过修改 Dansereau et al. (2013, 2015) 和 Prevedel et al. (2014) 的方法, 以两个管道流场纹影图像作为重构对象, 基于焦深堆栈图像进行了流场的三维重构, 成功地解析了管道及其相关纹影源的位置, 结果如图 15(b) 所示。

基于微透镜阵列的光场相机系统具有成像单元间位置和角度关系稳定、系统体积小、可移植性强等多项优势, 相关数据处理方法和软件也已

十分成熟。然而, 微透镜是通过牺牲空间分辨率以获取角度分辨率, 无法满足高空间分辨率场景的应用需求。相比之下, 掩膜法 (Veeraraghavan et al., 2007) 采用光学掩膜调制光信号, 并通过算法恢复四维光场信息, 相对于微透镜阵列结构具有更简单的硬件系统和更容易的初级数据处理, 因此更易于实现。Orth et al. (2013) 提出的 LMI (light field moment imaging) 方法以及 Zheng et al. (2013) 提出的傅里叶叠层成像技术, 也可以实现四维光场数据的获取, 并实现数字重聚焦。未来可以考虑将以上光场信息获取方法与聚焦纹影结合, 实现复杂流动的三维显示。

3 总结与展望

本文从格栅对准和非定常流动的多平面测量两个角度出发, 详细介绍了 4 种类型的聚焦纹影系统, 对聚焦纹影系统的发展现状进行了梳理。主要结论如下:

(1) 数字聚焦纹影系统利用计算机控制数字显示设备可以生成任意形状的源格栅, 实现了源格栅和截止格栅的自对准。但是, 其对准精度严重依赖相机坐标与数字设备之间的精确映射, 在高灵敏度中的应用受限, 对于网格校正程序的要求高。

(2) 单格栅型自对准系统通过控制光的偏振状态, 基于单个格栅创新了系统灵敏度调节方式, 具有很强的抗干扰能力。

(3) 基于色差效应的聚焦纹影系统利用透镜的色差效应实现单个纹影图像下的多平面测量,

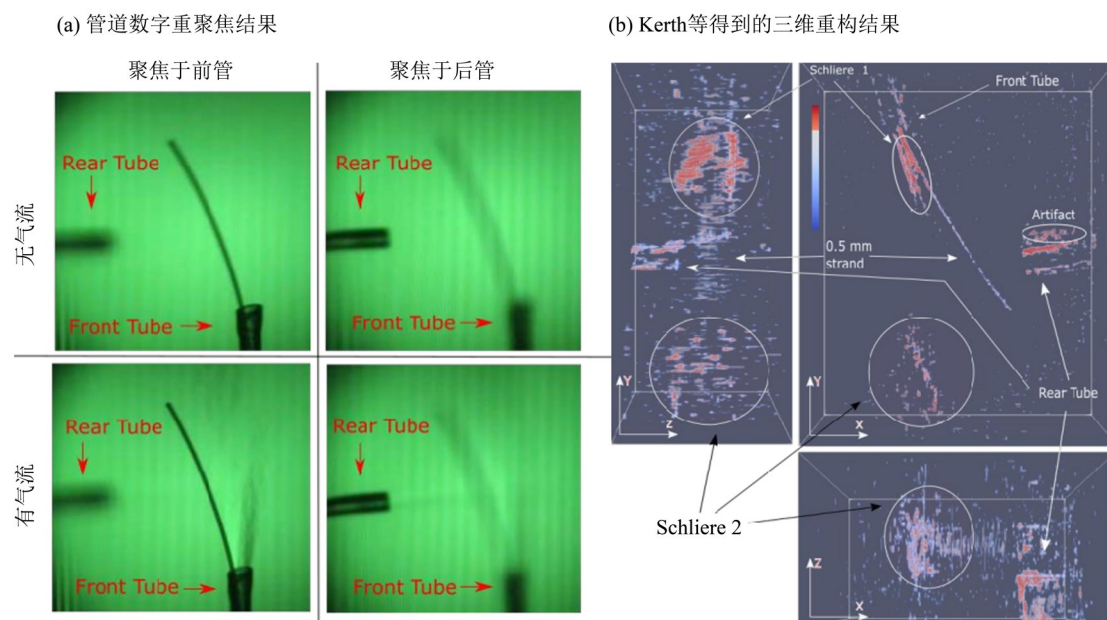


图15 管道数字重聚焦结果和Kerth等得到的三维重构结果

Fig. 15 Digital refocusing and 3D representation of the obtained reconstruction results in Kerth's work

但是最多只能同时测量三个平面,且由于未考虑邻近平面的噪声贡献、光学像差等因素,测量误差较大。

(4) 基于光场相机的系统,其依据的相关成像理论以及光场信息利用方式仅考虑了光线的二维空间位置和传输方向,忽略了相位、振幅等更

多维度的信息,且其通过牺牲空间分辨率以获取角度分辨率,无法满足高空间分辨率场景的应用需求。

(5) 在未来的研究中,可以考虑将光学掩膜法、LMI或傅里叶叠层成像技术与聚焦纹影技术相结合,实现流场的三维显示。

参考文献:

- 田立丰, 2011. 超声速光学头罩流场精细结构及其气动光学效应的机理研究[D]. 长沙:国防科学技术大学.
- 席锋, 秦华锋, 胡莉, 等, 2021. 可视化聚焦纹影系统实现流场中的三维扰动成像[J]. 光学学报, 41(9): 0911003.
- 谢爱民, 黄洁, 徐翔, 等, 2013. 激波风洞流场密度测量的聚焦纹影技术[J]. 实验流体力学, 27(2): 82-86.
- 谢爱民, 部绍清, 罗锦阳, 2018. 基于光源拼接的大视场聚焦纹影技术初步研究[J]. 实验流体力学, 32(6): 68-73.
- 易仕和, 田立丰, 赵玉新, 等, 2011. 基于NPLS技术的可压缩湍流机理实验研究新进展[J]. 力学进展, 41(4): 379-390.
- 岳茂雄, 田野, 张弯洲, 等, 2021a. 凹腔燃烧截面波系及温度场同步显示研究[J]. 推进技术, 42(9): 2022-2027.
- 岳茂雄, 张弯洲, 吴运刚, 等, 2021b. 基于发散光反射式布局的大视场显示方法研究[J]. 实验流体力学, 35(3): 77-82.

- 周芮旭, 连欢, 顾洪斌, 等, 2020. 激光诱导荧光聚焦纹影系统及超声速燃烧流场应用[J]. 气体物理, 5(2): 14-19.
- AHMAD A, KUMAR A, DUBEY V, et al, 2019. Characterization of color cross-talk of CCD detectors and its influence in multispectral quantitative phase imaging [J]. Opt Express, 27(4): 4572-4589.
- AHMED K A, WILEY A, 2017. Structured light-field focusing for flowfield diagnostics [J]. Exp Therm Fluid Sci, 89: 110-118.
- ALVAREZ-HERRERA C, MORENO-HERNÁNDEZ D, BARRIENTOS-GARCÍA B, et al, 2009. Temperature measurement of air convection using a schlieren system [J]. Opt Laser Technol, 41(3): 233-240.
- ALVI F, SETTLES G, WEINSTEIN L, 1993. A sharp-focusing schlieren optical deflectometer [C]//Proceedings of the 31st Aerospace Sciences Meeting. Reston, Virginia,

- USA: AIAA: 629.
- BATHEL B F, WEISBERGER J M, 2021. Compact, self-aligned focusing schlieren system [J]. *Opt Lett*, 46(14): 3328–3331.
- BATHEL B F, WEISBERGER J M, 2022. Development of a self-aligned compact focusing Schlieren system for NASA test facilities [C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum. Reston, Virginia, USA: AIAA: 0560.
- BATHEL B F, WEISBERGER J M, PAGE W E, et al, 2024. Digital self-aligned focusing schlieren [J]. *Opt Lett*, 49(4): 778–781.
- BUCKNER B D, TROLINGER J D, L' ESPERANCE D, 2015. Digital focusing schlieren imaging [C]//Applied Advanced Optical Metrology Solutions. San Diego, California, USA: SPIE: 59–66.
- BUCKNER B D, L' ESPERANCE D, 2019. Schlieren unwrapped: Distortion correction in digital focusing schlieren [C]//Applied Optical Metrology III. San Diego, California, USA: SPIE: 189–197.
- CAUTY F, ERADES C, 2012. Tracking of aluminum particles burning in solid propellant combustion gases by focusing schlieren technique [C]//Proceeding of the 15th International Symposium on Flow Visualization. Reston, Virginia, USA: AIAA: 0156.
- CHOI Y J, GRAY M D, SIROHI J, et al, 2017. Measurement of velocity induced by a propagating arc magneto-hydrodynamic plasma actuator [C]//Proceeding of the 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston, Virginia, USA: AIAA: 0156.
- DANSEREAU D G, PIZARRO O, WILLIAMS S B, 2013. Decoding, calibration and rectification for lenslet-based plenoptic cameras [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Portland, OR, USA: IEEE: 1027–1034.
- DANSEREAU D G, PIZARRO O, WILLIAMS S B, 2015. Linear volumetric focus for light field cameras [J]. *ACM Trans Graph*, 34(2): 1–15+20.
- DOGGETT G P, CHOKANI N, 1993. Large-field laser holographic focusing schlieren system [J]. *J Spacecr Rockets*, 30(6): 742–748.
- DOWNIE J D, 1995. Application of bacteriorhodopsin films in an adaptive-focusing schlieren system [J]. *Applied optics*, 34(26): 6021–6028.
- DOWNIE J D, SMITHEY D T, 1996. Measurements of holographic properties of bacteriorhodopsin films [J]. *Applied optics*, 35(29): 5780–5789.
- DUANE C B, 1971. Close-range camera calibration [J]. *Photogramm Eng*, 37(8): 855–866.
- DUONG N T, TAGUCHI M, KASHITANI M, et al, 2022. An experimental investigation of busemann biplane in transonic flow by focusing schlieren technique [C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum. Reston, Virginia, USA: AIAA: 0769.
- FAGAN A F, L' ESPERANCE D, ZAMAN K Q, 2014. Application of a novel projection focusing schlieren system in NASA test facilities [C]//30th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Reston, Virginia, USA: AIAA: 2522.
- FÖRSTER F J, DRÖSKE N C, BÜHLER M N, et al, 2016. Analysis of flame characteristics in a scramjet combustor with staged fuel injection using common path focusing schlieren and flame visualization [J]. *Combust Flame*, 168: 204–215.
- GOULDING J S, 2006. A study of large-scale focusing schlieren systems [D]. <https://wiredspace.wits.ac.za/items/b72c81c8-ef23-4403-83e0-bf32025af630>.
- HARGATHER M J, LAWSON M J, SETTLES G S, et al, 2009. Focusing-schlieren PIV measurements of a supersonic turbulent boundary layer [C]//Proceeding of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston, Virginia, USA: AIAA: 69.
- HILL J L, BORG M P, BENITEZ E K, et al, 2023. Implementation of self-aligned focusing schlieren for hypersonic boundary layer measurements [C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2023 Forum. Reston, Virginia, USA: AIAA: 2438.
- JEON H G, PARK J, CHOE G, et al, 2015. Accurate depth map estimation from a lenslet light field camera [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston, MA, USA: IEEE: 1547–1555.
- KASHITANI M, NAKAO S, MIYAZATO Y, 2019. Basic experiment on focusing schlieren piv method with LED light source [C]//Proceedings of the 31st International Symposium on Shock Waves. Cham: Springer: 435–441.
- KERTH P, HERMANN T, MCGILVRAY M, 2019. Three-dimensional focusing schlieren using a plenoptic camera [C]//International Conference on Flight Vehicles, Aerothermodynamics, Re-entry Missions and Engineering. ESA Conference Bureau.
- KOUCHI T, GOYNE C P, ROCKWELL R D, et al, 2015. Focusing-schlieren visualization in a dual-mode scramjet

- [J]. *Exp Fluids*, 56(12): 1–14.
- L' ESPERANCE D, BUCKNER B D, 2017. Focusing schlieren systems using digitally projected grids [C]// *Applied Optical Metrology II*. San Diego, USA: SPIE: 204–213.
- LEVOY M, NG R, ADAMS A, et al, 2006. Light field microscopy [M]. *ACM Sig Graph 2006 Papers*. Boston, Massachusetts, USA: ACM: 924–934.
- LEVOY M, HANRAHAN P, 2023. Light field rendering [M]. *Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries*. New York, NY, USA: ACM: 441–452.
- LUCY L B, 1974. An iterative technique for the rectification of observed distributions [J]. *Astron J*, 79: 745.
- MARTÍNEZ-GONZÁLEZ A, MORENO-HERNÁNDEZ D, GUERRERO-VIRAMONTES J A, et al, 2018. Temperature measurement of fluid flows by using a focusing schlieren method [J]. *Sensors*, 19(1): 12.
- MARTÍNEZ-GONZÁLEZ A, MORENO-HERNÁNDEZ D, GUERRERO-VIRAMONTES J A, et al, 2021. Multiplane temperature measurement of fluid flows using a color focusing schlieren system [J]. *Opt Laser Technol*, 142: 107256.
- MEJIA N, SCHMIDT B E, 2023. ATLAS: Assistive tool for self-aligning schlieren [C]// *Proceedings of the AIAA SCITECH 2023 Forum*. Reston, Virginia, USA: AIAA: 2265.
- NG R, 2005. Fourier slice photography [J]. *ACM Trans Graph*, 24(3): 735–744.
- NG R, LEVOY M, BRÉDIF M, et al, 2005. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [D]. Stanford, CA: Stanford university.
- ORTH A, CROZIER K B, 2013. Light field moment imaging [J]. *Opt lett*, 38(15): 2666–2668.
- OZAWA R W, COX T J, REYES J, et al, 2018. Structured light-field focusing 3D density measurements of a supersonic cone [C]// *Proceedings of the 56th Aerospace Sciences Meeting*. Reston, Virginia, USA: AIAA: 0410.
- PASSMANN M, DER WIESCHE SAUS, JOOS F, 2020. Focusing schlieren visualization of transonic turbine tip-leakage flows [J]. *Int J Turbomach Propuls Power*, 5(1): 1.
- PREVEDEL R, YOON Y G, HOFFMANN M, et al, 2014. Simultaneous whole-animal 3D imaging of neuronal activity using light-field microscopy [J]. *Nat Methods*, 11(7): 727–730.
- RICHARDSON W H, 1972. Bayesian-based iterative method of image restoration [J]. *JOSA*, 62(1): 55–59.
- SCHOEGL I, PISANO A J, SEDKY G, 2016. Development of a compact focusing color schlieren technique [C]// *Proceedings of the 54th Aerospace Sciences Meeting*. Reston, Virginia, USA: AIAA: 1765.
- SETTLES G S, 2001. *Schlieren and shadowgraph techniques: Visualizing phenomena in transparent media* [M]. Berlin: Springer Science & Business Media.
- TAO M W, HADAP S, MALIK J, et al, 2013. Depth from combining defocus and correspondence using light-field cameras [C]// *International Conference on Computer Vision*. Sydney, NSW, Australia: IEEE: 673–680.
- VEERARAGHAVAN A, RASKAR R, AGRAWAL A, et al, 2007. Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing [J]. *ACM Trans Graph*, 26(3): 69.
- WEINSTEIN L M, 2010. Review and update of lens and grid schlieren and motion camera schlieren [J]. *Eur Phys J Spec Top*, 182(1): 65–95.
- WEISBERGER J M, BATHEL B F, 2022. Single source/cutoff grid, self-aligned focusing schlieren system [J]. *Exp Fluids*, 63(1): 38.
- WEISBERGER J M, BATHEL B F, 2023. Colinear focused laser differential interferometry and self-aligned focusing schlieren [J]. *Applied Optics*, 62(18): 4958–4970.
- ZHENG G, HORSTMAYER R, YANG C, 2013. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy [J]. *Nat Photonics*, 7(9): 739–745.

(责任编辑 王海蓉)