

doi:10.3788/gzxb20184702.0211002

基于背景纹影的几何光学传递函数测量技术

赵鑫海, 易仕和, 丁浩林, 牛海波

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 光学传递函数是评价像质的重要指标, 是光学系统设计的重要辅助参数. 基于背景纹影技术获取光线通过折射率场的位移场数据, 结合马吕斯定理, 获取了对应的波前梯度数据. 结合光学传递函数计算方法, 实现对光学传递函数的获取. 利用上述思路完成了对某平凸透镜光学传递函数的测量, 并将其与 ZEMAX 计算得到的光学传递函数进行比较. 对比了低频处的实验结果和理论结果, 其误差不超过 4.0%. 分析了误差产生原因并验证了基于背景纹影技术对低通系统进行光学传递函数测量的可行性和有效性.

关键词: 背景纹影; 测量; 几何光学; 光学传递函数; 适用性

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)02-0211002-6

Measurement Technique of Geometric Optical Transfer Function Based on Background Oriented Schlieren

ZHAO Xin-hai, YI Shi-he, DING Hao-lin, NIU Hai-bo

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: The optical transfer function is accepted as an essential index to evaluate the imaging quality and is an important auxiliary parameter for designing the optical system. Based on the background oriented schlieren, the displacement field data of the light passing through the refractive index field are obtained, and the corresponding wavefront gradient data is obtained by combining the Marius theorem. Combined with the geometric optical transfer function formula, the optical transfer function can be achieved. The optical transfer function of a flat convex lens is measured by the above idea and is compared with the optical transfer function results calculated by ZEMAX. Comparison of the experimental results and theoretical results at low frequencies is conducted and the error is less than 4%. Feasibility and validity of background oriented schlieren for measuring the optical transfer function of low-pass systems are verified.

Key words: Background oriented schlieren; Measurement; Geometric optics; Optical transfer function; Applicability

OCIS Codes: 110.4100; 110.4850; 080.2740; 080.3630

0 引言

20 世纪 50 年代林特贝格证实了光学传递函数(Optical Transfer Function, OTF)的可测性^[1], 随后, 光学传递函数在像质评价、光学设计、光学信息处理等方面发挥着越来越重要的作用. 目前, 测量光学传递函数

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.11172326, 11302256)资助

第一作者: 赵鑫海(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为航天气动光学. 18773129527@163.com

导 师: 易仕和(1965-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为航天气动光学与成像制导技术等方面的研究. Email: yishihe_gfkd@foxmail.com

通讯作者: 丁浩林(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为航天气动光学. Email: dinghaolin_gfkd@foxmail.com

收稿日期: 2017-09-01; **录用日期:** 2017-10-10

<http://www.photon.ac.cn>

的方法主要有对比度法、狭缝测量法和刀口测量法^[2].应用这些方法完成了大量的以镜头^[3]为代表的光学器件和系统的光学传递函数的测量,同时技术也得到了有效的改进^[4].然而这些测量方法成本较高,在实验复杂度和抗干扰能力、测量对象和测量空间范围等方面存在一定的缺陷.例如,狭缝法中不同测量对象需要不同的狭缝靶,刀口法容易受到噪声的干扰,并且在非常规环境(如大型风洞实验)中进行光学传递函数测量时,其适用性受限.目前大多数测量系统所得的数据量很大,处理不易,系统一般只在不同方向进行 OTF 的一维分析.在做像质评价时,求得多个方向上的 OTF 平均值,以局部来描述光学系统的整体特性.

背景纹影技术(Background Oriented Schlieren, BOS)于 20 世纪末期由 Meier 正式提出,并在之后文章中对该技术做了详细的介绍.该技术在流动可视化^[5]、流场密度测量^[6]、流场温度测量^[7]、透明物体面重构^[8]以及气动光学波前测量^[9-11]等领域应用广泛.BOS 技术装置组成简单,操作方便,测量范围和测量分辨率可根据测量对象进行调整,具有较好的鲁棒性^[12],成为其推广应用的有利要素.本文通过将 BOS 技术测量得到光线通过折射率场导致的光线偏移结果与几何光学传递函数理论相结合,提出了一种基于 BOS 技术的光学传递函数测量方法.该方法继承了 BOS 技术结构简单、操作方便、鲁棒性好等优点.

1 背景纹影技术及实验装置

BOS 技术组成简单,其测量部分由背景点和相机组成,数据采集和处理由计算机完成.基本工作原理为:通过相机拍摄视场中不存在密度场情况下的背景图像和存在密度场情况下的背景图像(以下记作畸变图像),并将其进行互相关处理,得到背景点位移信息.基于此技术,在实验室搭建背景纹影光路平台,获取非均匀密度场产生的光线偏折信息.

图 1 为实验简图,图 2 为实验实物图.图 2 中从左至右依次为背景点、待测透镜、相机镜头和 CCD 相机.图 1 与图 2 中器件依次对应.在光路上,图 1 从左至右依次为物平面、入/出瞳和像平面.其中物平面与背景点重合,入/出瞳与待测透镜重合(对薄透镜系统),像平面与 CCD 感光面重合.

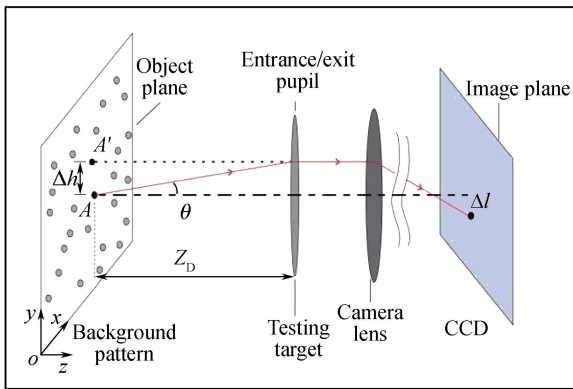


图 1 实验简图
Fig.1 Sketch of the experiment

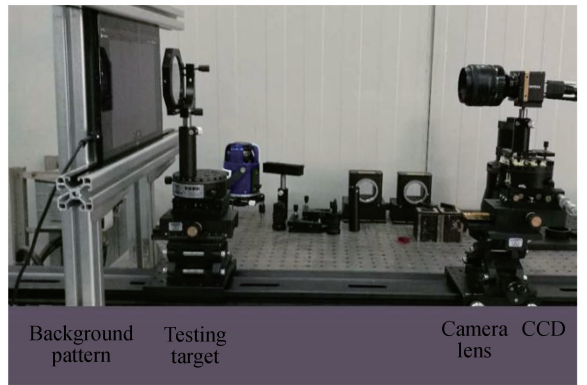


图 2 实验实物图
Fig.2 Graph of the experiment structure

图 1 中 A 和 A' 代表从相机视觉出发,在视场中有无非均匀密度场的两种情况下,对同一个背景点观察到的空间位置.其在物平面上存在相应的位移量 Δh .通过 BOS 得到位移量后,结合小角近似原理,进一步得到光线偏折角分布 θ .将它它在 x 和 y 两个方向表示为

$$\begin{cases} \theta_x = \frac{\Delta x}{Z_D} \\ \theta_y = \frac{\Delta y}{Z_D} \end{cases} \quad (1)$$

从几何光学的观点出发,光线传播方向总是垂直于波前.则入瞳处波像差函数 $W(x, y)$ 在的 x 和 y 两个方向偏导数可以用光线偏转的小角度表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial x} = \theta_x = \frac{\Delta x}{Z_D} \\ \frac{\partial W}{\partial y} = \theta_y = \frac{\Delta y}{Z_D} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)为入瞳处波相差偏导数,是实验的主要测量对象.对目标透镜(薄透镜)系统而言,入瞳位置和出瞳位置关于透镜中心对称.由该系统的对称性可知,入射光线在入瞳位置为平面波前时对应的出射光瞳处的波前,等价于出瞳处为平面波前所对应的入瞳处的波前.因此出瞳处波前等价于式(2)得到的入瞳处波相差偏导数.

2 光学传递函数

光学传递函数可由光瞳函数^[13] $g(x, y)$ 的自相关函数表示,即

$$R(\sigma, \tau) = \frac{1}{\pi} \iint_S g(x, y) g^*(x - \sigma, y - \tau) dx dy \quad (3)$$

式中, x 和 y 为光瞳正则坐标,在正则坐标下出射光瞳由椭圆形转化为圆形,在几何光学中积分区域 S 为光瞳面积, σ 和 τ 分别为子午和弧矢方向的简化空间频率.

利用泰勒级数,光学传递函数可以近似表达为

$$R(\sigma, \tau) = \frac{1}{\pi} \iint_S \exp\left\{ik \left[\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \sigma + \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \tau \right]\right\} dx dy \quad (4)$$

在已有理论的基础上,为简化积分,使得实验数据和理论参数相对应,利用欧拉公式分离函数,式(4)等价于

$$R_g(\sigma, \tau) = \frac{I_0}{\pi} \iint_S \cos \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\partial W}{\partial X} \sigma + \frac{\partial w}{\partial y} \tau \right] dx dy + i \frac{I_0}{\pi} \iint_S \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\partial W}{\partial X} \sigma + \frac{\partial w}{\partial y} \tau \right] dx dy \quad (5)$$

式(5)即为由两个二重积分表示的几何光学传递函数,可知函数由实部和虚部组成.其中波像差偏导数 $\partial W / \partial x$ 和 $\partial W / \partial y$ 可由实验得到.可以将式(5)分解为两个积分,即令

$$R_g(\sigma, \tau) = A(\sigma, \tau) + iB(\sigma, \tau) \quad (6)$$

式中 $A(\sigma, \tau)$ 和 $B(\sigma, \tau)$ 分别对应式(4)中的两项积分.在满足精度的条件下,选用复化 Simpson^[14] 二重数值积分方法分开计算实部 $A(\sigma, \tau)$ 和虚部 $B(\sigma, \tau)$.

光学传递函数由相位传递函数(Phase Transfer Function, PTF)和调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)组成,他们分别代表相位和对比度的变化.文中着重研究光学传递函数对应的调制传递函数.调制传递函数即为光学传递函数 R_g 的模,即

$$\text{MTF}(\sigma, \tau) = \sqrt{A^2(\sigma, \tau) + B^2(\sigma, \tau)} \quad (7)$$

3 实验结果及分析

实验利用互相关算法^[15] 对相机拍摄到的畸变前后的背景图像进行计算,得到了物平面上 x 和 y 两个方向的位移量信息.图 3(a)和(b)所示为实验得到的目标透镜引起的背景图像位移云图和位移矢量图.位移云图的结果显示,光线经过透镜后的偏折量整体呈圆形对称分布,但未能形成较规则的轴对称分布,这与理论存在一定的差异.F Cozzi^[16] 用相同方法测量了光线通过透镜后偏折的位移云图,这种实验位移量非规则对称的差异在其文章中也存在.出现这样的差异,分析为实验的不可控因素造成.

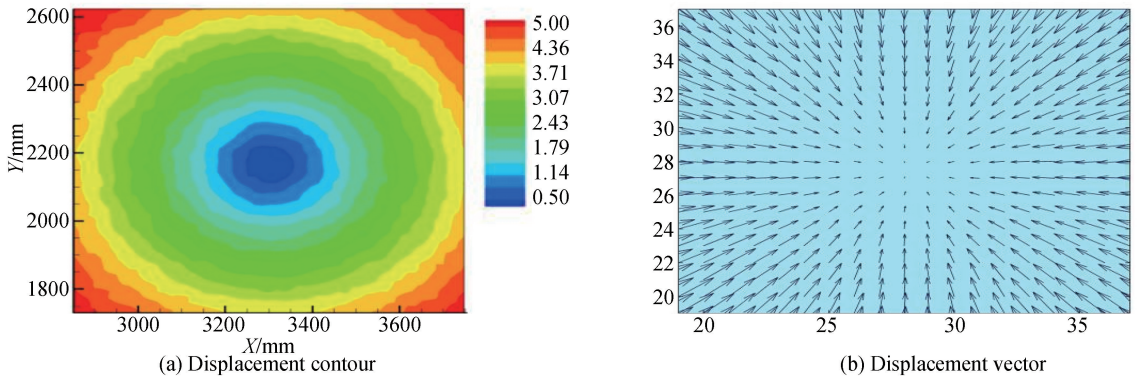


图3 位移云图和位移矢量图像

Fig.3 Displacement contour and displacement vector

将实验得到的位移量数据根据式(2)中得到出瞳处波像差偏导数进行后期处理.在进行 OTF 计算时,利用子午和弧矢两个方向的波像差偏导数,在不同简化空间频率下进行数值积分,得到光学传递函数,求其模得到 $MTF(\sigma, \tau)$,再将坐标由简化空间频率 (σ, τ) 转化到实际空间线频率 (f_x, f_y) ,得到 $MTF(f_x, f_y)$.为了支撑实验方法的实用性,在相同几何条件下利用商业软件 ZEMAX 对目标透镜进行计算,得到其 MTF.

图 4(a)为实验得到的目标透镜的连续 MTF 分布,图 4(b)为 ZEMAX 软件对目标透镜计算得到的 $f_x - f_y$ 平面上的透镜 MTF 分布(为便于比较,将 ZEMAX 的数据文件导出,用 MATLAB 软件重新绘图).图中空间频率变化范围为 $f_x: -40 \sim 40$ lp/mm; $f_y: -40 \sim 40$ lp/mm.应该指出的是,文中依据瑞利准则来确定系统在空气中的截止频率,即

$$\begin{cases} f_x = \frac{\sin \alpha_s}{0.5\lambda} \\ f_y = \frac{\sin \alpha_t}{0.5\lambda} \end{cases} \quad (8)$$

式中, α_s 和 α_t 分别为子午和弧矢极限光线与主光线的夹角.

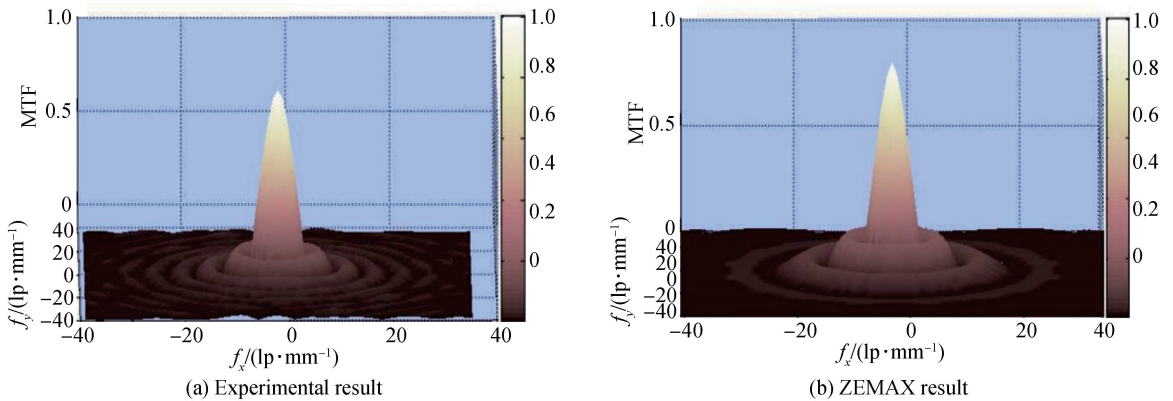


图 4 透镜 MTF

Fig.4 MTF of the lens

由图 4 可以观察到,目标透镜对子午和弧矢两个方向上的低频分量都具有较好通过性,符合低通的特性.同时,在高频部分实验得到的结果和理论结果存在着明显的差异:理论结果高频部分 MTF 的值几乎为 0,但是实验结果在高频处存在着较小的 MTF 值.原因可以解释为:数据处理方法未考虑衍射极限的影响和系统渐晕;同时实验操作时的精度缺陷,使得成像质量不能和理论结果保持一致.另外,算法本身从几何光学出发,利用了泰勒展开和复化二重积分,实际为近似的算法,会引入一定误差.需对误差进行相应的定量分析.

图 5 所示为多个方向上实验结果和 ZEMAX 计算结果的二维对比图.其中虚线为 ZEMAX 计算结果,其余三种线型分别代表实验结果在 f_x, f_y 和 45° 三个方向上的二维数据提取结果.因为 ZEMAX 是对理想透镜进行计算的,即图 4(b)表示为连续的二维结果且旋转对称,所以图 5 中只给出一个 ZEMAX 二维结果代表整体.

图 5 中, $f_y = 0, f_x = 0:40$ lp/mm 和 $f_x = 0, f_y = 0:40$ lp/mm 对应的曲线代表只有一个方向(子午或弧矢)的空间频率作用.值得注意的是, 45° 方向($f_y: 0:40$ lp/mm; $f_x = f_y = 0:40$ lp/mm)的 MTF 与理论结果最接近.对这种现象,有一种解释是:

45° 方向代表子午和弧矢空间频率的共同作用,且该方向两种方向的空间频率作用强度一样(即 $f_x = f_y$),这样的空间频率条件与透镜的实际应用情况更符合.图 5 的高频部分中,可以观察到和图 4(a)所表现一致,都

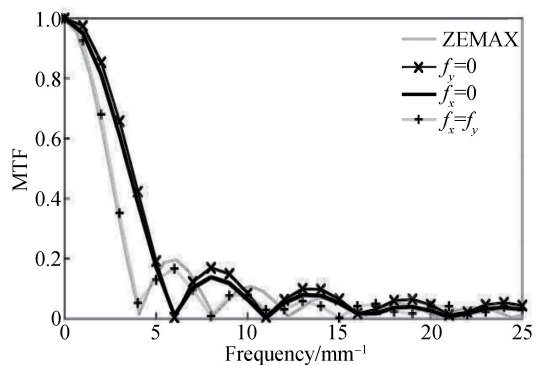


图 5 MTF 对比图

Fig.5 Contrast map of MTF

可以得出系统在高频方面存在测量能力不足的缺陷,并且从结果可以得到,在高频部分所表现出的特点是,空间频率越高实验结果与理论结果相差越大.因此,该实验方法具有较好的低通性能.

图6所示为 $f_x = f_y = 0:40$ lp/mm低频处的实验结果和ZEMAX理论结果的误差分析.图中数据表示实验结果与理论结果的差值.可以得到:在归一化的MTF结果中,实验和理论的最大误差不超过4%,其平均误差约为2.5%.另外,曲线与坐标所围线下面积可以表示系统成像质量和传输信息的多少.因此,分别计算图5中 45° 方向上实验结果曲线和理论结果曲线在低频处的线下面积,将其进行相互对比, 45° 方向实验结果与理论结果最符合,绝对值误差约为0.8%,说明系统在对待测物成像质量的评价能力较高.结合实验及其所依据的理论,这样的误差量可以被工程应用所接受.因此证明了对低通系统采用BOS技术测量目标物的光学传递函数具有较好的适用性.

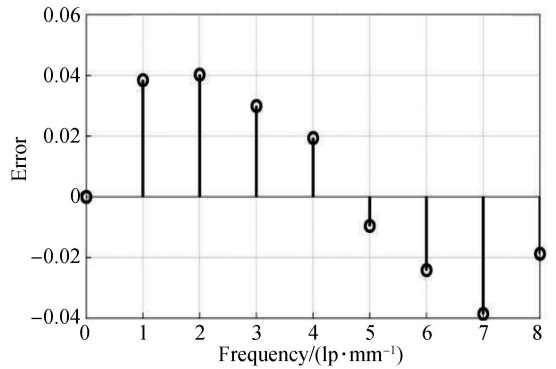


图6 低频处 MTF 误差分析

Fig.6 Analysis of MTF error at low frequency

4 结论

本文利用背景纹影技术进行了有效的实验,通过相关算法对实验数据进行分析处理,得到了连续二维调制传递函数.将实验结果与 ZEMAX 结果进行了对比分析,发现实验方法在低频处与理论结果符合较好,在高频部分与理论相差较大.选择三个方向的 MTF 二维曲线与理论结果进行比较,发现从 45° 方向得到的 MTF 实验结果和理论结果符合得最好.给出了原因分析,但仍需要进一步的讨论(例如背景点参数和实验参数的影响等).同时,从单点值和线下面积出发,定量对比分析了低频部分实验结果与理论结果的差异.得出在低频部分,所提方法的误差可以接受,证明了其实用性较好.考虑到本文方法有较好的低通适用性,接下来的工作将拓宽其应用并进一步验证该方法,例如风洞实验中复杂流场的光学效应测量与分析等.

参考文献

- [1] WANG Cai-ping. Research on the on-line optical transfer function detection and the accurate positioning control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 5.
王彩平. 在线光学传递函数检测及其精密定位控制的研究[D]. 杭州:浙江大学,2016:5.
- [2] YU Qian. Study on MTF test method of optical inspection lens[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010: 23-26.
于谦. 光学检查镜头的 MTF 测试方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2010:23-26.
- [3] CARDEI V, FOWLER B, KAVUSI S, et al. MTF measurements of wide field of view cameras[J]. *Electronic Image*, 2016, **5**(5): 1-5.
- [4] LI Hang, YAN Chang-xiang, SHAO Jian-bing, et al. High accuracy measurement of the MTF of electro-optical imaging system based on modified slanted-edge method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(12): 1211009.
李航,颜昌翔,邵建兵,等. 基于改进倾斜刃边法的光电成像系统 MTF 高准确度测试[J]. 光子学报,2016, **45**(12): 1211009.
- [5] HARGATHER M J. Background-oriented schlieren diagnostics for large-scale explosive testing[J]. *Shock Waves*, 2013, **23**(5): 529- 536.
- [6] TAN D J, EDINGTON-MITCHELL D, HONNERY D. Measurement of density in axisymmetric jets using a novel background-oriented schlieren (BOS) technique[J]. *Experiments in Fluids*, 2015, **56**(11): 204.
- [7] BLANCO A, BARRIENTOS B, MARES C. Performance comparison of background oriented schlieren and fringe deflection in temperature measurement: part I. Numerical evaluation[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(5): 054102.
- [8] WETZSTEIN G, HEIDRICH W., RASKAR R. Computational schlieren photography with light field probes[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2014, **110**(2): 113-127.
- [9] DING Hao-lin, YI Shi-he, FU Jia, et al. Experimental investigation of aero-optical effect due to supersonic turbulent boundary layer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(10): 184-190.
丁浩林,易仕和,付佳,等. 超声速湍流边界层气动光学效应的实验研究[J]. 红外与激光工程,2016, **45**(10):184-190.
- [10] TIAN L F, YI S H, ZHAO Y X, et al. Aero-optical wavefront measurement technique based on BOS and its applications[J]. *Science Bulletin*, 2011, **56**(22): 2320-2326.
- [11] ZHAO Y X, YI S H, TIAN L F, et al. An experimental study of aero-optical aberration and dithering of supersonic

- mixing layer via BOS[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2010, **53**(1): 81-94.
- [12] SETTLES G S, HARGATHER M J. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, **28**(4): 042001
- [13] ZHANG Yi-mo. Applied optics[M]. *Publishing House of Electronics Industry*, 2015: 578-584.
张以谟. 应用光学[M]. 北京:电子工业出版社,2015:578-584.
- [14] HE Jun-jun, SU Qi-fang. Iterative method of numerical integration and its application[J]. *Journal of Taizhou University*, 2014, **36**(3): 1-7.
何俊俊,苏岐芳. 数值积分的迭代方法及应用[J]. 台州学院学报,2014,**36**(3):1-7.
- [15] SHI B, WEI J, PANG M. A modified cross-correlation algorithm for PIV image processing of particle-fluid two-phase flow[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2015, **45**: 105-117.
- [16] COZZI F, GÖTTLICH E, ANGELUCCI L, *et al.* Development of a background-oriented schlieren technique with telecentric lenses for supersonic flow[C]. *Journal of Physics Conference Series*, 2016, **778**(1): 012006.