

光学相干层析技术微流场三维可视化测速方法

刘国忠¹, 李 萍²

- (1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;
2. 北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192)

摘 要: 为实现微流场 3D 可视化速度测量, 建立了基于光学相干层析技术的微粒子跟踪速度测量系统。对系统组成原理、微粒子图像提取、匹配和速度计算方法等进行研究。介绍了频域光学相干层析技术、微流场速度测量系统组成及对渗入微粒子的微流场扫描及三维成像方法。利用中值滤波、最大类间方差二值化和体积滤波等方法搜索流场中各个微粒子, 实现全流场流动特性 3D 可视化; 利用微粒子之间距离、灰度二阶矩建立代价函数, 对不同时刻扫描得到的微粒子进行匹配, 根据微粒子三维坐标求其运动速度。对对流流场进行了测量, 实现了微米级空间分辨的微粒子图像与速度矢量显示。适合于复杂微流场的三维速度检测, 对微流动器件流动特性研究具有重要意义。

关键词: 微粒子图像测速技术; 光学相干层析; 微流体; 匹配

中图分类号: TH815; TH744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0273-06

3D visualization velocimetry technique for microfluidic based on optics coherence tomography

Liu Guozhong¹, Li Ping²

- (1. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;
2. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to realize 3D visualization velocimetry of microfluidic, an micro-particle tracking velocity measurement system based on optics coherence tomography was established and the principles of the system, algorithms such as image extraction of micro-particles, matching, and velocity computation were investigated. First, velocity measurement system based on optics coherence tomography and scanning and imaging method were presented. Then, micro-particles in fluid were detected using median filtering, OTSU binarization method and volume filtering to realize 3D visualization of flow characteristics. Finally, to find an optimal matching of micro-particles, the cost function was defined using the quadratic distance between particles, as well as the quadratic differences in the intensity moment of order 2, and velocity was computed using 3D coordinates of particles. Experimental results such as 3D particle images, and velocity vector with micrometer spatial resolution in convective flow were given. It is important for the velocity measurement of the complex microfluidic and study of microfluidic devices.

Key words: micro-scale particle image velocimetry; optics coherence tomography; microfluid; matching

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61240057)

作者简介: 刘国忠(1966-), 男, 教授, 博士, 主要从事精密测量、OCT 等方面的研究。Email: liuguozhong@bistu.edu.cn

0 引言

流体流速是流场最基本的物理量,人们对流体流动特性的认识较大程度上取决于速度场的获取。到目前为止,还无法从理论上彻底解决湍流等问题,只能借助科学实验手段建立或改进流体力学模型,并对实际问题进行更深入的研究。微流动器件在生命科学、化学、微机械加工等领域应用也更加广泛,成为国内外研究热点^[1],微流动的特性更加复杂^[2],科学实验的作用越来越突出。测量流体中流速的方法有机械方法、散热率法、动力测压法、激光多普勒测速^[3-4]和粒子成像测速等。其中机械方法测量流速的原理是根据流体中叶轮的旋转角速度与流体流速成正比;散热率法测量流速是基于发热的测速传感器的散热率与流体流速成比例的原理;毕托管(Pitot Tube)为典型的动力测压法,基于流体力学 Bernoulli 能量方程进行平均速度测量和流量测量;以上流速测量为单点、接触式测量方法,对流场的影响也较大。激光多普勒测速原理是利用流体中运动微粒散射光的多普勒频移获得流体的速度信息,采用多光束测量系统可获得三维流速。激光多普勒测速方法有较高的空间分辨率,但为单点测速技术,无法测量湍流等复杂流场。

粒子成像测速(PIV)原理是在流体中散布跟随性好的固体粒子(或流体中已经存在)作为示踪粒子,通过观察流场中微粒子图像,对连续多个瞬时速度场的相关性分析,直观反映全场瞬时流动信息,可以深入研究复杂流场瞬时过程,具有单点测速技术无可比拟的优点。粒子图像处理算法主要有相关算法、最小二次差分算法和粒子跟踪算法等。Brody 等^[5]使用超荧光显微镜对直径 900 nm 的荧光示踪粒子进行长时间照明和观察,获得粒子运动轨迹图像,这种方法获得的速度场分辨率、精度都很低。SANTIAGO 等^[6]使用汞弧灯照明对直径 300 nm 的荧光示踪粒子进行照明,用 CCD 采集示踪粒子图像,利用相关算法得到流场速度,这种方法获得的空间分辨率可以得到 10 μm 。二维测速的空间分辨率已经达到 100 nm^[7],二维平面流场测速技术已经相对成熟。全流场测量可以通过多二维平面扫描、数字全息技术、立体粒子图像测速、散焦数字图像测速和共焦荧光显微技术等。但一般结构复杂,而且全流场

信息需要通过物镜焦平面的移动获得,一般只适合于定常流动和周期性流动。

论文将基于光学低相干原理,建立频域光学相干层析全流场可视化测速系统;利用激光束对渗入微粒子或本身存在微粒子的流体进行二维扫描,获取流体的三维结构图像,搜索流场中各个微粒子三维图像,实现全流场微粒子流动特性的可视化;求取各个微粒子的中心,建立代价函数对连续扫描得到的两个流体体积中的微粒子进行匹配,并根据已匹配的微粒子三维坐标值求微粒子的运动方向和位移;对多个连续采样的三维流体图像中的微粒子进行匹配,跟踪流场中微粒子的运动轨迹,检测全流场中速度的变化。

1 基于光学相干层析技术的微粒子跟踪速度场测量系统

1.1 速度场测量系统构成

图 1 为微粒子跟踪速度场测量系统原理图。其主要基于频域光学相干层析技术,由宽带光源、光纤耦合器、参考臂、测量臂、光谱仪、计算机和被测流体等组成。

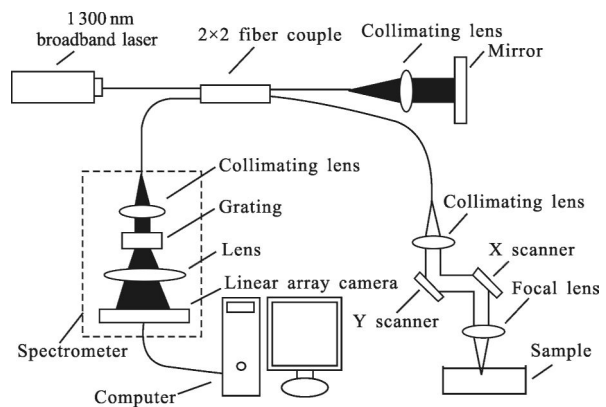


图 1 速度场测量系统原理图

Fig.1 Block diagram of velocity measuring system

中心波长为 1300 nm、带宽为 80 nm 的超辐射发光二极管(SLD)宽带光源发出的弱相干光在 2x2 光纤耦合器中分为两束光,一束进入参考臂,通过准直透镜后经平面镜返回,另外一束光进入样品臂,经由准直透镜、二维振镜系统(X 扫描仪和 Y 扫描仪)、物镜后入射到被测流体上。两束光经原路返回后在光纤耦合器内发生干涉,其干涉谱由准直透镜、衍射光栅(1200 线/mm)、消色差透镜(焦距为 100 mm)和线阵 CMOS (1024 pixel) 组成的光谱仪接收,并通过

CameraLink 接口板将干涉光谱数据读入计算机。

1.2 速度场测量系统的工作原理

采集到计算机内的干涉谱和被探测点不同探测深度散射场之间关系为:

$$F(z) \propto FT\{A(K)\} \quad (1)$$

式中: $F(z)$ 为沿探测深度方向的散射场分布; $A(K)$ 为被探测对象的背向散射光和参考臂反射光发生低相干的干涉谱强度, K 为波数。通过傅立叶变换(FT)可以将干涉谱转换为探测点沿深度方向的散射场分布,而散射特性与被探测对象的结构有关。因此,将光束射入被测流体内即可获得此探测位置沿深度方向的结构信息。通过二维振镜系统将聚焦光束在被测流体某个范围内进行横向扫描,即可获得流体的三维结构信息,得到其三维图像。其中 X 扫描仪在锯齿波的驱动下进行 X 方向的扫描,一个锯齿波周期完成一个快速扫描,在 X 方向一个快速扫描周期内包含 M 个探测点,Y 扫描仪在台阶斜波信号的驱动下使聚焦光束在 Y 方向扫描(慢速扫描),在 Y 方向扫描范围内设置 N 个慢速扫描位置,因此,完成一次扫描可以得到 $M \times N$ 个扫描位置的干涉谱数据,通过对每个扫描位置干涉谱进行傅里叶变换即可得到被测流体在探测范围内的结构信息,形成三维结构图像。通过对被测流体进行连续多次扫描即可获得流体三维流场随时间的变化情况。探测系统的纵向空间分辨率由光源的带宽决定,系统的横向分辨率由物镜的数值孔径决定^[8],此系统的纵向分辨率和横向分辨率分别为 $12 \mu\text{m}$ 和 $16 \mu\text{m}$,焦深为 $400 \mu\text{m}$ 。

在被测流体中加入直径为 300nm 的微粒子(或者利用流体中自身已经存在的微小粒子),利用微粒子具有较强的散射性能和灰度值较大的特点从流体三维结构图像中搜索流场中各个微粒子,求取各个微粒子的中心,并通过跟踪微粒子的运动轨迹实现全流场的可视化。通过建立代价函数对连续扫描得到的两个流体体积中的微粒子进行匹配,并根据已匹配的每一对微粒子三维坐标值求流体在此处的运动方向和位移。对多个连续采样的三维流体图像中的微粒子进行匹配,跟踪流场中微粒子的运动轨迹,实现全流场三维速度的可视化测量。

2 速度场测量系统软件算法

2.1 微粒子图像提取

微粒子图像提取过程如图 2 所示,主要包括以

下步骤:

(1) 中值滤波

图 2(a)为获取的流体原始三维图像,图 2(e)为图 2(a)的一个二维纵向切面图像。为减小各种随机噪声对可靠提取微粒子图像的影响,采用中值滤波方法对原始三维图像进行处理,图 2(b)和图 2(f)分别为中值滤波后的三维图像和二维图像。

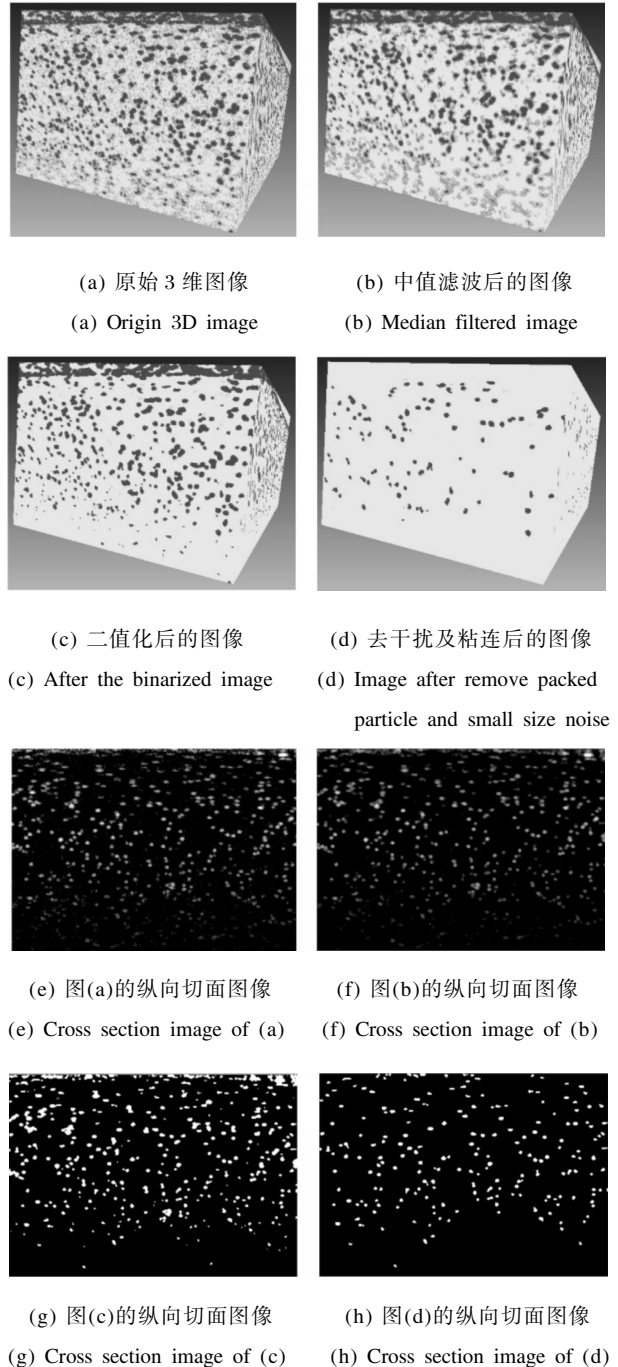


图 2 微粒子图像提取过程

Fig.2 Extraction of micro-scale particle image

(2) 灰度图像二值化

利用最大类间方差原理设定灰度阈值,若灰度值大于阈值,认为是微粒子图像部分,对流体三维图像进行初步分割,搜索各个微粒子图像块。图 2(c)和图 2(g)分别为二值化后的三维图像和二维图像。

(3) 流体中超微小杂质图像及粘连微粒子图像去除

从图 2 可知,流体三维图像中除了大小比较均匀的微粒子图像外,还有更小的杂质形成的图像,以及微粒子粘连图像,为去除它们的影响设置体积最大阈值 V_{\max} 和最小阈值 V_{\min} ,若分割后小块体积大于 V_{\max} ,则认为出现了微粒子粘连情况,若分割后小块体积小于 V_{\min} ,则认为更微小粒子形成的图像,予以去除。微粒子形成的图像大小 V_{particle} 由光学系统的点扩展函数决定,一般可以选择 $V_{\max}=1.5V_{\text{particle}}$, $V_{\min}=0.5V_{\text{particle}}$ 。图 2(d)和图 2(h)分别为二值化后的微粒子三维图像和二维图像。

2.2 微粒子图像中心三维坐标计算

利用上面的图像二值化过程可以初步搜索出各个微粒子图像所在位置。为求取微粒子运动速度,需要从二值化前的三维灰度图像 2(b)中精确计算各个微粒子图像中心的三维坐标,因此,采用以下的平方加权质心法求取微粒子中心三维坐标。

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^p F^2(x, y, z)x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^p F^2(x, y, z)} \\ y_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^p F^2(x, y, z)y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^p F^2(x, y, z)} \\ z_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^p F^2(x, y, z)z}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^p F^2(x, y, z)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F(x, y, z)$ 为灰度值; m, n, p 为考虑的微粒子图像窗口范围。

2.3 微粒子匹配及三维速度场计算

2.3.1 微粒子匹配算法

微粒子匹配就是从连续扫描得到的两个体积图像中搜寻来自同一个微粒子的图像。图 3 所示为从某一时刻扫描得到的流体三维图像中提取的微粒子

中心三维坐标。假定第一个三维图像中搜寻到 K_1 个

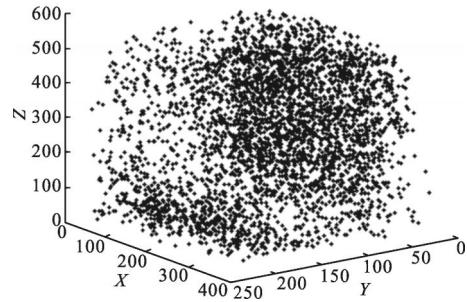


图 3 微粒子图像中心三维坐标

Fig.3 3D coordinates of micro-scale particle image center

$p_i, i=1, 2, \dots, K_1$, 第二个三维图像中搜寻到 K_2 个微粒子 $q_j, j=1, 2, \dots, K_2$, p_i 和 q_j 的关系用矩阵 r_{ij} 表示, 如果 p_i 和 q_j 为同一个微粒子, 则 $r_{ij}=1$, 否则 $r_{ij}=0$ 。为了得到最优关系 r_{ij} , 定义了代价函数并使其最小化。定义的代价函数为:

$$\psi = \sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} \phi_{ij} r_{ij} \quad (3)$$

式中: ϕ_{ij} 表示将 p_i 和 q_j 关联的代价, 定义为 p_i 和 q_j 之间距离的平方与二阶矩之差的平方之和, 即

$$\phi_{ij} = (x_{p_i} - x_{q_j})^2 + (y_{p_i} - y_{q_j})^2 + (z_{p_i} - z_{q_j})^2 + (\text{moment}_{p_i} - \text{moment}_{q_j})^2 \quad (4)$$

其中, moment 为二阶矩, 表示为:

$$\text{moment} = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^p [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2] F(x, y, z)}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^p F(x, y, z)} \quad (5)$$

式中: $F(x, y, z)$ 为灰度值; m, n, p 为考虑的微粒子图像窗口范围, x_0, y_0, z_0 为公式(2)中微粒子中心三维坐标。

2.3.2 三维速度场计算

当求取微粒子中心三维坐标 $(x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i})$ 和 $(x_{q_j}, y_{q_j}, z_{q_j})$ 并对微粒子进行匹配后, 用以下公式计算微粒子三维运动速度矢量。

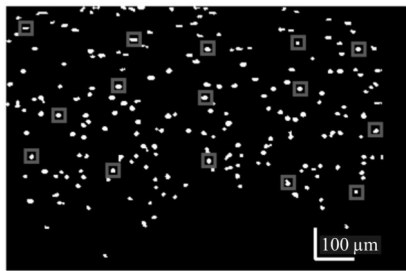
$$v_x = \frac{x_{q_j} - x_{p_i}}{T}, v_y = \frac{y_{q_j} - y_{p_i}}{T}, v_z = \frac{z_{q_j} - z_{p_i}}{T} \quad (6)$$

式中: T 为采样时间间隔。

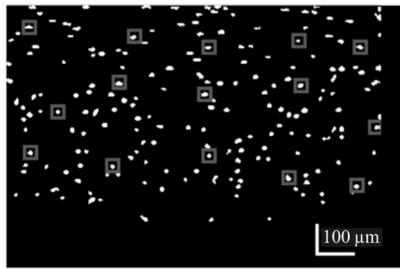
3 对流流场测量实验与结果

在盛水的玻璃容器中加入直径为 300 nm 的微

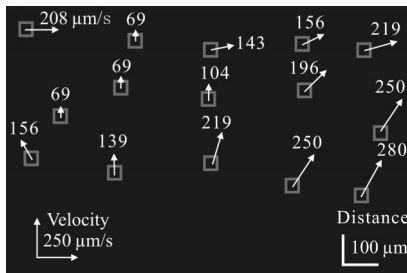
粒子,当激光束射入水中时,产生了对流现象,利用速度测量系统对对流流场的区域以 140 k/s 的单个采集速度进行扫描测量。利用以上算法对实验数据处理可得到全流场的三维速度分布。图 4(a)和图 4(b)所示为同一个纵向切面不同扫描时刻得到的图像,部分已经匹配好的微粒子用红色矩形框标注。图 4(c)所示为(a)和(b)红色矩形框标注的微粒子的运动速度矢量,其中箭头方向表示在此二维平面上流速方向,长度表示流速大小,空间尺寸比例和速度比例如图 4 中所示。



(a) 第 1 次采样图像
(a) First image



(b) 第 2 次采样图像
(b) Second image



(c) 速度场分布
(c) Velocity field vector

图 4 对流场二维纵向切面速度场分布

Fig.4 Velocity field vector in 2D longitudinal section of convective flow

4 结论

为检测微流动器件复杂的流场特性,提出了基

于频域光学相干层析技术的微粒子跟踪速度场方法,并介绍了微粒子跟踪速度场测量系统的结构和工作原理。然后研究了流场中微粒子图像提取方法、微粒子中心坐标计算、微粒子匹配以及三维速度场求取等算法。给出了对流流场的速度场测量结果。

光学相干层析微流场测速技术通过对微粒子三维成像并跟踪微粒子运动轨迹,实现流体速度的可视化测量;光学相干层析系统微米级的空间位置高分辨特性和图像中心坐标亚像素提取为实现高精度速度测量提供了保证,可实现复杂微流场的全场三维流速测量。

该方法通过一次二维扫描过程获取被测流体的瞬时三维图像,当扫描速度远远大于流体流动速度且扫描点数较少时,可认为在一次二维扫描过程中微粒子处于静止状态,利用连续两次二维扫描得到的微粒子三维坐标的变化可以求取微粒子的瞬时运动速度分布。当扫描速度较低或扫描点数较多时,在扫描过程中微粒子处于运动状态,影响微粒子三维坐标和速度求取的准确性。一次二维扫描过程扫描一个微粒子所需时间为 $T_s = T_1 \times M \times N$, 其中 T_1 为测量系统扫描速度(采集一个点数据所需时间), M 为 X 方向探测点数目, N 为 Y 方向扫描行数。可以检测的流体最快速度近似表示为 $V_{max} = 1/2 V_{error} \times T/T_s$, 其中 T_s 为完成 $M \times N$ 点扫描需要的时间, T 为两次二维扫描时间间隔, V_{error} 为允许的速度测量误差大小。当扫描点数 ($M \times N$) 较大时,要求测量系统有非常快的扫描速度(较小的 T_1) 和较大的两次扫描时间间隔 T , 否则会引起速度测量精度的下降。

由公式(6)可知,纵向速度测量精度受纵向标定误差和采样时间间隔的影响,横向速度测量精度受横向扫描精度和采样时间间隔的影响。纵向标定误差越大,纵向速度误差就越大;横向扫描误差越大,横向速度误差就越大。虽然采样时间间隔的测量比较精确,但纵向和横向速度误差都与两次采样时间间隔大小成反比,采样时间间隔越小,三个方向的速度误差就越大。因此,在测量层流等简单流场时,通过增大采样间隔可以提高速度测量精度;但在测量湍流等复杂流场时,较大的采样间隔不能准确反应流场的速度实时变化情况,需要根据流体流速和流场实际情况恰当选择采样间隔。

此外,往流体里渗入微粒子会对流体的流动特

性造成影响,而且当微粒子体积较大时,微粒子运动速度与流体实际流速存在差异。未来工作将着重于通过其他流体速度精密测量方法研究分析和补偿扫描速度、扫描时间间隔、微粒子直径大小等参数对速度测量的影响,提高测量精度,并将此测量方法应用于实际的复杂微流场的三维速度矢量检测和微流动器件的特性测量。

参考文献:

- [1] Robert C R W, Andrew J D. Microfluidics: Exploiting elephants in the room[J]. *Nature*, 2010, 464(7290): 839-840.
- [2] Colin S. Microfluidics[M]. London: John Wiley & Sons, 2010.
- [3] Wu Limin, Ye Lihua, He Anzhi, et al. Turbulent flow velocity field measurement of recoil mechanism by LDV [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1998, 27(6): 29-30. (in Chinese)
吴利民, 叶莉华, 贺安之, 等. 激光多普勒对于火炮驻退机湍流速度场的测量 [J]. 红外与激光工程, 1998, 27(6): 29-30.
- [4] Wu Limin, You Haihang. Blood flow measurement by self-mixing semiconductor laser Doppler velocimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1997, 26(5): 59-61. (in Chinese)
吴利民, 尤海航. 自混合型半导体激光多普勒测速仪对血流量的测量[J]. 红外与激光工程, 1997, 26(5): 59-61.
- [5] Brody J P, Yager P, Goldstein R E, et al. Biotechnology at low Reynolds numbers[J]. *Biophys J*, 1996, 71(6): 3430-41.
- [6] Santiago J G, Wereley S T, Meinhart C D, et al. A particle image velocimetry system for microfluidics [J]. *Experiments in Fluids*, 1998, 25(4): 316-319.
- [7] Ralph Lindken, Massimiliano Rossi, Sebastian Große, et al. Micro-Particle Image Velocimetry (μ PIV): Recent developments, applications, and guidelines [J]. *Lab on a Chip*, 2009, 17: 2551-2567.
- [8] Fercher A F, Drexler W, Hitzenberger C K, et al. Optical coherence tomography-principles and applications [J]. *Rep Prog Phys*, 2003, 66: 239-303.