

数字显微全息中记录参数对颗粒测量影响的数值模拟*

周斌武¹⁾ 吴学成^{1)†} 吴迎春¹⁾ 阳静¹⁾ Gérard Gréhan²⁾ 岑可法¹⁾

1) (浙江大学热能工程研究所, 能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

2) (鲁昂大学 CORIA 研究所, 法国, 鲁昂 76801)

(2013年6月12日收到; 2013年7月6日收到修改稿)

数字显微全息技术由于具有三维、非接触和实时测量微小空间内流场的能力, 已引起了国内外学者的广泛关注. 利用数字显微全息方法测量微通道流场时, 记录距离、颗粒尺寸、颗粒浓度、入射光波长、CCD 分辨率等参数会对颗粒重建结果产生重要影响. 为了评估颗粒浓度和样本空间深度对重建结果的影响, 本文开展了数值模拟研究. 采用基于洛伦兹-米散射理论的程序产生不同浓度的颗粒全息图, 用小波变换重建算法对其进行重建. 结果表明: 在样本空间深度为 $24\text{ }\mu\text{m}$ 时, 颗粒浓度 n_s 在 $3.44 \times 10^5\text{ mm}^{-3}$ — $13.77 \times 10^5\text{ mm}^{-3}$ 范围内时, 颗粒重建率 E_p 随着颗粒浓度 n_s 的增大而迅速减小, 在 $13.77 \times 10^5\text{ mm}^{-3}$ — $55.08 \times 10^5\text{ mm}^{-3}$ 范围内时, 颗粒重建率 E_p 随颗粒浓度 n_s 增大而缓慢减少. 在颗粒浓度 n_s ($13.77 \times 10^5\text{ mm}^{-3}$) 保持不变时, 颗粒重建率 E_p 与样本空间深度满足单调递减的线性关系. 当阴影密度不变时, 重建率的变化呈现一定的规律性: 当深度 L 较小时, 样本空间深度对颗粒重建的影响要比颗粒浓度的影响大; 当深度 L 较大时, 颗粒浓度对颗粒重建的影响较大.

关键词: 数字显微全息, 颗粒浓度, 粒径误差, 位置误差

PACS: 42.40.Jv, 42.30.Wb, 42.40.Ht, 47.61.Fg

DOI: 10.7498/aps.62.204203

1 引言

近年来, 随着大规模和超大规模集成电路的迅猛发展, 微机电系统 (micro electro-mechanical systems, MEMS)^[1,2] 在化学^[3]、医学^[4] 和生命科学^[5,6] 等领域应用广泛, 已经成为这些领域的研究热点. 在能源领域, 微型发动机^[7]、微型热管^[8] 和微型反应器^[9] 等也引起了广泛关注. 微管道是微机电系统中最简单、应用最广泛的微尺度元件. 研究微管道内微流体的流动特性, 对复杂微尺度流动现象和流动机理的研究具有重要的推动作用. 目前国际公认的微流场有效检测手段为颗粒显微图像测速技术 (micro particle image velocimetry, PIV)^[10], 由于无接触和精度高等特点使其具有独特的优越性, 但是该技术仅仅限于二维颗粒场中单一速度参

数的测量. 近年来采用多相机多角度拍摄和重建的层析成像三维 PIV 技术^[11] 得到了较快的发展, 并成功应用于颗粒场的三维瞬态测量, 但是其系统复杂, 标定程序烦琐, 限制了它在微流场的应用推广. 结合传统显微拍照技术和数字全息技术 (digital holography, DH)^[12]、数字显微全息技术 (digital holographic microscope, DHM)^[13–18] 具有多维、瞬态以及多参数测量的特点, 在微通道流场^[19–21]、生物细胞核^[5,6] 和电子元器件的三维可视化等领域具有巨大的应用潜力. 其中数字同轴全息因其装置布局简便得到了广泛应用: 经准直扩束的激光照射被测颗粒场, 用 CCD 相机记录颗粒的全息干涉图, 然后通过数学重建方法再现被测颗粒场, 获得颗粒形状与位置.

从目前的研究报道来看, 有限的 CCD 分辨率限制了测量截面的尺度 ($1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$), 是制约数字

* 国家自然科学基金 (批准号: 51176162) 和高等学校学科创新引智计划 (批准号: B08026) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wuxch@zju.edu.cn

显微全息技术^[22-26]发展的重要因素之一. 有限的 CCD 分辨率会造成孔径角偏小, 使重建后的图像产生严重的斑点噪声^[27,28], 并使景深扩大. 全息图上的斑点噪声是由离焦颗粒的虚像光波、实像光波和透射光波重叠造成的, 它会严重阻碍颗粒场的三维重建. 扩大的景深会抑制重建颗粒精确定位的能力. 与斑点噪声和景深息息相关的颗粒浓度、样本空间深度和阴影密度等参数也会对重建图像的信噪比 (SNR)^[29] 及颗粒场的重建产生影响. 因此, 数字显微全息只能应用于小样本体积和低颗粒浓度的颗粒场测量. 考虑到这些问题, Malek 等^[29] 验证了数字同轴全息技术应用于三维颗粒场颗粒的提取能力, 揭示了重建图像的 SNR 只与阴影密度有关. 同时, 考察了颗粒重建效率随阴影密度的变化情况, 指出当阴影密度接近 10%, 颗粒重建率减少到约 20%. Zhang 等^[30] 分析了记录距离、颗粒浓度、颗粒尺寸、入射波长等参数对重建结果的影响, 观察到焦平面上的颗粒重建率随颗粒数的升高而降低, 最小达到约 25%. 之后, Singh 和 Panigrahi^[31] 检验了数字全息技术应用于颗粒场测量的潜力, 研究了不同条件下颗粒重建率随颗粒数密度和阴影密度增加的变化情况, 并与 Malek 等^[29] 的研究做了比较. 最近, Restrepo 和 Garcia-Sucerquia^[32] 数值模拟并重建了数字无透镜显微全息图, 通过量化颗粒的重建率, 他们检验了阴影密度对颗粒重建率的影响, 并指出当阴影密度接近 20%, 数字无透镜显微全息系统的重建率就会下降到低于 20%.

为了评估颗粒浓度和样本空间深度对重建结果的影响, 探讨颗粒重建率、粒径和位置随各参数的变化情况, 本文开展了数值模拟研究. 采用基于洛伦兹 - 米散射理论的程序产生不同浓度的颗粒全息图, 用小波变换重建算法对其进行重建. 利用最邻近匹配原则对颗粒进行匹配, 并对结果进行了分析.

2 方法

2.1 颗粒全息与重建

图 1 表示同轴数字显微全息的记录及其三维图像重建的物理过程. 平面波照射到颗粒上发生散射; 物光波 (颗粒散射光) 由于和参考光 (平面波) 光程不同而存在相位差, 从而产生干涉; 干涉条纹图

被 CCD 平面记录, 形成全息图; 用相同参考光照射全息图并发生衍射, 从而重现物体图像. 本文采用数值模拟的方法重建颗粒场图像.

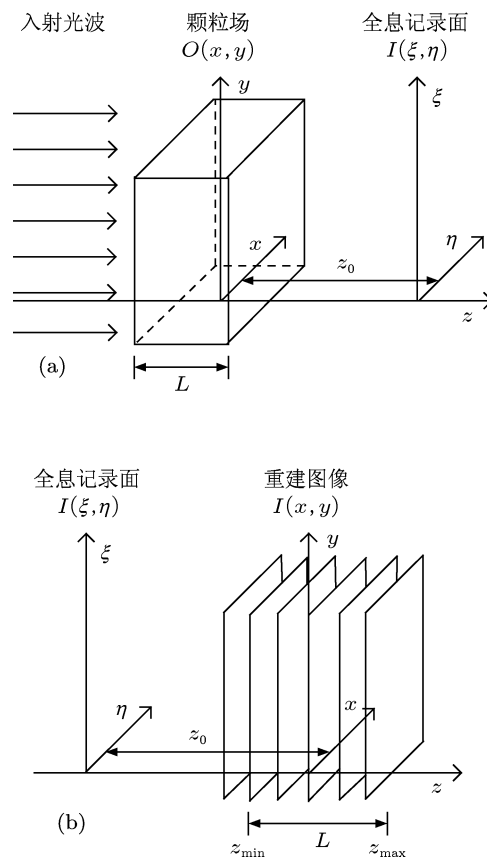


图 1 平面光照射下颗粒场记录与重建示意图 (a) 颗粒场记录示意图; (b) 全息图数值重建示意图

2.1.1 全息记录

图 1(a) 表示平面光照射下颗粒场全息记录. 假设颗粒场中只存在惟一的透明球形颗粒, 光强可用 $O(x, y)$ 表示, 颗粒粒径为 d ; 全息记录平面 (ξ, η) 与颗粒之间的距离为 z_0 .

假设 CCD 阵列面上记录的干涉条纹光强为 $I(\xi, \eta, z)$ ^[26], 基于标量衍射理论, 它可表示为

$$I(\xi, \eta, z) = 1 - \frac{2}{\lambda z_0} O(x, y) \otimes \sin \left(\frac{\pi}{\lambda z_0} (x^2 + y^2) \right), \quad (1)$$

其中 λ 表示入射光波长, $\otimes$ 表示二维卷积算.

2.1.2 全息重建

目前, 三维颗粒场全息图数字重建算法有菲涅耳衍射积分^[33]、分数傅里叶变换^[34]和小波变换^[35-37]等. 本文采用小波变换方法来重建颗粒全息图, 它具有重建图像的高信噪比^[29]和图像背景光强均匀等特点.

首先, 基于小波母函数, 构造一个小波子函数和尺度参数 $\alpha = \sqrt{\lambda z_0/\pi}$, 构造的小波子函数可表示为

$$\psi_\alpha(x, y) = \frac{1}{\alpha^2} \sin\left(\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2}\right), \quad (2)$$

则 (1) 式可表示为

$$I(\xi, \eta, z) = 1 - \frac{2}{\pi} O(x, y) \otimes \psi_\alpha(x, y), \quad (3)$$

它表明全息记录图像的光强分布函数可以描述为物函数的小波变换.

激光数字全息图可以用小波变换法进行重建. 假设重建图像的光强为 $I(x, y, z)$, 可以表示为

$$\begin{aligned} I(x, y, z) &= 1 - I(\xi, \eta, z) \otimes \psi_\alpha(x, y) \\ &= 1 - I(\xi, \eta, z) \\ &\quad \otimes \left\{ \frac{1}{\alpha^2} \left[\sin\left(\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2}\right) - M_\psi \right] \right. \\ &\quad \left. \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2 \sigma^2}\right) \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\psi_\alpha(x, y)$ 为校正的小波函数, σ 是带宽因子, 它依赖于全息图的采样特性. 调零参数 M_ψ 使 $\psi_\alpha(x, y)$ 平均值为零. 它可以表示为

$$M_\psi = \frac{\sigma^2}{1 + \sigma^4}.$$

2.2 数据处理算法

本文采用小波变换方法重建颗粒场图像, 研究颗粒浓度、样本空间深度对重建图像中颗粒的识别、形状测量及定位的影响. 对全息图的处理过程主要由以下几个步骤组成.

1) 采用基于洛伦兹 - 米散射理论的程序产生不同浓度的颗粒全息图, 该程序可通过设置参数来计算任意球形颗粒场全息图像^[38].

2) 采用小波变换法对颗粒全息图进行重建, 获得重建区域内一定间距的重建平面光强图. 设定合适的灰度阈值, 并对重建图像进行二值化处理, 将颗粒从背景中识别出来. 基于颗粒面积和重建图像的灰度空间分布特性获得颗粒的中心位置, 颗粒的粒径 d 可通过以下方式获得:

$$\begin{aligned} d_x &= (x_{\max} - x_{\min} + 1) \times \Delta x, \\ d_y &= (y_{\max} - y_{\min} + 1) \times \Delta y, \\ d &= (d_x + d_y) / 2, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $x_{\max}, x_{\min}, y_{\max}, y_{\min}$ 分别表示 x, y 轴上颗粒的最大和最小像素个数; $\Delta x, \Delta y$ 分别表示 x, y 轴上像素长度; d_x, d_y 分别表示 x, y 轴上颗粒的尺寸大小.

3) 采用最邻近匹配原则来匹配模拟颗粒和重建颗粒.

假设 H, R 分别表示全息记录图和全息重建图, $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 表示记录的全息图上各个颗粒的 x, y 轴坐标, $P'_1, P'_2, \dots, P'_n$ 表示全息重建图上各个颗粒的 x, y 轴坐标, 可表示为

$$\begin{aligned} &\{P_1, P_2, \dots, P_m\} \\ &= \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}, \\ &\{P'_1, P'_2, \dots, P'_n\} \\ &= \{(x'_1, y'_1), (x'_2, y'_2), \dots, (x'_n, y'_n)\}. \end{aligned} \quad (6)$$

模拟颗粒 P_i 通过查找其重建全息图上最近距离的颗粒 P'_j 来进行匹配, 它们之间的距离要小于该模拟颗粒粒径的三分之一, 可表示为

$$\begin{aligned} D_{ij} &= D(P_i, P'_j) \\ &= \sqrt{(x_i - x'_j)^2 + (y_i - y'_j)^2} \leq \frac{1}{3} d_i \end{aligned} \quad (7)$$

其中 d_i 是第 i 颗模拟颗粒的粒径.

4) 计算颗粒重建效率 (E_p)、颗粒粒径误差 (Er_d)、 z 轴定位误差 (Er_z) 及其平均值, 可表示为

$$\begin{aligned} E_p &= N_e / N_h, \\ Er_d &= \left| \frac{d_h - d_e}{d_h} \right|, \\ Er_z &= \left| \frac{z_h - z_e}{z_0} \right|, \\ \overline{Er_d} &= \sum Er_d / N, \\ \overline{Er_z} &= \sum Er_z / N, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 N_h, N_e, d_h, d_e, z_h 和 z_e 分别表示全息记录图和全息重建图上颗粒个数、粒径和 z 轴位置, $\overline{Er_d}, \overline{Er_z}$ 表示颗粒的平均粒径误差和平均 z 轴位置误差, N 是成功匹配的颗粒数.

该模拟及重建程序的可靠性和准确性已得到验证^[39], 作者独立编译的颗粒匹配和数据处理程序也具有一定的适用性. 图 2 所示为了颗粒的模拟全息图和全息重建图. 图 2(a) 表示颗粒模拟全息图, 颗粒粒径为 $5 \mu\text{m}$. 图 2(b) 表示图 2(a) 在 $z_0 =$

0.02 cm 的全息重建图.

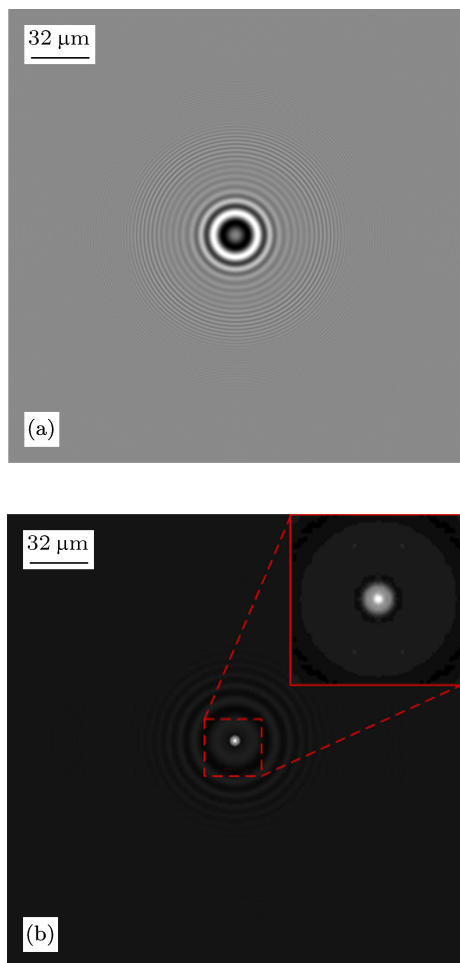


图2 颗粒全息图和全息重建图 (a) 颗粒全息图; (b) 全息重建图

3 结果与讨论

正如 Malek 和 Allano 所研究的, 颗粒浓度与样本空间深度对数字显微全息技术测量颗粒场的影响可以归结为颗粒场阴影密度的影响. 阴影密度 s_d 又被称为光束遮挡率 F , 它可定义为颗粒场内所有颗粒沿光传播方向形成的投影空间在 x - y 平面上的投影面积与颗粒场截面面积的比率, 可表示为

$$s_d = \frac{N_h d_h^2}{ab} = n_s L d_h^2, \quad (9)$$

其中, N_h 表示模拟颗粒个数, d_h 表示模拟颗粒粒径, a, b 分别表示样本空间截面的长与宽, L 是样本空间的深度, n_s 是颗粒浓度.

为了研究不同的颗粒浓度、样本空间深度和阴影密度对颗粒检测成功率及精度的影响, 分析数字显微全息技术测量微流体颗粒场的能力, 本文首先采用单一变量法分别使样本空间深度 L 、颗粒浓度 n_s 变化, 再在阴影密度 s_d 不变的前提下使样本空间深度 L 、颗粒浓度 n_s 均发生变化, 共设计了 3 个模拟工况. 各模拟工况均重复 4 次, 结果取平均值. 照射颗粒场的平行平面波波长为 532 nm. 每张全息图的分辨率为 512×512 , 像素尺寸为 $0.5 \mu\text{m}$ (像平面上的有效像素尺寸). 像平面离样本空间的中心距离用 z_0 表示, 大小为 0.02 cm, 为保证滤除噪声的同时尽可能多地提取出颗粒, 灰度阈值设置为 0.5. 具体模拟工况如表 1 所示.

表1 模拟工况

工况	不变参数	可变参数
1	$X = Y = 22 \mu\text{m}, L = 24 \mu\text{m}, d = 1\text{--}5 \mu\text{m}$	$N_h = 4, 8, 16, 32, 48, 64$ 颗
2	$X = Y = 22 \mu\text{m}, n_s = 13.77 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}, d = 1\text{--}5 \mu\text{m}$	$L = 12, 24, 48, 60, 84, 96 \mu\text{m}$
3	$X = Y = 22 \mu\text{m}, s_d = 10.33\%, N_h = 16, d = 1\text{--}5 \mu\text{m}$	$L = 12, 24, 48, 60, 84, 96 \mu\text{m}$

注: X, Y, L 分别表示样本空间的长、宽、深

3.1 颗粒浓度的影响

首先考察了在样本空间深度一定的情况下, 颗粒重建率、粒径误差和 z 轴定位误差随颗粒浓度的变化情况. 图 3 表示样本空间深度为 $24 \mu\text{m}$ 的情况下, 颗粒重建率、粒径误差和 z 轴定位误差随颗粒浓度 n_s 变化的响应情况. 图中横坐标表示颗粒浓度 n_s , 最大模拟到 $55.08 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ (阴影密度 40%), 纵坐标表示颗粒重建率 E_p . 从图 3(a) 可知, 颗粒浓度 n_s 在 $3.44 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ — $13.77 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ 的

范围内时, 颗粒重建率 E_p 随着颗粒浓度 n_s 的增大而迅速减小, 而颗粒浓度 n_s 在 $13.77 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ — $55.08 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ 的范围内时, 颗粒重建率 E_p 随颗粒浓度 n_s 的增大呈缓慢减少的趋势. 该曲线形状与反比例函数相似, 其位置处于文献 [32] 研究的两种模型结果 (点状模型和衍射模型) 的曲线之间, 该文作者认为实际测量实验中的曲线应该处于这两个极端模型的曲线之间. 从这个角度来看, 该模拟实验的数据具有一定的可信度. 对于实际的有大量颗粒存在的被测流场, 其样本空间规格

相当于 $22\ \mu\text{m} \times 22\ \mu\text{m} \times 24\ \mu\text{m}$, 在保证颗粒重建率 $E_p \geq 40\%$ 的前提下, 应选择的最大颗粒浓度为 $10 \times 10^5\ \text{mm}^{-3}$ (阴影密度 6%).

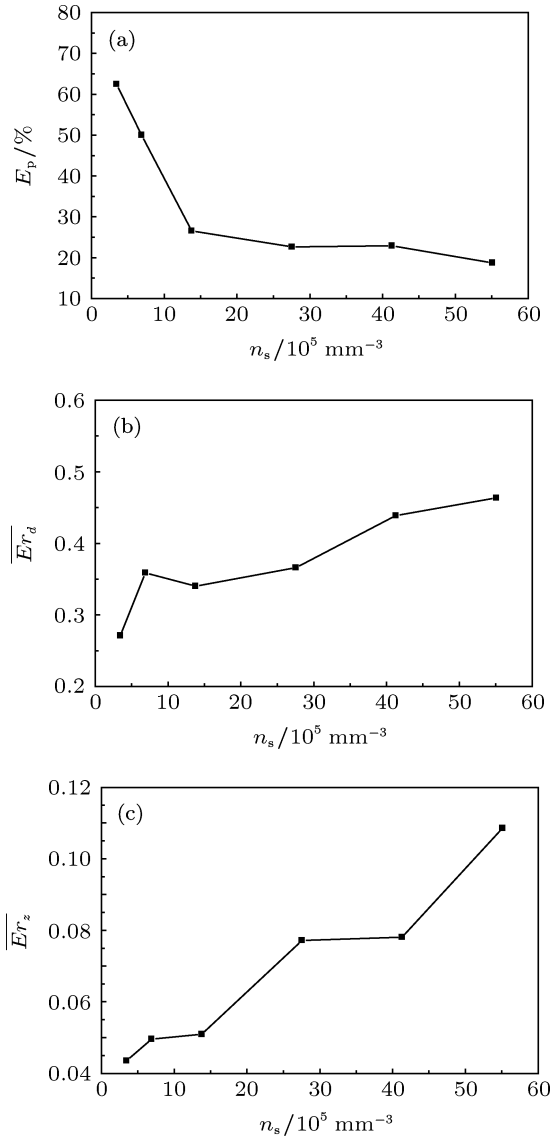


图3 颗粒浓度对各参数的影响 (a) 对颗粒重建率的影响; (b) 对平均粒径测量误差的影响; (c) 对平均 z 轴定位误差的影响

下面将在样本空间深度为 $24\ \mu\text{m}$ 的前提下, 讨论颗粒浓度对颗粒平均粒径误差和平均 z 轴定位误差的影响. 首先分析在颗粒浓度 $n_s \leq 55.08 \times 10^5\ \text{mm}^{-3}$ 的情况下, 颗粒平均粒径误差的变化情况. 图 3(b) 给出了重建颗粒的平均粒径误差 $\overline{Er_d}$ 随颗粒浓度增加的变化情况. 如图 3(b) 所示, 在 $n_s \leq 6.89 \times 10^5\ \text{mm}^{-3}$ 的范围内, 随着颗粒浓度的增大, 重建颗粒的平均粒径误差 $\overline{Er_d}$ 先迅速增大, 等到 $n_s \geq 13.77 \times 10^5\ \text{mm}^{-3}$ 时, 平均粒径误差 $\overline{Er_d}$ 缓慢增大. 图 3(c) 表示颗粒的平均 z 轴定位误差 $\overline{Er_z}$ 随颗粒浓度增加的变化情况. 由图 3(c) 可

知, 重建颗粒的平均 z 轴定位误差 $\overline{Er_z}$ 也是随着颗粒浓度的增加呈阶梯状上升. 比较图 3(b) 和 (c) 可知, 在相同颗粒浓度情况下, 平均粒径误差 $\overline{Er_d}$ 是平均 z 轴定位误差 $\overline{Er_z}$ 的 5—6 倍, 这表明在数字显微全息技术测量颗粒场时, 颗粒浓度变化对颗粒粒径测量的影响要比颗粒 z 轴定位的影响要大.

3.2 样本空间深度的影响

前面讨论了在样本空间深度一定的前提下, 颗粒浓度变化对颗粒重建率、粒径测量和 z 轴定位的影响. 下面探讨在颗粒浓度一定的情况下, 样本空间深度不同时对颗粒识别、粒径测量和定位的影响. 图 4(a) 表示在颗粒浓度 $n_s = 13.77 \times 10^5\ \text{mm}^{-3}$

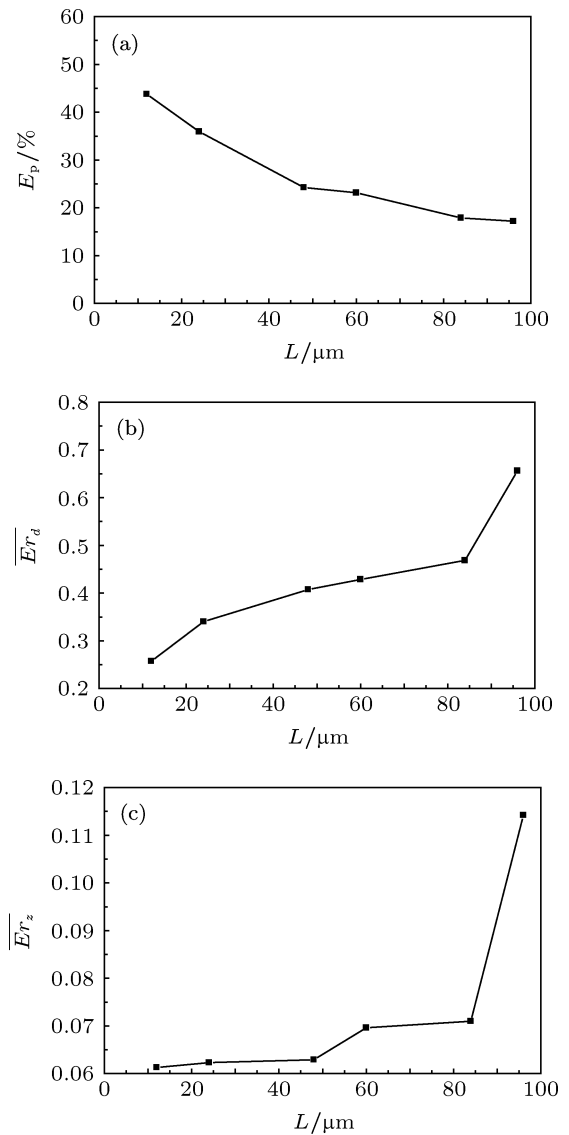


图4 样本空间深度对各参数的影响 (a) 对颗粒重建率的影响; (b) 对平均粒径误差的影响; (c) 对平均 z 轴定位误差的影响

的前提下, 颗粒浓度对颗粒重建率的影响. 与图 3(a)

不同, 颗粒重建率 E_p 与样本空间深度基本呈单调递减的线性关系. 而对于颗粒粒径测量和 z 轴定位, 情况却大不相同. 图 4(b) 和 (c) 分别表示样本空间深度对粒径测量和 z 轴定位的影响. 由图 4(b) 和 (c) 可知, 颗粒的平均粒径误差 $\overline{Er_d}$ 随样本空间深度的增加而增大, 两者大致呈线性递增关系, 而对于颗粒的平均 z 轴定位误差 $\overline{Er_z}$ 而言, 深度的增加对其值的影响不大. 这说明颗粒的 z 轴定位与样本空间深度无关. 比较图 4(b) 和 (c), 在相同样本空间深度的情况下, 平均粒径误差 $\overline{Er_d}$ 是平均 z 轴定位误差 $\overline{Er_z}$ 的 5—6 倍, 这表明在数字显微全息技术测量颗粒场时, 样本空间深度的变化对颗粒粒径测量的影响要比颗粒 z 轴定位的影响大.

3.3 颗粒浓度与样本空间深度的影响比较

在实际的被测流场中, 所涉及的往往是流动着的颗粒场. 微流体内的颗粒因为流体的流动性, 可能出现簇集现象, 它会导致样本空间内的部分区域的颗粒浓度会高于其他区域, 以及不同区域的颗粒的有效样本空间深度不同. 因此, 采用显微全息技术拍摄的全息图像就需要有选择性地重建. 为了研究颗粒浓度与样本空间深度同时变化时对颗粒重建率、粒径测量及定位的影响, 并正确地使用显微全息技术测量微通道内复杂流体内的颗粒场, 采用如下模拟实验. 首先, 假设样本空间的长、宽均为 $22\ \mu\text{m}$, 模拟的颗粒个数为 16 颗, 粒径 d 为 $1\text{--}5\ \mu\text{m}$, 控制颗粒场的阴影密度 s_d 大小为 10.33%, 改变样本空间深度, 使其值分别为 12, 24, 48, 60, 84 和 $96\ \mu\text{m}$. 图 5 表示在阴影密度 s_d 不变, 颗粒浓度与样本空间深度均改变的前提下, 颗粒重建率、粒径测量与 z 轴定位的变化情况. 由图 5(a) 可知, 当样本空间深度较小 (颗粒浓度大) 时, 颗粒的重建率随着样本空间深度增加而增加, 这说明当深度 L 较小 ($L \leq 48\ \mu\text{m}$) 时, 样本空间深度对颗粒重建的影响要比颗粒浓度的影响要来的大. 当深度 $L \geq 48\ \mu\text{m}$ 时, 重建率随着样本空间深度增加而增大, 说明颗粒浓度对其影响较大. 由图 5(b) 和 (c) 可知, 两者对颗粒的粒径测量及 z 轴定位的影响情况比较复杂.

4 结论

本文采用数值模拟方法研究了数字显微全息中三维颗粒场的全息记录与重建, 基于最邻近匹

配原则编译软件进行颗粒匹配, 着重探讨了在颗粒群模型下颗粒浓度、样本空间深度对颗粒重建率、颗粒粒径误差及 z 轴定位误差的影响. 虽然模拟数据不具有普适性, 但能反映一定的趋势变化.

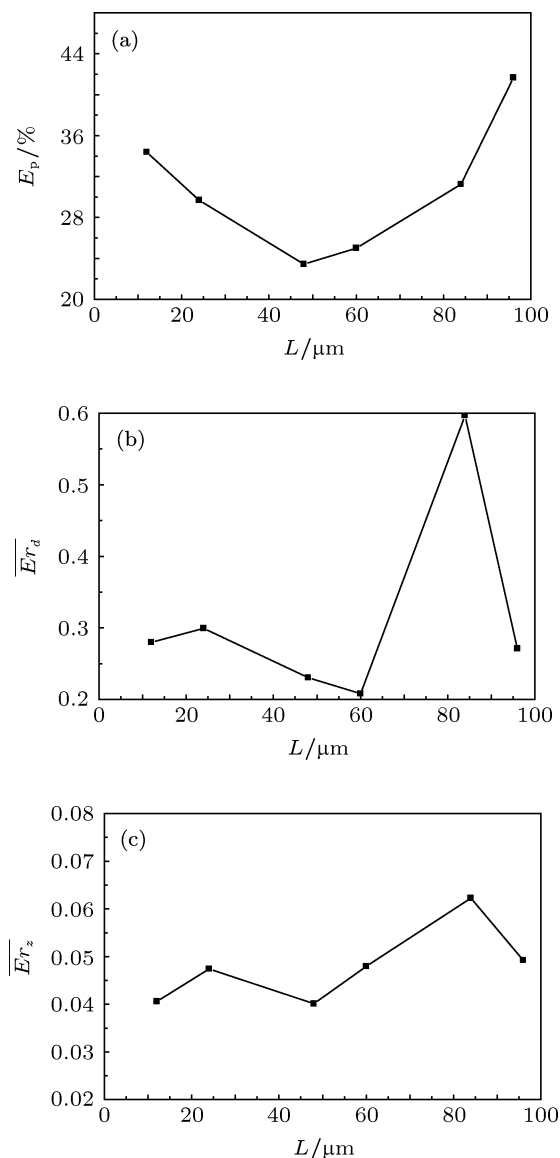


图 5 相同阴影密度下样本空间深度对各参数的影响 (a) 对颗粒重建率的影响; (b) 对平均粒径误差的影响; (c) 对平均 z 轴定位误差的影响

1) 在样本空间深度为 $24\ \mu\text{m}$ 的前提下, 颗粒浓度 n_s 在 $3.44 \times 10^5\text{--}13.77 \times 10^5\ \text{mm}^{-3}$ 的范围内时, 颗粒重建率 E_p 随着颗粒浓度 n_s 的增大而迅速减小, 而颗粒浓度 n_s 在 $13.77 \times 10^5\text{--}55.08 \times 10^5\ \text{mm}^{-3}$ 的范围内时, 颗粒重建率 E_p 随颗粒浓度 n_s 呈缓慢减少的趋势.

2) 在颗粒浓度 n_s ($13.77 \times 10^5\ \text{mm}^{-3}$) 保持不变的前提下, 颗粒重建率 E_p 与样本空间深度满足单调递减的线性关系. 颗粒的 z 轴定位与样本空间深

度基本无关。

3) 在相同颗粒浓度或样本空间深度时, 平均粒径误差 $\overline{Er_d}$ 是平均 z 轴定位误差 $\overline{Er_z}$ 的 5—6 倍, 这表明在数字显微全息技术测量颗粒场时, 颗粒粒径测量时所受的影响要比颗粒 z 轴定位时所受的影响要大。

4) 当颗粒浓度与样本空间深度均改变时, 重建率的变化呈现一定的规律性: 当深度 L 较小时, 样本空间深度对颗粒重建的影响要比颗粒浓度的影响大; 当深度 L 较大时, 颗粒浓度对颗粒重建的影响要比样本空间深度的影响大。

-
- [1] Tanner D 2009 *Microelectron. Reliab.* **49** 937
- [2] Shi S, Chen D P, Jing Y P, Ou Y, Ye T C, Xu Q X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 76802
- [3] Potrich C, Lunelli L, Forti S, Vozzi D, Pasquardini L, Vanzetti L, Panciatichi C, Anderle M, Pederzoli C 2010 *Eur. Biophys. J. Biophys.* **39** 979
- [4] Yao S, Tang X, Hsieh C, Alyousef Y, Vladimer M, Fedder G K, Amon C H 2006 *Energy* **31** 636
- [5] Langehanenberg P, Kemper B, Dirksen D, von Bally G 2008 *Appl. Opt.* **47** D176
- [6] Mir T A, Shinohara H 2012 *Anal. Biochem.* **429** 53
- [7] Whalen S, Thompson M, Bahr D, Richards C, Richards R 2003 *Sensor. Actuat. A Phys.* **104** 290
- [8] Do K H, Jang S P 2010 *Int. J. Heat Mass Trans.* **53** 2183
- [9] Cai W, Wang F, van Veen A, Descorme C, Schuurman Y, Shen W, Mirodatos C 2010 *Int. J. Hydrogen Energ.* **35** 1152
- [10] Park J S, Choi C K, Kihm K D 2004 *Exp. Fluids* **37** 105
- [11] Elsinga G, Westerweel J, Scarano F, Novara M 2011 *Exp. Fluids* **50** 825
- [12] Wu Y C, Wu X C, Wang Z H, Chen L H, Cen K F 2011 *Appl. Opt.* **50** H22
- [13] Garcia-Sucerquia J, Xu W, Jericho S K, Klages P, Jericho M H, Kreuzer H J 2006 *Appl. Opt.* **45** 836
- [14] Sheng J, Malkiel E, Katz J 2006 *Appl. Opt.* **45** 3893
- [15] Ferraro P, Coppola G, De Nicola S, Finizio A, Pierattini G 2003 *Opt. Lett.* **28** 1257
- [16] Wu Y L, Yang Y, Zhai H C, Ma Z H, Gai Q, Deng L J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084203 (in Chinese) [吴永丽, 杨勇, 翟宏琛, 马忠洪, 盖琦, 邓丽军 2013 物理学报 **62** 084203]
- [17] Wang H Y, Liu F F, Liao W, Song X F, Yu M J, Liu Z Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 054208 (in Chinese) [王华英, 刘飞飞, 廖薇, 宋修法, 于梦杰, 刘佐强 2013 物理学报 **62** 054208]
- [18] Wang H Y, Liu F F, Song X F, Liao W, Zhao B Q, Yu M J, Liu Z Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024207 (in Chinese) [王华英, 刘飞飞, 宋修法, 廖薇, 赵宝群, 于梦杰, 刘佐强 2013 物理学报 **62** 024207]
- [19] Kim S, Lee S J 2007 *J. Micromech. Microeng.* **17** 2157
- [20] Satake S I, Kunugi T, Sato K, Ito T, Kanamori H, Taniguchi J 2006 *Meas. Sci. Technol.* **17** 1647
- [21] Wu Y C, Wu X C, Wang Z H, Grehan G, Chen L H, Cen K F 2011 *Appl. Opt.* **50** H297
- [22] Cao L, Pan G, De Jong J, Woodward S, Meng H 2008 *Appl. Opt.* **47** 4501
- [23] Pan G, Meng H 2003 *Appl. Opt.* **42** 827
- [24] Fugal J, Shaw R 2009 *Atmos. Meas. Tech.* **2** 259
- [25] Yang Y, Li G, Tang L, Huang L 2012 *Appl. Opt.* **51** 255
- [26] Malek M, Allano D, Coëtmelec S, Zkul C, Lebrun D 2004 *Meas. Sci. Technol.* **15** 699
- [27] Meng H, Anderson W, Hussain F, Liu D D 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 2046
- [28] Royer H 1974 *Nouvelle Revue d'Optique* **5** 87
- [29] Malek M, Allano D, Coëtmelec S, Lebrun D 2004 *Opt. Express* **12** 2270
- [30] Zhang Y, Shen G, Schroder A, Kompenhans J 2006 *Opt. Eng.* **45** 075801
- [31] Singh D K, Panigrahi P 2012 *Appl. Opt.* **51** 3874
- [32] Restrepo J F, Garcia-Sucerquia J 2013 *Appl. Opt.* **52** A310
- [33] Natan T, Shaked, Joseph R, Adrian S 2007 *Opt. Express* **15** 5754
- [34] Kumar Nishchal N, Joseph J, Singh K 2004 *Opt. Commun.* **235** 253
- [35] Buraga-Lefebvre C, Coëtmelec S, Lebrun D, Zkul C 2000 *Opt. Laser Eng.* **33** 409
- [36] Anderson W, Diao H 1995 *Appl. Opt.* **34** 249
- [37] Lebrun D, Belaïd S, Zkul C 1999 *Appl. Opt.* **38** 3730
- [38] Wu X C, Meunier-Guttin-Cluzel S, Wu Y C, Saengkaew S, Lebrun D, Brunel M, Chen L H, Coëtmelec S, Cen K F, Grehan G 2012 *Opt. Commun.* **285** 3013
- [39] Pu S L, Allano D, Patte-Rouland B, Malek M, Lebrun D, Cen K F 2005 *Exp. Fluids* **39** 1

Influence of recording parameters on particle field measurement by digital holographic microscopy: a numerical investigation*

Zhou Bin-Wu¹⁾ Wu Xue-Cheng^{1)†} Wu Ying-Chun¹⁾ Yang Jing¹⁾
Gérard Gr han²⁾ Cen Ke-Fa¹⁾

1) (State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute for Thermal Power Engineering of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

2) (UMR 6614/CORIA, LABEX EMC3, Centre National de la Recherche Scientifique, Universit  et Institut National des Sciences Appliqu es de Rouen, Site du Madrillet, Avenue de l'Universit , Saint Etienne du Rouvray, BP12 76801, France)

(Received 12 June 2013; revised manuscript received 6 July 2013)

Abstract

Digital holographic microscopy plays a key role in micro-fluid measurement, and appears to be a strong contender as the next-generation technology for diagnostics of three-dimensional (3D) particle field. However, various recording parameters, such as the recording distance, the particle size, the wavelength, the size of the CCD chip, the pixel size and the particle concentration, will affect the results of the reconstruction, and may even determine the success or failure of a measurement. In this paper, we numerically investigate the effects of particle concentration and the volume depth on reconstruction efficiency, to evaluate the capability of digital holographic microscopy. Standard particle holograms with all known recording parameters are numerically generated by using a common procedure based on Lorenz-Mie scattering theory. Reconstruction of those holograms are then performed by a wavelet-transform based method. Results show that on the premise that the value of volume depth is 24 μm , the reconstruction efficiency E_p decreases quickly until particle concentration reaches $6.89 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$, and decreases slowly with the increase of particle concentration from $6.89 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$ to $55.08 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$. And on the premise that the value of particle concentration is $13.77 \times 10^5 \text{ mm}^{-3}$, the reconstruction efficiency E_p decreases linearly with the increase of the volume depth. When shadow density is constant, the variance of the construction efficiency presents a certain regularity. When the volume depth is small, the effect of particle concentration on the reconstruction efficiency becomes larger than one of volume depth, while it comes to a completely opposite result with a larger volume depth.

Keywords: digital holographic microscopy, particle concentration, diameter error, position error

PACS: 42.40.Jv, 42.30.Wb, 42.40.Ht, 47.61.Fg

DOI: 10.7498/aps.62.204203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51176162) and the Program of Introducing Talents of Discipline to Universities of China (Grant No. B08026).

† Corresponding author. E-mail: wuxch@zju.edu.cn