

基于复数主从光学相干层析成像相位信息的离散界面快速定位方法^{*}

钱黄河 王迪 韩涛 丁志华[†]

(浙江大学光电科学与工程学院, 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2022 年 3 月 11 日收到; 2022 年 7 月 7 日收到修改稿)

鉴于谱域光学相干层析成像 (spectral-domain optical coherence tomography, SD-OCT) 系统通常存在非线性采样与色散失配等问题, 需要额外的数据处理步骤. 此外, 所需要的成像区域往往是整个成像区域的一小部分, 对于整个成像区域的计算带来了算力资源浪费, 而且在离散界面的定位方面, 有限的轴向分辨率下亚像素偏差的存在限制了界面的测量精度. 针对以上问题, 本文提出了一种基于复数主从 (complex master slave, CMS) OCT 相位信息的离散界面快速定位方法. 联合谱域与深度域的相位信息, 精确求解 CMS-OCT 的重建模板, 并利用 CMS-OCT 的相位信息, 实现高精度的光程差检测与离散界面定位. 最后, 通过精密光学量规和光学透镜离散界面实验验证了所提出方法能够在快速定位的同时, 保持较高的分辨率和稳定性. 本文所提出的方法有效地解决了 SD-OCT 系统的非线性采样与色散失配问题, 实现了局域范围内的高精度界面快速定位, 有望促进 SD-OCT 在光学透镜离散界面测量方面的应用.

关键词: 谱域光学相干层析成像, 复数主从算法, 亚像素偏差, 光程差检测

PACS: 42.25.Hz, 42.25.Kb, 42.30.Rx, 42.30.Wb

DOI: 10.7498/aps.71.20220444

1 引言

光学透镜在加工和装配过程中涉及的参数很多, 对于精密的光学透镜, 微小的参数变化可能使透镜的性能下降甚至失效, 因此对透镜离散界面进行精确测量具有重要意义. 应用最广泛的调制传递函数测量可以直接反映透镜成像性能的退化, 然而它不能识别导致退化的结构变化^[1,2]. 一些表面轮廓测量技术, 如针尖式形貌检测仪^[3]、原子力式显微轮廓仪^[4,5]、基于干涉测量的轮廓仪^[6-8]可以对单一界面进行轮廓的精确测量, 但无法无损地对多个界面进行测量. 其他测量技术可以测量透镜表面之间的中心距离^[9]以及元件偏心^[10], 但不能提供其整个表面的形貌信息. 此外, X 射线显微计算机

断层扫描是一种有效的无损测量方法, 其空间分辨率约为几微米, 且需要大量的重建时间^[11,12].

光学相干层析成像 (optical coherence tomography, OCT)^[13-15]是一种基于低相干干涉的非侵入、无损伤的三维断层成像技术, 具有无损无辐射、高分辨率、高灵敏度等一系列优点. 谱域 OCT^[16-18]是目前应用最广泛的 OCT 成像技术, 相较于时域 OCT, 谱域 OCT 在分辨率、信噪比、灵敏度和成像速度等方面具有显著优势^[19-21]. 鉴于谱域 OCT 技术的非侵入、非接触、快速成像与低成本等优势, 在光学透镜离散界面的测量方面具有重要应用. 在谱域 OCT 中, 通过对干涉光谱信号进行傅里叶变换可以得到样品的深度域信息. 一方面, 在探测干涉光谱的过程中, 由于光栅型光谱仪的分光原理^[22], 线阵探测器等像素间隔位置采集到的光谱信号在

^{*} 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0700501)、国家自然科学基金 (批准号: 62035011, 11974310, 31927801, 61905214) 和浙江省自然科学基金 (批准号: LR20F050001) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zh_ding@zju.edu.cn

波数域上并非线性分布, 而快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 算法要求在波数域上均匀采样, 所以在变换之前需要对光谱信号进行重采样处理, 来获得均匀的干涉光谱信号^[23]. 另一方面, 除了非线性采样带来的影响, 参考臂与样品臂之间所用元件的差异, 会导致双干涉臂之间的色散不匹配, 进而导致轴向分辨率下降. 为此, 提出了一系列基于软、硬件的解决方案. Hu 和 Rollins^[24] 在光谱仪中引入棱镜构成波数均匀光谱仪, 实现对波数线性光谱的采集. Perret 和 Heuberger^[25] 利用法布里-珀罗干涉滤光片生成等间距的定标谱线, 通过多项式拟合获得波数标定结果, 进而获得波数线性的光谱. Wojtkowski 等^[26] 提出使用匹配长度的玻璃来进行色散补偿. Rosa 等^[27] 提出使用基于光栅的相位控制延迟线, 通过调整光栅的离焦量改变参考光路的色散系数, 从而补偿色散失配. Marks 等^[28] 通过基于黄金分割法的迭代方法来获取补偿系数进行色散补偿. 这类方法需要额外的硬件设施或较大的算力. 与上述方法不同, Rivet 和 Bradu 等^[29–31] 提出的复数主从 (complex master slave, CMS) 算法则无需考虑色散失配与非等间隔光谱采样问题. 而且, 针对光学离散界面的快速定位需求, CMS 算法拥有快速处理的显著优势. 不过, 该算法对重建模板的构建精度具有很高的要求.

本文提出了一种基于 CMS-OCT 相位信息的离散界面快速定位方法, 该方法联合谱域和深度域相位信息, 校正了构建 CMS 模板时的亚像素偏差, 并充分利用 CMS-OCT 相位信息实现了亚采样精度的深度域位置快速定位. 通过比较所提出的方法与传统成像方法进行离散界面快速定位的效果, 验证所提出方法的优势.

2 理论方法

2.1 传统 CMS 算法原理

对于单一界面位置 z_0 , CMS-OCT 的深度域信号可以表示为

$$\begin{aligned} I_{\text{CMS}}(k_i, z_0) &= \sum_{n=1}^N I(k_i, z_0) g(k_i)' e^{-i\varphi(k_i, z_0)} \\ &= \sum_{n=1}^N I(k_i, z_0) M^*(k_i, z_0), \end{aligned} \quad (1)$$

其中, k_i 为非均匀波数分布, $I(k_i, z_0)$ 为单一界面位置 z_0 下的复数干涉信号, $g(k_i)$ 为均匀的波数分布, $\varphi(k_i, z_0)$ 为对应的光谱域相位分布, 记录非均匀波数分布 k_i 和深度域位置 z_0 处的复数相位模板为

$$M^*(k_i, z_0) = g(k_i)' e^{-i\varphi(k_i, z_0)}. \quad (2)$$

这种提取和代换使运算规避了要求波数均匀分布的 FFT, 回归了原始的矩阵乘法运算, 只需要知道相对相位的分布情况 $\varphi(k_i, z_0)$, 即可求得复数相位模板 M^* , 进而通过矩阵运算, 得到 z_0 处的深度域信号强度. 模板中包含的 z_0 意味着我们可以有选择地构建感兴趣的成像区域的复数相位模板, 实现有针对性的局域图像重建.

CMS 算法分为主阶段和从阶段, 主阶段的目标是构建相位模板 M^* , 主阶段对于模板中 φ 的求取, 一般使用光程差分别为 $z_1 = n\Delta z + \delta_1$ 和 $z_2 = m\Delta z + \delta_2$ 的单一界面干涉光谱进行求解, 其中 Δz 为深度域采样间隔, δ_1 和 δ_2 为两个峰值采样点处的亚像素偏差, 且 $m > n$, 以深度域采样值 $n\Delta z$ 和 $m\Delta z$ 生成离散采样点 $p\Delta z$ 处对应的谱域相位为

$$\begin{aligned} &\varphi(k_i, p\Delta z) \\ &= \varphi(k_i, n\Delta z) + \frac{p-n}{m-n} [\varphi(k_i, m\Delta z + \delta_2) \\ &\quad - \varphi(k_i, n\Delta z + \delta_1)]. \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式在比例系数 $\frac{p-n}{m-n}$ 处使用采样点位置代替实际的深度域位置, 这会带来亚像素级别的偏差. 当 m 和 n 相差不大时, 这种亚像素偏差可能导致定位结果上像素级别的误差. 在求解相位模板时, 可以通过调整 p 的取值范围来设定感兴趣区域, 从而生成与其对应的相位模板:

$$M_{N_z \times N_k}^* = \begin{bmatrix} M^*(z_1, k_1) & M^*(z_1, k_2) & \cdots & M^*(z_1, k_{N_k}) \\ M^*(z_2, k_1) & M^*(z_2, k_2) & \cdots & M^*(z_2, k_{N_k}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M^*(z_{N_z}, k_1) & M^*(z_{N_z}, k_2) & \cdots & M^*(z_{N_z}, k_{N_k}) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, N_z 为感兴趣区域点的个数, 反映模板的大小; N_k 为光谱采样点数.

从阶段的目标是求解感兴趣区域内的深度域信号. 通过从阶段探测的干涉光谱与复数相位模板的矩阵相乘, 可以得到感兴趣区域的轴向反射系数分布:

$$I_{\text{CMS}} = \mathbf{M}_{N_z \times N_k}^* \cdot I_{N_k \times 1}, \quad (5)$$

其中, $I_{N_k \times 1}$ 为从阶段探测的干涉光谱. 图 1 展示了复数主从算法的流程. 在样品数据采集前的主阶段中, 该算法通过对两个或两个以上的单反射面干涉光谱 I_M 进行相位提取并处理, 得到深度相关的谱域相位和包含信号啁啾信息的复数相位模板; 从阶段采集样品数据, 并通过采集到的干涉光谱 I_S 与上一部分计算得到的相位模板进行矩阵运算, 得到样品的深度域信号, 实现深度域快速定位.

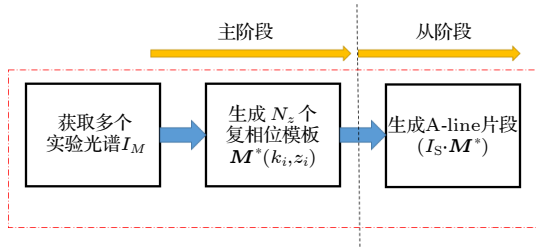


图 1 CMS 算法流程图

Fig. 1. Flow chart of CMS algorithm.

基于离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 的 CMS 算法与 FFT 算法的时间复杂度分别为 $O(n^2)$, $O(n \log n)$, 且

$$O(n \log n) < O(n^2). \quad (6)$$

CMS 算法虽然在时间复杂度上大于 FFT 算法, 但是局域小范围的运算时间不涉及无关点的运算, 不需要计算所有深度区域, 因此运算时间更短; 其次, 数据采集完成后, 重采样算法还要进行光谱重采样与去色散等操作, 进一步增加了程序的运行时间, 在时间上更加落后.

2.2 改进的 CMS 模板构建方法

为校正主阶段构建模板时的亚像素偏差, 从用于构建模板的单一界面深度域信号中提取峰值点位置处的深度域包裹相位, 记为 $\psi_w(z_0 - \delta)$, δ 为峰值采样点处相对于实际位置 z_0 的亚像素偏差, $z_0 - \delta$ 为离散的峰值采样点位置, 相较于理论深度域相位 $\psi(z_0 - \delta)$ 存在 N 次的相位包裹, 对于这种

相位包裹, 可以联合谱域相位 $\varphi(k_c)$ 进行求解, 其中 k_c 为中心波数. 构造深度域估计相位 $\hat{\psi}(z_0 - \delta)$ 表达式为

$$\hat{\psi}(z_0 - \delta) = 2k_c \delta = \varphi(k_c) - 2k_c(z_0 - \delta). \quad (7)$$

对于 (7) 式中谱域相位 $\varphi(k_c)$ 的求取, 可以使用最小二乘法拟合其谱域相对相位分布, 拟合得到的曲线斜率为光程差的近似值 z'_0 , 进而与 $2k_c$ 相乘得到:

$$\varphi(k_c) = 2k_c z'_0. \quad (8)$$

求得深度域估计相位后, 用于对深度域相对相位的解包裹, 可以得到深度域绝对相位:

$$\psi(z_0 - \delta) = \psi_w(z_0 - \delta) + 2\pi \text{floor} \left[\frac{\hat{\psi}(z_0 - \delta) - \psi_w(z_0 - \delta)}{2\pi} \right]. \quad (9)$$

在得到深度域的绝对相位之后, 可以计算其峰值点位置处的亚像素偏差 δ :

$$\delta = \psi \frac{(z_0 - \delta)}{2k_c}, \quad (10)$$

求得峰值点处的亚像素偏差后, CMS 算法可以得到校正亚像素偏差的相位:

$$\begin{aligned} & \varphi(k_i, p\Delta z) \\ &= \varphi(k_i, n\Delta z + \delta_1) + \frac{(p-n)\Delta z - \delta_1}{(m-n)\Delta z + (\delta_2 - \delta_1)} \\ & \quad \times [\varphi(k_i, m\Delta z + \delta_2) - \varphi(k_i, n\Delta z + \delta_1)]. \end{aligned} \quad (11)$$

对比 (3) 式, 可以看出结合相位检测技术可以获得更为精确的比例系数, 从而得到更精确的复数相位模板, 进而得到具有更高精度的定位效果.

2.3 利用 CMS 相位信息的离散界面定位

为校正从阶段矩阵运算后得到的深度域信号的亚像素偏差, 可以利用 CMS 相位信息进行更精确的离散界面定位. (1) 式中的干涉光谱信号 $I(k_i, z_0)$ 可以表示为

$$I(k_i, z_0) = 2S[g(k_i) - k_c] \sqrt{R_R R_S} e^{i\varphi(k_i, z_0)}, \quad (12)$$

其中, $S[g(k_i) - k_c]$ 为光源功率谱; R_R 和 R_S 分别是参考臂反射镜和样品的反射率. 将 (12) 式代入 (1) 式中可得:

$$\begin{aligned} I_{\text{CMS}}(k_i, z_0) &= 2\sqrt{R_R R_S} \sum_{n=1}^N S[g(k_i) - k_c] e^{i\varphi(k_i, z_0)} \\ & \quad \times g(k_i)' e^{-i\varphi(k_i, z_0 - \delta)}. \end{aligned} \quad (13)$$

(13) 式中, 谱域相位 $\varphi(k_i, z_0) = 2g(k_i)z_0 + h(k_i)$, $\varphi(k_i, z_0 - \delta) = 2g(k_i)(z_0 - \delta) + h(k_i)$, $h(k_i)$ 为两干涉臂之间的色散失配. 将谱域相位代入 (13) 式并结合 $g(k_i)' = [g(k_i) - k_c]'$ 可以得到:

$$I_{\text{CMS}}(k_i, z_0) = 2\sqrt{R_R R_S} \sum_{n=1}^N S[g(k_i) - k_c] \times [g(k_i) - k_c]' e^{i2[g(k_i) - k_c]\delta} e^{i2k_c\delta}. \quad (14)$$

其中, $\sum_{n=1}^N S[g(k_i) - k_c] [g(k_i) - k_c]' e^{i2[g(k_i) - k_c]\delta}$ 可以看作对函数 $S[g(k_i) - k_c] [g(k_i) - k_c]'$ 的 DFT, 则 (14) 式可转化为

$$I_{\text{CMS}}(k_i, z_0) = 2\sqrt{R_R R_S} \text{DFT}\{[Sg(k_i) - k_c] \times [g(k_i) - k_c]'\} e^{i2k_c\delta}. \quad (15)$$

由 (15) 式可以看出, CMS 深度域信号在峰值点处的深度域相位为

$$\psi_{\text{CMS}}(z_0 - \delta) = 2k_c\delta. \quad (16)$$

CMS 的深度域信号 $I_{\text{CMS}}(k_i, z_0)$ 相当于对波数均匀分布的谱域干涉光谱信号进行逆 DFT, 有如下关系:

$$I_{\text{CMS}}(k_i, z_0) = \text{DFT}^{-1}\{I^{\text{non-chirp}}[g(k_i), z_0]\}, \quad (17)$$

其中, $I^{\text{non-chirp}}[g(k_i), z_0]$ 为波数均匀分布的谱域干涉光谱信号. 由 (17) 式可知, 对 CMS 的深度域信号进行傅里叶变换可以得到其波数均匀分布的谱域干涉光谱信号, 再对该信号进行相位提取, 可以得到其谱域相位信息:

$$\varphi_{\text{CMS}}[g(k_i)] = \arg\{\text{DFT}\{I_{\text{CMS}}[I(k_i, z_0)]\}\}. \quad (18)$$

从 CMS 信号中获取其深度域包裹相位与谱域相位信息后, 可以根据 (7) 式—(10) 式求得峰值位置处的亚像素偏差 δ , 再结合光程差 (optical path difference, OPD) 表达式 $\text{OPD} = 2z_0 = 2(z_0 - \delta + \delta)$ 得到精确的 OPD:

$$\text{OPD} = 2\left[z_0 - \delta + \frac{\psi(z_0 - \delta)}{2k_c}\right]. \quad (19)$$

由此可以看出, 充分利用 CMS 信号的深度域相位和谱域相位, 可以解决深度域的相位包裹问题并得到更精确的 OPD 求解结果.

3 实验结果与讨论

实验系统见图 2, 在已有超高分辨谱域 OCT 系统基础上 [32], 做出了部分改进. 超连续光源发出光谱带宽约为 200 nm 的可见低相干光, 经 2 倍扩

束器扩束后, 平行入射至分光比为 1:1 的分束器上 (BS, Thorlabs), 透射光部分经 30 mm 透镜聚焦到参考臂平面镜上, 反射光部分则通过扫描振镜 (GVS012, Thorlabs) 扫描, 经消色差透镜 (30 mm, Edmund optics) 聚焦到样品上; 最终, 两束返回光重新汇聚, 经扩束、50 μm 小孔滤波后入射至衍射光栅上 (600 线/mm, Wasatch Photonics), 形成宽光谱色散, 最终被像素数 2048、行频 250 kHz 的线阵互补金属氧化物半导体相机 (CMOS, OCTOP LUS, Teledyne E2v) 采集, 实现了最高 250 fps 成像速度 (对应于横向 1000 个采样点数) 的快速成像. 系统的横向分辨率约为 3.9 μm , 轴向分辨率约为 1.6 μm , 成像量程约为 687.82 μm .

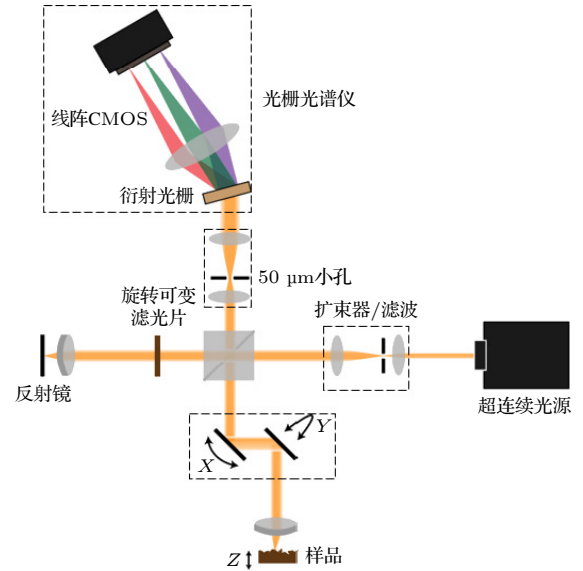


图 2 谱域 OCT 系统

Fig. 2. Spectral domain OCT system.

3.1 数值模拟实验

为了验证相位模板对于重建结果的影响, 对 CMS 算法进行了模拟. 设置光源功率谱为高斯型, 其波长范围为 500—850 nm, 光谱仪采样点数为 2048, 主阶段用于构建模板的干涉光谱对应的 OPD 分别为 100 μm 和 120 μm . 从阶段模拟一个 OPD 为 200 μm 的干涉光谱信号, 用于从阶段的 A-line 信号重建. 使用传统 CMS 算法与改进模板的 CMS 算法以及重采样去色散 (phase calibration with dispersion compensation, PCDC) 算法的重建结果如图 3 所示. 可以看出, PCDC 算法与改进模板的 CMS-OCT 算法所获得的峰值点位置均

为 165, 传统 CMS 算法获得的峰值点位置为 166, 根据 $\Delta z = \frac{\pi}{N\Delta k} = 0.6068 \mu\text{m}$, 其中 Δz 为深度域采样间隔, N 为光谱采样点数, Δk 为光谱采样间隔, 求得 PCDC 算法和改进模板的 CMS 算法的 OPD: $\text{OPD}_{\text{PCDC}} = \text{OPD}_{\text{ICMS}} = 2 \times 165 \times 0.6068 = 200.244 \mu\text{m}$; 采用传统 CMS 算法得到的 OPD 为 $\text{OPD}_{\text{CMS}} = 2 \times 166 \times 0.6068 = 201.4576 \mu\text{m}$. 显然, PCDC 算法与改进模板的 CMS 算法的重建结果高度一致, 且更接近于设定值 $200 \mu\text{m}$, 而传统 CMS 算法则出现了像素级别的误差.

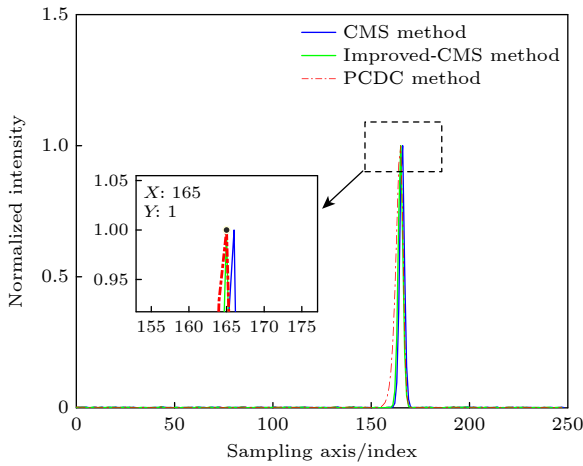


图 3 PCDC 算法、传统 CMS 算法和改进的 CMS 算法的定位结果

Fig. 3. Positioning results of PCDC algorithm, traditional CMS algorithm and improved CMS algorithm.

3.2 成像速度实验

为验证 CMS 算法在成像速度上的优势, 在主阶段使用两块厚度分别为 $1001 \mu\text{m}$ 和 $1009 \mu\text{m}$ 的不透明金属量规进行模板构建, 分别测量模板大小从 100—2048 的成像速度, 并与 FFT 算法的运算速度进行比较, 结果如图 4 所示. 可以看出, 当目标成像区域为整个成像范围的一小部分时, 采用 CMS 算法具有显著优势, 且 PCDC 算法在 FFT 之前需要进行重采样、去色散等一系列操作, 成像速度进一步降低.

3.3 不同 CMS 模板重建结果对比

为了实际说明提出的相位模板构建方法相较于传统 CMS 模板在单一界面定位上的优势, 在主阶段使用厚度分别为 $1001 \mu\text{m}$ 和 $1009 \mu\text{m}$ 的金属量规构建传统模板与消除亚像素偏差后的模

板, 在从阶段对厚度分别为 $1250 \mu\text{m}$ 和 $1350 \mu\text{m}$ 的金属量规分别进行单一界面定位, 其结果见图 5. PCDC 算法和改进的 CMS 算法模板重建得到的两量规峰值像素采样间隔为 $n_{\text{PCDC}} = n_{\text{ICMS}} = 27 - (-122) = 149$, 根据 $\Delta z = \frac{\pi}{N\Delta k} = 0.6717 \mu\text{m}$, 可求得实际光程差 $\text{OPD}_{\text{PCDC}} = \text{OPD}_{\text{ICMS}} = 2 \times 149 \times \Delta z = 200.1666 \mu\text{m}$, 传统 CMS 算法得到的两量规的峰值像素采样间隔为 $n_{\text{CMS}} = 27 - (-123) = 150$, 其对应的光程差为 $\text{OPD}_{\text{CMS}} = 2 \times 150 \times \Delta z = 201.51 \mu\text{m}$, 实验中两组量规的厚度差为 $100 \mu\text{m}$, 其对应的 OPD 为 $200 \mu\text{m}$. 显然, 改进的 CMS 模板较之传统 CMS 模板在界面定位方面具有明显优势.

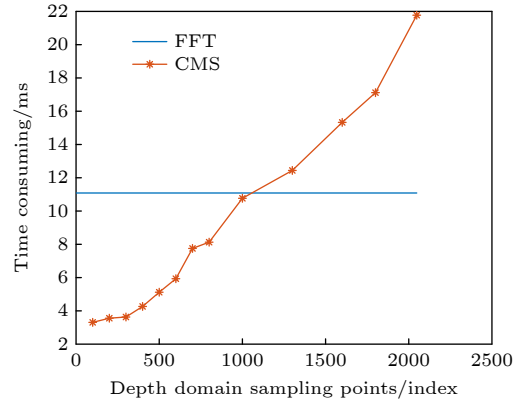


图 4 CMS 算法和 FFT 算法运算时间的比较

Fig. 4. Comparison of the operation time between CMS algorithm and FFT algorithm.

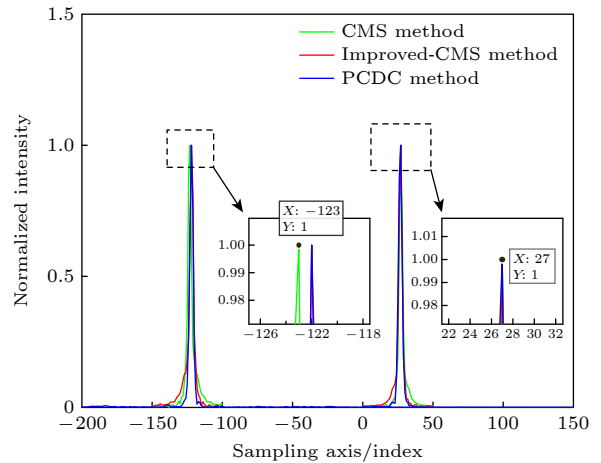


图 5 PCDC 算法、传统 CMS 算法和改进的 CMS 算法对厚度分别为 $1250 \mu\text{m}$ 和 $1350 \mu\text{m}$ 的金属量规的定位结果

Fig. 5. Positioning results of metal gauges with a thickness of $1250 \mu\text{m}$ and $1350 \mu\text{m}$ obtained from the PCDC algorithm, the traditional CMS algorithm and the improved CMS algorithm.

3.4 量规重复性实验

为了实际说明所提出方法相较于传统 CMS 算法在单一界面定位上的重复性优势, 将两块厚度分别为 $1250\ \mu\text{m}$ 和 $1350\ \mu\text{m}$ 的金属量规作为样品, 分别使用 PCDC 算法、传统 CMS 算法 (未改进模板但利用了 2.3 节所介绍的 CMS 相位) 和本文改进的 CMS 算法进行量规 OPD 的 500 次重复测量, 结果如图 6(a) 所示. PCDC 算法得到的 OPD 平均值为 $200.0653\ \mu\text{m}$, 传统 CMS 算法得到的 OPD 平均值为 $200.3724\ \mu\text{m}$, 改进的 CMS 算法得到的 OPD 平均值为 $200.0749\ \mu\text{m}$. 图 6(b)—(d) 分别给出了用 PCDC 算法、传统 CMS 算法和改进的 CMS 算法求取 OPD 的分布情况. 用传统 CMS 算法求取的 OPD 的标准差为 $74.8\ \text{pm}$, 而用 PCDC 算法和改进的 CMS 算法求取的 OPD 的标准差分别为 $21.3\ \text{pm}$ 和 $37.3\ \text{pm}$. 可见改进的 CMS 算法具有更好的重复性, 且其测量平均值与 PCDC 算法具有高度一致性.

3.5 光学透镜离散界面实验

为了验证本文所提出的方法在光学透镜离散界面定位上的优势, 并考虑到实验系统的量程限制, 以盖玻片的下表面与平凸透镜的上表面作为样品进行探测, 样品示意图如图 7 所示. 分别使用 PCDC 算法、传统 CMS 算法 (未改进模板但利用了 2.3 节所介绍的 CMS 相位) 及本文改进的 CMS 算法处理了三维图像数据, 针对盖玻片下表面以及平凸透镜上表面的界面定位结果如图 8 所示. 图 8(b)—(d) 分别表示了 PCDC 算法、传统 CMS 算法及改进的 CMS 算法的三维重建结果, 由于其 OPD 动态范围较大难以注意到 OPD 三维图像之间的差异. 图 8(b)—(d) 为对应图 8(b)—(d) 中黑线处的轴向剖面图, 从其中虚线框的放大图中可以看出本文所提出的方法与 PCDC 算法具有高度一致性, 而传统 CMS 算法具有相对较大误差. 为进一步说明重建结果之间的差异, 以 PCDC 算法的重建结果作为基准, 分别计算传统 CMS 算法和改

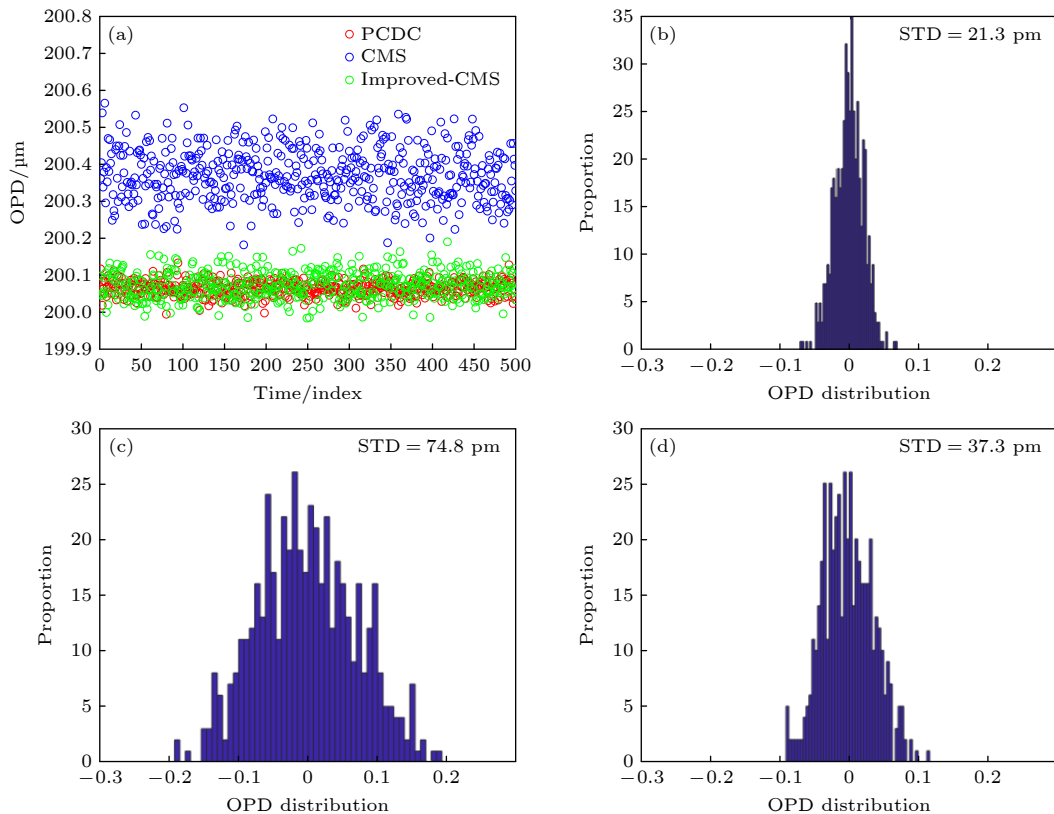


图 6 (a) 用 PCDC 算法 (红色)、传统 CMS 算法 (蓝色) 以及改进的 CMS 算法 (绿色) 求取的 OPD; (b) 用 PCDC 算法求取的 OPD 分布情况; (c) 用传统 CMS 算法求取的 OPD 分布情况; (d) 用改进的 CMS 算法求取的 OPD 分布情况

Fig. 6. (a) OPD obtained by PCDC algorithm (red), traditional CMS algorithm (blue) and improved CMS algorithm (green); (b) OPD distribution obtained by PCDC algorithm; (c) OPD distribution obtained by traditional CMS algorithm; (d) OPD distribution obtained by improved CMS algorithm.

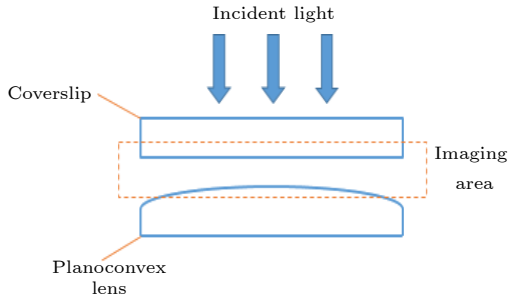


图 7 样品成像范围示意图

Fig. 7. Schematic diagram of sample imaging range.

进的 CMS 算法的重建结果与基准间的标准差, 计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\sum (\text{OPD}_e - \text{OPD}_b)^2}, \quad (20)$$

其中 OPD_e 为传统 CMS 算法和改进的 CMS 算法计算得到的 OPD 数值, OPD_b 为 PCDC 算法计算得到的 OPD 数值. 计算得到传统 CMS 算法重建结果与基准之间的标准差为 340.1343, 而改进的 CMS 算法重建结果与基准之间的标准差为 16.6985, 说

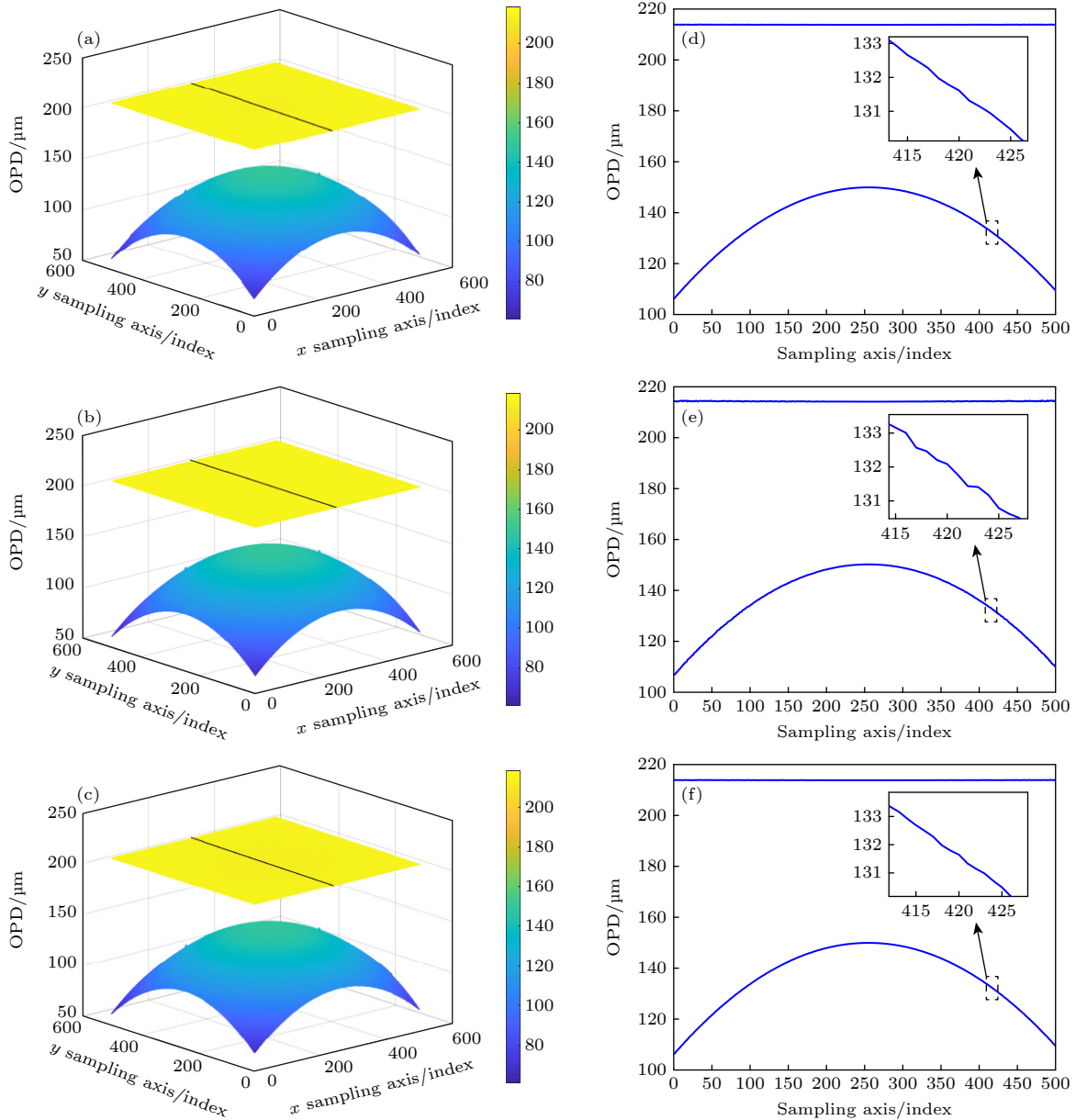


图 8 光学透镜离散界面定位结果 (a) PCDC 算法的定位结果; (b) 传统 CMS 算法的定位结果; (c) 改进的 CMS 算法的定位结果; (d)–(f) 分别对应图 (a)–(c) 中黑线位置处的轴向剖面图

Fig. 8. Positioning results of optical lens discrete interface: (a) Positioning results of PCDC algorithm; (b) positioning results of traditional CMS algorithm; (c) positioning results of improved CMS algorithm; (d)–(f) axial section at the black line in panel (a)–(c), respectively.

明本文所提出的测量方法实现了高动态范围 OPD 的定量测量, 可以良好地刻画光学透镜离散界面信息.

4 结 论

本文提出了一种基于 CMS-OCT 相位信息的离散界面快速定位方法, 该方法保持了 CMS 算法在局域成像上的速度优势, 并结合谱域相位信息、深度域相位信息, 精确地校正了信号在峰值点处的亚像素偏差, 从而构建更精确的复数相位模板, 并充分利用 CMS 相位信息进行界面定位, 获得更好的定位效果. 通过理论推导和模拟, 说明了传统 CMS 算法模板构建的问题, 针对问题提出了模板构建的新方法, 并给出了利用 CMS 相位进行界面定位的方法. 使用不同大小的模板进行了成像速度实验, 验证了 CMS 算法在成像速度上的优势; 通过对比不同模板的重建结果, 验证了构建模板新方法的的优势; 通过对精密光学量规厚度差的重复性测量, 验证了所提出方法相较于传统方法在定位精度和重复性上的提高; 最后对光学透镜离散界面进行了精确的定量测量, 验证了所提出方法在光学透镜离散界面精确定位方面的优势.

参考文献

- [1] Dube B, Cicala R, Ciosz A, Rolland J P 2017 *Appl. Opt.* **56** 5661
- [2] Liu S K, Wang T, Li k 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 134208 (in Chinese) [刘尚阔, 王涛, 李坤 2021 物理学报 **70** 134208]
- [3] Fukatsu H, Yanagi K 2005 *Microsyst. Technol.* **11** 582
- [4] Binnig G, Rohrer H, Gerber C, Weibel E 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 57
- [5] Binnig G, Quate C F, Gerber Ch 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 930
- [6] Wyant J C, O'Neill P K 1974 *Appl. Opt.* **13** 2762_1
- [7] Deck L, Groot P D 1995 *Int. J. Mach. Tool. Man.* **35** 147
- [8] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, Rosenfeld D P, White A D, Brangaccio D J 1974 *Appl. Opt.* **13** 2693
- [9] Zhao W, Sun R, Qiu L, Shi L, Sha D 2010 *Opt. Express* **18** 3608
- [10] Liu J A, Chen J J, Liu J L, Feng S L, Yang J, Song N, Sun C, Cui J C 2018 *Appl. Opt.* **57** F50
- [11] Awaja F, Arhatari B, Wiesauer K, Leiss E, Stifter D 2009 *Polym. Degrad. Stabil.* **94** 1814
- [12] Bertelson M, Hofsten O V, Vogt U, Holmberg A, Hertz H M 2009 *Opt. Express* **17** 11057
- [13] Wu T, Sun S S, Wang X H, Wang J M, He C J, Gu X R, Liu Y W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 104208 (in Chinese) [吴彤, 孙帅帅, 王绪晖, 王吉明, 赫崇君, 顾晓蓉, 刘友文 2018 物理学报 **67** 104208]
- [14] Choi W J, Park K S, Eom T J, Oh M K, Lee B H 2012 *Opt. Lett.* **37** 2784
- [15] Liang Y M, Zhou D C, Meng F Y, Wang M W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3246 (in Chinese) [梁艳梅, 周大川, 孟凡勇, 王明伟 2007 物理学报 **56** 3246]
- [16] Leitgeb R, Hitzinger C K, Fercher A F 2003 *Opt. Express* **11** 889
- [17] Boer J F D, Cense B, Park B H, Pierce M C, Bouma B E 2003 *Opt. Lett.* **28** 2067
- [18] Chong G T, Farsiu S, Freedman S F, Sarin N, Koreishi A F, Izatt J A, Toth C A 2009 *Arch. Ophthalmol-Chic.* **127** 37
- [19] Yan Y, Ding Z, Shen Y, Chen Z, Zhao C, Ni Y 2013 *Opt. Express* **21** 25734
- [20] Choma M, Sarunic M, Yang C, Izatt J 2003 *Opt. Express* **11** 2183
- [21] Chang R T, Knight O J, Feuer W J, Budenz D L 2009 *Ophthalmology* **116** 2294
- [22] Lei Y, Hui X, Chen J X 2018 *Appl. Opt.* **57** 9789
- [23] Beaurepaire, C A, Boccara, Lebec, Blanchot, Saint-Jalmes 1998 *Opt. Lett.* **23** 244
- [24] Hu Z, Rollins A M 2007 *Opt. Lett.* **32** 3525
- [25] Edith Perret T E B, Heuberger M 2010 *Appl. Spectrosc.* **64** 1139
- [26] Wojtkowski M, Leitgeb R, Kowalczyk A, Bajraszewski T, Fercher A F 2002 *J. Biomed. Opt.* **7** 457
- [27] Rosa C C, Rogers J A, Podoleanu A 2005 *Opt. Lett.* **30** 3263
- [28] Marks D L, Oldenburg A, Reynolds J J, Boppart S A 2002 *Proceedings of the Proceedings IEEE International Symposium on Biomedical Imaging* Washington DC, USA, July 7–10, 2002 p621
- [29] Rivet S, Maria M, Bradu A, Feuchter T, Podoleanu A 2016 *Opt. Express* **24** 2885
- [30] Bradu A, Israelsen N M, Maria M, Marques M J, Rivet S, Feuchter T, Bang O, Podoleanu A 2018 *Sci. Rep.* **8** 15445
- [31] Podoleanu A, Bradu A, Marques M, Rivet S 2019 *High-Speed Biomedical Imaging and Spectroscopy IV* San Francisco, California, United States, March 4, 2019 p1088908
- [32] Tang T, Zhao C, Chen Z Y, Li P, Ding Z H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 174201 (in Chinese) [唐弢, 赵晨, 陈志彦, 李鹏, 丁志华 2015 物理学报 **64** 174201]

A method of fast locating discrete interface based on phase information of complex master-slave optical coherence tomography^{*}

Qian Huang-He Wang Di Han Tao Ding Zhi-Hua[†]

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(Received 11 March 2022; revised manuscript received 7 July 2022)

Abstract

Spectral-domain optical coherence tomography (SD-OCT) system has the advantages of non-invasive, non-contact, fast imaging and low cost. It has important applications in the measurement of discrete interface of optical lens. However, the interference spectrum collected by spectral domain OCT system inevitably encounters some problems such as the unequal interval spectrum sampling and chromatic dispersion between two interference arms. In order to ensure that the axial resolution and sensitivity of the system are not reduced, subsequent data processing steps such as spectrum resampling and dispersion compensation need adding, which greatly reduces the real-time performance of measurement. In addition, in the actual measurement process, the required imaging area is often only a small part of the whole imaging area, the calculation of the whole imaging area brings a certain waste of computing power and resources. Moreover, in the positioning of discrete interface, the existence of sub-pixel deviation under limited axial resolution limits the measurement accuracy of interface. To solve the above problems, in this work proposed is a method of fast locating discrete interfaces based on complex master slave (CMS) OCT phase information. By combining the phase information of spectral domain and depth domain, the reconstruction template of CMS-OCT is solved accurately, and the phase information of CMS-OCT is used to achieve high-precision optical path difference detection and discrete interface location. Finally, experiments with precise optical gauge and discrete interface of optical lens verify that the proposed method can maintain high resolution and stability while fast locating is implemented.

Keywords: spectral domain optical coherence tomography, complex master-slave algorithm, subpixel deviation, optical path difference detection

PACS: 42.25.Hz, 42.25.Kb, 42.30.Rx, 42.30.Wb

DOI: 10.7498/aps.71.20220444

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0700501), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62035011, 11974310, 31927801, 61905214), and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LR20F050001).

[†] Corresponding author. E-mail: zh_ding@zju.edu.cn

基于复数主从光学相干层析成像相位信息的离散界面快速定位方法

钱黄河 王迪 韩涛 丁志华

A method of fast locating discrete interface based on phase information of complex master-slave optical coherence tomography

Qian Huang-He Wang Di Han Tao Ding Zhi-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 214202 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220444

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220444>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于最优化线性波数光谱仪的谱域光学相干层析成像系统

Optimized linear wavenumber spectrometer based spectral-domain optical coherence tomography system

物理学报. 2018, 67(10): 104208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172606>

基于受激辐射信号的谱域光学相干层析分子成像方法

Stimulated-emission based spectral domain optical coherence tomography for molecular contrast imaging

物理学报. 2018, 67(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171738>

用于内窥光学相干层析成像的小型化预标定Lissajous扫描光纤探头

A miniaturized pre-calibration based Lissajous scanning fiber probe for endoscopic optical coherence tomography

物理学报. 2021, 70(15): 150701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210151>

基于聚焦声场模型的光声层析成像时间延迟快速校正反投影方法

Back-projection method with fast time-delay correction for photoacoustic tomography reconstruction based on a focused sound field model

物理学报. 2022, 71(7): 078102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212019>

扫频光学相干层析角膜图像轮廓自动提取算法

Automatic contour extraction algorithm for swept-source optical coherence tomography cornea image

物理学报. 2019, 68(20): 204201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190731>

微分相位衬度计算机层析成像的感兴趣区域重建方法

Method of reconstructing region of interest for differential phase contrast computed tomography imaging

物理学报. 2021, 70(11): 118702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202192>