

文章编号: 0258-7025(2007)06-0833-04

基于光学相干层析成像的投影折射率 计算机层析成像系统研制

周振明, 丁志华, 杨亚良

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 报道了基于光纤型光学相干层析成像(OCT)的投影折射率计算机层析成像(PICT)系统,并利用研制的系统对外径为1.3 mm,内径为0.9 mm的充水玻璃管样品进行了测量。样品以1°的步进角旋转,共采集180个方向上的投影值,然后利用卷积反投影算法进行了折射率分布图像的重建。实验结果表明,系统具有较高的空间分辨率,能够正确区分空气、玻璃和水三种不同折射率的物质,且其边界清晰可辨;由于利用了折射率信息,投影折射率计算机层析图像消除了常规光学相干层析图像中的几何畸变。

关键词 医用光学与生物技术;投影折射率计算机层析成像;光学相干层析成像;折射率分布;卷积反投影算法;重建图像

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

Development of Optical Coherence Tomography Based Projected Index Computed Tomography System

ZHOU Zhen-ming, DING Zhi-hua, YANG Ya-liang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A fiber-typed optical coherence tomography (OCT) based projected index computed tomography (PICT) system is reported. A water-filled glass tube with outer and inner diameters of 1.3 mm and 0.9 mm respectively is measured by the developed system. 180 projection data from the sample rotated at step resolution of 1 degree are collected, and its refractive index mapped image is then reconstructed based on convolution back projection algorithm. Experimental result with high spatial resolution shows that air, glass and water with different refractive indexes are properly discriminated and their boundaries are clearly resolved. Meanwhile, due to the utilization of information on refractive index distribution, geometrical distortions usually observed in conventional OCT images are avoided in the PICT image.

Key words medical optics and biotechnology; projected index computed tomography; optical coherence tomography; refractive index distribution; convolution back projection algorithm; reconstructed image

1 引言

涉及光在生物组织中的干涉、衍射、散射和传播等问题都与组织的折射率相关。通过对生物组织折射率的测量,可以观察组织的状态。

Schmitt等^[1]利用相衬显微镜观测了哺乳动物内组织折射率的变化,但相衬显微镜只能用于组织

折射率的定性测量。基于光学相干层析成像^[2](OCT)的生物组织折射率空间分布测量方法^[3],目前已发展出焦点追迹法^[4]、双焦距法^[5]和光程匹配法^[4]。这些方法都可实现样品折射率空间分布的非侵入测量。但由于光学相干层析成像的测量精度强烈依赖于样品内部的后向散射信号,对于相位型或

收稿日期:2006-10-10;收到修改稿日期:2007-01-15

基金项目:国家863计划(2006AA02Z4E0)、国家自然科学基金(60378041,60478040)、浙江省自然科学基金(Z603003)、教育部新世纪优秀人才支持计划和浙江省“新世纪151人才工程”资助项目。

作者简介:周振明(1981—),男,吉林人,硕士研究生,主要从事生物医学光子学的研究。E-mail:zhouzmster@gmail.com

导师简介:丁志华(1967—),男,浙江人,研究员,博士生导师,主要从事生物医学光子学的研究。E-mail:zh_ding@zju.edu.cn

无明显内部散射层的生物样品来说,必然存在信噪比过低的问题。

投影折射率计算机层析成像(PICT)^[6]是一种新型的折射率空间分布成像技术,它利用一系列离散角度下的投影数据来重建样品的折射率分布。与前述基于光学相干层析成像的折射率测量方法不同,投影折射率计算机层析成像测量的不是样品内部的后向散射信号,而是提取透过样品的光信号,信噪比通常较高。

本文介绍了自行搭建的基于光纤型光学相干层析成像^[7]的投影折射率计算机层析成像系统,讨论了该系统中样品折射率投影采集方法以及基于卷积反投影算法的图像重建。利用该系统对充水玻璃管样品进行了折射率空间分布的测量,并利用获得的折射率分布信息,重建了无畸变的光学相干层析图像。

2 系统与方法

光学相干层析成像采用渗透组织能力强的近红外低相干光源,基于相干技术来探测组织内部的后向散射光信号^[8,9]。根据低相干光的干涉特性,只有样品的后向散射光和参考光的光程匹配时,才会出现干涉信号。光学相干层析成像的测量信号通过光程来定位,并不代表实际空间距离。因此,常规的光学相干层析图像往往存在着几何畸变^[10]。但是,光学相干层析成像测量得到的光程信息中包含着折射率信息。投影折射率计算机层析成像系统便是基于投影图像重建理论,利用光学相干层析成像采集的多角度投影数据来重建样品的折射率空间分布图像。

基于光纤型光学相干层析成像的投影折射率计算机层析成像系统如图 1 所示。从超辐射二极管(SLD)光源(中心波长 $\lambda = 1310$ nm,带宽 $\Delta\lambda = 65$ nm)发出的低相干光入射到 2×2 宽带光纤耦合器(50/50,带宽 80 nm),经分光后分别进入参考臂和样品臂。进入参考臂的光先通过相位调制器(PM, JDS Uniphase),然后进入由准直镜、衍射光栅、傅里叶变换(FT)透镜和振镜组成的快速扫描光学延迟线(RSOD),由快速扫描光学延迟线返回的参考光与样品臂返回的测量光由宽带光纤耦合器汇合,产生干涉信号。其中,相位调制器和振镜分别由函数发生器(FG)1 和 2 控制。

投影折射率计算机层析成像系统的样品臂(图

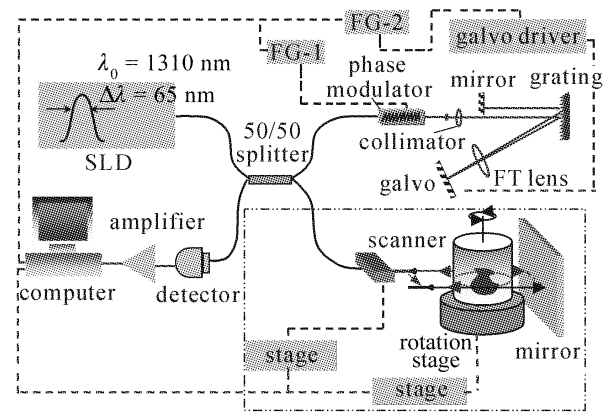


图 1 基于光学相干层析成像的投影折射率成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of OCT-based PICT system

中虚框)主要由旋转投影扫描装置构成。入射到样品臂上的光通过光纤扫描头后入射待测样品,透射光到达反射镜后被返回。因此,反射光携带着光传输路径中样品的折射率积分信息。被测样品固定在电控步进转台上,光纤扫描头固定在一维电动平移台上。测量过程中,样品在 180° 范围内,以 1° 的步距旋转。在每个投影方向上,光纤扫描头随电动平移台移动进行横向扫描,并由快速扫描光学延迟线进行纵向深度扫描。

投影折射率计算机层析成像中样品的投影通过计算光学相干层析图像中反射镜面位置的错移量来得到,反射镜面的位置由光到达镜面时经过的光程决定。测量样品时,由于传播路径上样品的存在导致了光程的变化,使得光学相干层析图像中反射镜面的位置产生错移量

$$\Delta Z = Z_1 - Z_0 = 2 \int_z [n_1(z) - 1] dz, \quad (1)$$

式中 Z_1 为加入样品后的镜面位置, Z_0 为未加入样品时的镜面位置, $n_1(z)$ 为样品的折射率沿深度 z 方向的分布。因此,错移量 ΔZ 反映了样品折射率沿光路的线积分信息。

利用样品在一系列离散角度上的投影,通过卷积反投影算法可重建样品的断层折射率分布图像。卷积反投影算法在计算机层析技术中被广泛采用^[11],尤其适用于平行投影方式、完全投影角度(180° 或 360°)下,大量投影数据的投影重建。该算法的数学表达形式为

$$\hat{f}(r, \theta) = \int_0^\pi g(x_r, \phi) \Big|_{x_r = r \cos(\theta - \phi)} d\phi, \quad (2)$$

$$g(x_r, \phi) = h(x_r) * p(x_r, \phi), \quad (3)$$

式中 $p(x_r, \phi)$ 为采集的投影值, $h(x_r)$ 为滤波函数,

$g(x_r, \phi)$ 为滤波后投影值。 ϕ 为投影角度, x_r 为采样点距离原点的距离。 r, θ 为极坐标参量。该式表达的物理含义为: 重建图像可以由 180° 范围内所有角度上滤波后投影值的叠加来获得。在我们算法的实现程序中, 采用了 R_L 和 S_L 两种常用滤波器。

3 结果与讨论

利用搭建的基于光学相干层析成像的投影折射率计算机层析成像系统, 测量了充水玻璃管样品。玻璃管截面为近似圆环状, 内径约为 0.9 mm, 外径约为 1.3 mm。对应 1310 nm 的入射光, 玻璃管折射率为 1.47, 水的折射率为 1.324。将样品置于光纤扫描头出射高斯光束的焦深范围内, 使得经过样品的光束为近似平行的细光束。由步进转台控制样品旋转, 步进角度为 1° , 共采集样品在 180 个投影方向上

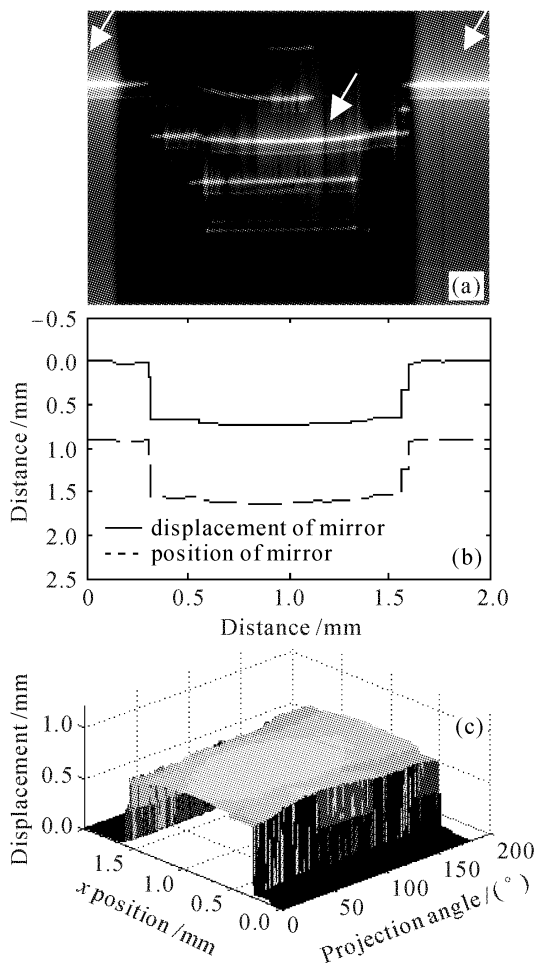


图 2 玻璃管样品投影图像

(a) 0° 投影图; (b) 投影曲线和光学相干层析图像中反射镜面位置曲线; (c) 180 个角度方向上的投影

Fig. 2 Projection image of water-filled glass tube

(a) projection image at 0° ; (b) sample projection curve versus mirror position in OCT image; (c) sample projections corresponding to 180 orientations

的投影图像, 如图 2 所示。图 2(a) 是投影角度为 0° 时样品的投影图像。每幅图像中的成像范围为横向 2 mm, 纵向光学长度 3.25 mm。图中箭头所指的白线即为反射镜面图像。由于反射镜面位置的光信号最强, 利用极值法便能确定反射镜面的位置, 进而计算镜面位置错移量, 即为该投影方向的折射率投影, 如图 2(b) 所示。图 2(c) 是样品在 180 个角度方向上的投影值。

利用编写的基于卷积反投影算法的图像重建程序, 得到重建后的样品图像如图 3 所示。图 3(a) 为充水玻璃管断面的折射率分布图像, 成像范围为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 灰度代表折射率数值。玻璃管的内外壁结构清晰可见, 空气、玻璃、水这三种不同的物质可明显区分开来, 还可看出内径圆形的偏心。图 3(b) 为对应于图 3(a) 中箭头方向上的折射率分布曲线, 该曲线的振荡是由于实际的投影采集都是离散化的, 不可能获得雷登 (Radon) 公式^[1]要求的完全投影积分。其中折射率分布曲线的中间部分对比边缘部分振荡相对较小, 这是由于中间部分的投影采集相对密集, 而边缘部分则相对稀疏。由图 3 可以测量出管子外、内径尺寸分别为 1.285 mm 和

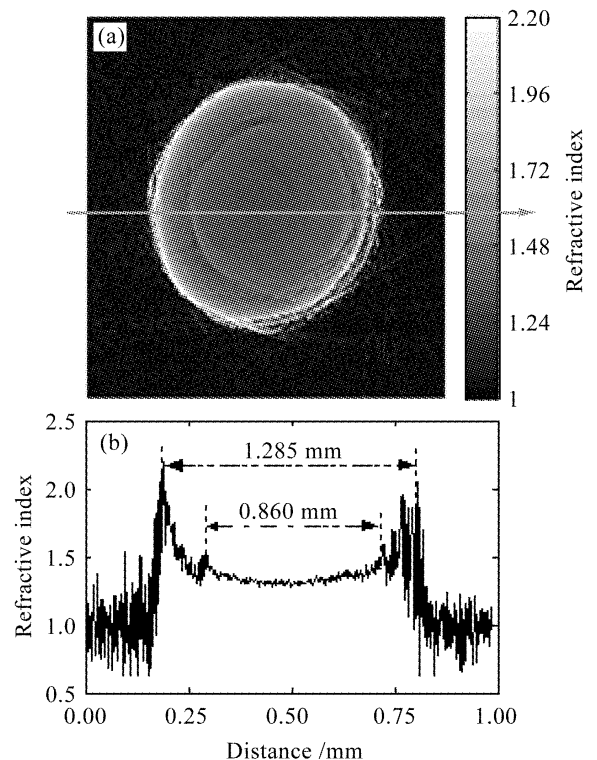


图 3 充水玻璃管样品的重建折射率分布图像 (a) 和对应图 (a) 中箭头方向上的折射率值曲线 (b)

Fig. 3 Reconstructed refractive index distribution image of water-filled glass tube (a), and refractive index profile (b) corresponding to the arrowed line indicated in (a)

0.860 mm,这与样品的实际尺寸基本接近,测量误差在5%以内。

作为比较,对同样的充水玻璃管样品进行了常规光学相干层析成像,结果如图4所示。在图4(a)的光学相干层析图像中,充水玻璃管样品形状出现明显畸变,这是由于样品折射率空间分布不均匀导致的结果;而图4(b)中的投影折射率计算机层析图像,由于利用了折射率信息,则完全消除了光学相干层析图像中的几何畸变,这一特点对于正确描述样品结构具有优势。其次,光学相干层析成像测量的是样品反射或后向散射光信号,只能辨别出较为明显的界面,而不能区分不同折射率的物质;投影折射率计算机层析图像可以展示样品内部折射率的空间分布信息,从而可分辨出不同的物质。最后,光学相干层析图像对于测量相位型样品对比度低,且随着成像深度的增加,信噪比下降,部分结构细节已经不可分辨;而投影折射率计算机层析图像利用了强反射的反射镜来提取折射率投影信息,信噪比高,不存在随深度增加、图像质量下降的问题。

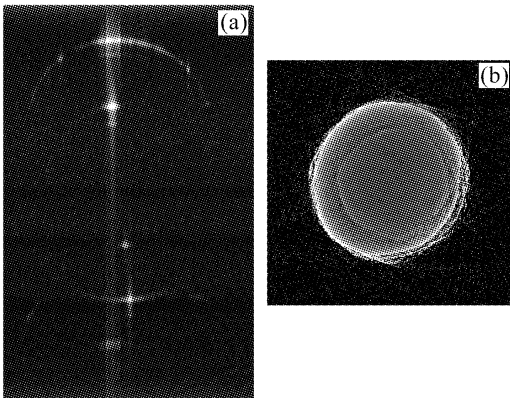


图4 充水玻璃管样品的光学相干层析图像(a)和投影折射率计算机层析图像(b)

Fig. 4 OCT image (a) and PICT image (b) of the same water-filled glass tube

4 结 论

完成了基于光学相干层析成像的投影折射率计算机层析成像系统的研制。该系统利用旋转扫描装置采集样品的多角度投影,然后利用卷积反投影算法重建样品的断层折射率分布图,避免了以往基于光学相干层析成像系统测量生物体折射率分布方法中普遍存在的低后向散射信号问题。利用所研制的

系统,进行了充水玻璃管样品折射率分布的测量实验。实验结果表明,系统具有较高的空间分辨率,能够正确区分样品的折射率分布。同时,由于利用了折射率信息,重建的投影折射率计算机层析图像消除了光学相干层析图像中的几何畸变,为折射率分布测量提供了一种新的手段。

参 考 文 献

- 1 J. M. Schmitt, G. Kunmar. Turbulent nature of refractive-index variations in biological tissue [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(16):1310~1312
- 2 David Huang, Eric A. Swanson, Charles P. Lin *et al.*. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, **254**(5035):1178~1181
- 3 G. J. Tearney, M. E. Brezinski, J. F. Southern *et al.*. Determination of the refractive index of highly scattering human tissue by optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(21):2258~2260
- 4 Xingyu Wang, Chunping Zhang, Lianshun Zhang *et al.*. Simultaneous refractive index and thickness measurements of bio tissue by optical coherence tomography [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2002, **7**(4):628~632
- 5 Andrei V. Zvyagin, K. K. M. B. D. Silva, Sergey A. Alexandrov *et al.*. Refractive index tomography of turbid media by bifocal optical coherence refractometry [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(25):3503~3517
- 6 Adam M. Zysk, Josh J. Reynolds, Danial L. Marks *et al.*. Projected index computed tomography [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(9):701~703
- 7 Yu Xiaofeng, Ding Zhihua, Chen Yuheng *et al.*. Development of fiber-based optical coherence tomographic imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):235~238
俞晓峰,丁志华,陈宇恒等. 光纤型光学相干层析成像系统的研制[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):235~238
- 8 Zhou Lin, Ding Zhihua, Yu Xiaofeng. Axial superresolution in optical coherence tomography through the combination of apodization and coherence gating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1181~1185
周琳,丁志华,俞晓峰. 利用变迹术和相干门相结合实现光学相干层析成像术轴向超分辨[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1181~1185
- 9 Yu Xiaofeng, Ding Zhihua, Chen Yuheng *et al.*. Function expansion of optical coherence tomography for Doppler imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11):1717~1720
俞晓峰,丁志华,陈宇恒等. 光学相干层析多普勒成像功能拓展研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11):1717~1720
- 10 Adrian Podoleanu, Ismini Charalambous, Lucian Plesea *et al.*. Correction of distortions in optical coherence tomography imaging of the eye [J]. *Phy. Med. Biol.*, 2004, **49**:1277~1294
- 11 G. T. Herman *et al.*. Image Reconstruction from Projections—Implementation and Applications [M]. Xie Zongjun, Liu Kun, Huang Lebin translated. Beijing: National Defence Industry Press, 1992. 10~70
G. T. Herman等. 投影法图像重建——实现和应用[M]. 谢宗钧,刘昆,黄乐斌译. 北京:国防工业出版社,1992. 10~70