

各向异性生物组织中偏振光传输的模拟与实验

云天梁^{1,2} 曾楠² 李伟^{1,2} 马辉^{1,2}

(¹ 清华大学物理系原子分子纳米科学教育部重点实验室, 北京 100084)
(² 清华大学深圳研究生院光学检测与成像实验室, 广东 深圳 518055)

摘要 针对具有纤维状结构特征的生物组织(诸如肌肉、皮肤等),建立了包含球状散射体和具有取向分布的圆柱状散射体的仿体模型,并对偏振光在这类具有各向异性分布的复杂体系中的传输过程进行了蒙特卡罗模拟。给出了蒙特卡罗模拟程序的实现方法并验证了程序的可靠性,随后将程序用于模拟和分析一些肌肉组织的偏振成像实验。实验和模拟结果的一致性验证了用柱-球散射体混合的仿体模型来模拟各向异性生物组织的合理性。同时,通过模拟验证,得到了两个新的参量,分别可以用来表征组织样品中纤维的空间取向和组织样品的各向异性度。

关键词 散射;偏振成像;蒙特卡罗模拟;各向异性组织;仿体

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092907.1926

Simulation and Experiment of Polarized Light Propagating in Anisotropic Tissue

Yun Tianliang^{1,2} Zeng Nan² Li Wei^{1,2} Ma hui^{1,2}

¹ Key Laboratory for Molecular and Nanosciences of Education Ministry, Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² Laboratory of Optical Imaging and Sensing, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen Guangdong 518055, China

Abstract The propagation of polarized light in anisotropic medium like some fibrous tissues (e. g., muscle, skin, tooth) is investigated with Monte Carlo method. In the simulation, the myofibrils and collagen fibers are approximated as long cylinders and the tissue phantom is composed of spherical and cylindrical structures. We present the realization and validation of Monte Carlo program, and then apply the program to simulate and analyze polarization imaging process of muscle. The good agreement between the simulation results and the experimental results validates the assumption of the phantom composition and shows the feasibility of Monte Carlo method. This paper also presents how to describe tissue anisotropy according to two parameters derived from the polarization imaging.

Key words scattering; polarization imaging; Monte Carlo simulation; anisotropic tissue; phantom

1 引言

生物组织是一种强散射介质,大量的多次散射光子构成影响成像的背景噪声。为了排除多次散射光子的影响,偏振成像具有重要意义,它能提取出经过少量散射带有组织结构信息的光子^[1]。蒙特卡罗模拟是分析光子在强散射介质中多次散射的有效工具之一。1995年,Texas大学的Wang等将散射体

简化成球状粒子模型,模拟了光子在多层介质中传播的结果并公布了源代码^[2],带动了蒙特卡罗模拟在生物光学方面的应用,本文所用到的蒙特卡罗程序也参考了其程序框架。随后,一些研究小组开始在模拟中将光子的偏振信息加以考虑^[3,4],使得程序可以对偏振光的传输过程进行模拟。另一方面考虑到对于许多生物样品,除了球状散射体外还存在

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(60578003)、国家 973 计划(2006CB70570)和广东省自然科学基金(7301723)资助课题。

作者简介: 云天梁(1982—),男,博士研究生,主要从事光子散射模拟方面的研究。E-mail: ytl05@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 马辉(1959—),男,博士,教授,主要从事生物医学光子学方面的研究。E-mail: mahui@tsinghua.edu.cn

其他形状散射体,如皮肤和肌肉组织中的胶原纤维就是一种近似长柱状的散射体,于是一种新的散射体模型——无穷长圆柱体模型被加入体系进行研究,这方面的研究工作也有了相关报道^[5,6]。我们的工作是在这些研究基础上,对一个既有球状散射体又有无穷长圆柱状散射体的各向异性分布体系中偏振光散射的过程进行蒙特卡罗模拟,并将模拟用于组织偏振成像的分析。

2 偏振光散射的蒙特卡罗模拟程序

本文中蒙特卡罗程序的实现是在我们原有的模拟程序——偏振光在球状散射体中的散射模拟基础上进行改进的。如其他蒙特卡罗程序一样,程序从加载给定参数的光子开始,依次跟踪记录每一个光子,直到所有光子被吸收或者逃离介质。在模拟跟踪光子之前,我们根据模拟体系散射体的半径、折射率等参数,分别算出光子与散射体(包括球状和无穷长圆柱状)发生单次散射时,光子从不同角度入射,从不同角度出射所对应的缪勒(Mueller)矩阵。对此,我们增加了无穷长圆柱状散射体单次散射的理论模型^[7]。通过电动力学理论求解得出,光子以 ξ 角入射与无穷长圆柱状散射体发生散射后,将沿着以圆柱为轴、半角为 ξ 的锥面出射。先计算出以不同 ξ 角入射,不同 θ 角散射的 Mueller 矩阵,从而可以得到相函数,按照几率分布就能得到每次被圆柱状散射体散射后光子的传播方向。

我们用向量 $\mathbf{S}=[I, Q, U, V]$ 表示一个光子的偏振状态,根据入射条件确定起始跟踪点和传播的方向。由体系总散射系数和介质的吸收系数及随机数,确定下一次发生散射的位置。我们假定,两种形状的散射体与光子发生散射的几率取决于它们的散射系数之比。圆柱状散射体的散射系数与光子入射角度 ξ 有关, $u_s(\xi) = Q_{scn}(\xi) \cdot d \cdot C_A$ 其中 Q_{scn} 为散射效率, d 为圆柱直径, C_A 为圆柱散射体的浓度^[8]。因此对于圆柱状散射体的散射系数,需要通过给定的 $\xi=90^\circ$ 时的值算出。而体系的总散射系数近似为球散射体的散射系数与柱散射体在 $\xi=90^\circ$ 时散射系数之和。另外,考虑在真实组织中,纤维并非完全朝某个方向平行排列,而是在某一个方向角附近呈一定分布,近似可认为是高斯线形分布^[5]。因此,程序中模拟柱状散射体的空间取向分布是通过设定高斯线形的半高宽度 $\Delta\eta$ 来实现。发生散射时,先确定散射前的光子偏振态 \mathbf{S} 和入射方向,根据前面算出的不同散射体单次散射的 Mueller 矩阵,计算 $\mathbf{S}'=\mathbf{M}\times\mathbf{S}$, 得到散射后的

向量 \mathbf{S}' 和传播方向等信息。重复上一步,如此循环计算,直到光子权重小于某一设定阈值,或者光子逃逸出组织表面时就结束对光子的跟踪,返回记录另一光子,直到设定的光子数全部跟踪完毕。最后对从背向散射的光子进行统计分析。

3 蒙特卡罗模拟程序的验证

可将程序应用于测量各向异性介质中背向散射光光强分布的模拟。

图 1 为只有圆柱状散射体的体系中,通过模拟得到的背向散射光光强的空间分布图,其中圆柱半径为 $1\ \mu\text{m}$,沿 x 轴排列 $\Delta\eta=15^\circ$, $u_s(\xi=90^\circ)=300\ \text{mm}^{-1}$ 。图中在离入射点 $(0,0)$ 附近(间距小于 $0.5\ \text{mm}$)的区域,散射光强度等高线沿 y 轴拉伸,而在较远(间距大于 $0.5\ \text{mm}$)的区域,等高线则沿 x 轴拉伸。这与 Kienle 2004 年发表的结果相符^[5],从而也验证了程序的可靠性。

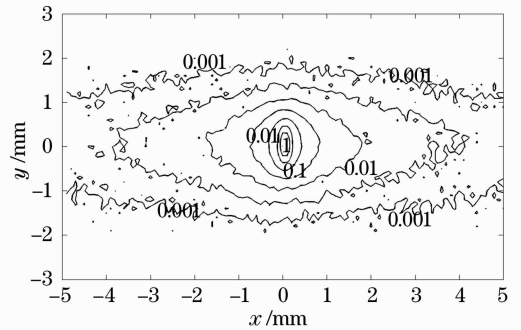


图 1 背向散射光强的空间分布 $R(x, y)$

Fig. 1 The spatially resolved reflectance

4 偏振成像实验的蒙特卡罗模拟

在本节中,将用蒙特卡罗程序模拟一个偏振成像实验^[9]并与实验结果进行对比。图 2 为偏振成像实验的装置示意图。在这个实验中,将肌肉组织样品平放在 $x-y$ 平面上,使组织中肌纤维平行 x 轴;入射光在 $x-z$ 平面内与垂直方向成 20° 斜入射,通过起偏器 P1

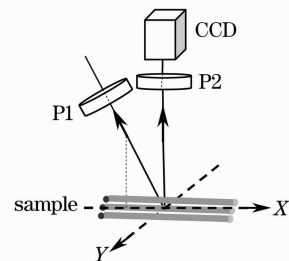


图 2 背向偏振光散射测量装置示意图

Fig. 2 Schematics of experimental setup

改变入射线偏振光的偏振角 θ_i , 最后背向散射光经过检偏器 P2 被探测器接收。通过测量入射光为不同的 θ_i 时背向散射光在 x, y 两个方向的光强差, 进行归一化后与起偏角进行拟合作图。

通过进一步对大量实验结果和模拟结果进行拟合, 发现偏振差 LDP 和检偏角 θ_s 、起偏角 θ_i 的曲线关系为

$$\text{LDP}(\theta_i, \theta_s) = I_1 \times \sqrt{\alpha \cos(4\theta_s - \varphi_1) + 1} \times \cos[2\theta_i - \varphi_2(\theta_s)] + I_2 C \cos(2\theta_s - \varphi_3) \quad (1)$$

从(1)式中可以得到参数 α 与体系的各向异性度密切相关。表 1 为一些实际生物样品通过上述实验测量拟合算出的 α 。

表 1 不同生物样品的 α 值

Table 1 Different α of different samples

Sample	α / %
Porcine muscle with regular alignment of fibers A	0.95 ± 7.4
Porcine muscle with irregular alignment of fibers B	0.63 ± 33.3
Porcine fatty tissue C	0.17 ± 52.9
Porcine liver D	0.07 ± 57.1

从表 1 中可看出纤维规则排列的肌肉组织 α 值最大, 其次是不规则排列的肌肉组织, 而可视为各向同性的脂肪组织和肝组织等 α 则接近于 0。从实验结果我们可以做这样一个合理猜想: 在组织中, 球状散射体所占散射粒子比例越大, 体系的各向异性度越小; 在同一比例组成下, 柱状散射体的取向涨落高斯分布越宽, 体系的各向异性度越小。 α 值基本上反映了体系各向异性度的大小。

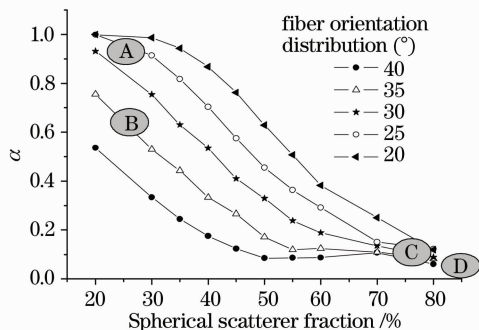


图 3 两种形状散射体不同比例组成和柱状散射体取向分布不同半高宽度时的 α (图中 A/B/C/D 标示的区域为表 1 中对应的不同生物样品)

Fig. 3 Dependence of α to the fraction of spherical scatterers and the width of the Gaussian distribution. (A/B/C/D corresponds to different samples listed in Table. 1)

图 3 为利用蒙特卡罗程序模拟改变两种形状散射体的比例组成, 改变纤维取向高斯分布的半高宽情况下的 α 值, 图中 A/B/C/D 标示的区域对应于表 1 中四种样品的微观结构组成。可以看到, 模拟结果和实验结果定性上基本一致, 即: 对于组成比例一定的情况下, 柱状散射体排列得越规则 α 越大; 而对于同样柱状散射体, 其在体系中占的比例越大 α 越大。该模拟和对应的实验结果正验证了我们所做的猜想, 拟合参数 α 确实能够体现组织仿体的各向异性度。对于进一步区分两种散射体组成比例和柱状散射体取向角度分布这两个因素对 α 的影响, 有待于进一步的研究模拟。

5 结 论

用蒙特卡罗的方法研究了偏振光在含有无穷长圆柱状和球状散射体的体系中传播的规律, 并将这种散射体系用来模拟肌肉、皮肤等纤维结构组织。通过改变两种散射体的组成比例, 粒径大小, 柱状散射体的取向分布等参数, 可以使得体系更接近于真实样品。通过与偏振成像实验的对比, 可以看出对于肌肉、皮肤等生物组织, 这样的仿体模型是合理的。在加入对光子偏振态的考虑之后, 通过蒙特卡罗模拟, 我们研究分析了背向散射光的偏振信息, 从而得到样品的结构信息。模拟和实验的结果都给出了一个反映组织样品各向异性程度的参量 α , 该参量与体系中球状散射体和圆柱状散射体的组成比例有关, 还与圆柱状散射体的取向分布宽度有关。肌肉皮肤等组织发生病变的过程可能伴随着肌原纤维的减少和排列无序化^[10], 我们期待这种变化能通过偏振成像拟合 α 值反映出来, 为前期诊断提供参考数据。

参 考 文 献

- Schmitt J M, Gandjbakhche A H, Bonner R F. Use of polarized light to discriminate short path photons in a multiply scattering medium [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(30): 6535~6546
- Wang L, Jacques S L, Zheng L. MCML-Monte Carlo modeling of photon transport in multilayered tissues [J]. *Comput. Meth. Prog. Bio.*, 1995, **47**(2): 131~146
- Jessica C. Ramella-Roman, Scott A. Prahl, Steven L. Jacques. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4420~4438
- Jessica C. Ramella-Roman, Scott A. Prahl, Steven L. Jacques. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part II [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10392~10405
- A. Kienle, F. K. Forster, R. Hibst. Anisotropy of light propagation in biological tissue [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22):

2617~2619

6 A. Kienle, R. Hibst . Light guiding in biological tissue due to scattering [J]. *Phys. Rev. Lett.* , 2006, **97**(1): 018104

7 C. F. Bohren, D. R. Huffman. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: John Wiley and Sons, 1983. 194~206

8 A. Kienle, C. Wetzel, A. Bassi. Determination of the optical properties of anisotropic biological media using an isotropic diffusion model [J]. *J. Biomed. Opt.* , 2007, **12**(1): 014026

9 Jiang Xiaoyu, Zeng Nan, He Yonghong *et al.*. Investigation of linear polarization difference imaging based on rotation of incident and backscattered polarization angles [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2007, **34**(6): 659~663
蒋啸宇,曾楠,何永红等. 基于旋转偏振角的线偏振扫描成像方法研究[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2007, **34**(6): 659~663

10 Janaka Ranasinghesagara, Gang Yao. Imaging 2D optical diffuse reflectance in skeletal muscle [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 3998~4007



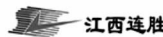
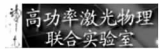
为了进一步提高我国光学期刊的学术水平和论文质量,吸引和催生优秀稿件,鼓励和培育优秀作者,促进我国光学、激光科技事业发展,《光学学报》《中国激光》《中国光学快报》(英文版)特发起“光学期刊优秀论文评选活动”。在光学泰斗王大珩先生的支持下,本活动特命名为光学前沿——“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动。

光学前沿——首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选结果在中国光学学会 2008 年学术年会上隆重公布。中国光学学会秘书长倪国强宣读了入选论文名单,中国光学学会理事长周炳琨院士、副理事长徐至展院士等为上海光机所周军等入选论文的作者代表颁发了证书和奖金。

根据“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动评选办法,光学前沿——第二届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动即将开始,欢迎广大作者提交论文信息,参与评选。评选规则请参考“大珩杯”光学期刊优秀论文评选办法。

编辑部将在 2009 年年底,对获奖作者进行表彰,并颁发证书和奖金。

主办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所
 联合主办单位:相干(北京)商业有限公司
 上海瀚宇光纤通讯技术有限公司
 协办单位:高功率激光物理联合实验室
 江西连胜实验装备有限公司
 普爱纳米位移技术有限公司



时间安排:参评论文统计截止时间:2009 年 8 月 30 日。

论文作者提交申请材料时间:2009 年 7 月 1 日~9 月 30 日(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明),请在中国光学期刊网上提交。

审核时间:2009 年 10 月 8 日~10 月 30 日。

详情请浏览:<http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm>

咨询电话:021-69918426 段家喜 编辑 duanjiaxi@siom.ac.cn

光学期刊联合编辑部

2009-5-1