

文章编号: 0258-7025(2004)02-0169-04

用蒙特卡罗法研究折射率对光在组织中的漫反射率和吸收比的影响

程树英^{1,2}, 沈鸿元², 陈美锋¹

(¹ 福州大学电子科学与应用物理系, 福建 福州 350002; ² 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002)

摘要 用蒙特卡罗(Monte Carlo, M-C)法分别对光在人肺组织和人体动脉三层组织中的传输特性进行了研究, 得到如下结果: 漫反射率 R_d 随着组织折射率 n 的增大线性减小, 而吸收比 A 随着组织折射率 n 的增大几乎是线性地增大。但对于多层组织来说, 越深层处的折射率对 R_d 的影响越小, 并且由于各层组织的厚度和光学特性不同, 各层组织的折射率对吸收比 A 的影响也有所不同。因此, 折射率是生物组织不可忽视的一个重要参数。

关键词 统计模拟; 折射率; 蒙特卡罗; 漫反射率; 吸收比

中图分类号 O 242.2; TN 012 文献标识码 A

Research on the Influence of Refractive Index on Diffuse Reflectance and Absorptance in Tissue by Monte Carlo Method

CHENG Shu-ying^{1,2}, SHEN Hong-yuan², CHEN Mei-feng¹

(¹ Department of Electronic Science and Applied Physics, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)
(² Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, The Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract The light propagations in human lung and three-layer artery are simulated by Monte Carlo method. It results that, with the increasing of the refractive index, the diffuse reflectance R_d is linearly decreased and absorptance A is almost linearly increased. But for multi-layer tissues, the influence of the refractive index in the deeper layer of the tissue on R_d is less, and the influence of the refractive index in the different layer of the tissue on A is different because each layer has its own thickness and optical property. Therefore, the refractive index is a very important parameter in bio-tissue.

Key words statistical analog; refractive index; Monte Carlo; diffuse reflectance; absorptance

1 引言

用蒙特卡罗(Monte Carlo, M-C)法研究光在组织中的传输是一种比较理想的方法, 它对光学性能、照明和探测结构都很少有限制。虽然用该方法研究光在组织模型中的传输报道很多^[1~5], 但所模拟的组织模型的光学特性参数多数是人为给定的, 并不代表实际组织的光学特性参数, 因此所得到的模拟结果并不能直接用于指导激光在生物医学中的应用。因为实际生物组织的光学特性参数是千变万化的, 研究光在实际生物组织中的传播更有意义。因

此, 本文利用已有的成熟的蒙特卡罗模型^[2]研究光在人肺和人体动脉等实际生物组织中的传播。由于目前只知道生物组织的折射率在 1.35 和 1.55 之间^[6], 没有具体的人体组织折射率的数据, 所以假设人肺和人体动脉的折射率也在 1.35 和 1.55 之间变化。着重研究组织折射率的变化对光在组织中的漫反射率和吸收比的影响, 确定折射率在生物组织光学参数中的作用。

2 蒙特卡罗算法的基本思想

收稿日期 2002-09-18; 收到修改稿日期 2002-11-20

基金项目 福建省教委基金(JB00087)和福州大学基金(2002-XQ-24)资助项目。

作者简介 程树英(1966—), 女, 福建武夷山人, 福州大学电子科学与应用物理系副教授, 博士, 主要从事光电子技术、组织光学等方面的研究。E-mail: sycheng@pub3.fz.fj.cn

蒙特卡罗算法的物理思想及其具体模拟过程已很成熟,这里仅简要介绍。

光子在组织中发生的散射和吸收的过程是一种随机过程,因此蒙特卡罗法可正确描述光在组织中的传播。单个光子的随机步长和随机行走方向通过相应的概率模型和随机数发生器产生的随机数来决定。光子的传输步长为

$$s = - \frac{\ln(\xi)}{\mu_t} \quad (1)$$

这里 ξ 为 0 和 1 之间均匀分布的随机数, μ_t 为衰减系数,它是吸收系数 μ_a 和散射系数 μ_s 之和。

光子在每一个随机位置会发生散射和吸收作用,作用后光子的权重由反照率(albedo = μ_s/μ_t)来决定,方向的偏移主要由 Henyey-Greenstein 相函数决定,它直接与相函数余弦平均值 g 因子有关。重复以上行走和作用的过程直到满足某种条件而使光子消亡。通过对大量光子的追踪得到光子在组织中传输行为的统计结果,从而计算出表面漫反射率、漫透过率及吸收比等光学参数。

在用蒙特卡罗方法模拟时,计算的光子总数和随机数产生的质量都会影响模拟的精度,为得到小于 5% 的统计误差,光子数至少为 10^4 个。

以下的模拟结果是利用成熟的蒙特卡罗模型^[2]计算得到的。因为该算法已被验证是正确、可靠的,所以就直接利用该算法进行模拟。在用 M-C 方法模拟时,为了得到比较高的精度,假设所有的入射光子数都为 10^5 个,参数 $dz = 0.01$ cm, $dr = 0.01$ cm。而其他的光学参数(如 n, μ_a, μ_s, g, d 等)下面将具体给出。

3 模拟结果和讨论

3.1 折射率对光在人肺组织中的漫反射率和吸收比的影响

人肺组织在波长 635 nm 的光学参数为^[7]: $\mu_s = 324$ cm⁻¹, $\mu_a = 8.1$ cm⁻¹ 和 $g = 0.75$ 。因为生物组织的折射率一般在 1.35 和 1.55 之间,所以人肺组织的折射率 n 也应该在 1.35 和 1.55 间变化。模拟时分别取值为 1.35, 1.40, 1.45, 1.50 和 1.55。同时假设组织厚度 d 分别为 0.05 cm, 0.1 cm, 0.15 cm, 0.2 cm 和 2 cm。则当组织厚度不同时,用 M-C 方法仿真出的漫反射率和吸收比随 n 的变化关系分别如图 1 和图 2 所示。

从图 1 可知,对每一确定的厚度,漫反射率 R_d

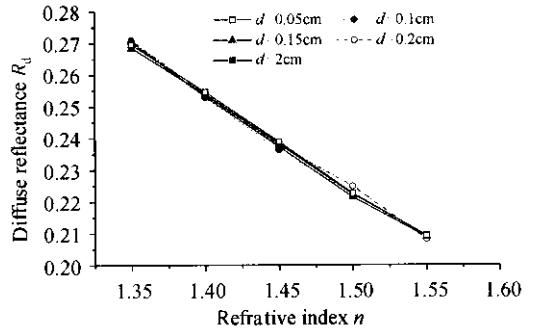


图 1 组织厚度不同时,漫反射率 R_d 与折射率 n 的关系

Fig. 1 Relationship between the diffuse reflectance and the refractive index for different tissue thickness

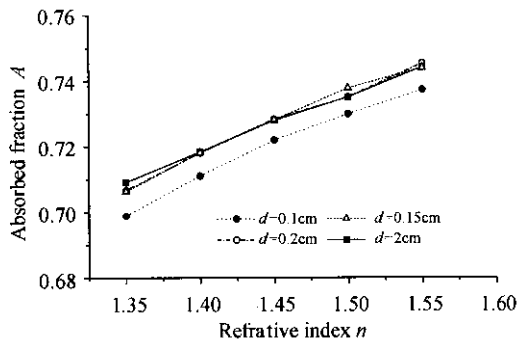


图 2 组织厚度不同时,吸收比 A 与折射率 n 的关系

Fig. 2 Relationship between the absorptance and the refractive index for different tissue thickness

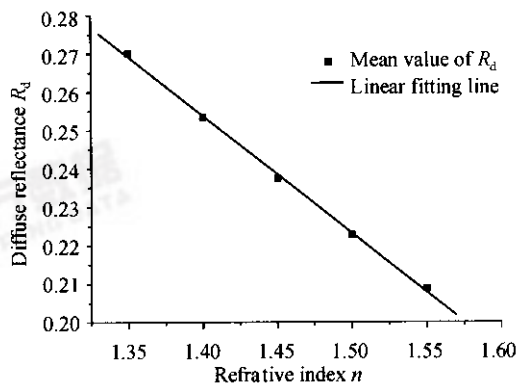


图 3 平均漫反射率 R_d 与折射率 n 的线性直线

Fig. 3 Linear line of the mean diffuse reflectance R_d and the refractive index n

随折射率 n 的增大而减小。当 n 从 1.35 增大到 1.55 时,相应的 R_d 约从 0.27 减小到 0.21,其漫反射比较严重。组织厚度对 R_d 的影响不大,随着组织厚度的改变,所对应的漫反射率 R_d 除了有些微小变化外,基本恒定。将每一个折射率 n 所对应的平均漫反射率值 R_d 和 n 进行线性拟合,得到线性方程为 $R_d =$

0.6831 - 0.3066 · n, 线性直线见图 3。因此,漫反射率随折射率的增大而线性减小。

从图 2 可见,对每一确定的人肺组织样品厚度 d , 吸收比 A 随着折射率 n 的增大几乎是线性地增大。当 d 小于 0.1 cm 时, A 受 d 影响较大; 当 d 大于 0.15 cm 时, A 基本上不受 d 影响, 即吸收达到饱和。这也说明 635 nm 的光在人肺组织中穿透到 0.15 cm 深度后吸收就达到饱和了。

表 1 人体动脉组织在 633 nm 的光学特性参量

Table 1 Optical property parameters of human artery at 633 nm

No. of layers	Name	μ_a / cm^{-1}	μ_s / cm^{-1}	g	d / cm
1	Intima	3.6	171	0.85	0.03
2	Media	2.3	310	0.90	0.10
3	Adventitia	5.8	195	0.81	0.02

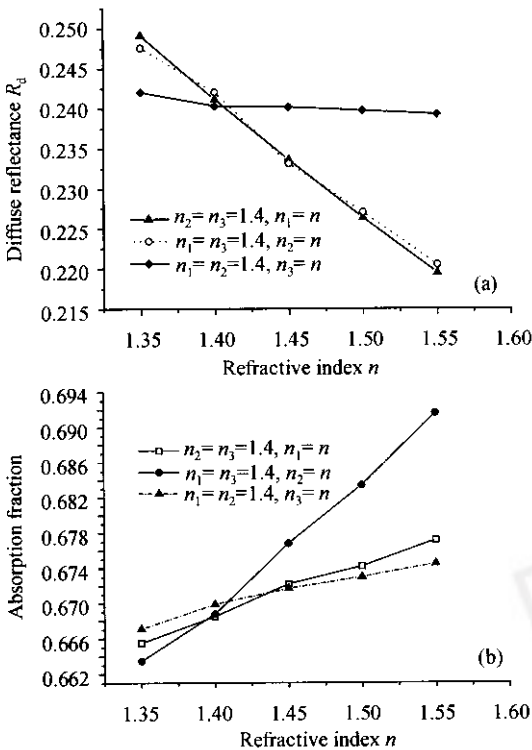


图 4 人体动脉组织的各层折射率 n 分别为 1.35 ~ 1.55 时, 漫反射率与折射率的关系(a)和吸收比与折射率的关系(b)

Fig. 4 Relationship between the diffuse reflectance and the refractive index n (a) and relationship between the absorbance and the refractive index n (b) when n in each layer of human artery changed from 1.35 to 1.55

3.2 折射率对光在动脉组织中的漫反射率和吸收比的影响

在 633 nm 处人体动脉组织的光学特性参量见文献 8 [表 1)。用 M-C 方法研究各层折射率 n 从 1.35 到 1.55 间变化(n 分别取值为 1.35, 1.40, 1.45, 1.50 和 1.55)时, 折射率对漫反射率和吸收比的影响。

折射率 n 在 1.35 和 1.55 间变化时, 漫反射率 R_d 和吸收比 A 相对于折射率的变化。从图 4(a)可见, 动脉组织的第一层和第二层的折射率 n 的变化对漫反射率 R_d 的影响比较大, 并且 R_d 随着 n 的增大而线性地减小。通过对 R_d 和 n 的关系进行线性拟合, 获得它们的线性方程分别为 $R_d = 0.4492 - 0.1485 \cdot n_1$ 和 $R_d = 0.4349 - 0.1385 \cdot n_2$; 而第三层 n 的变化对漫反射率 R_d 几乎无影响, 这是因为能穿透到第三层的光微乎其微。从图 4(b)可见, 动脉组织的吸收比 A 随折射率 n 的增大而增大, 但是对于第一层和第三层来说, n 的变化对吸收比 A 的影响比第二层的小, 这是由于各层的光学参数和厚度不同所致。

4 结 论

通过用 Monte Carlo 法分别对光在人肺组织和人体动脉三层组织中的传播特性研究, 得到如下结果: 1) 对于单层的人肺组织, 漫反射率 R_d 随着折射率 n 的增大线性减小, 而吸收比 A 随着折射率 n 的增大几乎是线性地增大。组织厚度 d 对 R_d 影响不大, R_d 几乎是恒定的, 而 A 在没有达到饱和时 A 随着 d 的增大而增大, 当 A 饱和时, 就不受 d 影响。2) 对于三层的人体动脉组织, 漫反射率随着各层折射率的增大而线性减小, 但越深层处的折射率对漫反射率的影响越小, 吸收比随着各层折射率的增大而增大, 但由于各层组织的厚度和光学特性不同, 它们对吸收比的影响不同。因此, 折射率是生物组织不可忽视的一个重要参数。

参 考 文 献

- 1 S. A. Prahl. Light transport in tissue [D]. PhD Dissertation , University of Texas at Austin , 1988
- 2 Lihong Wang , S. L. Jacques. Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues in standard C [R]. University of Texas M. D. Anderson Cancer Center , Houston , Texas , 1992
- 3 Xue Lingling , Wang Xinyu , Zhang Chunping *et al.* . The light distribution in the bio-tissue [J]. *Acta Photonica Sinica* , 2000 , **29** (10) 885 ~ 889
薛玲玲 , 王新宇 , 张春平等. 生物组织中的光分布研究 [J]. 光子学报 , 2000 , **29** (10) 885 ~ 889
- 4 Cheng Shuying , Shen Hongyuan. Monte Carlo simulation of light propagation in blood irradiated by surface sources [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* , 2002 , **13** (1) 94 ~ 97
程树英 , 沈鸿元. 用蒙特卡罗法研究面光源在血液中的传播 [J]. 光电子 · 激光 , 2002 , **13** (1) 94 ~ 97
- 5 Wang Jiangang , Wang Guiying , Xu Zhizhan. Monte Carlo method for research on imaging of inhomogeneity in the scattering medium [J]. *Chinese J. Lasers* , 2001 , **A28** (2) : 169 ~ 172
王建刚 , 王桂英 , 徐至展. 用蒙特卡罗法研究高散射介质中的成像 [J]. 中国激光 , 2001 , **A28** (2) : 169 ~ 172
- 6 Cheng Shuying , Shen Hongyuan , Zhang Ge *et al.* . A simple measurement method of the refractive index of biotissue [J]. *Chinese J. Lasers* , 2002 , **A29** (5) : 450 ~ 454
程树英 , 沈鸿元 , 张戈等. 一种简单的测量生物组织折射率的方法 [J]. 中国激光 , 2002 , **A29** (5) : 450 ~ 454
- 7 R. Marchesini , A. Bertoni , S. Andreola *et al.* . Extinction and absorption coefficients and scattering phase functions of human tissues *in vitro* [J]. *Appl. Opt.* , 1989 , **28** (12) 2318 ~ 2324
- 8 M. Keijzer , R. R. Richards-Kortum , S. L. Jacques *et al.* . Fluorescence spectroscopy of turbid media : Autofluorescence of the human aorta [J]. *Appl. Opt.* , 1989 , **28** (20) : 4286 ~ 4292

