

聚焦光束在半无限大生物组织内传播的 Monte Carlo 模拟

张 琳¹ 李晓霞² 祁胜文³

(¹ 华北科技学院基础部, 北京 101601; ² 河北工业大学电气与自动化学院, 天津 300130)

³ 浙江海洋学院数理与信息学院, 浙江 舟山 316000

摘要 分析了聚焦光束在介质中的传播情况, 利用 VC++ 语言编制了一套平圆光束聚焦在半无限大生物组织内传播的 Monte Carlo 模拟程序, 对几种不同参数值的情况进行了模拟, 通过对模拟结果的分析, 得出了平圆光束聚焦在半无限大生物组织内传播的规律。

关键词 生物光学; 生物组织; 聚焦光束; Monte Carlo 模拟; 吸收光子数密度

中图分类号 R318.51 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0417002

Monte Carlo Simulation of the Focused Beam Propagation in a Semi-Infinite Bio-Tissue

Zhang Lin¹ Li Xiaoxia² Qi Shengwen³

¹ North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China

² School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

³ School of Mathematics, Physics and Information Science, Zhejiang Ocean University,

Zhoushan, Zhejiang 316000, China

Abstract The focused beam propagation in turbid medium is analyzed. A Monte Carlo simulation model for simulating the focused flat circular beam propagation in a semi-infinite bio-tissue is constructed. Using this model, we study the absorbed photon density with different tissue parameters in the case of a focused flat circular beam injecting the tissue. The simulation results show the law of optical propagation in the tissue.

Key words biotechnology; bio-tissue; focused beam; Monte Carlo simulation; absorbed photon density

OCIS codes 170.3660; 170.5280; 170.1610

1 引 言

对于简单形式的入射光, 例如高斯光束和平圆光束以及无限细光束在垂直入射条件下, 光在生物组织中传播的 Monte Carlo 模拟, 目前已有成熟的软件模拟和计算结果^[1~4]。而在实际应用中, 很多情况下并不直接使用高斯光束或平圆光束, 例如在做光学相干层析(OCT)研究时, 对样品的照射使用聚焦光束; 在激光外科的应用中, 例如清除胎痣, 去掉文身等临床治疗中, 使用发散光束; 在进行有关生

物组织的散射特性的测量时, 为了避免镜面反射光的干扰而使用了斜入射光照射等。对于聚焦光束在生物组织中传播的研究还鲜有报道, 文献[6]给出了高斯聚焦光束在生物组织中的传播。本文报道了平圆光束聚焦在生物组织中的传播模拟, 利用 VC++ 语言编制了一套平圆光束聚焦在半无限大生物组织内传播的 Monte Carlo 模拟程序, 对几种不同参数值的情况进行了模拟, 并对模拟结果进行了分析, 得出了平圆光束聚焦在半无限大生物组织内传播的规律。

收稿日期: 2011-10-26; **收到修改稿日期:** 2011-11-28

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y1100088)和中央高校基本科研业务费(2011B021)资助课题。

作者简介: 张 琳(1975—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事生物组织中的光传播方面的研究。

E-mail: tengzhouzhang@163.com

2 理论分析

对于平圆光束聚焦在生物组织内的传播,与简单形式入射光的不同仅在于光子入射生物组织后的初始运动方向的不同,光子在生物组织内传播的处理与简单形式入射光在半无限大介质中的传播完全相同,在此仅引用其他文献^[1,2]中的结果。本文研究的是平圆光束垂直入射聚焦后在半无限大生物组织内传播,以入射光束中心为坐标原点建立了笛卡尔坐标系(见图1)。图中 z_f 表示混沌介质中焦点到表面的距离, $n = n_t/n_a$ 为混沌介质相对于周围介质的折射率, ρ_f 是光束在介质表面的半径。

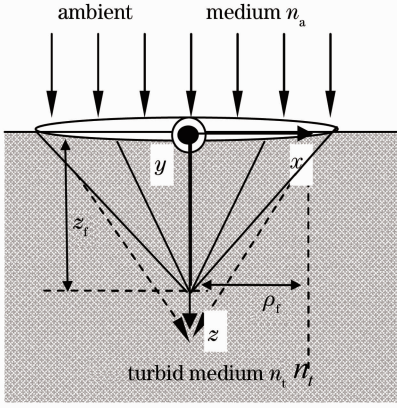


图1 光束入射混沌介质和笛卡尔坐标选取示意图(y 轴正方向指向纸面外)

Fig.1 Schematic of the Cartesian coordinate system and the light beam incident on the turbid medium (y -axis points outward)

对半径为 R 的准直平圆光束,其强度在半径内均匀分布,在光束入射到介质内部之前,光子在表面上是均匀分布在以 ρ_f 为半径的圆内,可以由下述方式来随机产生光子的初始位置 $(x, y, z=0)$ 。

$$\begin{cases} x = \rho \sin \phi \\ y = \rho \cos \phi \end{cases}, \quad (1)$$

式中

$$\begin{cases} \rho = \rho_f \sqrt{\xi_\rho} \\ \phi = 2\pi\xi_\phi \end{cases}, \quad (2)$$

式中 ξ_ρ 和 ξ_ϕ 为 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数。 ρ 和 ϕ 分别为光子的横向半径及光子与 x 轴的夹角。设光子的初始方向 (i_a, j_a, k_a) 为点 $(x, y, 0)$ 到焦点 $(0, 0, z_f)$ 的连线方向,可以得到如下关系式:

$$\begin{cases} i_a = -x/\sqrt{x^2 + y^2 + z_f^2} = -x/\sqrt{\rho^2 + z_f^2} \\ j_a = -y/\sqrt{x^2 + y^2 + z_f^2} = -y/\sqrt{\rho^2 + z_f^2} \\ k_a = z_f/\sqrt{x^2 + y^2 + z_f^2} = z_f/\sqrt{\rho^2 + z_f^2} \end{cases}. \quad (3)$$

设入射光子的初始权重为1,光子入射时,由于生物组织表面是一个与外界折射率不匹配的界面,将会发生镜面反射。设生物组织表层相对于外部介质的折射率为 n ,则镜面反射的反射系数 $R_{sp}(\theta_i)$ ^[5]为

$$R_{sp}(\theta_i) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{n \cos \theta_i - \cos \theta_t}{n \cos \theta_i + \cos \theta_t} \right)^2 + \left(\frac{\cos \theta_i - n \cos \theta_t}{\cos \theta_i + n \cos \theta_t} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中 θ_i 和 θ_t 分别为入射角和折射角。由于镜面反射的存在,使得光子的权重减小为 $w = 1 - R_{sp}(\theta_i)$ 。

3 光传播的模拟

光子进入生物组织后的传播所经历的过程与其他文献报道的类似,所用公式在文献报道中很容易得到^[2],在此本文直接引用了其结果。在上述笛卡尔坐标系下,假设光子经散射后到达了 $A(x_a, y_a, z_a)$ 点,光子的方向余弦为 (μ_x, μ_y, μ_z) ,则其后的方向余弦 (μ'_x, μ'_y, μ'_z) 由下式给出

$$\begin{cases} \mu'_x = \sin \theta (\mu_x \mu_z \cos \varphi - \mu_y \sin \varphi) / (1 - \mu_z^2)^{1/2} + \mu_x \cos \theta \\ \mu'_y = \sin \theta (\mu_y \mu_z \cos \varphi + \mu_x \sin \varphi) / (1 - \mu_z^2)^{1/2} + \mu_y \cos \theta \\ \mu'_z = -\sin \theta \cos \varphi (1 - \mu_z^2)^{1/2} + \mu_z \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中 θ 和 φ 分别为随机取样的散射角和方位角^[1]。

如果光子的运动方向与生物组织表面法向非常接近(如 $|\mu_z| > 0.99999$),那么光子的新的方向余弦为

$$\begin{cases} \mu'_x = \sin \theta \cos \varphi \\ \mu'_y = \sin \theta \sin \varphi \\ \mu'_z = \text{sign } \mu_z \cos \theta \end{cases}, \quad (6)$$

式中当 μ_z 为正值时,sign μ_z 为1,当 μ_z 为负值时,sign μ_z 为-1。

经散射后光子的可能位置由下式给出：

$$\begin{cases} x_a \leftarrow x_a + s\mu_x \\ y_a \leftarrow y_a + s\mu_y \\ z_a \leftarrow z_a + s\mu_z \end{cases} \quad (7)$$

式中箭头代表值的替换,将箭头右边表达式的值赋给箭头左边的变量。 s 表示光子散射步长的随机量,可由下式获得

$$s = \frac{-\ln \xi}{\mu_t} \quad (8)$$

式中 ξ 为 $(0,1)$ 之间均匀分布的随机数。 μ_t 为介质的总衰减系数。

光子每到达一个新的位置,由于其与生物组织的相互作用而发生的吸收导致光子的权重衰减,光子的一部分权重将留在当前位置的格元中。权重的损失量为 $\Delta w = w\mu_a/\mu_t$, 则光子的权重更新为 $w \leftarrow w - \Delta w$, 设光子的初始权重为 w_0 , 第 n 次相互作用后的权重为 w_n , 则有 $w_n = w_0 (\mu_s/\mu_t)^n$, 由此可知,在传输过程中,光子的权重呈指数形式衰减。携带新权重的光子在生物组织中继续传输。此处, μ_a 为介质的吸收系数, μ_s 为介质的散射系数, $\mu_t = \mu_a + \mu_s$ 为介质的总衰减系数。

光子在介质中经历多次的散射和吸收,其权重由于组织的吸收而不断减小,当其权重小于某一预

设值时,将停止对此光子的追踪,否则其将继续重复被组织的散射和吸收。

4 模拟结果及分析

利用本文编制的程序,模拟了几种情况下平圆光束聚焦在介质中的传播。基于生物组织在生理状态有所变化时,组织光学参数值如各向异性因子 g 、吸收系数 μ_a 、散射系数 μ_s 均会表现为不同的取值,而各参数值的不同必会影响到光在组织内的传播及吸收,反之通过光在组织中的传播特性可以去判断组织参数和生理状态的变化。为清晰看出各参数值的不同对光传播及吸收的影响,扩大了参数值的差异。在此选择性地给出了不同各向异性因子和不同焦距对平圆光束聚焦在平板介质中传播的影响模拟,另外还分析了介质吸收系数和散射系数对介质吸收光子数密度的影响。不同各向异性因子和焦距的选择是为了展示清晰而主观给出的。介质的其余参数值均为随意选择,且在实际正常组织参数值基础上将用于比较的参数值差异特意有所扩大,并不与实际生物组织参数对应,只用于此处的理论讨论。

图 2 给出了平圆光束经透镜聚焦到生物组织内部的情况下,生物组织中吸收的光子数密度沿 z 和 r 方向的立体网格图。本文中模拟光子数为十万

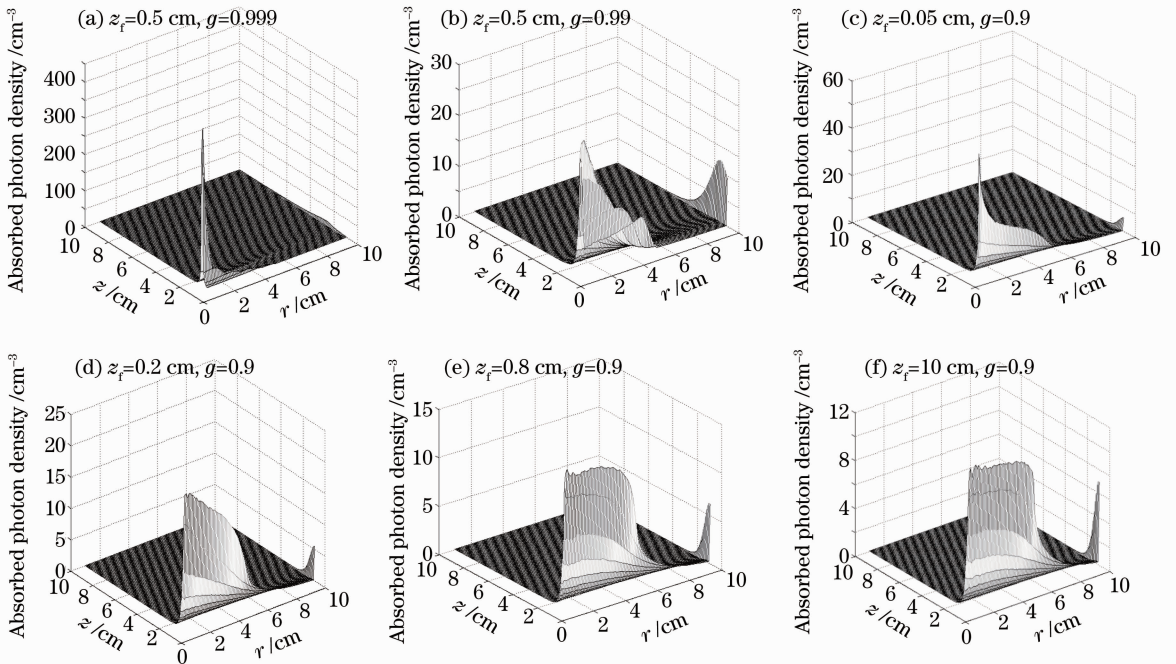


图 2 不同各向异性因子和焦距下生物组织中吸收光子数密度分布图

Fig. 2 Distribution of absorbed photon density in turbid media for the different anisotropic factors and focal lengths

个。模拟所取介质的相对折射率 $n=1.4$, 吸收系数 $\mu_a=0.5 \text{ cm}^{-1}$, 散射系数 $\mu_s=100 \text{ cm}^{-1}$, 介质厚度 $z=10 \text{ cm}$, 表面光束半径 $\rho_f=0.5 \text{ cm}$ 。图 2(a) 中各向异性因子 $g=0.999$, 图 2(b) 中各向异性因子 $g=0.99$, 两种模拟中焦点深度皆为 $z_f=0.5 \text{ cm}$, 代表了极强的前向散射条件下光吸收的分布。图 2(a) 中前向散射非常接近于 1, 因而其传播特性类似于在透明介质中的传播, 焦点区域相对较为集中, 光子吸收区域呈明显的圆锥形分布, 并且在焦点附近具有很强的吸收, 图 2(b) 显示由于 g 因子比图 2(a) 中的小, 光子的传播分散开来, 焦点区域扩展, 并且具有较大吸收的区域上移, 这源于散射的前向特性减弱, 能够向下方传播的光子数减少, 同时还可看出焦点附近的最大吸收急剧降低。

图 2(c)~(f) 中, $g=0.9$, 前向散射特性较图 2(a) 和 (b) 中更为削弱, 因此各图中焦点的形状不太明显。图 2(c) 中, 焦点在界面下方 $z_f=0.05 \text{ cm}$ 处, 距离介质表面很近, 根据 $\lambda^* = \frac{1}{\mu_a + (1-g)\mu_s}$ 计算得到介质内光子的平均自由程约为 0.1 cm , 可知焦点是处于一个平均自由程之内的, 光束还可以保持聚焦的形状, 但有相当多的光子超越焦点, 到达介质的更深处。在图 2(c)~(f) 中, 图 2(c) 中的最大吸收是 4 幅图中最高的, 这不仅是因为光子经历的散射次数少, 而且还由于界面处折射率不匹配, 界面附近被反射回组织内部的光子使得吸收增强。图 2(d)~(f) 随着焦距的增加, 光子吸收区域的分布愈来愈接近平圆光束垂直入射时的情况, 焦点变得越来越模糊,

吸收的范围也越来越扩展, 可以预期, 当焦点深度 $z_f \rightarrow \infty$ 时, 光子在介质中的传播将与平圆光束垂直入射时的情况完全一致。

另外要说明的是, 因光子在介质中的物理位置不会与本文建立的网格系统完全吻合, 当光子的权重经散射、吸收被记录进格元后, 光子还会超越网格系统继续传播, 在 z 和 r 方向的最后格元用来收集余留的光子权重。所以, z 和 r 方向的最后格元给出的不是相应物理位置的真实值。

图 3(a) 和 (b) 给出了不同吸收系数和不同散射系数下平圆光束聚焦在平板介质中的传播情况。图 3 的模拟对应于介质的相对折射率 $n=1.4$, 各向异性因子 $g=0.9$, 焦点深度 $z_f=0.5 \text{ cm}$, 介质厚度 $z=10 \text{ cm}$, 表面光束半径 $\rho_f=0.5 \text{ cm}$ 。图 3(a) 中吸收系数 $\mu_a=0.5 \text{ cm}^{-1}$, 散射系数 $\mu_s=50 \text{ cm}^{-1}$; 图 3(b) 中吸收系数 $\mu_a=2.0 \text{ cm}^{-1}$, 散射系数 $\mu_s=100 \text{ cm}^{-1}$ 。模拟结果显示图 3(b) 中最大吸收光子数密度强于图 3(a), 但光子在介质中能达到的最大深度则小于图 3(a), 这自然是因为图 3(b) 中介质吸收系数大, 散射系数小, 故而光子在介质中的吸收光子数密度增大, 但散射深度却小于图 3(a)。两图中光子都已散开, 不太能看出焦点的形状, 图 3(b) 中光子在 r 方向上的离散度要高于图 3(a), 结合图 2 的分析可见, 这与各向异性因子的取值有很大关系, 图 3(b) 中介质的散射系数高导致了其光子在 r 方向上的离散度更大。

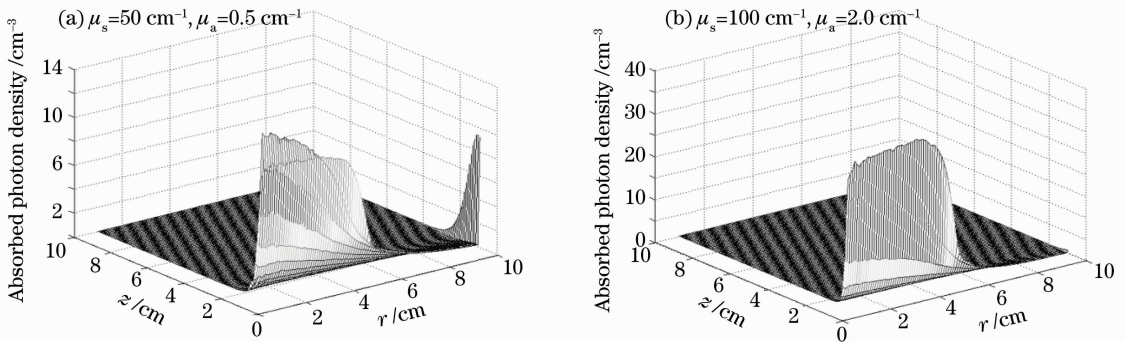


图 3 不同吸收系数和散射系数下生物组织中吸收光子数密度分布图

Fig. 3 Distribution of absorbed photon density in turbid media for the different absorptions and scattering coefficients

5 结 论

利用自编的 Monte Carlo 模拟程序, 对几种不同参数的平圆光束聚焦在半无限大介质中的传播进

行了模拟, 分析模拟结果, 得到以下规律:

1) 光束在介质中能否保持聚焦的形状, 很大程度上取决于各向异性因子 g 的取值, 随着 g 值的减

小,光子在介质中的分散度加大,更难以保持聚焦的形式;

2) 光子在介质中能到达的深度并没有随焦点深度的增大有明显变化,只是随焦点深度的增大,光子在介质中经历散射和吸收的次数增多,光子在径向的分散度加大,光束聚焦的形状越发不明显;

3) 介质的散射和吸收系数对光束能否保持聚焦没有决定性影响,但吸收系数增大会导致介质中焦点附近吸收光子数密度增大,而散射系数更多的是影响到光子相对焦点的扩散程度。

参 考 文 献

1 Lihong Wang, Steven L. Jacques, Liqiong Zheng. MCML—Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995, **47**: 131~146
2 Gao Di, Wei Shoushui, Ren Xiaonan *et al.*. Study on the light

propagation in biological tissues by Monte Carlo method[J]. *J. Biomedical Engineering Research*, 2009, **28**(4): 242~245
高迪,魏守水,任晓楠等. 光在生物组织中传播的蒙特卡罗模拟[J]. *生物医学工程研究*, 2009, **28**(4): 242~245
3 Zhang Lin, Wang Xinyu, Sun Meixiu *et al.*. Monte Carlo simulation for the light propagation in two-layered cylindrical biological tissues[J]. *J. Mod. Opt.*, 2007, **54**(10): 1395~1405
4 Wang Jiangan, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte-Carlo simulations for light propagation in striated scattering medium [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 346~350
王建岗,王桂英,徐至展. 光在分层散射介质中传输行为的蒙特卡罗模拟研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 346~350
5 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978. 61~64
玻恩,沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京:科学出版社, 1978. 61~64
6 Lin Lin, Zhang Mei, Zhang Huailing. Numerical simulation of focused optical beam in tissue samples [J]. *Chin. J. Med. Imaging Technol.*, 2010, **26**(12): 2375~2378
林林,张梅,张怀苓. 聚焦光束在生物组织中传输的数值模拟[J]. *中国医学影像技术*, 2010, **26**(12): 2375~2378

栏目编辑: 韩峰