

蒙特卡罗方法仿真光在多层结构农产品中的传输及试验研究

王忠义¹, 侯瑞锋², 黄 岚^{1*}, 徐志龙², 王 成², 乔晓军²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

摘 要: 通过对光与农产品相互作用物理本质的分析, 采用一种求解光子在生物组织中迁移规律的蒙特卡罗 (Monte Carlo) 计算方法, 并设计了基于 Windows 蒙特卡罗仿真软件。对大量光子进行仿真计算就可以获得漫反射率、平均光学路径、空间灵敏度图像等。利用液体模型的实测光学参数进行仿真, 其结果与试验结果符合。进一步对多层结构的农产品样品进行了蒙特卡罗仿真研究, 可为合理设计无损检测的传感器提供依据。

关键词: 蒙特卡罗仿真方法; 光子迁移; 漫射光; 农产品

中图分类号: TN247; TP319

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0001-07

王忠义, 侯瑞锋, 黄 岚, 等. 蒙特卡罗方法仿真光在多层结构农产品中的传输及试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 1-8.

Wang Zhongyi, Hou Ruifeng, Huang Lan, et al. Light transport in multi-layered farm products by using Monte Carlo simulation and experimental investigation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 1-8. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

光学无损检测技术在农业领域有着广泛的应用, 如农作物、农产品的形态和结构成像等, 特别是国内外研究者利用光谱技术对农产品定量分析取得了大量的研究成果。由于农作物和农畜产品对光具有散射和吸收, 而且是散射系数大于吸收系数的强散射介质, 要从复杂的漫射光中提取出有用的组织信息, 应深入研究光在生物组织中的输运规律, 以提高检测分辨率、检测精度。对光输运规律的研究, 可采用蒙特卡罗方法和光子输运方程。与光子输运方程相比, 蒙特卡罗方法适合于建立更接近于实际的、具有复杂几何形状的非均匀生物组织光输运过程的仿真模型。实际上, 蒙特卡罗仿真已成为组织光学中一种公认的非实验标准^[1]。利用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法不仅可以给出光穿透深度与光源到检测距离的关系^[2], 而且能对具有不同光学参数的组织进行仿真, 给出如平均光学路径、表面漫反射率和空间

灵敏度矩阵等信息, 已在人体组织血氧参数无损检测中应用^[3]。本文研究光子在具有多层结构的农产品中输运的蒙特卡罗仿真算法, 为农产品品质无损检测系统设计提供依据。

1 光学参数及蒙特卡罗 (Monte Carlo) 仿真方法

Monte Carlo (MC) 方法又称随机抽样技巧或统计实验方法, 其基本思想是建立一个随机模型, 通过大样本统计获得其中的一个或多个随机变量(或多个随机变量的组合)的期望值, 进而确定待定量物理量的值。Monte Carlo 方法可被用来研究各种粒子输运问题^[4]。由于光子在组织内的迁移本身就是一个随机过程, 因此完全可以用 Monte Carlo 方法正确地模拟。需要指出的是, Monte Carlo 仿真中既需要将光子视为弹性粒子, 可以与介质粒子发生弹性碰撞; 又需要考虑光在介质中传输和碰撞过程中的能量衰减。

1.1 农产品及生物组织的光学参数

描述农产品及生物组织的光学参数主要有折射率 n , 生物样品的折射率与水接近, 在 1.3~1.47 之间。吸收系数 μ_a , 其微观物理含义是光子在被吸收之前所走过的平均路径长度的倒数, 单位为 cm^{-1} 或 mm^{-1} 。介质对光的散射作用反映出组织结构的显微不均匀性, 组织光学中采用散射系数 μ_s 来表征介质对于光散射的能力, 其微观物理含义为光子在失去原来的迁移方向之前所经过单位路径长度上的衰减能力, 单位是 cm^{-1} 或 mm^{-1} 。为了描述光子包在组织内部被散射的方向特性,

收稿日期: 2006-12-22 修订日期 2007-02-04

基金项目: 科技部“十五”攻关 (02EFN216900720) 及 (2004BA210A03); 中国农业大学信电学院科研基金资助项目 (KY-06)

作者简介: 王忠义 (1968-), 副教授, 工学博士, 研究方向农业生物信息检测与处理。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: cau_wzy@vip.sohu.com

*通讯作者: 黄 岚 (1968-), 副教授, 工学博士, 研究方向嵌入式系统及应用; 农业生物信息检测与处理; 生物医学光子学。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: biomed_hl@263.net

引入了各向异性因子 g , 即光子包被散射的方向与原来行进方向夹角余弦值的均值。散射角在 $0 \sim \pi$ 区间均匀分布, 当 $g = 0$, 散射后的方向是各向同性, 即向各个方向散射的概率一样; $g = 1$ 时为前向散射; $g = -1$ 时为后向散射; $-1 < g < 0$ 时主要偏重于后向散射; $0 < g < 1$ 时主要偏重于前向散射。有时也将散射系数 μ_s 与各向异性因子 g 综合表示为约化散射系数 μ'_s , $\mu'_s = \mu_s \times (1 - g)$, (mm)。

1.2 蒙特卡罗仿真算法

光子进入组织后会多次发生散射, 其行进方向不断改变, 所经过的是一条曲折的传播路径。光子在组织内的迁移过程可以用随机迁移理论来描述, 即单个光子在迁移过程中不断发生碰撞, 每次碰撞不但伴有吸收, 还会发生改变迁移方向的散射。如果把一次散射碰撞作为一次迁移, 则每次迁移的步长是随机的, 由前一次迁移到后一次迁移的方向改变也是随机的。因此, 光子在组织内的随机迁移过程可以用 Monte Carlo 方法进行模拟和仿真。由于光子本身是不可分的, 因此在 Monte Carlo 仿真中所谓的光子其实是“光子包”的概念^[5], 同时具有弹性粒子特性和能量衰减特性。光子包是包含很多光子 ($h\nu$) 的能量集合体, 一个光子包代表着入射光中的一份能量。

蒙特卡罗仿真的基本步骤如下: ①初始化光子包, 包括光子包权重、初始位置、方向角、最小权重等; ②计算行进步长和方向; ③确定光子包运行状态和在当前位置光子包能量的衰减; ④重复②-③, 直至光子包能量全部被衰减被吸收或者逃逸出生物组织; ⑤开始跟踪下一个光子包。当所有的光子包被逐个模拟跟踪结束后, 仿真程序结束。在仿真中, 每一步光子包能量的衰减都被存储在特定的数组中, 并且可根据要求得到相关信息。流程图如图 1 所示。

光子在多层组织中迁移, 发生以下几种情况: 1) 在本层内迁移; 2) 迁移至相邻层; 3) 跨层迁移, 即越过相邻层迁至其它层。对于上述 2) 和 3) 会涉及的问题是: ①光子在各层之间经过界面时的处理; ②迁移时的方向余弦, 空间坐标的计算和修正, 在不同层中迁移路径及权重变化的修正^[6]。

在仿真过程中主要是涉及以下计算问题: ①迁移方向余弦的计算; ②光子迁移位置的确定; ③光子权重的计算。 P 点空间粒子, 当光子沿 Ω' 在 P 点与之相撞, 并发生散射, 散射方向 Ω , 设 Ω 方向余弦为 η_x, η_y, η_z , P 处坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 发生散射后方向余弦、空间坐标、权重可以用相关公式计算得到^[6,7]。对于具有多层结构的农产品生物组织的仿真还要考虑边界上的透射、反射处理。

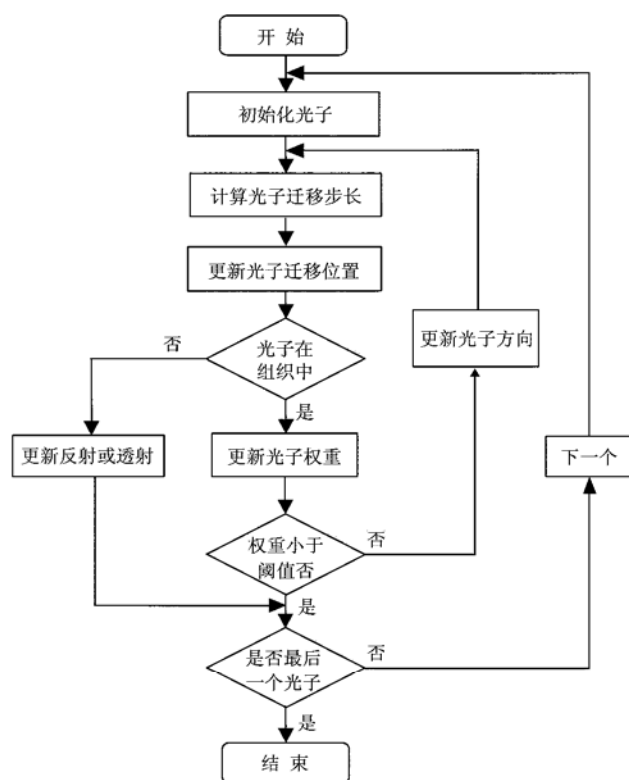


图 1 蒙特卡罗仿真流程图

Fig. 1 Flowchart of Monte Carlo algorithm simulation

1) 光子包权重的变化

光子包到达一个新的位置后(碰撞点), 在每一次碰撞过程中都会有一部分能量因为组织对其的吸收造成损耗, 在每个散射点, 能量权重可用公式(1)计算^[8]。

$$w - new = w - old \times \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a} \quad (1)$$

式中 $w - new$ —— 新能量权重; $w - old$ —— 碰撞前的能量权重。

2) 光子包的迁移步长

光子包的迁移步长是指它在两次碰撞之间自由飞行的距离, 即光子自由程。根据粒子迁移的自由程的概率分布特点, 迁移步长 s (mm) 可用公式(2)计算, RND 为随机数, 其取值范围为 $0 < RND < 1$ ^[8]。

$$s = - \frac{1}{\mu_s + \mu_a} \ln[RND] \quad (2)$$

3) 光子包的迁移位置计算

当光子包的迁移步长 s (mm) 和方向余弦确定后, 就可计算出光子包行进到的新位置。设当前坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 方向余弦为 (η_x, η_y, η_z) , 则光子包下一步所到达的位置的计算公式为公式(3), 迁移过程如图 2 所示。

$$\begin{aligned} x &= x_0 + s\eta_x \\ y &= y_0 + s\eta_y \\ z &= z_0 + s\eta_z \end{aligned} \quad (3)$$

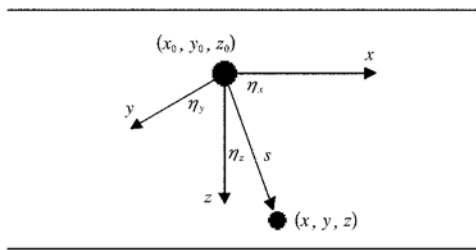


图2 蒙特卡罗仿真中光子迁移位置

Fig. 2 Position of a photon during migration using Monte Carlo simulation

4) 分层边界和交界处光子包的反射与透射及权重修正

由于生物组织与外界以及不同的生物组织介质之间折射率不同,当光子包经过散射行进到边界处时,将在边界处发生反射和透射。当前光子包在边界处的反射几率由 Fresnel 反射系数 $R(\theta_i)$ (无量纲) 决定^[8]:

$$R(\theta_i) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right] \quad (4)$$

式中 θ_i ——入射角(无量纲); θ_t ——透射角(无量纲),由折射定律给出。由公式(4)可以得到向下一层生物组织透射的几率 $T(\theta_i) = 1 - R(\theta_i)$ 。当光子包行进到边界并与之发生碰撞,此时可能发生反射也可能发生透射,或部分透射部分反射即光子包中一部分透射过当前的介质层而另一部分被反射回原来介质层,由于只能跟踪其中的一种情况,因而需要根据一个随机的概率来决定其到底会属于哪种情况。若 $RND < R(\theta_i)$,则认为在边界处发生了全反射,当 $RND \geq R(\theta_i)$ 时光子包透射出当前组织层。

若光子从第 i 层迁移至相邻层(第 $i+1$ 层或第 $i-1$ 层),在反射方式下,权重应按照公式(5)计算,在折射方式下权重修正见公式(6)^[8]。

$$w_{i\pm 1} = w_i \times R(\theta_i) \times \frac{\mu_{s,j\pm 1}}{(\mu_{a,i\pm 1} + \mu_{s,i\pm 1})} \quad (5)$$

$$w_{i\pm 1} = w_i \times (1 - R(\theta_i)) \times \frac{\mu_{s,j\pm 1}}{(\mu_{a,i\pm 1} + \mu_{s,i\pm 1})} \quad (6)$$

蒙特卡罗(Monte Carlo)方法的输出物理量包括反映出介质表面距光源 r 处的由检测器检测的漫反射率 $R(r)$, 漫透射率 $T(r)$, 光子平均路径长度 PL(mm) 及在每层中所经过的有效光学路径 PPL(mm), 光子最大穿透深度 Z_{\max} (mm) 以及空间灵敏度图像等。这些输出参数为研究者提供有用信息。

2 试验材料与方法

2.1 用于蒙特卡罗(Monte Carlo)方法的混浊介质模型

Intralipid-10% 溶液(500 mL 封装,成分为 1000 mL 注射用水中含有注射用大豆油 100 g,注射用卵磷脂 12 g,注射用甘油 22 g)来自深圳华瑞制药有限公司, Evans blue 固体粉末(10g 进口分装)来自国药集团化学试剂有限公司(上海)。将 Intralipid-10% 溶液稀释成 Intralipid-1% 溶液作为纯散射物质, Evans blue 溶液是取 515 mg Evans blue 固体粉末加生理盐水至 1000 mL 配制而成,作为纯吸收物质的母液。Intralipid-1% 溶液散射物质的散射系数由双积分球系统获得为 2.58 mm^{-1} , Evans blue 母液的吸收系数由 TU-1800SPC 紫外可见分光光度计获得为 1.3433 mm^{-1} ; 取 Intralipid-1% 溶液 500 mL、Evans blue 溶液母液 120 mL 配置成具有散射与吸收特性混合液体半无限大均匀单层样品模型,由双积分球系统^[9,10]实测得到此混合溶液的散射系数与吸收系数和各向异性因子,散射系数为 2.08 mm^{-1} , 吸收系数为 0.26 mm^{-1} , 各项异性因子为 0.65, 这些光学参数将用于蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真研究。

2.2 猪肉光学参数

选择猪肉样品进行蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真研究,其组织各层参数见表 1^[2,8,11]。

表 1 猪肉光学参数(各层折射率为 1.4, $g = 0$, 各向同性)

Table 1 Optical parameters of pork muscle

(refractive index of layers is 1.4, $g = 0$)

组织分层	光学参数		
	约化散射系数 /mm ⁻¹	吸收系数 /mm ⁻¹	各层厚度 /mm
皮层(第1层)	1.3	0.025	4
脂肪层(第2层)	1.2	0.003	10
肌肉层(第3层)	0.9	0.04	100

2.3 研究内容和方法

设计了基于 Windows 界面的 Monte Carlo 仿真软件,比文献^[6,7,12]所采用的命令行方式的界面友好可操作性强,其可靠性、准确性与其他研究小组的结果作了对比^[13,14],取得了软件著作权^[15]。通过输入光学参数和仿真的光子数目,检测距离,检测器形式等,运行程序、记录仿真输出结果,软件界面如图 3 所示,通过设置可实现对漫反射光和漫透射光检测仿真的研究,如图 4 所示。由双积分球系统^[9,10]实测得到光学参数;漫反射率由稳态空间分辨光谱测试装置实测得到^[16],检测装置如图 5 所示。

3 结果与讨论

3.1 光子迁移运动轨迹

利用仿真软件在农产品样品(本文以猪肉为样品,

样品参数见表 1) 的表面设置光源, 并在距离光源 r 处设置接收器, 则仿真软件可以显示光子迁移运动轨迹。尽管单个光子在组织内的迁移过程是随机的, 但大量光

子在组织中仍然存在其平均光子路径, 这个路径呈香蕉状, 其长度大于光源到检测器的直线距离, 上述物理概念可以由蒙特卡罗仿真得出的结果予以展示(图 6, 7)。

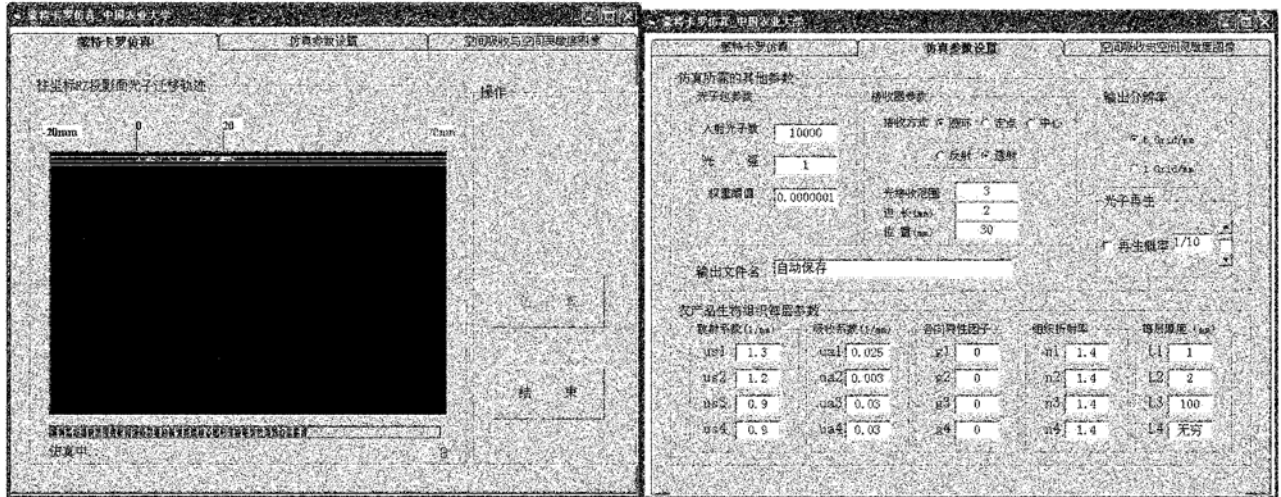


图 3 蒙特卡罗仿真软件界面

Fig. 3 Software interface of Monte Carlo simulation

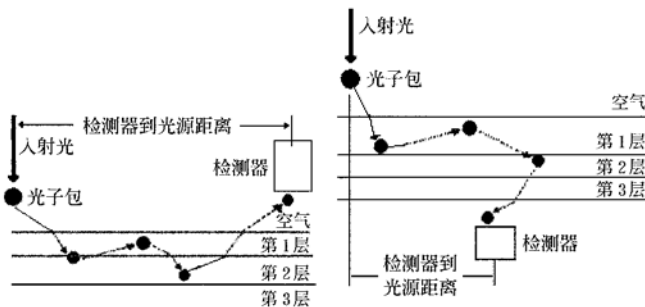


图 4 漫反射(左)与漫透射(右)的仿真示意图

Fig. 4 Simulation of diffused reflectance and transmission

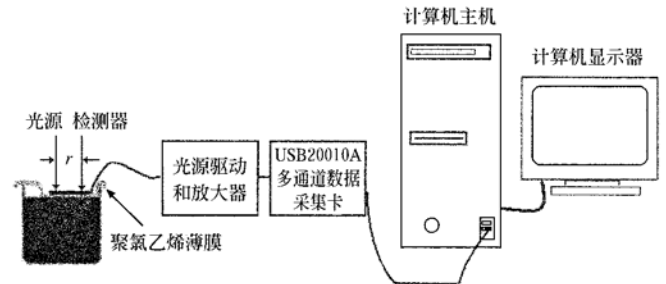


图 5 检测装置

Fig. 5 Schematic of experiment apparatus to measure the reflectance

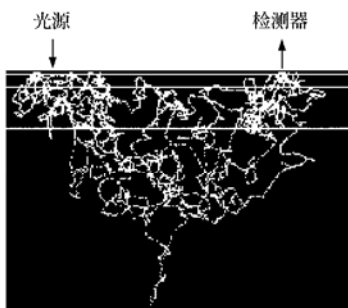


图 6 光子在猪肉样品中从光源到检测器的运动轨迹

Fig. 6 Photon migration trajectories from source to detector in tissue of pork calculated by Monte Carlo simulation

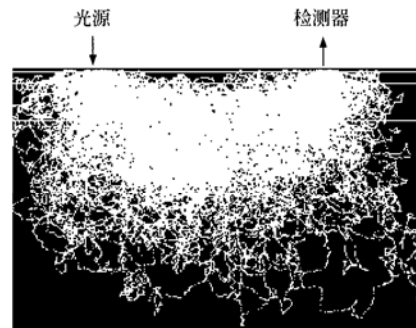


图 7 大量光子在猪肉样品中从光源到检测器的光子路径分布

Fig. 7 Shape region of photons-path-distribution from large numbers of photons from source to detector in tissue of pork calculated by Monte Carlo simulation

3.2 检测距离与平均光学路径关系的仿真结果

图8显示了平均光学路径 PL (mm) 与检测距离 r (光源到检测的距离, mm) 的关系。可见在样品光学参数不变时, 平均光学路径随检测距离的增加而增加, 而 PL/r 基本是一个常数, 这就是 Delpy 等研究者根据具有散射特性的生物样品的特点提出的 PF (Pathlength Factor, 路径因子) 的概念^[17], 但这个常数随样品的光学参数如吸收系数的变化而变化, 如图8所示。平均光学路径的仿真结果为应用光谱技术对农产品样品进行定量检测提供了有用信息, 当被检测的农产品样品物质含量改变时, 引起吸收变化, 则平均光学路径呈非线性变化, 在选择计算方法时必须予以考虑。

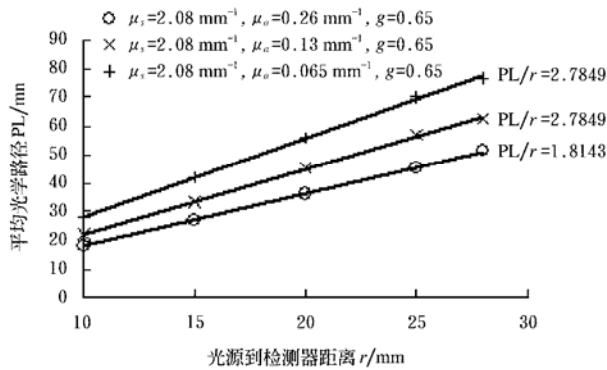


图8 Intralipid-1% 溶液、Evans blue 溶液母液配置成3种具有散射与吸收特性的混合液体对应的半无限大均匀单层样品模型的平均光学路径 PL 与检测器距离 r 的关系
Fig. 8 Relationship between the mean optical pathlength and distance r from source to detector in the phantom with intralipid-1% and pure Evans blue solution

3.3 漫反射率随检测距离变化的仿真结果

取 Intralipid-1% 溶液 500 mL、Evans blue 溶液母液 120 mL 配置成具有散射与吸收特性混合液体半无限大均匀单层样品模型, 若样品的 $\mu_s = 2.08 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_a = 0.26 \text{ mm}^{-1}$, $g = 0.65$, 在统计光子数范围内, 采用漫反射方式检测时, 检测器距离大于 20 mm 后已检测不到光子, 这是由于样品强烈地吸收光子, 使光子很难到达较远的地方, 对于不同的农产品应当合理的选择检测距离。图9给出了当 $\mu_s = 2.08 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_a = 0.26 \text{ mm}^{-1}$, $g = 0.65$ 使用蒙特卡罗仿真得到的漫反射率与实测漫反射率 $R(r)$ 的结果(以对数表示), 表明蒙特卡罗仿真方法能反映实际情况。当农产品样品的特性改变时, 相应光学参数也会变化, 漫反射率曲线也相应的变化, 图10显示了多层组织情况下漫反射率与光源到检测器距离 r 之间的关系。在多层结构情况下, 光子在迁移中由于吸收、散射作用, 光子包的能量减小甚至隐灭在迁移过程中, 不同检测距离上接收的光子包数目随检测距离

增加而减少, 且依赖于入射光子包数目, 只有能接收到的光子包数目达到一定数量才有统计意义, 入射光子包数目设置应大于 10^6 , 以保证仿真精度。

3.4 多层结构情况下最大穿透深度与光源到检测距离的关系

如果在屠宰前无损检测如猪肉等具有多层结构的农产品样品, 存在一定外层组织厚度下, 若要能够检测到深层组织, 光源到检测器距离要取得大些。肌肉检测时, 一般光源到检测器距离应 $\geq 30 \text{ mm}$, 本研究组已做过讨论^[2]。

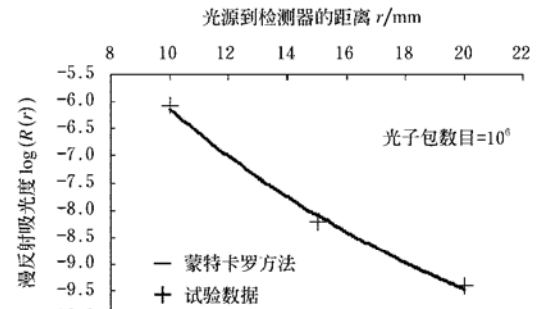


图9 单层组织的漫反射光度与检测距离的关系
Fig. 9 Relationship between reflectance of single layered sample and distance r from source to detector

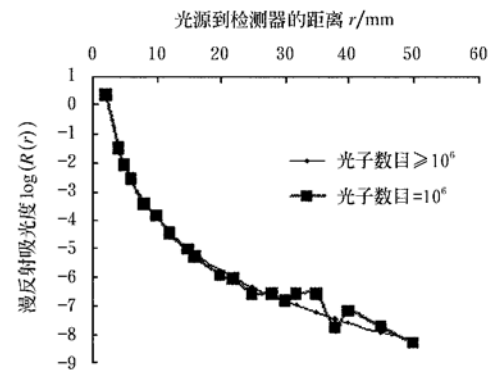


图10 多层结构样品下入射光子包数目对漫反射光度仿真结果的影响
Fig. 10 Influence of emitted photon packets on reflectance of multi-layered sample

3.5 接收光光密度分布图像

若许多光子包以单位能量不断射入介质, 当这些光子被距入射点 r 处的检测器收集到时, 其迁移过程中任一位置 (x_i, z_j) 处的空间灵敏度定义为^[18]:

$$E(x_i, z_j, r) = \sum_{k=1}^m W_k(r) n_k$$

式中 x_i, z_j ——像素点的离散坐标; i, j ——待测空间中的任意位置, 其离散坐标由图象中的像素点表示; n_k ——第 k ($k = 1, \dots, m$) 个光子包通过像素点 (x_i, z_j)

的次数; W_k ——第 k 个光子包在 r 处被测到的能量。可见空间灵敏度的概念是以各光子包被检测到的能量和它曾到达内部各像素点的次数来评价检测到的光信号携带介质内部各点信息的程度, 它反映了样品内的点 (x_i, z_j) 对表面 r 处接收到的光信号贡献大小。图 11 为具有多层结构的猪肉样品在 3 个检测距离时仿真所得的空间灵敏度图像, 所用的猪肉光学参数见表 1。图中 3 条白短线(其中一条在界面上)示意各层介质边界在 Z 轴(纵深方向)的位置, 空间灵敏度图像采用 256 灰度级黑白显示, 白色表示空间灵敏度最大, 黑色为空间灵敏度最小。当检测距离为 20 mm, 检测到的光主要是携带表层介质的信息, 空间灵敏度较高的空间点主要集中在光源与检测器附近, 有少量光子进入第三层中, 说明在 20 mm 以下的检测距离很难检测到第三层物质的信息。当检测距离增至 30 mm, 所检测的光开始受到深层组织参数的影响。空间灵敏度指标考察了各单位体积的介质对光的接收能力, 在空间灵敏度较高的区域, 其光学参数的改变在接收光信号中反映出来。接收光光密度分布图像在反射式检测方法中为农产品组织成像提供了非常有利的分析工具。

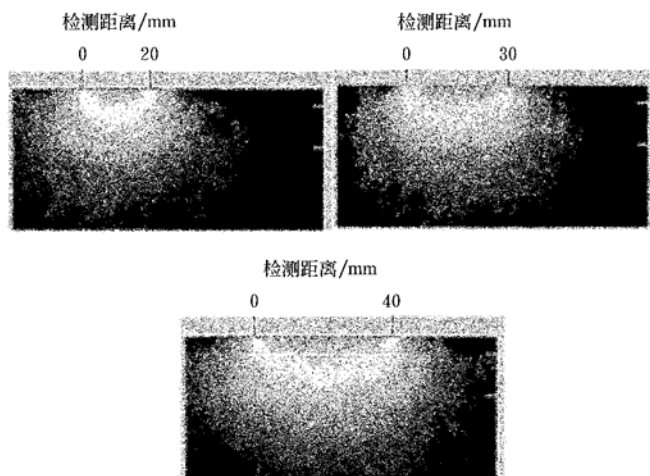


图 11 3 个检测距离时 Monte Carlo 仿真猪肉组织所得的空间灵敏度图像(光学参数见表 1)

Fig. 11 Spatial sensitivity profile images in the multi-layered tissue model for distance between source and detector at 20 mm, 30 mm, 40 mm calculated by Monte Carlo simulation(Optical parameters of muscle from table 1)

4 结 语

应用蒙特卡罗仿真方法研究了光子在具有散射与吸收特性混合液体的半无限大均匀单层样品模型和具有多层结构的猪肉样品中的迁移规律, 并提供了一种基于 Windows 界面的蒙特卡罗仿真软件。在运用蒙特卡

罗仿真方法对具有多层结构的样品进行研究时, 入射光子数目应 $\geq 10^6$, 以确保仿真精度。试验与蒙特卡罗仿真结果相符, 这表明蒙特卡罗方法可以应用于农产品光学检测仿真中, 并可以为农产品无损检测的传感器设计提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] Kienle A, Patterson M S, Dognitz N, et al. Noninvasive determination of the optical properties of two-layered turbid media[J]. Applied Optics, 1998, 37(4): 779– 791.
- [2] 侯瑞峰, 黄 岚, 王忠义, 等. 农产品组织中光输运规律的初步研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 12– 15.
- [3] 黄 岚, 田丰华, 丁海曙, 等. 用近红外光谱对组织氧测量方法的研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5): 379– 383.
- [4] Cashwell E D, Everett C J. A practical manual on the Monte Carlo method for random walk problems [M]. London: Pergamon Press, 1959.
- [5] 黄 岚. 近红外组织氧绝对量检测的研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [6] Wang L H, Jacques S L, Zheng L Q. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1995, 47: 131– 146.
- [7] Wang L H, Jacques S L, Zheng L Q. CONV-convolution for responses to finite diameter photon beam incident on multi-layered tissues [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1997, 54: 141– 150.
- [8] 侯瑞峰. 光输运规律在农产品无损检测中的研究及应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [9] 徐志龙. 农产品生物组织的光学参数检测研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [10] 徐志龙, 王忠义, 黄 岚, 等. 农产品光学参数测量的双积分球系统及其应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 244 – 249.
- [11] 许 棠, 张春平, 王新宇, 等. 用 CCD 测量生物组织的漫反射率和透射率[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(4): 392– 395.
- [12] 林 方, 丁海曙, 苏 畅, 等. Monte-Carlo 方法研究生物组织内部的光能分布[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(3): 20– 23.
- [13] Matsushita K, Homma S, Okada E. Influence of adipose tissue on muscle oxygenation measurement with NIRS instrument[J]. SPIE, 1997, 3194: 159– 165.
- [14] Wang L H. Rapid modeling of diffuse reflectance of light in turbid slabs [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(4): 936– 944.
- [15] 黄 岚, 王忠义, 侯瑞峰, 等. 软件著作权(BJ4014) [Z]. 农产品生物组织光子输运过程仿真软件 v1.0.

- [16] 姬瑞勤. 鲜肉深层水分的无损检测方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [17] Delpy D T, Cope M, Van der Zee P, et al. Estimation of optical pathlength through tissue from direct time of flight measurements [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1988, 33: 1433– 1442.
- [18] Okada E, Firbank M, Delpy D T. The effect of overlying tissue on the spatial sensitivity profile of near-infrared spectroscopy[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1995, 40: 2093– 2108.

Light transport in multi-layered farm products by using Monte Carlo simulation and experimental investigation

Wang Zhongyi¹, Hou Ruifeng², Huang Lan^{1*}, Xu Zhilong², Wang Cheng², Qiao Xiaojun²

(1. *College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;*

2. *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China*)

Abstract: The Monte Carlo method for simulating photon migration in sample of farm products was introduced by means of analysis of interaction between light and sample of farm product, and a software of Monte Carlo simulation based on Windows was designed. The reflectance, mean optical pathlength and spatial sensitivity profile image were obtained by simulation with large numbers of photons. Moreover, Monte Carlo method, the most exact solution for light transport in tissue, was studied for modeling photon random migration in single-layered and multi-layered samples. The simulation result is in good agreement with experimental data on tissue phantoms. The results show that Monte Carlo method can provide theoretical predication in the design of near-infrared optic sensor.

Key words: Monte Carlo simulation method; photon migration; diffusion light; farm products