

文章编号: 1001-3806(2011)05-0675-03

由漫射图像测量生物组织的光学特性

张连顺, 张晓晖, 王章祯

(中国民航大学 理学院, 天津 300300)

摘要: 为了获取生物组织的光学特性参量, 采用 CCD 无损测量系统来获得生物组织的漫反射图像, 通过数据分析获取组织表面的漫射光分布, 首先对具有不同光学特性参量的组织模拟液进行测量, 用实验所得数据训练神经网络, 并用另一组实验数据对神经网络的有效性和精确度进行了验证, 然后对牛肉、猪肉以及人体表皮组织在 633nm 光照下进行了测量, 由经实验数据训练的神经网络反演获得生物组织的光学特性参量。结果表明, 神经网络能够正确反演不同组织的光学特性参量, 并具有较高的精度。

关键词: 医用光学与生物技术; 光学特性; 漫射光; 神经网络

中图分类号: Q632 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.027

Determination of optical coefficients of biological tissue by means of diffuse image

ZHANG Lian-shun, ZHANG Xiao-hui, WANG Zhang-zhen

(College of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to acquire the optical properties (scattering and absorption coefficients) of biological tissue, the CCD non-invasive measurement equipment was used to measure the image of diffuse reflectance of biological tissue. The spatially resolved diffuse reflectance of the tissue was acquired by analyzing the image. One set of experimental data on tissue phantoms were used to train a neural network which was used to extract the optical properties. The accuracy of the neural network was investigated and validated by another set of experimental data. The optical properties of bovine muscle, pig muscle and human skin tissue under 633nm laser irradiation were also determined by the network which was trained by the experiment. The result shows the neural network can estimate the optical properties of different tissues with high accuracy.

Key words: medical optics and biotechnology; optical properties; diffuse light; neural network

引言

生物组织的光学特性参量主要包括吸收系数 μ_a , 散射系数 μ_s , 散射相位函数 p , 以及各向异性因子 g 和有效散射系数 $\mu_s' = \mu_s(1-g)$ 。近年来, 生物组织表面漫射光的测量成为无损测量生物组织光学特性的有效手段^[1-2]。许多研究倾向于使用光纤探头与组织表面进行不同距离的光接触, 或是利用 CCD 视频摄像技术来测量光的漫反射。相比而言, 光纤探测具有技术相对简单的优势, 但光纤探测只能在几个有限的点上进行测量, 因此, 可能会因组织的不均匀而造成测量上的偏差。此外, 探针与组织接触时产生的压力也可能影响到组织本身的光学特性。CCD 视频摄像技术则能

够实现对组织表面光分布进行所有距离范围内全面而准确的测量。

通过 CCD 获得的组织表面的漫射图像, 可以方便地得到组织表面的漫射光分布。传统由组织表面漫射光分布得到组织光学特性参量的方法有两种, 一种是利用蒙特卡洛模拟算法确定生物组织的光学特性参量, 但蒙特卡洛模拟算法需要较长的时间; 另一种是根据漫射近似方程进行非线性拟合, 来获取组织内部的光学特性参量^[3-5]。

神经网络具有相当强的输入-输出映射能力, 经过必要的训练, 可以很好地预测实验数据与所需参量之间的非线性关系, 从而避开了曲线拟合、样条函数插值等工作。与传统的拟合方法比较, 神经网络更加便于计算机实现, 具有学习规则简单、误差小、精度高等优点。本文中利用实验数据训练神经网络, 使其能够映射漫反射光强与光学特性参量之间的非线性关系^[6]。

1 材料和方法

1.1 实验测量

为了证明所用测量方法的正确性, 首先用已知光

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合基金资助项目(61079010)

作者简介: 张连顺(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为生物光子学。

E-mail: zhangls1963@yahoo.com

收稿日期: 2010-11-17; 收到修改稿日期: 2011-01-17

学特性参量的 20% 脂肪乳和墨水配置具有不同散射和吸收系数的组织模拟液。其中,20% 脂肪乳注射液由广州百特侨兴医疗用品有限公司生产,其主要成分为每 250mL 中包含 25g 大豆油、25g 中链甘油三酸酯、3g 卵磷脂、6.25g 甘油。在本实验中,20% 脂肪乳注射液在 633nm 光照下光学特性参量为 $\mu_s' = 28.13\text{mm}^{-1}$, $\mu_{a-\text{intralipid}} = 0.51\text{mm}^{-1}$ 。实验中所用墨水为上海法伦文具有限公司生产的高级墨水,在 633nm 光照下的吸收系数为 $\mu_{a-\text{ink}} = 40.52\text{mm}^{-1}$, 墨水为高吸收低散射介质,忽略其散射特性。为了覆盖人体皮肤组织光学特性参量的全部范围(正常组织与病变组织的光学特性参量范围),共配制了 36 份具有不同散射和吸收系数的模拟组织样品。

测量模拟组织表面漫射光分布的装置如图 1 所示。He-Ne 激光器发出的激光光束(波长 632.8nm, 功

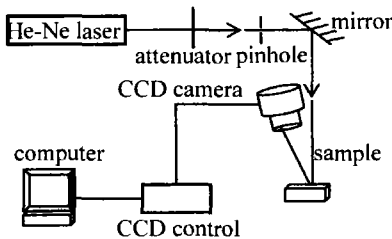


Fig. 1 Experimental setup for the measurement of spatially resolved diffusive reflectance

率为 11.13mW) 经衰减器、光阑(直径为 0.5mm)、反光镜垂直入射到组织样品的表面上。由于 CCD 摄像所需的人射光功率较小,一般在 $1\mu\text{W} \sim 100\mu\text{W}$ 范围内,因此,用光衰减器对入射光束功率进行衰减以防止 CCD 饱和,实验中选用的光束直径为 0.5mm。测量所用 CCD 型号为 Penguin 150CLM,分辨率为 1392 像素 \times 1040 像素,灵敏度设置为 200,曝光时间设置为 1/10s。光束入射到组织样品表面,其漫反射光形成以入射光束入射点为中心,光强逐渐向外衰减的圆对称分布,由 2 维 CCD 探测器以较小的角度(7°)成像(小的探测角度可避免垂直入射时样品表面的镜面反射对 CCD 成像的影响且其对结果产生影响可以忽略)^[7], CCD 输出图像数据传送到 CCD 控制器进行存储和简单计算,再送计算机作进一步的数据分析和处理,即可得组织表面的漫射光分布。

1.2 神经网络的实现

本装置所用神经网络为改进的反向传播网络^[8],如图 2 所示。它是 1 个 3 层网络,输入层的节点代表测得的漫射光分布,隐含层节点的数量由经验而定,这里用 18 个节点进行特征提取;输出层有 2 个节点,分别代表吸收系数和有效散射系数;训练函数为“traingdx”,目标误差设定为 0.0001。

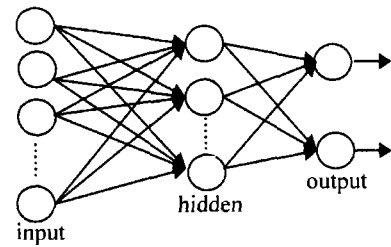


Fig. 2 Structure of back propagation network

实验中共测量了 36 组数据,其中 25 组用来训练神经网络,通过神经网络特有的自学习和记忆功能,使其获得通过光强反演光学特性参量的能力,然后用另外 11 组数据对训练过的神经网络进行测试。将 11 组光强导入神经网络输入层,输出光学特性参量与真实值相比较,测试结果用相对误差来表示: $f_{\text{relative-error}} = |(\mu_{\text{prediction}} - \mu_{\text{true}}) / \mu_{\text{true}}| \times 100\%$ 。

2 测量结果与分析

由实验数值训练的神经网络预测的 μ_s' 和 μ_a 的值的对比见图 3a 和图 4a,它们的相对误差见图 3b 和图 4b。

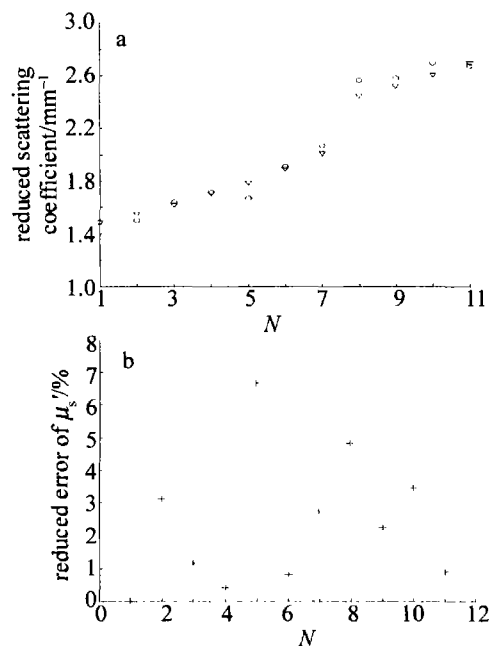


Fig. 3 a—comparison of the values of μ_s' estimated by network which trained by experimental data (circles) and the true values of the phantoms (triangle) b—relative errors of each point of μ_s' between true values and estimated values by the network

图示结果表明,神经网络预测结果和真实值之间的最大相对误差 $\mu_s' = 6.67\%$, $\mu_a = 7.65\%$ 。这样的误差范围是可以接受的,说明经过训练的神经网络具有很高的精确度。

为了进一步检验神经网络的精确性和适用范围,利用图 1 所示测量装置对牛肉、猪肉以及人体表皮组织进行在体测量。人体前臂内侧漫射图像及其对应的光强分布如图 5 所示。

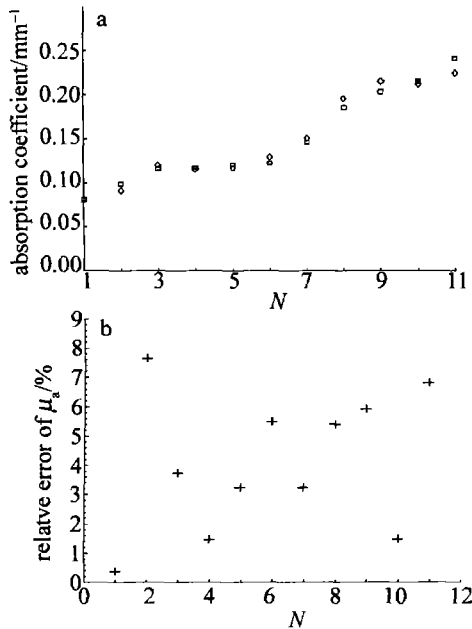


Fig. 4 a—comparison of the values of μ_a acquired from network which trained by experimental data (diamonds) and the true values of the phantoms (squares) b—relative errors of μ_a between true values and estimated values by the network

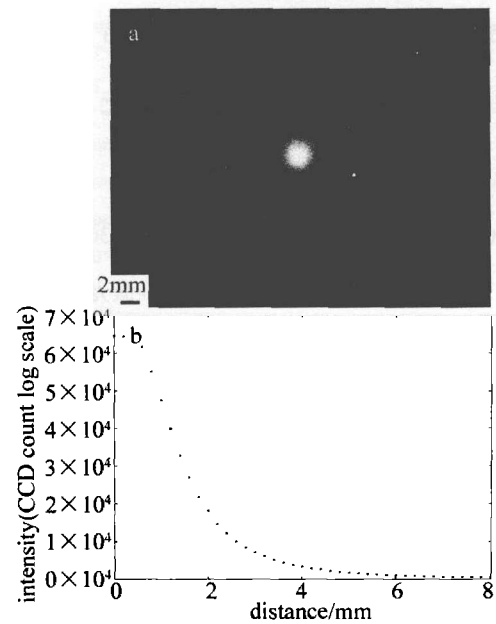


Fig. 5 a—a image of the sample's surface b—spatially resolved diffuse reflectance versus distance

所得漫射光分布经训练过的神经网络获得的组织光学特性参量与他人利用蒙特卡罗模拟算法或漫射近似方程进行非线性拟合所得结果的比较如表1所示。

Table 1 Comparison between the obtained results and the reference results

samples	bovine muscle		pig muscle		human skin/mm ⁻¹	
	μ_a/mm^{-1}	μ_a'/mm^{-1}	μ_a/mm^{-1}	μ_a'/mm^{-1}	μ_a/mm^{-1}	μ_a'/mm^{-1}
others	0.096	0.53 ^[7]	0.04	0.27 ^[9]	0.082	1.57 ^[10]
this paper	0.0879	0.631	0.0292	0.203	0.0835	1.467

从表中数据可以看出,神经网络所得结果与文献中所给出的结果基本一致。

3 结论

用已知光学特性参量的20%脂肪乳和墨水配置具有不同散射和吸收系数的组织模拟液,用实验装置测量其表面漫射光图像,通过数据分析获取组织表面的漫射光分布,并用获取的漫射光分布来训练神经网络,可以高效高精度地反演出光学特性参量。通过实验发现,反向传播网络还存在着学习和记忆具有不稳定性、收敛速度慢、网络隐含层的层数和单元数的选择需根据经验判定等不足。下一步将研究更精确的神经网络和用精度更高的实验数据供神经网络学习,进一步提高测量精度和速度,使神经网络技术在生物组织光学参量无损测量中发挥更好的作用。

参 考 文 献

[1] ZONIOS G, DIMOU A. Modeling diffuse reflectance from semi-infinite turbid media; application to the study of skin optical properties [J]. Optics Express, 2006, 14(19): 8661-8674.
 [2] TAN Y, HE J F, CAO J L, et al. High contrast and fast photoacoustic image of tissue [J]. Laser Technology, 2008, 32(5): 551-553 (in

Chinese).

[3] AMELINK A, STERENBORG H J C M, BARD M P L, et al. In vivo measurement of the local optical properties of tissue by use of differential path-length spectroscopy [J]. Optics Letters, 2004, 29(10): 1087-1089.
 [4] DIMOFTE A, FINLAY J C, ZHU T C. A method for determination of the absorption and scattering properties interstitially in turbid media [J]. Physics in Medicine and Biology, 2005, 50(10): 2291-2311.
 [5] DAM J S, DALGAARD T, FABRICIUS P E, et al. Multiple polynomial regression method for determination of biomedical optical properties from integrating sphere measurements [J]. Applied Optics, 2000, 39(7): 1202-1209.
 [6] BOLT R A, BOSCH TEN J J. Method for measuring position-dependent volume reflection [J]. Applied Optics, 1993, 32(24): 4641-4645.
 [7] ALWIN K, LOTHAR L, MICHAEL S P, et al. Spatially resolved absolute diffuse reflectance measurements for noninvasive determination of the optical scattering and absorption coefficients of biological tissue [J]. Applied Optics, 1996, 35(13): 2304-2314.
 [8] FEI SIKE Technology R & D Center. Neural network theory and MATLAB 7 realization [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 90-104 (in Chinese).
 [9] XIE Sh S, CHIN T Ch, HUANG L H, et al. Measurement of the optical properties of mammalian tissues in vitro [J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25(2): 97 (in Chinese).
 [10] GHOSH N, MOHANTY S K, MAJUMDER S K, et al. Measurement of optical transport properties of normal and malignant human breast tissue [J]. Applied Optics, 2001, 40(1): 176-184.