

学校编码: 10384
学号: 19920131152929

分类号密级
UDC

廈門大學

硕士学位论文

近红外光子在膝关节中传输的三维蒙特卡
洛仿真

Propagation of Near-infrared Photons in
Three-dimensional Knee Joint Model by Monte Carlo

Method

王晓玲

指导教师姓名: 陈延平副教授

专业名称: 机械工程

论文提交日期: 2016年 月

论文答辩时间: 2016年 月

学位授予日期: 2016年 月

答辩委员会主席:

评阅人:

2016年 5 月

近红外光子在三维膝关节中传输的 Monte Carlo 方法的研究

王晓玲

指导教师

陈延平副教授

厦门大学

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ ）课题（组）的研究成果，获得（ ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

() 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

() 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

膝骨性关节炎是一种常见的慢性关节疾病，早期检测膝骨性关节炎，力求在疾病的初期做出诊断是亟待解决的重要课题。近红外光谱技术因其对样本具有无损性、分析速度快等优点被广泛运用于生物医学领域，因此可将近红外光谱技术应用于早期膝骨性关节炎的研究。作为该领域的基础研究，光在膝关节组织中的传输特性和光与组织相互作用的机制越来越引起大家的兴趣。

本论文运用三维体素模型模拟膝关节组织，应用蒙特卡洛方法模拟近红外光子在膝关节组织中的传输，研究不同衰减系数和光源入射位置的情况下膝关节表面光强分布，为近红外光谱技术用于早期膝关节炎的临床诊断奠定一定的理论基础。研究内容主要包括以下几个方面：

一、将蒙特卡洛方法应用于早期膝骨性关节炎的诊断中。主要内容包括：根据膝关节组织病理特征及光学特性，提出近红外光谱技术检测早期膝骨性关节炎的原理；利用蒙特卡洛方法仿真近红外光子在膝关节中的传输，分析膝关节内部光子运动轨迹，得到碰撞骨组织后迁移出膝关节组织的信号光子和未碰撞骨组织直接迁移出膝关节组织的噪音光子；分析信号光子与噪音光子在膝关节表面的分布，光源从不同位置入射时膝关节表面信号光子的数目，以及信号光子数目随膝关节组织约化衰减系数变化的规律。

二、通过实验验证蒙特卡洛仿真结果的正确性。主要内容包括：根据膝关节光学参数制备膝关节组织模型，验证光源从不同位置入射时膝关节表面光强分布；改变膝关节组织的约化衰减系数，得到健康关节与病变关节的表面光强分布，验证仿真结果的正确性。

关键词：膝骨性关节炎；近红外光谱技术；蒙特卡罗方法

Abstract

Knee osteoarthritis is one of the most prevalent chronic diseases, which makes patients extremely suffering. Early diagnosis and cure could be very effective in protecting the structure and function of knee joints, making it the focus of the treatment of knee osteoarthritis. Near infrared reflectance spectroscopy has been widely applied to biomedical sciences because of its fast analysis speed and less damage to samples. Thus, near infrared reflectance spectroscopy is chosen to study knee osteoarthritis. As the basic research, the transmission properties and the mechanisms on the interaction of light and knee tissue have drawn greater attention.

In this dissertation, three-dimensional voxel model is used to simulate knee joint tissue and the transmission properties of the photons in knee joint tissue are studied with Monte Carlo method. The relationship between the incident location of light source and reduced attenuation coefficient of knee tissue are analyzed. It lays a certain theoretical foundation for the early detection of knee osteoarthritis. The main contents of the dissertation are as follows:

(1) Monte Carlo method is applied to detect early knee osteoarthritis. The following contents are studied: firstly, according to knee tissue's pathological and optical feature, the principle of near-infrared detection of knee osteoarthritis is described. Then, propagation of near-infrared photons in three-dimensional knee joint model is simulated and the proportion of photons which collide with bone tissue then migrate out of the muscle tissue and photons directly migrate out of muscle tissue are calculated. Finally, migration trace and distribution rule of photons are analyzed and propagations of photons are simulated when lights are injected from different locations. Light distributions in the face of knee joint issues are recorded when attenuation coefficient is altered.

(2) A series of experiments are conducted on the model and the results of MC are

confirmed with the experimental results.

Keywords: Knee osteoarthritis; Near-infrared light; Monte Carlo method

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 骨关节炎检测技术概述.....	3
1.3 近红外光谱技术概述.....	4
1.4 论文主要研究内容.....	5
第二章 光在三维组织结构中传输的 Monte Carlo 方法研究	7
2.1 光在生物组织中传输的数学模型.....	7
2.2 体素模型中的光子传输规则.....	10
2.2.1 体素模型形状与结构的描述.....	10
2.2.2 光子迁移时与体素边界的交叉点.....	11
2.2.3 体素边界处光子反射和透射.....	13
2.3 Monte Carlo 模拟中的随机变量抽样.....	14
2.3.1 步长抽样.....	16
2.3.2 散射方向的抽样.....	17
2.4 本章小结.....	18
第三章 Monte Carlo 方法在膝骨性关节炎诊断中的应用	19
3.1 膝关节组织结构与光学信息.....	19
3.1.1 膝关节组织结构与 KOA 病理特征.....	19
3.1.2 光与膝关节组织的相互作用.....	21
3.1.3 近红外光谱技术检测 KOA 原理.....	25
3.2 Monte Carlo 模拟.....	25
3.2.1 膝关节组织模型的建立.....	25

3.2.2 仿真流程图.....	27
3.3 模拟结果与分析	30
3.3.1 膝关节组织中光子运动轨迹.....	30
3.3.2 膝关节表面光强分布.....	31
3.3.3 光子信噪比与光源位置入射的关系.....	33
3.3.4 信号光子数目与约化衰减系数的关系.....	36
3.4 本章小结	40
第四章 近红外早期膝骨性关节炎检测的实验研究.....	42
4.1 实验	42
4.1.1 制备膝关节组织模型.....	42
4.1.2 搭建实验平台.....	44
4.2 实验结果及分析	47
4.2.1 膝关节表面光强分布.....	47
4.2.2 光源入射位置与膝关节表面光强分布的关系.....	48
4.2.3 约化衰减系数与膝关节表面光强分布的关系.....	49
4.3 本章小结	50
第五章 总结与展望.....	51
5.1 本文工作总结	51
5.2 研究前景展望	52
参考文献.....	53
致 谢.....	59
攻读硕士学位期间的研究成果.....	60

Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 Detection techniques of osteoarthritis	3
1.3 Near infrared reflectance technology	4
1.4 Major contents of the study	5
Chapter 2 Research on Monte Carlo method for optical transmission in three-dimensional tissue	7
2.1 Mathematical models of light transport in biological tissues	7
2.2 Transmission rules of photons in voxel model	10
2.2.1 The description of the shape and structure of voxel model	10
2.2.2 The crosspoints when photons hit the boundary of voxel model	11
2.2.3 Reflection and transmission in the boundary of voxel model	13
2.3 Random sampling	14
2.3.1 Step length	16
2.3.2 Scattering direction	17
2.4 Summary	18
Chapter 3 Application of the Monte Carlo method in the diagnosis of knee osteoarthritis	19
3.1 The structure and optical properties of the knee tissue	19
3.1.1 The structure and pathological feature of the knee tissue	19
3.1.2 Interaction of photons with knee tissues	21
3.1.3 The principle of near-infrared detection of knee osteoarthritis	25
3.2 Monte Carlo simulation	25
3.2.1 The establishment of the knee joint model	25
3.2.2 The flow chart of the simulation	27

3.3 Results analysis	30
3.3.1 Research on movement track of photon in the knee	30
3.3.2 Light intensity distribution in the face of the knee	31
3.3.3 The relationship between signal-to-noise ratio and incident location of light source.....	33
3.3.4 The relationship between the number of signal photons and reduced attenuation coefficient	36
3.4 Summary	40
Chapter 4 Experimental research and analysis	42
4.1 Experiment procedure	42
4.1.1 The establishment of the knee joint model	42
4.1.2 Experimental setup.....	44
4.2 Experiment result	47
4.2.1 Light intensity distribution in the face of the knee	47
4.2.2 Influence of incident position of light source on light intensity distribution	48
4.2.3 Influence of reduced attenuation coefficient on light intensity distribution	49
4.3 Summary	50
Chapter 5 Summary and forecasting	51
5.1 Summary	51
5.2 Forecasting	52
References	53
Acknowledgement	59
Publication	60

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 引言

骨关节炎（Osteoarthritis, OA）是一种常见的慢性关节疾病。美国流行病学研究调查表明^[1]：年龄在 55-64 岁之间的美国人中，有超过 13% 的人患有 OA，年龄在 65-74 岁之间的美国人中，约 17% 患有 OA，可见 OA 患者在中老年人群中十分普遍^[2]；OA 患者可能病变的关节有手部、膝盖、臀部和脊椎关节等部位，调查表明在 1040 的样本人群中，仅有 135 人的手部、膝盖、臀部和脊椎关节全部正常，在意大利的 OA 患者中，其中 30% 是膝骨性关节炎（Knee Osteoarthritis, KOA）患者，15% 患者手部关节有损伤，8% 是臀部关节炎患者。可见 KOA 患者占大多数，而膝盖和臀部关节的病变是导致中老年人丧失长期劳动力的主要原因，因此 KOA 尤其值得重视^[3]。KOA 的发生发展都要经历前期、中期、晚期（后期）三个阶段^[4]，如图 1.1 所示。其症状表现为膝盖肿胀、弹响和积液等，如患者不及时接受治疗，病情将恶化，同时会出现关节弯曲和不稳定等症状，患者休息时也会感到疼痛，负重时疼痛加重，甚至会引起关节畸形或者残疾，对中老年人的生活造成极大的困扰。膝关节早期病变时，关节软骨发生变化，这一变化难被患者察觉，以至于耽误了早期诊断与治疗，待膝关节进一步恶化时再治疗会给患者带来不必要的痛苦与烦恼。因此早期预防和治疗 KOA，力求在疾病的初期就能做出诊断是亟待解决的重要课题。

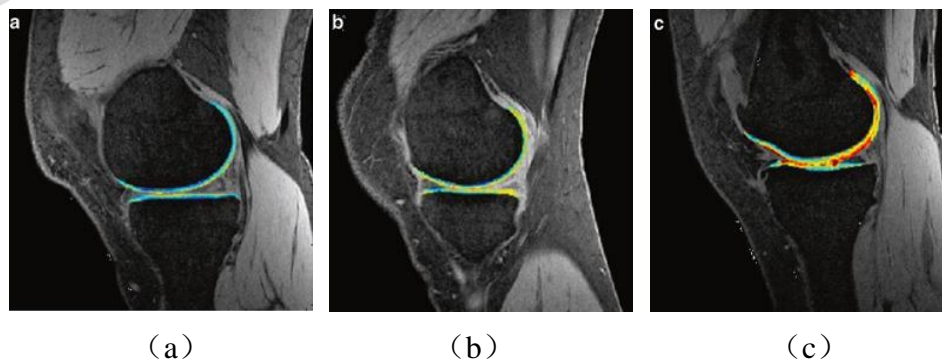


图 1.1 关节软骨的 T1 ρ 成像^[4]。(a) 健康关节，(b) 中度患肢，(c) 严重患肢

目前对 KOA 的诊断与评估主要通过观察临床表现症状、查看关节镜检查结果和影像学资料实现。在临床上，KOA 的诊断依据主要是患者的临床表现，医生依据其行医经验对患者做出诊断，该方法主观性较强且无法诊断出早期阶段的 KOA；关节镜检查被认为是诊断关节软骨受损的黄金标准^[5-6]，疗效高、创伤小，但是操作关节镜的医务人员必须具有熟练的技术，并且它视野较小，存在观察盲区，只能观察关节软骨的表面，无法了解关节软骨的内部情况。另外，关节镜检查具有创伤并会引起并发症，对为数众多的小关节不能使用，因此关节镜也不能用于常规诊断；诊断 KOA 的影像学方法主要有 X 光、CT、超声、MRI 等几种^[7]。其中，X 光和 CT 虽然对人体骨结构的变化比较敏感^[8-9]，但很难观测到软骨的损伤以及发生在滑膜及滑液中的早期炎症，它们主要用于骨关节炎的后期诊断。超声成像只在骨关节炎早期的恶化过程观测中起有限的作用^[10]，且检查结果与操作人员的经验有关，操作人员必须技术娴熟，因此超声成像很难作为一种常规检查早期膝关节炎的方法。MRI 对关节的异常变化非常敏感^[11-12]，尤其在注入了增强剂后其诊断效果更明显，但是由于 MRI 成本太高，也不适合作为一种膝骨关节炎的长期常规监测手段。因此找到一种方便、低成本、灵敏可靠的早期诊断方法具有重大意义。

生物医学光子学是一种运用光学技术对疾病进行诊断与治疗的方法，当近红外光照射到生物组织上，不同波长的光谱区中生物组织的某些不同成分的吸收系数和散射系数不同，即使是同一组织，在健康、癌变和局部缺血缺氧等不同的生理状态下对光的散射和吸收也表现出不同的特性。所以，生物组织的光学参数在医学诊断和治疗领域中有着很重要的意义。早期光学成像研究表明，当膝关节组织发生病变时，软骨组织的光学特性发生极大变化。如关节腔处的滑液逐渐变得浑浊，导致膝关节组织的散射系数和吸收系数增加。其次，骨关节发病后，关节软骨的胶原纤维消失，导致光程减少 19%-71%，同时伴随着粘多糖的消失，软骨的吸收和散射系数也会产生很大的改变。因此，通过研究膝关节光学特性参量可为组织病变的早期诊断提供依据。近红外光谱检测技术（Near Infrared Reflectance Spectroscopy, NIRS）是利用生物组织光学特性诊断疾病的一种方法^[13-14]，因其分析速度快、对样本具有无损性等优点被广泛运用于生物医学领域^[15]，

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.