

# 人眼晶状体建模与仿真研究综述

王博亮<sup>1,2</sup>, 刘卓<sup>2</sup>, 徐秀英<sup>1</sup>, 谢杰镇<sup>1</sup>

(1.厦门大学计算机科学系, 福建 厦门 361005; 2.国防科技大学电子科学与技术系, 湖南 长沙 410073)



**摘要:** 组织器官的建模仿真是生物医学工程研究的热点, 人眼作为人体最重要的感觉器官之一, 对其组成部分的建模与仿真研究具有重要的意义, 而晶状体仿真模型的建立是“国人虚拟眼”研究的重要组成部分。论述了国内外人眼晶状体建模仿真研究现状, 讨论了建模研究中几何建模与物理建模两大关键技术的研究方法及其发展趋势, 为进一步开展晶状体的建模仿真研究打下基础。

**关键词:** 晶状体; 建模; 仿真; 调节; 国人虚拟眼

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2006) 10-2709-03

## Modeling and Simulating of Human Crystalline Lens

WANG Bo-liang<sup>1,2</sup>, LIU Zhuo<sup>2</sup>, XU Xiu-ying<sup>1</sup>, XIE Jie-zhen<sup>1</sup>

(1. Department of computer Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Department of Electric Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The modeling and simulating of human tissues and organs is an attractive field in biological medical engineering. Human eye is one of the most important sense organ so it is significant to study its parts by simulating method. The researches on the field of modeling and simulating the human crystalline lens were reviewed and the two key technologies, e.g. geometry modeling and physical modeling were discussed, including their current studies and developing trend. At last, a brief comment of future development on the study of the lens was given.

**Key words:** human crystalline lens; modeling; simulating; accommodation; virtual Chinese human eye

## 引言

晶状体是人眼的重要组成部分,它位于虹膜、瞳孔之后,玻璃体之前,通过晶体悬韧带与睫状体联系。晶状体呈双凸透镜状,是重要的屈光间质之一,对光线有屈光作用,同时也能滤去一部分紫外线,保护视网膜。但它最重要的作用是通过睫状肌的收缩或松弛改变屈光度,使看远或看近时眼球聚光的焦点都能准确地落在视网膜上。这种为了适应看近距离,而增加眼的屈光力的现象,叫做“调节”。随着人年龄的增大,由于晶状体自身变厚变硬以及睫状体、悬韧带功能的下降,人眼的调节功能减退,将会产生“老视”现象,俗称“老花眼”。更有许多老年人由于晶状体蛋白变性、水肿、纤维之间出现水裂,水泡,晶状体由透明变混浊,严重时将导致失明,这就是白内障。随着全球人口的老龄化,发生老视的人群数量越来越庞大,而白内障的发病率以及患者人数也在不断上升,估计全世界目前有2千万人因此失明。老视、白内障等晶状体疾病的治疗研究具有非常重要的社会意义和经济价值。欲寻求有效治疗方法,首先要对晶状体、悬韧带和睫状体三者之间的相互作用关系有清楚的了解。但是由于晶状体及其周边组织包容在眼球内部,且结构非常精密,在活体状态下直接对其进行观测研究效果并不理想,晶状体

形变屈光的作用机理尚未十分清楚<sup>[1]</sup>。

随着计算机科学和生物医学的结合发展,物理建模和虚拟仿真技术被越来越广泛地应用于生物组织和器官的研究中,如心脏功能研究、人脑软组织变形、骨骼、牙齿,在眼科中也有不少应用,如人眼房水动力学、角膜等。使用仿真技术可以开展许多临床试验无法进行的研究工作,为生物医学工程的研究提供了新的强有力的研究手段,极大地丰富了该领域的研究内容。将建模仿真技术引入晶状体及其周边组织的研究中,开展晶状体屈光调节的模拟研究,可以帮助探寻调节的机理,对白内障手术进行仿真,降低手术风险,为老视和白内障的治疗提供重要的参考,可带来巨大的经济效益和社会效益。在赋予模型光学属性后,可以建立晶状体的功能模型,模拟产生晶状体的屈光调节,为实现具有基本视觉功能的虚拟眼提供重要的基础。

## 1 国内外研究现状

目前晶状体及周边组织的建模仿真还处在起步阶段,主要内容包括晶状体的外部形态的数学建模,晶状体调节时的形变研究。

由于晶状体自身形态比较规则,因此可用数学曲线来进行拟合。最早采用圆锥曲线来拟合晶状体的光学区,它无法拟合整个晶状体轮廓。Burd等<sup>[2]</sup>利用多项式加圆弧的形式来拟合,Shung<sup>[3]</sup>利用分段多项式来拟合。Kasprzak<sup>[4]</sup>在2000提出用双曲余弦函数来拟合,提供了新的思路。无论采取哪种形式,都要符合晶体轮廓外形的基本要求:曲线的曲率要

收稿日期: 2005-07-04

修回日期: 2006-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60371012); 卫生部科学研究基金—福建省卫生教育联合攻关计划项目 (WKJ2005-2-001); 厦门市科技计划项目 (3502Z20041044)。

作者简介: 王博亮(1945-),男,福建闽侯人,教授,博导,研究方向为虚拟现实与医学图像处理、生物信息检测与控制,计算机在医学工程中应用。

连续,符合晶状体外形的主要特征参数。对于睫状体和悬韧带,由于其形状非常复杂,因此无法用简单的曲线来拟合。未见有使用数学方法对其形态做分析的报道。

在调节形变研究方面,Weale<sup>[5]</sup>Wyatt 等<sup>[6]</sup>建立了简单的力学模型来模拟晶状体的形变;Burd 等<sup>[2]</sup>用有限元分析软件建立了晶状体的物理模型,并用于研究调节的机理。Shung<sup>[7]</sup>使用计算机辅助设计和有限元分析方法建立模型,用来研究晶状体受赤道部拉力下的形变。Power 等<sup>[8]</sup>使用非线性有限元建立了大形变的人眼模型,但仅用一个简单的几何刚体来模拟晶状体。目前还未有专门针对晶状体的手术仿真系统的研究报道。

厦门大学医学电子工程实验室研究组在虚拟国人眼器官方面开展了大量研究,取得了一系列国内领先的结果。2002 年—2004 年该研究组原创性制备了两只中国人眼的基础数据集,其中一只眼球组织切削并制成标本多达 646 切片;这是至今为止国内外一只眼球制作组织切片数量最多的成果,为构造国人虚拟眼奠定了物质基础<sup>[9]</sup>。在此基础上,开展了若干研究,包括:获得了眼球切片一套五种图像数据集,研制了虚拟眼的整体结构的三维图像软件,研制了眼球三维形态模型,提供眼的三维解剖结构信息;在多源晶状体数据融合的基础上建立了晶状体参数化模型<sup>[10]</sup>;在建立的中国人眼晶状体以及囊膜的形态的基础上,设计了弹簧模型,实现了对晶状体囊膜的撕囊力学仿真;提出了人眼前房水流动系统的动力学仿真模型<sup>[11]</sup>;建立晶状体—悬韧带—睫状体的有限元分析模型,对调节机制进行了初步研究<sup>[12]</sup>。

## 2 建模仿真研究的主要技术

### 2.1 几何建模

高精度的几何模型是建立准确的仿真模型的基础。几何模型依赖于临床实验研究所提供的数据,包括各种医学图像(如裂隙灯图像、电子显微镜图像、超声图像、MRI 图像等),对离体尸眼的相关部分等进行直接测量得到的数据。对于图像数据,涉及到图像分割、轮廓提取等技术,这些是图像处理研究的热点和难点。

组织器官在获得数据后,需要进行三维重建和可视化,主要技术分为两类:通过抽取中间面的表面绘制技术和基于体元的体绘制技术。但晶状体的几何建模有其特殊性:目前的研究都假设它是一个轴旋转对称体,从而只需要根据晶状体的截面数据进行旋转即可得到三维模型。这大大简化了可视化的工作。

虽然国内外学者在几何形态方面开展不少研究,但迄今为止,尚没有一项研究能够提供关于个体晶状体的完整的几何形态信息。各种数据来源于不同的晶状体和不同的测量方式。研究者在对这些数据进行融合时的取舍尚无统一标准,这不可避免的会引入较多的随意性。一种可能的方法是从数据中选取能够表达晶状体形态的若干关键参数,这样可根据

各种不同数据获得这些参数,建立晶状体的参数化模型,根据参数化模型和实际数据的差别修正模型的参数数量,这样逐步地建立起准确实用的模型(图 1)。

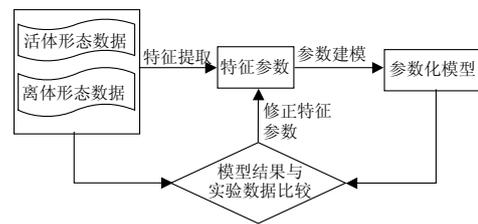


图 1 晶状体的参数化建模流程图

### 2.2 物理建模

物理建模是建模仿真的核心内容,通过建立准确的物理模型可以模拟晶状体在睫状肌和悬韧带拉动下的形变,以及在手术器械的作用下,各种组织产生的力反馈和变形。对于变形模型而言,人们曾提出了非线性变形的转换矩阵来实现物体的变形,但还是难以模拟现实世界中丰富的变形。因此近来的研究重点放在了基于物理学的变形模型上。为了提高物理模型的真实性和弹性力学的理论引入到晶状体建模仿真研究中,在应用上使用较多的是弹簧—质点模型和有限元模型<sup>[13]</sup>。

弹簧—质点模型是常用的用于模拟形变的方法,以其简单易行,计算量较小等优点,广泛应用于软组织变形实时仿真。该模型最大困难是对几何的定义,尤其是对于复杂的模型而言(如许多生物组织的形状非常复杂),为了提高模型的精度,需要使用高精度的弹簧节点网格,往往会出现一个节点有许多弹簧与之连接,从而出现复杂的结构,使节点参数的计算复杂度大大提高。一类自适应的解决方法是对模型进行局部动态加细,即:选择适当分辨率的模型作为基础模型,这种适当的分辨率是在问题所能允许的前提下,一个比较低的分辨率,目的是尽可能降低实时计算的开销,以保证问题的实时性要求,然后在感兴趣的局部或者按照某种准则动态的选取模型的局部,提高模型的局部分辨率,从而增强绘制的真实感或仿真的准确程度。

有限元法(Finite Element Method,简称 FEM)是从 20 世纪 50 年代以来随着电子计算机应用日益广泛而迅速发展起来的一种及其有效的通用数值解法,它的基本思想就是将连续的求解域离散成一组有限的单元的组合物,这样的组合物能模拟或逼近求解区域。FEM 现已广泛应用于固体力学、流体力学、传热学、电磁学、生物力学及其他数学物理领域,特别是生物力学有其固有的复杂性, FEM 可以更加淋漓尽致地发挥其自身的优势。目前有大量的研究报道采用 FEM 研究骨、软组织、心脏等的力学问题, FEM 也是研究眼球和晶状体力学特性的有力方法,而利用一些大型的通用有限元软件,如 ANSYS、MSC/NASTRAN、ABAQUS、ADINA、ALGOR 等,可以大大的提高分析效率。

有限元模型最大的问题是计算复杂度非常高。特别是当

几何模型很精细时, 网格节点数非常高, 使得计算量非常大。在对计算速度要求不高的场合, 如调节机制分析等, 使用高精度网格能够带来更准确的结果, 但是在对实时性要求很高的情况下(如进行虚拟手术仿真)就需要减少运算时间, 这就需要针对具体问题开发实用的优化算法, 使计算达到实时性。

建立物理模型必然要涉及到组织材料的物理属性, 国内外的学者对此进行了不少研究。由于建模仿真主要是对这些数据的应用, 因此对获取物理属性的研究本文不作详细分析。

### 3 结论

晶状体及其周边组织(悬韧带、睫状体)是人眼实现调节功能的主要部分, 随着年龄的增大, 人眼会出现老视和白内障等常见生理和病理现象。研究晶状体—悬韧带—睫状肌的相互作用机理对治疗老视和白内障具有决定性的意义。生物组织物理建模仿真是生物医学工程研究的新兴领域, 为生物医学的研究提供了强有力的手段。利用建模仿真技术对晶状体的形变调节进行研究, 可以为揭示调节机制提高参考, 从而为老视提供治疗手段; 同时建立白内障手术仿真系统, 提高医务工作者的临床手术水平, 促进我国医疗水平的发展, 具有很好的经济、社会效益。

### 参考文献:

[1] 李凤鸣. 中华眼科学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005.  
[2] H J Burd, S J Judge, J A Cross. Numerical modelling of the accommodating lens [J]. Vision Research (S0042-6989), 2002, 42(18): 2235-2251.  
[3] V W Shung. An analysis of a crystalline lens subjected to equatorial

(上接第 2708 页)

[33] A Kecskeméthy, D Strobach, G Steinwender, *et al.* Improvements in Measure-Based Simulation of the Human Lower Extremity [C]// IASTED Conference on Biomechanics, Rhodes, June 30-July 2, 2003.  
[34] F C Anderson, M G Pandey. A dynamic optimization solution for vertical jumping in three dimensions [J]. Computer methods in Biomechanics and Biomedical Engineering (S1025-5842), 1999, 2: 201-231.  
[35] F C Anderson, M G Pandey. Dynamic Optimization of Human Walking [J]. Journal of Biomechanical Engineering (S0148-0731), 2001, 123: 381-390.  
[36] F C Anderson, M G Pandey. Static and Dynamic Optimization Solutions for Gait Are Practically Equivalent [J]. Journal of Biomechanics (S0021-9290), 2001, 34: 153-161.  
[37] F C Anderson, M G Pandey. Individual muscle contributions to support in normal walking [J]. Gait and Posture (S0966-6362), 2003, 17: 159-169  
[38] K B Shelburne, M G Pandey. A dynamic model of the knee and lower limb for simulating rising movements [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering (S1025-5842), 2002, 5: 149-159.

periodic pulls [D]. Doctor of Philosophy. Arlington:the university of texas, 2002.  
[4] H T Kasprzak. New approximation for the whole profile of the human crystalline lens [J]. Ophthalmology Physiology Optics (S0275-5408), 2000, 20(1): 31-43.  
[5] R A Weale. Why we need reading-glasses before a zimmer-frame [J]. Vision Research (S0042-6989), 2000, 40(7): 2233-2240.  
[6] H J Wyatt. Application of a simple mechanical model of accommodation to the aging eye [J]. Vision Research (S0042-6989), 1993, 33(5/6): 731-738.  
[7] V W Shung, L A B Goan, T Huang. Analysis of an axisymmetric shell equatorially anchored with constrained volume[C]//16th ASCE Engineering Mechanics Conference, 2003.  
[8] E D Power, J D Stitzel, R L West, I P Herring, S M Duma. A nonlinear finite element model of the human eye for large deformation loading [C]// 25th annual meeting of the american society of biomechanics, San Diego, CA. 2001  
[9] 王博亮, 吴世辉, 谢杰镇, 等. 中国人虚拟眼研究进展[C]//中华医学会第九届全国眼科学术大会, 2004.  
[10] X Xu, Z Liu, B Wang, Y Chen, H Yang. Parametric 3D Visualization of Human Crystalline Lens based on OpenGL[C]//International Conference on Medical Imaging and Tele-medicine(MIT2005), 2005.  
[11] 鞠颖, 王博亮, 张铭志, 等. 应用人眼房水动力学模型研究葡萄膜巩膜通道房水排出影响的仿真方法[C]//中华医学会第九届全国眼科学术大会, 2004.  
[12] Z Liu, B Wang. Finite Element Modeling and Simulating of Accommodating Human Lens[C]//The 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2005.  
[13] 王勇军, 赵龙, 郭光友, 谭珂. 虚拟手术仿真器技术 [J]. 系统仿真学报, 2001, 13(3): 271-273.

[39] K B Shelburne, M G Pandey, F C Anderson, *et al.* Pattern of anterior cruciate ligament force in normal walking [J]. Journal of Biomechanics (S0021-9290), 2004, 37: 797-805.  
[40] M G Pandey. Computer Modeling and Simulation of Human Movement [J]. Ann. Rev. Biomed. Eng. (S1523-9829), 2001, 3: 245-273.  
[41] R R Neptune, S A Kautz, F E Zajac. Contributions of the individual ankle plantar flexors to support, forward progression and swing initiation during walking [J]. Journal of Biomechanics (S0021-9290), 2001, 34: 1387-1398.  
[42] R R Neptune, F E Zajac, S A Kautz. Muscle force redistributes segmental power for body progression during walking [J]. Gait and Posture (S0966-6362), 2004, 19: 194-205.  
[43] R R Neptune, F E Zajac, S A Kautz. Muscle mechanical work requirements during normal walking: the energetic cost of raising the body's center-of-mass is significant [J]. Journal of Biomechanics (S0021-9290), 2004, 37: 1-9.  
[44] R R Neptune, I C Wright. A method for numerical simulation of single limb ground contact events: application to heel-toe running [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering (S1025-5842), 2000, 3: 321-334.