

计算机生物力学模拟技术在脊柱侧凸矫形中应用的研究进展

顾苏熙, 李明

(第二军医大学附属长海医院骨科 200433 上海)

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2009.08.18

中图分类号:R682.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2009)-08-0631-03

脊柱侧凸的手术矫形策略包括诸多方面,如手术融合范围选择、内固定类型及位置等。正确的选择对获得最佳效果、减少并发症、促进术后功能至关重要。然而,手术策略的制定不仅要根据术者自身的经验及水平,更与患者侧凸类型、主弯 Cobb 角大小、僵硬度和代偿弯的特征等诸多因素密切相关。此外,由于侧凸手术治疗本身的不可逆性,目前关于各种手术矫形的策略、理论仍纷争不断,尚缺乏一种客观的、公认的治疗标准。

随着计算机技术的高速发展,医用生物力学研究逐渐成为医学研究中的重要手段,尤其是计算机生物力学建模技术的发展,给外科医生探索脊柱侧凸矫形机理提供了一个真实可靠的方法,成为理解脊柱侧凸复杂力学特性、探讨矫形策略异同、选择不同手术策略的有效工具。现就目前有关脊柱侧凸手术矫形的生物力学计算机模拟,特别是有限元模型构建方面的研究进展综述如下。

1 有限元模型的建立

手术矫形涉及到的力学机制非常复杂,由于组件刚度变化范围过大和矫形操作造成的大形变等技术限制,脊柱侧凸手术早期的有限元模型多较粗糙,仅能进行定性分析。20 世纪 70 年代, Belytschko 等^[1]首次建立了三维可变形数学模型,椎体、椎间盘及韧带分别采用刚性及柔性结构模拟,应用其分析 Harrington 棒纵向撑开侧凸矫形的过程,并与横向的侧方平移力相比较,但该模型未对其有效性进行任何验证。1973 年, Schultz 等^[2]报道对撑开矫形技术进行模拟,单纯使用力矩矫形,直接对椎体施加作用力,而未对矫形器械进行模拟。在此基础上, Schultz 等^[3,4]对各种矫形操作方式进行了深入分析,并划分成多个步骤进行模拟。通过对前人工作的总结, Ghista 等^[5]将脊柱侧凸手术矫形的生物力学分析划分为五个步骤:①建立脊柱侧凸有限元模型;②术前测定患者脊柱刚度,赋予有限元模型材料属性;③模拟不同外科器械的手术矫形,得出最佳手术方案;④完成有限元分析推荐的最佳手术方案;⑤比较矫形手术后脊柱的形态和模拟分析的结果。这基本概括了脊

柱侧凸矫形操作有限元模拟的基本过程。

2 在矫形方式选择中的应用

直至具有三维平面矫形效果的 C-D 系统问世,采用计算机模型模拟三维矫形的过程 and 对其力学改变进行分析逐步成为研究热点。学者们^[6]首先针对复杂的转棒 90° 矫形技术进行分析,将其过程大致分为三步:(1)利用平移方式将固定于椎体上的螺钉及钩与矫形棒相连,并设置棒与螺钉间为滑移及旋转关节;(2)然后将棒去旋转 90°,允许螺钉沿棒旋转和滑移;(3)锁紧螺母,限制钉棒间的自由度,放置另一侧固定棒及横连接,并释放旋转力以模拟回弹现象。模型中具体参数的设置参考临床,将下端椎的自由度限制在冠状面的原位旋转活动,上端椎则可在冠状面上自由活动,上端椎钉与棒间限制在棒纵轴平移活动。Gardner-Morse 等^[7]经研究发现 CD 技术的去旋转操作对单个椎体而言矫形效果不明显,更大程度上是对脊柱整体的去旋转矫形; Lenke 等^[8]临床研究也发现 CD 矫形术后对顶椎而言接近于平移矫形; Krismer 等^[9]和 Moens 等^[10]的影像学研究发现 CD 矫形后顶椎的横截面去旋转效果并不明显,旋转矫正率仅 20%。

针对原位弯棒技术,则可通过限制钉椎界面的所有自由度,钉棒间限制于纵轴上下及旋转两个自由度的方式来进行验证。2005 年 Dumas 等^[11]在考虑棒自身弹性形变以及多处应力施加和释放反应的矫形过程的同时,模拟了原位弯棒操作分别在脊柱侧凸及后凸畸形患者中的矫形过程。他们分别对一位胸椎后凸 50° 的 Scheuermann 氏病患者和右胸弯 58° 的脊柱侧凸患者进行模拟矫形分析,所得冠状面、矢状面和中轴面旋转角度的平均误差在 5° 之内,位移的平均误差则控制在 5mm 内,并认为有限元模拟原位弯棒操作是可行的。

针对 Crandall 等^[12]根据椎弓根螺钉操作临床经验提出的直接椎体平移技术(direct vertebral translation, DVT)治疗侧凸的效果,2008 年 Wang 等^[13]使用有限元法,在计算机模型上成功分析了该技术的生物力学优势,并指出 DVT 技术可以更好地优化内固定间应力分布,推拉长柄螺杆菌的操作对冠状面矫形具有良好效果,而锁紧步骤则对矢状面的控制至关重要。

随着非融合技术的提出及逐步运用,最近 Lalonde

第一作者简介:男(1982-),主治医师,博士在读,研究方向:脊柱外科

电话:(021)25072075 E-mail:Gu0212117@yahoo.com.cn

等^[14]对椎体骑缝钉技术(stapling techniques)进行了计算机模拟分析,他们比较了单枚钉与双枚钉两种方式的不同效果,并认为其矫形作用不明显,关键在于维持卧位的矫形效果;此外,双枚钉方式将增加椎间盘终板增生区 33% 的应力,对生长影响更多。

3 在置钉策略选择中的应用

近年来椎弓根螺钉系统在脊柱侧凸矫形领域得到了逐步推广,如何采用尽量少的融合节段、最恰当的置钉位置、合理选择万向或单向螺钉,达到更佳的矫形效果成为学术界争论的焦点。由于手术的不可重复性,对同一患者而言,不同手术方案无法比较其效果的优劣。计算机生物力学技术恰好提供了这样的研究平台。2007 年 Nault 等^[15]首次将模糊逻辑技术(Fuzzy Logic)引入制定脊柱侧凸手术策略的领域。他们根据临床已报道的评判标准构建筛选程序,设计了智能化计算机自动判定系统。在输入特定的侧凸患者的影像学检查结果后,自动对上胸弯以及腰弯是否需进行融合分别进行模糊逻辑运算的判定,试图解决临床上不同类型的侧凸正确进行选择融合的问题。这一尝试为未来自动化、智能化制定复杂脊柱侧凸病例的手术策略开创了先河。最近,Robitaille 等^[16]首次使用自主研发的 Spine Surgery Simulator 系统模拟比较了不同的矫形方案。在构建 5 个不同 Lenke 分型的青少年特发性侧凸患者的有限元模型后,请 32 名脊柱外科医生根据自身经验对每例患者分别制定了不同的手术方案。再将各种方案转换为各种边界条件和参数值输入该系统,分别进行模拟运算。成功比较了术者选择不同融合节段、使用万向或单向螺钉以及不同固定器械种类等对同一个患者矫形效果的影响。与临床实际矫形结果比较后认为该项技术为未来改进内固定器械、探索最佳手术方案提供了有力工具。学者们归纳了术中各步的生物力学特点,讨论了模型上施加任意矫形力的组合类型,以模拟达到最佳矫形效果,并将实际手术效果和模型预计的效果进行比较,在此基础上监控模型矫形过程中的力值和位移,从而设计最佳的矫形方案,为未来医学仿真矫形手术的实现带来了曙光。

4 在研究并发症中的应用

临床上对腰椎侧凸行前路矫形时,头端的螺钉拔出是一种常见的并发症。Rohmann 等^[17]通过脊柱侧凸三维有限元模型,模拟了 7 个不同矫形方案,分析置入物的力学性质后提出了降低头侧螺钉拔出风险的手术策略。他们认为对头端运动节段过度矫正使最头端的螺钉拔出力量加大,增加了螺钉拔出的风险。合理的手术方式是在脊柱中间运动节段给予强力矫形,在上下两端实施有节制的矫形,这样既可以有效地矫正 Cobb 角和旋转角度,又不增大最头端螺钉的拔出力量。Carrier 等^[18]则研究了肋骨短缩和延长术后对脊柱侧凸生物力学的影响,预测术后的长期矫正效果。该模型整合了术后韧带的松弛以及椎体和肋骨的

纵向生长和由于应力产生的骨重建效应,模拟了脊柱生长 24 个月的变化,结果发现顶椎楔形变从平均 5.2°减少到 3.8°,Cobb 角从 46°减少到 44°,24 个月后减少到 41°。然而,顶椎横截面旋转增加了 4°。这项结果确认了肋骨短缩和延长术的中远期效果。Rohmann 等^[19]最近利用脊柱有限元模型验证了一种新型非融合内固定器械的生物力学特性。

5 在研究麻醉体位影响中的应用

术中体位和麻醉对脊柱侧凸患者几何形态存在明确的影响,由于条件的限制,早期研究均集中在临床方面。Torell 等^[20]和 Klepps 等^[21]的研究表明,在非麻醉仰卧状况下侧凸患者 Cobb 角平均减少 24%。2000 年 Behairy 等^[22]和 Delorme 等^[23]分别研究发现,术中进行置钉矫形操作前,患者已获得了大约 33%~37%的矫正,即 10%~15%的矫正率是由于麻醉状态和暴露所致。有限元模型的实现使得对矫形术前体位摆放研究逐步深入。Duke 等^[24]建立了涵括脊柱、胸廓和骨盆的三维有限元模型,模拟不同的体位以及麻醉状态下脊柱的生物力学特性。模型使用软组织松弛来体现麻醉效果,和术中实际形态更加匹配。分析得出患者的体位和麻醉因素都会使脊柱的形态发生显著变化,提示在临床工作中要通过合理使用支撑垫,利用体位变化对脊柱形态的影响来提高手术效果。最近 Duke 等^[25]利用有限元模型分析了术中牵引大小、衬垫位置、高度以及麻醉等具体因素对脊柱侧凸患者矫形效果的影响,比较了 6 种不同体位摆放因素以及 10 种躯干整体位移指标,他指出除胸垫高度对胸椎后凸和平衡存在影响外,胸垫的位置更为关键。并提出一套最优化的术前体位摆放方案,矫正率由标准体位的 55%提高到 75%。

脊柱侧凸的手术矫形是一个复杂的过程,牵涉到很多因素,手术获得成功的关键与制定正确的矫形策略密切相关。生物力学是将力学应用于生物学,用力学原理研究生物体生命活动规律的一门学科,其中有限元技术是由多学科相互渗透而产生的一门边缘学科,为现代青少年特发性脊柱侧凸的手术治疗提供了一种非常有价值的评价和优化设计的方法。为改进矫形器械、优化手术方式、决定矫形策略和评估手术效果提供了可能,为未来实现脊柱侧凸的医学仿真手术进行了有益探索。

6 参考文献

1. Belytschko TB, Andriacchi TP, Schultz AB, et al. Analog studies of forces in the human spine: computational techniques [J]. J Biomech, 1973, 6(4): 361-371.
2. Schultz AB, Hirsch C. Mechanical analysis of Harrington rod correction of idiopathic scoliosis [J]. J Bone Joint Surg Am, 1973, 55(5): 983-992.
3. Schultz AB, Belytschko TB, Andriacchi TP, et al. Analog studies of forces in the human spine: mechanical properties and

- motion segment behavior[J].J Biomech,1973,6(4):373-383.
4. Schultz AB, Hirsch C. Mechanical analysis of techniques for improved correction of idiopathic scoliosis[J].Clin Orthop Relat Res,1974,100):66-73.
 5. Ghista DN,Viviani GR,Subbaraj K,et al. Biomechanical basis of optimal scoliosis surgical correction [J].J Biomech,1988,21(2):77-88.
 6. Lafage V,Dubousset J,Lavaste F,et al.3D finite element simulation of Cotrel-Dubousset correction [J].Comput Aided Surg, 2004,9(1-2):17-25.
 7. Gardner-Morse M, Stokes IAF. Three-dimensional simulations of the scoliosis derotation maneuver with Cotrel-Dubousset instrumentation [J].J Biomech,1994,27(2):177-181.
 8. Lenke LG,Bridwell KH,Baldus C,et al.Analysis of pulmonary function and axis rotation in adolescent and young adult idiopathic scoliosis patients treated with Cotrel-Dubousset instrumentation[J].J Spinal Disord,1992,5(1):16-25.
 9. Krismer M,Bauer R,Sterzinger W.Scoliosis correction by Cotrel-Dubousset instrumentation:the effect of derotation and three dimensional correction[J].Spine,1992,17(8):S263-S269.
 10. Moens P,Vanden Berghe L,Fabry G,et al.The Cortel-Dubousset device:prospective study on derotation[J].Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot,1995,81(5):428-432.
 11. Dumas R,Lafage V,Lafon Y,et al. Finite element simulation of spinal deformities correction by in situ contouring technique[J].Comput Methods Biomech Biomed Engin,2005,8(5):331-337.
 12. Crandall D,Morrison M,Baker D,et al.Adult scoliosis correction by direct vertebral translation technique:2 year clinical and radiographic results[J].Spine J,2005,5(4):S118.
 13. Wang X,Aubin CE,Labelle H,et al.Biomechanical modelling of a direct vertebral translation instrumentation system: preliminary results[J].Stud Health Technol Inform,2008,140: 128-132.
 14. Lalonde NM,Aubin CE,Pannetier R, et al. Finite element modeling of vertebral body stapling applied for the correction of idiopathic scoliosis:preliminary results [J].Stud Health Technol Inform,2008,140:111-115.
 15. Nault ML,Labelle H,Aubin CE,et al. The use of fuzzy logic to select which curves need to be instrumented and fused in adolescent idiopathic scoliosis:a feasibility study [J].J Spinal Disord Tech,2007,20(8):594-603.
 16. Robitaille M,Aubin CE,Labelle H. Effects of alternative instrumentation strategies in adolescent idiopathic scoliosis:a biomechanical analysis[J].J Orthop Res,2009,27(1):104-113.
 17. Rohlmann A,Richter M,Zander T, et al. Effect of different surgical strategies on screw forces after correction of scoliosis with a VDS implant [J].Eur Spine J,2006,15 (4):457-464.
 18. Carrier J,Aubin CE,Villemure I,et al. Biomechanical modelling of growth modulation following rib shortening or lengthening in adolescent idiopathic scoliosis[J].Med Biol Eng Comput,2004,42(4):541-548.
 19. Rohlmann A,Zander T,Burra NK,et al. Flexible non-fusion scoliosis correction systems reduce intervertebral rotation less than rigid implants and allow growth of the spine:a finite element analysis of different features of orthobiom [J].Eur Spine J,2008,17(2):217-223.
 20. Torell G,Nachemson A,Haderspeck-Grib K, et al. Standing and supine Cobb measures in girls with idiopathic scoliosis [J].Spine,1985,10(5):425-427.
 21. Klepps SJ,Lenke LG,Bridwell KH,et al.Prospective comparison of flexibility radiographs in adolescent idiopathic scoliosis[J].Spine,2001,26(21):E74-E79.
 22. Behairy Y,Hauser D,Hill D,et al. Partial correction of Cobb angle prior to posterior spinal instrumentation [J].Ann Saudi Med,2000,20(5-6):398-401.
 23. Delorme S,Labelle H,Poitras B,et al.Pre-,intra-,and postoperative three-dimensional evaluation of adolescent idiopathic scoliosis[J].J Spinal Disord,2000,13(2):93-101.
 24. Duke K,Aubin CE,Dansereau J,et al. Biomechanical simulations of scoliotic spine correction due to prone position and anaesthesia prior to surgical instrumentation [J].Clin Biomech (Bristol,Avon),2005,20(9):923-931.
 25. Duke K,Aubin CE,Dansereau J,et al. Computer simulation for the optimization of patient positioning in spinal deformity instrumentation surgery [J].Med Biol Eng Comput,2008,46(1):33-41.

(收稿日期:2008-12-30 修回日期:2009-03-09)

(本文编辑 卢庆霞)

消息

国际脊柱创新发展学会第二届亚太年会(APSAS)

国际脊柱创新发展学会第二届亚太年会(APSAS)将于 2010 年 1 月 14 日~17 日在中国海南三亚喜来登度假酒店隆重举办。由国际脊柱创新发展学会中国分会和中华医学会骨科学分会脊柱学组承办,国际脊柱创新发展学会(SAS)全力支持。大会将邀请顶尖的国际专家,把脊柱外科最前沿技术带给参会代表。同时,与会代表将有机会在此次国际化会议的平台上发表及交流临床经验和研究成果。此次年会的通用语言为英语。脊柱外科领域的新技术和研究是本次会议的重点。主要议题有:颈椎人工间盘置换;腰椎人工间盘置换;脊柱手术并发症;创新性技术;小关节置换和椎间置入器械;脊柱微创;髓核置换;纤维环修复;后动态固定;脊柱基础研究;脊柱疾病诊断。

会议投稿及注册:请登陆 <http://www.sascb.org/>填写注册表,提交论文摘要。截稿日期:2009 年 9 月 15 日。