

综述

放射立体照相测量分析及其在骨科研究中的应用进展

谭 荣¹, 邹德威¹, Hansen Yuan²

(1 解放军 306 医院骨科 100101 北京市; 2 美国纽约上州医科大学医院骨科 13210)

中图分类号: R814.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2007)-10-0788-03

放射立体照相测量分析 (radiostereometric analysis, RSA)^[1] 是一种利用 X 线测量骨骼系统空间位置和运动的方法。它通过对校准装置和带有标记点的研究对象同时进行放射照相, 对获得的影像进行精确的测量, 在计算机的帮助下, 分析两次照相标记点的位置差异, 对目标进行三维运动分析。该技术比传统的 X 线片精度高, 可以进行精确的三维空间测量和精细运动的研究。1974 年^[2]被首先介绍后, 就广泛应用于骨科的相关研究, 包括研究骨骼的生长、关节的运动和稳定性、人工关节假体、脊柱节段的运动、脊柱融合的过程、骨折的稳定性、骨盆和胫骨的截骨术等。现对 RSA 技术及其在骨科研究的应用与进展综述如下。

1 RSA 技术

在伦琴发现 X 线后, 人们就开始尝试通过 X 线照相来测定物体的空间位置。1898 年, Davisson^[3]用丝线连接两个射线管的中心和胶片上的物体, 重建了 X 线的空间位置, 但 X 线重建技术一直进展缓慢。发 954 年 Hallert^[4]进一步发展了照片测量分析法; 1964 年 Hollender^[5]进一步证明了伦琴射线没有系统偏差, 还证明了通过照片的分析测量可以获得 10~50 μm 的精确度。从而为 RSA 的可行性与高精度提供了重要的理论依据。

在拟研究的骨骼中植入小的金属标记物是 RSA 技术的重要进展。由于骨骼一般没有多个特异性的解剖学标记, 在获得的 X 线照片上也就难以进行精确的测量。植入金属标记点后, 则可以精确分析骨骼空间位置的变化。从而大大提高了测量的精度。最早将金属标记应用于骨科放射立体照相测量的是 Lysell^[6], 他将小钢珠植入到尸体颈椎椎体中以测量颈椎的运动。后来该方法又被应用到膝关节、髌关节假体松动研究以及脊柱的运动测量等, 目前应用最多的标记物是金属钽珠。

Selvik 基于标记物植入技术、X 线片的测量分析以及坚固物体运动的数学原理, 1972 年建立了一套全新的放射立体照相测量系统。1974 年他首次公开发表了基本原理^[7]。自此以后, 该方法一直随着计算机和影像技术的发展而不断更新。1983 年他将其命名为放射立体照相测量分

析 (roentgen stereophotogrammetry analysis, RSA)^[1], 后来又称为放射立体照相测量分析 (radiostereometric analysis, RSA)。

RSA 是一种可以进行三维测量且精度很高的技术。重复测量可以计算出目标物体的相对运动。其实施步骤通常可以分成四个部分: (1) 植入标记。球形的钽珠是目前应用较多的骨性标记物。通常直径为 0.8mm, 也有直径为 0.5mm 和 1.0mm 的。金属钽的原子量很大, X 线透过率低, 显影很清晰, 有很好的生物相容性。要完成一个完整的位置或运动分析, 同一骨骼中至少要植入 3 个钽珠, 且为非线性分布。由于钽珠可能松动, 为了增加精度, 一般需植入位置分散的 5 个或更多钽珠。(2) X 线照相。照相时需要两个 X 线球管从不同角度同时对参照装置和目标物体进行曝光, 参照装置上钽珠的位置可以帮忙确定目标的空间位置。典型的参照装置有四个面, 每个面都标记有钽珠。也可以用两个带有钽珠的参照面平板来代替。首先对参照系统进行照相, 然后对目标物体和参照系统进行照相。在两次检查时保持球管和参照装置在同一个位置。这样每次照相可以得到分别来自不同球管的一对 X 线片, 分别在不同时间或体位进行曝光, 就可以通过标记物空间位置的变化来计算出目标物体的精细运动。由于在 RSA 研究中重要的是钽珠的曝光, 骨骼的形态显得不是很重要, 所以可以提高曝光电压并降低电流, 这样不仅可以保证钽珠的良好曝光, 还可以减少 RSA 在照相过程中的射线量。(3) X 线照片的测量。测量前首先要对标记点进行选择 and 编码, 这些标记点包括患者体内的和参照装置上的参照点。通常选择能很好地反映对目标物体空间位置的点。早期常使用精密制图测量仪进行测量, 如 Wild A8 (Heerbrugg, Switzerland), 其精度达到 5~25 μm 。对标记点在胶片上的二维空间位置进行测量后, 将其数据录入到电脑中等待分析。目前随着计算机技术和数字化影像处理技术的飞速发展, 对胶片或数字影像上标记点的测量已经逐步走向自动化, 不但速度快, 而且测量的结果较传统的测量方法也更为准确。(4) 数学计算。早期所有的数学计算都由大型计算机来完成, 应用特定的软件对获得的测量数据进行数学计算, 并完成 RSA 分析。对于不同的研究目的, 如长度测量、角度测量、空间体积的测量等, 都可以由不同模块的电脑程序来完成。随着计算机技术发展和运行能力的提高, RSA 软件也在不断更新, 不但可以应用到个人电脑上, 而且功

能更强大,速度更快。

早期 Selvik 就对 RSA 的精度进行了分析和研究,他通过特制的参照装置反复测量发现,RSA 的精度可以达到 10~50 μm 。通常测量的精度在 10~250 μm 和 0.03°~0.6°之间。在实际应用中测量精度还受很多因素的影响,如参照装置的不同、影像的质量、胶片的平整度、测量工具的精确度、钽标记点的数量和分布是否合理、反复测量的次数等。其中最影响精度的是影像的质量、钽珠的分布合理性与稳定性。最近的研究也表明 RSA 具有很高的精密度和准确度^[7]。随着 RSA 技术的不断完善和发展,目前已经有完整的 RSA 系列产品在市场销售,包括钽珠及其植入装置、X 线机及参照装置、影像测量设备以及相配套的计算机和专业软件,使得 RSA 检查的操作更为方便易行,效率大大提高。

2 RSA 在骨科研究中的应用

2.1 测量骨骼的生长

最早将 RSA 技术应用于人类骨骼生长测量研究的可能是 Aronson 和 Hansson^[8]。他们对由于激素不足而生长发育异常的儿童进行了研究。将针形或球形标记物插入患儿的腓骨远端,给患儿服用不同的治疗药物,然后观察不同药物对骨骼生长速度的影响。RSA 在这些研究中发挥了重要的作用,通过这些研究,可以对那些不同原因的骨骼生长异常导致肢体不等长的患者进行早期诊断和跟踪监测,并可以对手术效果进行精确的评估。

2.2 研究关节的运动和稳定性

关节运动的研究包括膝关节、髋关节、踝关节和腕关节等,其中研究最多的是膝关节。最早将 RSA 应用于关节运动和稳定性研究的是 Edixhoven 等^[9]。他们对两个截肢标本采用机械装置进行膝关节的抽屉试验,以研究关节的松弛度。由于 RSA 精度很高,它可以对关节失稳进行三维空间的精细研究。1988 年,Kärrholm 等^[10]将 RSA 应用于膝关节前交叉韧带损伤后的三维失稳。后来,分析关节运动的变化就开始应用于评估关节软组织损伤的情况和肌肉张力的变化。RSA 还可以用来证明外固定支具的效果以及手术韧带重建对关节运动的影响等等。

2.3 评估人工关节置换效果

20 世纪 70 年代,骨水泥型人工全髋关节和全膝关节置换在临床应用获得了成功,随后人工关节置换手术迅速发展。到了 20 世纪 70 年代后期至 80 年代早期,人工关节假体松动的问题开始出现。传统的 X 线片并不能发现假体的早期松动,因此有必要提高影像学测量的精度来帮助发现早期的关节假体松动,从而为假体固定的研究和临床治疗提供依据。Hansson^[11]最早意识到了 RSA 在骨科的潜在应用前景,他和 Selvik 一起合作,采用股骨假体和髌臼杯口特征影像标记点的方法,发明了可应用于人工髋关节的 RSA 技术,可以早期发现关节的失稳、磨损和移位。随着 RSA 技术的发展,目前已经有更为先进的标记方法,可

以对关节假体进行三维运动分析,促进了人工关节假体的设计和骨水泥研究,也为临床早期诊断、治疗提供了可靠的依据。

RSA 技术在人工关节研究领域中的一个重要的作用是可以在术后早期预测材料的设计是否成功,而且需要的样本量相对较小。1991 年,欧洲很多国家开始使用一种新型的 Boneloc 骨水泥,该产品的特点是产热量小,聚合温度低,释放毒性单体少,因而在欧洲有些国家使用相当广泛。该骨水泥被介绍到瑞典后并没有马上被使用,而是进行了两项随机试验,总病例数不到 25 例。试验结果表明,该骨水泥导致假体的移位明显增加,因此该骨水泥未在瑞典使用。后来的报道表明^[12],采用 Charnley 股骨干并用 Boneloc 骨水泥固定的 1226 例病例,经过术后 3.2 年的随访,假体翻修率比预期的高 4%。术后 4.5 年随访表明翻修的风险增加了 14 倍。这一事件充分表明,如果早期对 Boneloc 骨水泥进行 RSA 研究,就可以发现其早期下沉和松动,该产品也就不会得到广泛的应用。

RSA 的另一个重要作用是早期预测假体松动的可能性。Rye 等^[13]对 131 例全膝人工关节置换患者胫骨假体的移位进行了连续 4 年以上的 RSA 观察,结果发现如果假体 2 年内移位超过 0.2mm,则预示着需要翻修。该指标的敏感度为 58%,特异性为 93%。Kärrholm 等^[14]对 84 例骨水泥型人工髋关节的 RSA 研究发现,2 年内发生股骨假体下沉是需要翻修的最佳预测指标。

2.4 评估脊柱节段运动与融合

测量脊柱的运动和判断椎间隙是否融合在临床上一直是比较棘手的问题,目前使用最多的还是对普通 X 线片进行测量,但主要存在的问题是不精确。CT 检查可以了解椎间隙有无骨性连接,但也很难精确测量椎间隙的活动。正是由于 RSA 的产生,使得脊柱节段的精细运动研究成为可能。RSA 的精度远远超过普通 X 线片测量,可以为医师提供脊柱三维运动的精确数据,从而为临床诊断和治疗策略的选择提供重要的信息。

1976 年,Olsson 等^[15]首先报道了采用 RSA 对腰骶椎融合后椎体的运动进行研究。他分析了 3 例行侧后方腰骶椎融合的病例,发现有 2 例直到术后半年椎间隙才相对稳定,但 RSA 表明融合的节段还存在明显的运动。后来,RSA 在脊柱相关的研究中主要用来分析腰椎或颈椎融合后椎间隙的稳定性,从而评估不同的植骨材料的融合效果。如 BMP 与自体骨、自体骨、同种异体骨与异种骨在脊柱融合中的对照研究^[16,17]。Axelsson 等^[18,19]还将 RSA 用来研究峡部裂、椎间盘退变以及体位改变时椎体的运动。另外,与体外的生物力学研究不同,RSA 还可以对各种脊柱内固定进行体内评估,并进行长期动态观察,了解该器械对腰椎稳定性的近期和远期影响。

2.5 观察骨折愈合过程

由于 RSA 精度很高,可以动态记录骨折端的微动,是用来研究骨折愈合模式、应力变化及负重对骨折愈合影

响的理想工具^[20]。同时它可以用来研究各种骨折内固定材料对骨折稳定性和骨折愈合过程的影响。但目前此类的研究相对较少,且主要集中在髋关节和踝关节骨折。

随着现代计算机技术和数字影像学技术的发展, RSA 技术也得以不断发展和创新,如自动化数字影像分析^[21]、基于模型的 RSA^[22]等。RSA 的数字化,不仅大大节约了 RSA 检查的时间,与传统的手工测量相比,精度还得到进一步提高。基于模型的 RSA 主要应用于人工关节假体的研究,不需要植入标记即可以分析。而动态 X 线照相、CT、MRI 与 RSA 的结合,可以更好地研究假体的稳定性和磨损。

RSA 起源于瑞典,后传入欧洲,目前已经在美国、加拿大、澳大利亚得到常规应用,但在国内还没有 RSA 相关报道。2003 年 2 月,第一届 RSA 大会在美国新奥尔良市举行,标志着 RSA 技术正越来越受到人们的重视。它精度高,敏感性高,早期就可以预测假体移位与手术失败,使得它几乎成为骨科领域中对人体骨骼运动或假体移位定量研究的金标准。有人认为,新的人工关节假体部件或骨水泥在正式上市前需要常规进行 RSA 评估和研究。国际标准化协会正在考虑建立人工关节产品上市前采用 RSA 技术进行预研究的标准。骨科领域中各种新理论、新技术、新产品的不断涌现,使得 RSA 技术的应用范围也越来越广,对骨科的基础和临床研究起着越来越重要的作用。

3 参考文献

1. Selvik G, Alberius P, Aronson AS. A roentgen stereophotogrammetric system; construction, calibration and technical accuracy [J]. Acta Radiol Diagn (Stockh), 1983, 24(4): 343-352.
2. Selvik G. Roentgen Stereophotogrammetry: a method for the study of the kinematics of the skeletal system [J]. Acta Orthop Scand 1989; 40(232): 1-51.
3. Davidson JM, Hedley WS. A method of precise localization and measurement by means of roentgen rays [J]. Lancet, 1897, 65(11): 1001-1009.
4. Hallert B. A new method for the determination of the distortion and the inner orientation of cameras and projectors [J]. Photogrammetria, 1954, 55(11): 107-123.
5. Hollender L. Determining the elements of the interior orientation in toentgenography [J]. Acta Radiol Diagn (Stockh), 1964, 40(230): 1-88.
6. Lysell E. Motion in the cervical spine; an experimental study on autopsy specimens [J]. Acta Orthop Scand, 1969, 123: 1-12.
7. Östen I, Berzins A, Shott S, et al. Accuracy and precision of radiostereometric analysis in the measurement of THR femoral component translations: human and canine in vitro models [J]. J Orthop Res, 2001, 19(6): 1162-1167.
8. Aronson AS, Hansson LI. Effect of tantalum markers of longitudinal bone growth [J]. Acta Orthop Scand, 1976, 47(5): 515-519.
9. Edixhoven P, Huiskes R, de Graaf R, et al. Accuracy and reproducibility of instrumented knee-drawer tests [J]. J Orthop Res, 1987, 5(3): 378-387.
10. Körrholm J, Selvik G, Elmqvist LG, et al. Three-dimensional instability of the anterior cruciate deficient knee [J]. J Bone Joint Surg Br, 1988, 70(5): 777-783.
11. Baldursson H, Egund N, Hansson LI, et al. Instability and wear of total hip prostheses determined with roentgen stereophotogrammetry [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 1979, 95(4): 257-263.
12. Furnes O, Lie SA, Havelin LI, et al. Exeter and chamley arthroplasties with boneloc or high viscosity cement: comparison of 1127 arthroplasties followed for 5 years in the Norwegian Arthroplasty Register [J]. Acta Orthop Scand, 1997, 68(6): 515-520.
13. Ryd L, Albrektsson BE, Carlsson LF, et al. Roentgen stereophotogrammetric analysis as a predictor of mechanical loosening of knee prostheses [J]. J Bone Joint Surg Br, 1995, 77(4): 377-383.
14. Körrholm J, Borssen B, Lowenhielm G, et al. Does early micromotion of femoral stem prostheses matter? 4-7-year stereoradiographic follow-up of 84 cemented prostheses [J]. J Bone Joint Surg Br, 1994, 76(6): 912-917.
15. Olsson TH, Selvik G, Willner S. Kinematic analysis of posterolateral fusion in the lumbosacral spine [J]. Acta Radiol Diagn (Stockh), 1976, 17(4): 519-530.
16. Johnsson R, Strömquist B, Aspenberg P. Randomized radiostereometric study comparing osteogenic protein-1 (BMP-7) and autograft bone in human noninstrumented posterolateral lumbar fusion; 2002 Volvo Award in clinical studies [J]. Spine, 2002, 27(23): 2654-2661.
17. Lofgren H, Johannsson V, Olsson T, et al. Rigid fusion after cloward operation for cervical disc disease using autograft, allograft, or xenograft; a randomized study with radiostereometric and clinical follow-up assessment [J]. Spine, 2000, 25(15): 1908-1916.
18. Axelsson P, Johnsson R, Strömquist B. Is there increased intervertebral mobility in isthmia adult spondylolisthesis? a matched comparative study using roentgen stereophotogrammetry [J]. Spine, 2000, 25(13): 1701-1703.
19. Axelsson P, Karlsson BS. Standardized provocation of lumbar spine mobility; three methods compared by radiostereometric analysis [J]. Spine, 2005, 30(7): 792-797.
20. Madanat R, Mäkinen TJ, Moritz N, et al. Accuracy and precision of radiostereometric analysis in the measurement of three-dimensional micromotion in a fracture model of the distal radius [J]. J Orthop Res, 2005, 23(2): 481-488.
21. Kaptein BL, Valstar ER, Stoel BC, et al. A new model-based RSA method validated using CAD models and models from reversed engineering [J]. J Biomech, 2003, 36(6): 873-882.
22. Uvehammer J, Körrholm J. Inducible displacements of cemented tibial components during weight-bearing and knee extension observations during dynamic radiostereometry related to joint positions and 2 years history of migration in 16 TKR [J]. J Orthop Res, 2001, 19(6): 1168-1177.

(收稿日期: 2006-12-26 修回日期: 2007-02-25)

(本文编辑 卢庆霞)