

# 运动学分析技术及其在肩关节领域的应用

方朝毅 皇甫小桥 戚文潇 赵金忠

**摘要** 肩关节的各种疾病或外伤均可引起一系列肩关节运动学及动力学改变,精准还原真实运动过程能够较好地阐明肩关节病理学,对于疾病评估、治疗、随访至关重要。目前常用的运动学分析技术主要有运动捕捉技术、放射立体测量分析(RSA)、图像-模型配准技术等,但还没有公认最优的分析技术。RSA技术精确度高,但为侵入性操作,仅适用于部分患者;运动捕捉技术常用电磁运动捕捉和光学运动捕捉技术,操作简便但精确度低;图像-模型配准技术精确度高,但技术操作过程复杂费时,受试空间范围狭小,可完成的动作类型有限。该文对以上技术及其在肩关节领域的应用作一综述。

**关键词** 运动学分析;肩关节;放射立体测量;运动捕捉;图像-模型配准

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-7083.2019.04.009

随着生活水平的提高,关节运动损伤越来越受到重视。肩关节因特殊的解剖结构,即较大的关节盂和较小的肱骨头,成为全身活动度最大的关节。由外伤骨折、肩袖损伤、肩关节脱位、冻结肩等引起的肩关节功能障碍可严重影响患者日常生活。

精确分析肩关节运动学状态,有助于改善患者治疗效果。然而,目前对肩关节活动范围和松弛度的临床评估多通过体检获得,较少使用复杂的运动测量技术。究其原因,可能在于测量所得的运动学数据需进一步处理,这限制了该技术在临床的应用。

与下肢步态分析类似,肩关节运动分析也需要以运动学模型来模拟其运动状态。如目前较常用的盂肱关节运动分析方法,以肩胛盂作为参照物,分析肱骨头相对运动,将肱骨近似看作刚体,其运动可以用3个旋转角(章动角、旋进角、自转角)和3个方向(互相垂直的X、Y、Z轴)的平移,即6个自由度来精确描述,肩关节旋转范围可达210°。与脊柱等相比,观察肩关节运动更为容易。但由于肩关节运动的复杂性,对其进行定量分析描述较困难<sup>[1-3]</sup>。目前临床研究中一般采用放射立体测量分析(RSA)、运动捕捉技术、图像-模型配准技术等对肩关节运动进行分析。本文对运动学分析技术及其在肩关节领域的应用作一综述。

## 1 RSA

RSA是一种通过放射线测量关节骨骼空间位

置变化的方法。通过对校准装置(参照物)和金属标记球进行X线摄片,获得关节动态影像,再利用计算机分析标记点的运动轨迹变化,推算受试关节运动状态<sup>[4-7]</sup>。

RSA的测量过程通常可分为以下4个步骤。

①植入金属标记球。由于金属钽硬度适中,生物相容性好,X线透射率低,目前常使用钽球。对每一单独骨骼(如肱骨、肩胛骨),至少需植入3枚金属标记球,且不能位于同一直线,但通常会植入5枚或更多,以防止软组织挤压或其他原因导致钽球位置改变。②X线摄片。通常利用2个相交的X线发射球管同时进行摄片,在不同位置或时间分别曝光,得到受试关节在不同空间位置的图像,摄片时必须保持参照物空间位置固定。③运动图像测量。对标记点(校准装置和金属标记球)进行选择 and 编码,通过标记物与骨骼的相对关系,计算得到受试关节的原始精细运动数据。④数据分析。依照研究目的不同,对前述步骤获得的原始数据进行转换,得到所需的运动学数据,如位移、旋转角等<sup>[5,7-8]</sup>。

多学者采用RSA技术进行了不同研究。Lawrence等<sup>[9]</sup>对12例正常受试者与10例肩痛患者进行RSA,发现肩痛患者在前屈90°~120°时,肱骨向前位移比正常受试者增加1.4 mm;在整个外展运动中,其肱骨向下位移较正常受试者平均增加1 mm。Miller等<sup>[10]</sup>对5例肩袖损伤患者(均为冈上肌损伤)进行为期12周的运动康复治疗,分别于治疗前后进行RSA分析,测量外展过程中盂肱关节位移和肩峰下间隙的变化,结果发现治疗后患者盂肱

作者单位:200233, 上海交通大学附属第六人民医院运动医学科

通信作者:赵金忠 E-mail: zhaojinzhong@vip.163.com

关节接触路径长度占肩胛盂高度的百分比由 67.2% 降低到 43.1%，肩峰下间隙最小距离由 0.9 mm 小幅增加至 1.3 mm，美国肩肘外科协会(ASES)评分有明显改善。Streit 等<sup>[11]</sup>对 11 例接受全肩关节置换术的患者(平均年龄 60.6 岁)采用术中植入钽珠的处理，并在术前和术后 3 年对其进行评估，结果显示患者平均 ASES 评分从 30.3 分升至 81.3 分，平均疼痛视觉模拟评分(VAS)自 8 分降至 1 分，平均主动前屈自 109° 提高到 155°，外旋从 28° 提高到 54°，内旋从骶骨水平升高到 L<sub>3</sub> 水平。Nuttall 等<sup>[12]</sup>将 20 例植入钽珠标记的肩关节表面置换患者分为两组，即多孔涂层组和多聚羟基磷灰石组，对其进行术后随访研究，结果发现术后 2 年，多孔涂层组肱骨头平均位移(1.0±0.7) mm，多聚羟基磷灰石组肱骨头平均位移(0.8±0.4) mm；两组患者 VAS、ASES 评分均有显著改善。Ten-Brinke 等<sup>[13]</sup>对上肢 RSA 技术的准确性和精密度进行分析，运动学分析使用三维坐标系，认为该技术应用于肩关节位移精确度为 0.06~0.88 mm，旋转角精确度为 0.05°~10.7°。以上可见，RSA 是一种具有高精度的测量上肢植入物早期位移的技术，然而对部分组件旋转角度测量的精确度较差。

RSA 技术出现最早，随着研究深入和技术的改善，其精确度越来越高，但在肩关节运动分析领域该技术仍存在诸多限制。RSA 为侵入性技术，多用于体外标本的运动学分析。在临床研究中，该技术主要应用于部分手术患者，一般于手术同时植入标记物以避免额外的侵入性操作<sup>[8,14]</sup>。近年来，有学者<sup>[15]</sup>开发出可用于 RSA 的不透明生物活性玻璃标记物，可避免取出标记物的二次创伤。

## 2 运动捕捉技术

运动捕捉技术依靠传感器发射信号，随后跟踪记录部分关键点的运动轨迹，再通过算法处理模拟实体运动轨迹，具有无创、快速和方便等特点。根据其工作原理可分为 4 类：机械运动捕捉、光学运动捕捉、声学运动捕捉和电磁运动捕捉。目前电磁运动捕捉和光学运动捕捉技术在生物力学研究中应用较多<sup>[16-18]</sup>。

电磁式动作捕捉系统的优点是成本低、技术成熟、实时性好，缺点是对金属敏感，易引起电磁场畸变而影响数据准确度，采样频率低<sup>[19-21]</sup>。光学运动捕捉系统的优点是标记点佩戴方便、运动受限小、采样频率高，缺点是成本昂贵、标记点易混淆遮挡、皮

肤软组织伪影易产生误差<sup>[17,20,22]</sup>。

Ogston 等<sup>[23]</sup>对 26 例肩关节多向不稳患者与 26 例正常人采用运动捕捉技术进行对比研究，发现在肩胛骨平面外展时，肩关节多向不稳患者肩胛骨上旋明显减少(8°)，内旋明显增加(12.2°)，而肱骨头位移变化则无明显差异。Rundquist 等<sup>[24]</sup>对健康受试者部分日常动作(搓背、梳头)采用运动捕捉技术进行研究，结果发现完成搓背动作的平均内旋角度为 85°±24°，完成梳头动作的平均外展角度为 119°±10°。Charbonnier 等<sup>[25]</sup>对 10 例职业网球选手采用运动捕捉技术进行研究，发现发球动作时肩峰内撞击比肩峰下撞击更常见，模拟运动过程计算出的内撞击区主要位于肩胛盂后上区域，与网球运动员常见的肩袖损伤和上孟唇从前到后的损伤(SLAP)有关。Lädemann 等<sup>[26]</sup>采用运动捕捉技术对 10 例网球运动爱好者外展动作进行研究，并结合其 MRI 影像对撞击类型和频率进行评估，结果 MRI 图像显示 5 例出现 SLAP，6 例轻度肩袖损伤；运动模拟显示 7 例撞击区位于后上方，3 例位于前下方。Maier 等<sup>[27]</sup>对 8 例接受半肩关节置换术的孟肱关节骨关节炎患者进行运动学分析研究，于术前 1 d、术后 6 个月和术后 3 年观察其外展、内收、外旋、内旋动作，结果显示患者外展自 50.5° 增加至 72.4°，内收自 6.2° 增加至 66.7°，外旋自 15.1° 增加至 50.9°，内旋自 -0.6° 增加至 35.8°。Klotz 等<sup>[28]</sup>对 15 例上肢偏瘫成年患者与年龄匹配的正常人进行日常生活动作对比研究，发现两者躯干、肩关节和肘关节活动度均有明显差异，最严重的是肩关节外展和屈肘动作，患者较正常人分别减少 70° 和 45°。

运动捕捉技术应用已近半个世纪，虽然精确度不及 RSA 技术，但因无创、方便、快速的特点，在临床上适用范围更广，尤其在研究正常人运动学特点时更为受试者接受。

## 3 图像-模型配准技术

图像-模型配准技术通过 X 线获取关节影像投影，依靠计算机在虚拟空间中与三维模型的投影相匹配，从而模拟实体运动过程，可分为单平面法和双平面法。单平面法仅用 1 台设备进行单一角度摄片，配准结果平面内误差较小，但离平面误差较大。双平面法采用 2 台正交设备同步摄片，在虚拟三维空间的不同平面同时配准，具有较高的精确度<sup>[29-31]</sup>。

双平面图像-模型配准技术的测试过程如下。

①定位和校正。通常采用圆盘校正器和方板定位

器,校正时2台设备分别静态摄片,定位时2台设备同时静态摄片,得到的影像用于后续虚拟空间定位和校正。②X线摄片。受试者在限定区域内完成既定动作,2台设备同步记录动态影像。③建立虚拟空间和三维模型。利用前述定位和校正图像,在计算机软件建立的虚拟空间中确定唯一的光源发射点和接收平面,然后利用CT或MRI影像重建三维骨模型,将模型置入限定区域。④图像-模型配准。在2个正交的接收平面导入动态图像的某一帧,调整三维模型在空间的位置和方向,使模型投影与图像轮廓完全重合,还原真实运动过程中的空间位向,逐帧或间隔一定帧数完成配准。⑤数据输出。利用骨模型坐标系的相对关系,获得关节运动6个自由度的数据<sup>[32-35]</sup>。

Kim等<sup>[36]</sup>对20例初发型肩关节前脱位患者使用双平面图像-模型配准技术进行运动学分析,将其患侧与健侧进行对比,分别进行外展、外旋运动和“恐惧征”测试,结果显示在上述检测中患侧与健侧肱骨头前后位移和上下位移均无统计学差异。Peltz等<sup>[37]</sup>对11例接受关节镜下Bankart修补术的患者与11位健康者应用双平面图像-模型配准技术进行运动学分析,发现与健康者相比,接受手术患者的术前盂肱关节接触点(肱骨头离肩胛盂最近的点)更偏前(占盂唇宽度的7.9%,2.1 mm),而术后该接触点更偏后(占盂唇宽度的4.7%,1.1 mm);术后接受手术患者的盂肱关节接触点范围明显小于术前和健康者。Kijima等<sup>[38]</sup>对5例有症状的肩袖损伤患者、7例无症状的肩袖损伤患者和7位健康志愿者应用双平面图像-模型配准技术进行运动学分析,记录其外展期间运动过程,发现有症状的肩袖损伤患者肩胛骨后倾角( $3.1^{\circ} \pm 1.8^{\circ}$ )明显小于健康者( $10.4^{\circ} \pm 0.8^{\circ}$ ),外旋角度也明显小于无症状的肩袖损伤患者和健康者;无症状的肩袖损伤患者与健康者间则无显著性差异。Dal-Maso等<sup>[39]</sup>研究健康者外展和投掷动作,结果表明外展过程中最大上方位移可达7.5 mm,投掷动作中最大上方位移可达8.6 mm。Baumer等<sup>[40]</sup>纳入25例肩袖损伤患者和25例年龄匹配的健康志愿者,对其肩关节外展、内外旋动作和肩胛骨后倾角进行评估,结果显示肩袖损伤患者肩关节活动度和肩胛骨后倾角均明显小于健康者。

图像-模型配准技术虽出现较晚,但其精确度很高。Shortis等<sup>[41]</sup>对双平面图像-模型配准技术定位

和定向误差进行研究,结果显示定位误差为0.01 mm,定向误差为 $0.02^{\circ}$ 。然而,该技术操作过程复杂费时,且受试空间范围狭小,可完成的动作类型有限,如只能完成简单的内收外展、内旋外旋等,而日常生活动作如梳头等则无法有效完成。

#### 4 结语

了解肩关节运动学状态能帮助临床医师更好地进行诊断和疗效评估。以上介绍的3项运动学分析技术各有优缺点,应根据研究目的选择适当的方法。此外,在实际应用中可以组合应用多种检测技术,以得到更好的结果。

#### 参 考 文 献

- [1] Phadke V, Braman JP, LaPrade RF, et al. Comparison of glenohumeral motion using different rotation sequences[J]. J Biomech, 2011, 44(4): 700-705.
- [2] Hill AM, Bull AM, Dallalana RJ, et al. Glenohumeral motion: review of measurement techniques[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2007, 15(9): 1137-1143.
- [3] Debski RE, McMahon PJ, Thompson WO, et al. A new dynamic testing apparatus to study glenohumeral joint motion[J]. J Biomech, 1995, 28(7): 869-874.
- [4] van de Kleut ML, Yuan X, Athwal GS, et al. Validation of radiostereometric analysis in six degrees of freedom for use with reverse total shoulder arthroplasty[J]. J Biomech, 2018, 68: 126-131.
- [5] Rosenquist B, Petersson A, Rune B, et al. Accuracy of the oblique lateral transcranial projection, lateral tomography, and X-ray stereometry in evaluation of mandibular condyle displacement[J]. J Oral Maxillofac Surg, 1988, 46(10): 862-867.
- [6] Penny JO, Ding M, Ovesen O, et al. Radio-stereometric analysis in resurfacing hip arthroplasty[J]. J Orthop Translat, 2014, 2(4): 208-209.
- [7] Muharemovic O, Troelsen A, Thomsen MG, et al. The effect of personalized versus standard patient protocols for radiostereometric analysis (RSA)[J]. Radiography (Lond), 2018, 24(2): e31-e36.
- [8] Broberg JS, Yuan X, Teeter MG. Radiostereometric analysis using clinical radiographic views: development of a universal calibration object[J]. J Biomech, 2018, 73: 238-242.
- [9] Lawrence RL, Braman JP, Staker JL, et al. Comparison of 3-dimensional shoulder complex kinematics in individuals with and without shoulder pain, part 2: glenohumeral joint[J]. J Orthop Sports Phys Ther, 2014, 44(9): 646-655.
- [10] Miller RM, Popchak A, Vyas D, et al. Effects of exercise therapy for the treatment of symptomatic full-thickness supraspinatus tears on in vivo glenohumeral kinematics[J]. J Shoulder Elbow Surg, 2016, 25(4): 641-649.

- [11] Streit JJ, Shishani Y, Greene ME, et al. Radiostereometric and radiographic analysis of glenoid component motion after total shoulder arthroplasty[J]. *Orthopedics*, 2015, 38(10): e891-e897.
- [12] Nuttall D, Birch A, Haines JF, et al. Radiostereographic analysis of a shoulder surface replacement: does hydroxyapatite have a place?[J]. *Bone Joint J*, 2014, 96B(8): 1077-1081.
- [13] Ten-Brinke B, Beumer A, Koenraadt KL, et al. The accuracy and precision of radiostereometric analysis in upper limb arthroplasty[J]. *Acta Orthop*, 2017, 88(3): 320-325.
- [14] Muharemovic O, Troelsen A, Thomsen MG, et al. Design and evaluation of learning strategies for a group of radiographers in radiostereometric analysis (RSA) [J]. *Radiography (Lond)*, 2017, 23(4): e80-e86.
- [15] Madanat R, Moritz N, Vedel E, et al. Radio-opaque bioactive glass markers for radiostereometric analysis [J]. *Acta Biomater*, 2009, 5(9): 3497-3505.
- [16] Patrona F, Chatzitofis A, Zarpalas D, et al. Motion analysis: action detection, recognition and evaluation based on motion capture data[J]. *Patt Recog*, 2018, 76: 612-622.
- [17] Nagymáté G, Kiss RM. Motion capture system validation with surveying techniques[J]. *Mater Today*, 2018, 5(13): 26501-26506.
- [18] Moeslund TB, Hilton A, Krüger V. A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis[J]. *Comput Vis Image Underst*, 2006, 104(2/3): 90-126.
- [19] Valevicius AM, Jun PY, Hebert JS, et al. Use of optical motion capture for the analysis of normative upper body kinematics during functional upper limb tasks: a systematic review[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2018, 40: 1-15.
- [20] Takayasu K, Yoshida K, Mishima T, et al. Upper body position analysis of different experience level surgeons during laparoscopic suturing maneuvers using optical motion capture [J]. *Am J Surg*, 2019, 217(1): 12-16.
- [21] Mousavi SJ, Tromp R, Swann MC, et al. Between-session reliability of opto-electronic motion capture in measuring sagittal posture and 3-D ranges of motion of the thoracolumbar spine[J]. *J Biomech*, 2018, 79: 248-252.
- [22] Choe N, Zhao H, Qiu S, et al. A sensor-to-segment calibration method for motion capture system based on low cost MIMU[J]. *Measurement*, 2019, 131: 490-500.
- [23] Ogston JB, Ludewig PM. Differences in 3-dimensional shoulder kinematics between persons with multidirectional instability and asymptomatic controls[J]. *Am J Sports Med*, 2007, 35(8): 1361-1370.
- [24] Rundquist PJ, Obrecht C, Woodruff L. Three-dimensional shoulder kinematics to complete activities of daily living[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2009, 88(8): 623-629.
- [25] Charbonnier C, Chagué S, Kolo FC, et al. Shoulder motion during tennis serve: dynamic and radiological evaluation based on motion capture and magnetic resonance imaging[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2015, 10(8): 1289-1297.
- [26] Läderrmann A, Chagué S, Kolo FC, et al. Kinematics of the shoulder joint in tennis players[J]. *J Sci Med Sport*, 2016, 19(1): 56-63.
- [27] Maier MW, Kasten P, Niklasch M, et al. 3D motion capture using the HUX model for monitoring functional changes with arthroplasty in patients with degenerative osteoarthritis[J]. *Gait Posture*, 2014, 39(1): 7-11.
- [28] Klotz MC, Kost L, Braatz F, et al. Motion capture of the upper extremity during activities of daily living in patients with spastic hemiplegic cerebral palsy [J]. *Gait Posture*, 2013, 38(1): 148-152.
- [29] Mozingo JD, Akbari Shandiz M, Marquez FM, et al. Validation of imaging-based quantification of glenohumeral joint kinematics using an unmodified clinical biplane fluoroscopy system[J]. *J Biomech*, 2018, 71: 306-312.
- [30] Englander ZA, Martin JT, Ganapathy PK, et al. Automatic registration of MRI-based joint models to high-speed biplanar radiographs for precise quantification of in vivo anterior cruciate ligament deformation during gait [J]. *J Biomech*, 2018, 81: 36-44.
- [31] Akbari-Shandiz M, Lawrence RL, Ellingson AM, et al. MRI vs CT-based 2D-3D auto-registration accuracy for quantifying shoulder motion using biplane video-radiography [J]. *J Biomech*, 2019, 82: 375-380.
- [32] Zhu Z, Massimini DF, Wang G, et al. The accuracy and repeatability of an automatic 2D-3D fluoroscopic image-model registration technique for determining shoulder joint kinematics[J]. *Med Eng Phys*, 2012, 34(9): 1303-1309.
- [33] Pataky TC, Vanrenterghem J, Robinson MA. Bayesian inverse kinematics vs. least-squares inverse kinematics in estimates of planar postures and rotations in the absence of soft tissue artifact[J]. *J Biomech*, 2019, 82: 324-329.
- [34] Bey MJ, Zael R, Brock SK, et al. Validation of a new model-based tracking technique for measuring three-dimensional, in vivo glenohumeral joint kinematics [J]. *J Biomech Eng*, 2006, 128(4): 604-609.
- [35] Akbari-Shandiz M, Mozingo JD, Holmes Iii DR, et al. An interpolation technique to enable accurate three-dimensional joint kinematic analyses using asynchronous biplane fluoroscopy[J]. *Med Eng Phys*, 2018, 60: 109-116.
- [36] Kim DS, Lee B, Banks SA, et al. Comparison of dynamics in 3D glenohumeral position between primary dislocated shoulders and contralateral healthy shoulders[J]. *J Orthop*, 2017, 14(1): 195-200.
- [37] Peltz CD, Baumer TG, Mende V, et al. Effect of arthroscopic stabilization on in vivo glenohumeral joint motion and clinical outcomes in patients with anterior instability[J]. *Am J Sports Med*, 2015, 43(11): 2800-2808.
- [38] Kijima T, Matsuki K, Ochiai N, et al. In vivo 3-dimensional

analysis of scapular and glenohumeral kinematics: comparison of symptomatic or asymptomatic shoulders with rotator cuff tears and healthy shoulders[J]. J Shoulder Elbow Surg, 2015, 24(11): 1817-1826.

[39] Dal-Maso F, Raison M, Lundberg A, et al. Glenohumeral translations during range-of-motion movements, activities of daily living, and sports activities in healthy participants[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2015, 30(9): 1002-1007.

[40] Baumer TG, Chan D, Mende V, et al. Effects of rotator cuff pathology and physical therapy on in vivo shoulder motion and clinical outcomes in patients with a symptomatic full-thickness rotator cuff tear[J]. Orthop J Sports Med, 2016, 4(9): 2325967116666506.

[41] Shortis MR, Remondino F, Ronsky J, et al. Rigorous accuracy assessment for 3D reconstruction using time-series Dual Fluoroscopy (DF) image pairs[J]. SPIE, 2017, 10332: 3.

(收稿:2019-04-22)

(本文编辑:李圆圆)

## 《国际骨科学杂志》投稿、邮购

《国际骨科学杂志》创刊于 1964 年,是国家级医学学术类期刊,入编中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、中国学术期刊统计源期刊、中国期刊全文数据库收录期刊等,由国家卫计委、上海市卫计委主管,上海市医学科学技术情报研究所主办。

《国际骨科学杂志》以广大骨科及相关临床医师、教学人员和研究人员为读者对象,贯彻理论与实践、普及与提高相结合的办刊宗旨,主要介绍国内外骨科领域的临床和基础研究的新理论、新方法、新技术和新成果。栏目设置包括综述、论著、专题报告、学术争鸣、专利介绍、病例报告、新技术新概念、国外来访者报告及信息报道等。目前本刊的 5 年影响因子为 1.052(《中国期刊引证研究报告·2014 年版》),居“国际医学系列期刊”前茅。欢迎广大作者投送稿件!来稿若符合录用标准,均可在 6 个月内发表。

**投稿通道:** 官方网站 <http://gjgkx.paperopen.com> 注册后投稿或发送电子邮件至 [intjorthop@163.com](mailto:intjorthop@163.com)。同时需将打印稿 2 份、作者单位推荐(介绍)信、作者简介(出生年月、学位、技术职称、研究方向、联系手机号码)等邮寄至上海市建国西路 602 号《国际骨科学杂志》编辑部,邮编 200031。来稿需标明是否为省部级以上基金资助项目并注明编号,以便优先审稿。

本刊历史悠久、内容翔实、可读性强,深受广大骨外科及相关学科临床医生、教研人员的欢迎和好评。本刊为双月刊,大 16 开本,每单月 25 日出版。邮局发行代号:4-268(定价:12.00 元,全年 72.00 元)。编辑部全年接受个人邮购,免收邮费。

投稿、邮购联系电话:021-33262069(直线)