

文章编号: 1004-7220(2024)06-1221-07

颞下颌关节运动分析的研究进展

秦际雄¹, 张玲¹, 杨洋洋², 蔡宗远^{2,3a}, 王少白¹, 蔡斌^{1,3b}

(1. 上海体育大学运动健康学院, 上海 200438; 2. 上海交通大学生物医学工程学院, 上海 200030;

3. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 a 骨科; b 康复医学科, 上海 200011)

摘要: 近年来, 颞下颌关节 (temporomandibular joint, TMJ) 的运动在口腔系统整体健康中的作用日益受到口腔医学和康复医学领域的关注, 其定量分析对理解和治疗口腔功能障碍具有重要价值。本文回顾近 10 年来电子描记、光学捕捉以及双平面透视追踪技术在临床和研究中的应用进展。电子描记和光学捕捉技术以其高精度和实时反馈, 在分析 TMJ 运动特征、评价治疗效果及优化治疗技术等方面已广泛应用。双平面透视追踪技术在分析复杂关节运动时显示出高度精确性和可重复性。尽管这些技术的操作复杂性、数据稳定性及安全性方面仍存不足, 但随着运动分析技术的发展和口腔系统功能的深入研究, 预计未来将显著提升口腔系统疾病的诊治精度和个性化水平。

关键词: 颞下颌关节; 运动学; 髁突轨迹; 光学捕捉; 双平面透视追踪

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.06.029

Research Progress of Temporomandibular Joint Motion Analysis

QIN Jixiong¹, ZHANG Ling¹, Yang Yangyang², TSAI Tsungyuan^{2,3a}, WANG Shaobai¹, CAI Bin^{1,3b}

(1. School of Exercise and Health, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2. School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 3a. Department of Orthopedics; 3b. Department of Rehabilitation, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

Abstract: In recent years, the role of temporomandibular joint (TMJ) motion in overall health of the orofacial system has increasingly captured the attention in the fields of oral medicine and rehabilitation medicine. The quantitative analysis of TMJ kinematics is crucial for understanding and treating orofacial functional disorders. This review summarizes the advancements in electronic axiography, optical motion capture, and dual-fluoroscopy technologies in clinical and research applications over the past decade. Electronic axiography and optical motion capture technologies, known for their high precision and real-time feedback, have been widely utilized in analyzing TMJ motion characteristics, evaluating treatment outcomes, and optimizing therapeutic techniques. dual fluoroscopic imaging system tracking technique demonstrates high accuracy and repeatability in analyzing complex joint motions. Although these technologies still face challenges regarding operational complexity, data stability, and safety, ongoing developments in motion analysis techniques and in-depth studies of orofacial system functions are expected to significantly enhance the precision and personalization of diagnostics and treatments for orofacial system diseases in the future.

Key words: temporomandibular joint (TMJ); kinematics; condylar trajectory; optical motion capture; dual fluoroscopic imaging system tracking

收稿日期: 2024-05-05; 修回日期: 2024-05-30

通信作者: 蔡斌, 主任医师, 硕士生导师, Email: shrehab@163.com

颞下颌关节 (temporomandibular joint, TMJ) 是人体中使用最频繁的关节之一,主要负责说话、吞咽和咀嚼等功能。颞下颌关节紊乱病 (temporomandibular disorders, TMD) 的表征之一 (即运动功能障碍),可表现为关节活动受限、疼痛、弹响以及绞索等,严重者甚至影响个体的身心健康和生活质量^[1-2]。据估计,1/3 成年人罹患一种或多种症状^[3]。目前常用的影像学检查只提供静态下的解剖学信息,无法全面反映 TMJ 的功能状况^[4]。在体格检查中,通常只测量牙齿的最终位置,例如张口度,忽略了关节面附属运动 (髁突的滑动和转动) 改变所提供的信息,故也不能完全代表 TMJ 的运动质量^[5]。例如,在患有慢性可复性关节盘移位 (disc displacement with reduction, DDWR) TMD 患者中,患者的张口度可与正常人无异,但若忽略关节运动模式的长期改变,可能会导致其他类型的关节损害^[6]。而在不可复性关节盘移位 (disc displacement without reduction, DDWoR) TMD 患者中,张口闭口时患侧髁突滑动范围明显减少^[7]。这可能会造成健侧髁突的过度活动和不对称的下颌运动模式,从而加重关节负荷,增加骨性关节炎 (osteoarthritis, OA) 发病风险^[8]。TMJ 运动学的深入分析不仅对于理解和治疗 TMD 至关重要,而且对于口腔医学的多个领域也有着显著意义。正畸治疗前,明确 TMJ 的运动学特征有助于预防和管理治疗后可能出现的 TMD 症状^[9]。在颌面外科领域,特别是正颌手术和关节置换手术后,理解和管理 TMJ 运动学变化对术后康复和长期预后至关重要^[10]。对于牙列缺损患者,准确的 TMJ 运动分析有助于定制个性化的修复方案,确保修复体与患者的关节运动相匹配,提高治疗的成功率和患者的舒适度^[11]。

早期 TMJ 运动学研究经历了离体、摄影技术和机械描记技术的演变和发展,但其应用始终受限于较低的测量精度和繁琐的操作流程。近年来,数字化运动分析技术成为主流。其中,电子描记和光学捕捉技术已实现四维运动数据分析。双平面透视追踪技术在其他关节运动学研究中应用广泛,且在 TMJ 运动分析领域展现潜力。本文对电子描记、光学捕捉以及双平面透视追踪技术近 10 年在临床和研究中的应用进展进行综述。

1 电子描记技术

1.1 电子描记技术原理

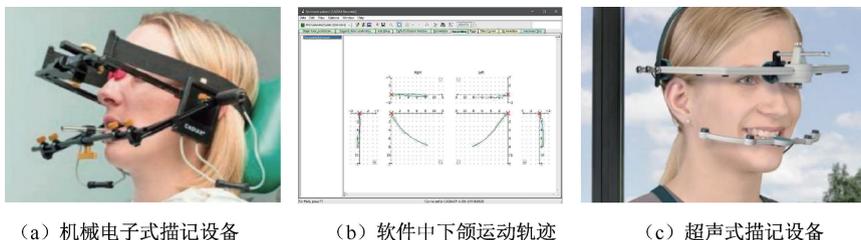
电子描记技术是一类依靠上下颌面弓追踪髁突运动轨迹的测量技术,上颌面弓固定在头部,下颌面弓通常通过铰叉与下颌牙齿相连接,当下颌运动时,即可通过面弓间的传感器和计算机软件记录髁突的 6 自由度运动。根据其传感器的工作原理不同,又可将电子描记设备分为机械电子式和超声式。

机械电子式描记设备,如奥地利 GAMMA 公司 CADIAX (Computer Aided Diagnosis AxioGraph) 和超声式描记设备如德国 Zebris 公司 JMA (Jaw Motion Analyzer), 目前均广泛用于记录髁突运动轨迹 (见图 1)。CADIAX 的工作特点主要是借助描记针和描记板记录髁突的二维运动轨迹,并通过计算机结合生成三维运动情况。而 JMA 的运作基于下颌面弓上的超声波发射器,超声波脉冲被上颌面弓中的超声接收器捕捉,系统通过计算脉冲的延迟时间,实时确定下颌的空间位置。该设备的测量精度为每 20 mm 运动路径中矢状向误差 0.10 mm,冠状向误差 0.13 mm,垂直向误差 0.17 mm^[12],总体优于 CADIAX 的每 5 mm 运动路径中矢状面误差 0.07 mm,水平面误差 0.57 mm^[13]。此外,JMA 的下颌面弓只有 25 g,相较 CADIAX 的 96 g 面弓重量^[14],可减少对下颌运动的干扰,更有利于还原自然条件下的运动,并易于患者接受。配备的计算机软件可实现髁突运动数据的多维度分析,如计算髁突路径的长度、倾斜度、旋转度以及速度等,为定性和定量评估 TMJ 功能与诊断关节疾病提供了可能^[15]。

1.2 电子描记技术在 TMJ 运动分析中的应用

电子描记技术可即时、直观地获取髁突运动轨迹,常用于不同病理状态,如 TMD、错颌畸形、下颌不对称等患者的关节运动特征分析。

1.2.1 TMD 患者关节运动特征分析 在 TMD 患者中,髁突轨迹与健康人呈现出明显的差异。周燕丽等^[7]测量了双侧 DDwR 和 DDwoR 患者各 18 名,发现 DDwR 患者张口闭口时髁突矢状轨迹形态明显异常。而 DDwoR 患者张口闭口期间,髁突运动范围明显减少,但前伸后退运动范围正常,提示关节转动受到限制。Santana-Mora 等^[16]对 24 名慢性、单侧



(a) 机械电子式描记设备

(b) 软件中下颌运动轨迹

(c) 超声式描记设备

图1 电子描记系统

Fig. 1 Electronic axiography system (a) Electromechanical axiography device, (b) Mandibular movement trajectories in software, (c) Ultrasonic axiography device

注:图1(a)型号为Cadiax Compact 2;图1(b)来源于Gamma Dental官网(<https://www.gamma-dental.com/en/home.html>);图1(c)型号为Jaw Motion Analyzer+,来源于Zebris官网(<https://www.zebris.de/en/>)

TMD 症状严重(疼痛强度 4~9)患者进行运动学评估发现,患侧通常与习惯性咀嚼侧一致,且该侧髁突矢状面倾斜度($50.52^\circ \pm 9.98^\circ$)显著大于健侧($45.50^\circ \pm 7.98^\circ$),侧方引导角(lateral guidance angles)减小,推测是 TMJ 的病理性重塑以及牙齿接触增加所带来的结构改变所造成,并建议双侧咀嚼以减少 TMD 症状和结构不对称。另外,Farrar 等^[17]研究指出,在下颌侧方运动时,TMD 患者与正常健康个体也存在差异。Choi 等^[18]研究发现,TMD 患者工作髁常出现过度侧移[(1.71 ± 0.86)mm];相比之下,健康组的工作髁以旋转为主,位移极小[(0.51 ± 0.19)mm]。这些差异可能与关节盘、关节囊及韧带的退行性改变有关,从而导致关节盘-髁突复合体不稳定。

1.2.2 错颌畸形患者关节运动特征分析 错颌畸形也可能导致髁突位置和运动学特征的改变,并常伴有 TMD 症状,从而影响 TMJ 的功能^[19]。张春香等^[9]研究表明,安氏 II 类 1 分类患者在单侧咀嚼时,髁突矢状面轨迹重复性较差,揭示咬合紊乱可能是造成下颌不稳定的原因;双侧咀嚼时,髁突运动范围仅为(5.29 ± 3.03)mm,显著低于健康者[(7.79 ± 2.33)mm],这可能与深覆颌带来的下颌运动限制有关。而伴有 TMD 的安氏 II 类 1 分类错颌患者在双侧咀嚼时,还存在左右不对称的轨迹特征。常忠福等^[20]对安氏 III 类患者的研究显示,其在张闭口和侧方运动中的髁突轨迹形态与正常颌者相似,但伴有 TMD 的安氏 III 类患者则表现出髁突运动范围显著减小,较高的轨迹交叉率,以及较差的左右对称性。该结果表明,TMD 因素与错颌因素共

同存在时 TMJ 功能受损明显加剧。

1.2.3 下颌不对称患者关节运动特征分析 在下颌不对称患者的关节运动特征分析领域,Ikeda 等^[21]对 25 名下颌不对称患者(颈部偏斜>4 mm)的研究发现,下颌前伸运动期间髁突路径长度与下颌不对称程度呈显著负相关。具体表现为下颌偏斜侧髁突长度、体积和下颌支高度越小,相应髁突路径长度越大,这可能反映了对下颌形态不对称的一种功能代偿。Lee 等^[22]在 30 名下颌不对称患者(颈部偏斜>3 mm)的下颌前伸运动中观测到偏斜侧髁突更大的矢状面倾斜角,且与关节面形态改建相吻合,以及侧方运动中更长的髁突路径。该研究指出,与颌面形态相比,髁突运动模式与 TMJ 形态的相关性更强。因此,仅依赖颌面解剖形态评估可能无法准确反映髁突运动模式。这种观点进一步解释了为何在正颌手术后尽管面部更对称,髁突运动不对称的现象仍可能存在。Tun 等^[23]研究指出,偏移侧关节间隙显著减小。这可能会导致关节盘力学负荷增加,进而增加 TMD 发病风险,影响正颌术后的长期效果^[24-25]。

以上研究表明,关节情况、咬合状态以及颌骨位置均对 TMJ 的运动产生特殊影响,TMJ 运动分析不仅在揭示关节运动机制方面提供了重要手段,也在优化治疗方案、管理预后方面展现潜力。

2 光学捕捉技术

2.1 光学捕捉技术原理

光学捕捉技术首先通过两台或两台以上的红外摄像机追踪固定在上颌和下颌处的多个反光或

主动发光标记点的运动轨迹,再通过与骨关节的配准,最终将标记点的运动转换为骨骼运动。上颌标记点通常借助头带或面弓固定在头部,下颌标记点通常黏附在下颌牙的殆叉上(见图2)。目前常用的光学捕捉系统有加拿大 NDI 系统、意大利 BTS 系统、英国 Vicon 系统以及法国 Modjaw 系统等,可记录各种复杂口腔运动(如张闭口、侧移、前伸以及咀嚼和说话等动作)过程的关节 6 自由度数据、髁突或切牙的运动轨迹、运动速度和角速度等。据统计,这项技术在测量 TMJ 运动时平移精度在 0.10~1.00 mm 之间,旋转精度为 0.40°~1.90°^[26-28]。误差主要源于刚性标记框架的内部变形、框架与下颌骨之间的固定问题以及标记点的识别难度。



(a) 便携式光学捕捉设备 (b) 上下颌固定架及标记点

图 2 光学捕捉系统

Fig. 2 Optical motion capture system (a) Portable motion capture device, (b) Maxillary and mandibular fixators with markers

注:图2(b)来源于 Modjaw 官网(<https://www.modjaw.com/en/>)。

2.2 光学捕捉技术在 TMJ 运动分析中的应用

光学捕捉技术在 TMJ 运动学的研究中不仅能够提供详细的运动数据,其与影像学三维重建技术的结合使得观测骨骼运动更加直观,常用于治疗前后关节的运动观测、功能评价以及关节植入物改进等领域的应用。

2.2.1 在 TMJ 置换术中的应用 Woodford 等^[29]利用光学捕捉技术与 CT 成像配准的方法,对 6 名单侧全颞下颌关节置换(temporomandibular joint replacement, TJR)女性患者进行基于解剖结构的关节运动学测量,发现原生髁突的前移量是人工髁突的 3 倍,导致张口运动的不对称和下颌侧向偏斜。此外,单侧 TJR 患者的原生侧髁突在侧方、前伸和咀嚼运动中,相较于健康者表现出更大的向下位移,这被视为对患侧髁突运动不足的一种功能代

偿。这种过度活动会改变原生髁突所载荷,进而可能导致髁突结构的重塑^[10]。Wojczyńska 等^[30]研究认为,无论是单侧还是双侧置换,在张口、前伸和侧方运动中,人工髁突的运动范围均不及原生髁突,而双侧 TJR 患者在前伸和侧方运动中的受限则更为明显。髁突的滑动受限以前主要被认为是由于手术造成翼外肌的结构破坏和功能丧失^[31]。而 Wojczyńska 等^[32]后续研究认为,髁突滑动受限可能更加取决于植入假体的设计,受试者在使用 TMJ Concepts 和 Biomet Microfixation 假体进行 TJR 后,临床结果存在较大差异。

2.2.2 在正颌、正畸治疗中的应用 在评价骨性 III 类错殆患者正颌术后的运动功能中,Ugolini 等^[33]研究表明,患者的最大张口度,以及前伸和侧方运动的范围没有显著变化。该结果表明,尽管进行了结构调整,下颌的基本运动能力保持稳定。同时,最大张口期间的髁突滑动成分占比显著提高(从 20% 提高到 23.6%),显示正颌手术改善了关节的运动质量。Ishihara 等^[34]使用种植体锚定正畸技术(miniscrew anchorage)治疗了 1 名患有 II 类 2 分类错殆和单侧磨牙剪刀咬合的成年患者,治疗后不仅改善了患者的牙齿排列和咬合状况,还观察到治疗后双侧 TMJ 运动和切牙路径更加对称,有助于预判口颌系统的长期健康。上述基于光学动作捕捉技术的研究结果,对评价手术疗效、改善 TMJ 植入物设计等具有重要实际意义。

3 双平面透视追踪技术

3.1 双平面透视追踪技术原理

双平面透视追踪技术通过两台高速 X 线机呈正交放置,实时捕捉 TMJ 运动时的 X 线影像,再通过 2D-3D 配准算法,将基于 CT 或 MRI 重建得到的 3D 骨骼模型与运动时双平面 2D 影像匹配,以实现 TMJ 运动的可视化分析(见图 3)。

3.2 双平面透视追踪技术在 TMJ 运动分析中的应用

与电子描记和光学捕捉技术相比,双平面透视追踪技术由于无需佩戴面弓,不但对牙列缺失或牙齿不稳患者更为友好,适用于更广泛的患者群体,还避免了面弓干扰引起的误差^[35]。在其他关节运动学研究领域,双平面透视追踪技术以其高精度被



图3 双平面透视追踪系统

Fig. 3 Dual fluoroscopic imaging system

公认为是在体关节运动分析的“金标准”, Wang等^[36]、Tsai等^[37]研究均证实,在脊柱、髋关节运动测量的精度可达亚毫米级;而颌骨以其更丰富的骨性特征和图像细节,可进一步提高该技术追踪TMJ运动的精度^[5]。Henderson等^[5]、Menegaz等^[38]通过研究兔和猪的TMJ动态功能,揭示了该技术在捕捉髁突复杂动作中的高可重复性和高精度(平移精度0.06~0.44 mm,旋转精度0.13~0.26 mm)。Henderson等^[39]通过干预咬合的方式构建兔子早期TMJ OA模型,探究了轻度TMJ OA的运动学影响,发现经6周的咬合干预后,实验兔的TMJ运动范围显著减少,此研究进一步证实了双平面透视追踪技术在监测TMJ病理变化中的应用价值。但可能出于对电离辐射的担忧^[40],目前尚未有使用双平面透视开展人类TMJ运动学的研究报道。未来随着技术的改进和辐射剂量的计算和优化,有望扩大其在研究和临床上的应用。

4 总结与展望

本文回顾了近10年的电子描记、光学捕捉以及双平面透视追踪技术在TMJ运动学分析方面的显著进展。特别关注这些技术在TMD患者、错颌患者和下颌不对称患者等不同口腔颌面患者中的应用,从基础的关节运动学特征研究,到对颌面外科手术、正畸矫治和关节置换等治疗的效果评价、假体改进,这些技术为临床医生和物理治疗师提供了多维的资料,提升了诊疗的精度。电子描记、光学捕捉技术均具有实时记录运动数据和直观观察运动轨迹的优点,适用于关节运动特征分析、治疗全过程的功能评估以及辅助诊断等场景。然而,这些技术的精度易受多种因素干扰,如标记框架固定

不稳;面弓过重影响自然的下颌运动;超声电子描记设备则易受到温度和噪声的影响^[41];光学捕捉过程中若将标记点贴于面部皮肤,误差可高达3.27 mm^[42]。此外,佩戴颌叉可能对牙列缺失或牙齿不稳的患者不利。双平面透视追踪技术在精度方面无上述影响,适用于高精度的运动学研究。但目前在后期的数据处理效率以及电离辐射方面仍面临挑战^[40],故临床应用受限。未来的运动分析技术尚存在广阔创新空间,需注重设备的便携性、操作简便性及安全性,以便于在临床环境中对TMJ功能进行有效评估,促进研究成果向临床转化。

随着口腔医学数字化分析的发展趋势,结合运动学数据和多种数字化技术被认为是更高效、精准的诊疗工具,通过采集下颌运动参数、口内扫描、面部扫描和影像学等资料,并整合到计算机辅助设计软件中,生成虚拟颌架或虚拟患者,在咬合设计和修复体设计上显示出巨大的应用前景。

此外,口颌肌作为口颌系统中的重要成分,其正常的协作模式对于颌整体健康十分关键,但目前的研究多关注于TMD、头颈姿势或筋膜疼痛与口颌肌的关系等方面,且表面肌电尚无法探查翼外肌、翼内肌等深层肌。因此,口颌肌激活模式与TMJ运动的相互作用尚未充分阐明。未来研究应进一步结合运动分析与肌电图、动力学仿真,建立TMJ运动与口颌肌活动的关系模型,这将有助于临床医生和物理治疗师更好地评估TMJ功能和口颌肌健康状态,从而制定更加精准的治疗方案。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:秦际雄负责资料收集、论文撰写;张玲、杨洋洋负责论文审核及修改;蔡宗远、王少白负责论文指导及修改;蔡斌负责论文指导及选题。

参考文献:

- [1] 张旻,张淞柏,王君俊. 口腔生物力学2022年研究进展[J]. 医用生物力学, 2023, 38(5): 854-863.
ZHANG M, ZHANG BS, WANG JJ. Research advances in dental biomechanics in 2022 [J]. J Med Biomech, 2023, 38(5): 854-863.
- [2] 刘亚蕊,张清彬,冯梓峻,等. 颞下颌关节紊乱病在不同年龄群体的调查研究[J]. 口腔医学研究, 2015, 31(12): 1254.
- [3] SCRIVANI SJ, KEITH DA, KABAN LB. Temporomandibular

- disorders[J]. *N Engl J Med*, 2008, 359(25): 2693-2705.
- [4] 赵翰驰, 兰婷婷, 向碧璐, 等. 髁突轨迹描记曲线系统分析[J]. *华西口腔医学杂志*, 2017, 35(5): 555-560.
- [5] HENDERSON SE, DESAI R, TASHMAN S, *et al.* Functional analysis of the rabbit temporomandibular joint using dynamic biplane imaging [J]. *J Biomech*, 2014, 47(6): 1360-1367.
- [6] MAPELLI A, MACHADO BCZ, GARCIA DM, *et al.* Three-dimensional analysis of jaw kinematic alterations in patients with chronic TMD-disc displacement with reduction[J]. *J Oral Rehabil*, 2016, 43(11): 824-832.
- [7] 周燕丽, 周薇娜, 于林凤, 等. 颞下颌关节盘移位患者髁突运动轨迹分析[J]. *口腔医学研究*, 2022, 38(2): 186-190.
- [8] LEI J, HAN J, LIU M, *et al.* Degenerative temporomandibular joint changes associated with recent-onset disc displacement without reduction in adolescents and young adults[J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2017, 45(3): 408-413.
- [9] 张春香, 王天齐, 刘冬巧, 等. 伴颞下颌关节紊乱病安氏 II 类 1 分类错(牙合)患者咀嚼运动中髁突轨迹分析[J]. *上海口腔医学*, 2022, 31(4): 429-434.
- [10] KIM JH, PARK BH, YOO MS, *et al.* Stability of the natural joint side in unilateral alloplastic total temporomandibular joint replacement using a ready-made system[J]. *Appl Sci*, 2021, 11(9): 3935.
- [11] RIBEIRO JAM, DE RESENDE CMBM, LOPES ALC, *et al.* Association between prosthetic factors and temporomandibular disorders in complete denture wearers [J]. *Gerodontology*, 2014, 31(4): 308-313.
- [12] HUGGER A, BOLONI E, BERTIEN U, *et al.* Accuracy of an ultrasonic measurement system for jaw movement recording[J]. *J Dent Res*, 2001, 80(4): 1226-1226.
- [13] SADAT-KHONSARI R, FENSKE C, KAHL-NIEKE B, *et al.* Mandibular instantaneous centers of rotation in patients with and without temporomandibular dysfunction [J]. *J Orofac Orthop*, 2003, 64(4): 256-264.
- [14] SCHIERZ O, KLINGER N, SCHÖN G, *et al.* The reliability of computerized condylar path angle assessment [J]. *Int J Comput Dent*, 2014(17): 35-51.
- [15] TALMACEANU D, BOLOG N, LEUCUTA D, *et al.* Diagnostic use of computerized axiography in TMJ disc displacements [J]. *Exp Ther Med*, 2022, 23(3): 213.
- [16] SANTANA-MORA U, LÓPEZ-CEDRÚN J, SUÁREZ-QUINTANILLA J, *et al.* Asymmetry of dental or joint anatomy or impaired chewing function contribute to chronic temporomandibular joint disorders [J]. *Ann Anat*, 2021(238): 151793.
- [17] FARRAR WB, MCCARTY WL. Inferior joint space arthrography and characteristics of condylar paths in internal derangements of the TMJ [J]. *J Prosthet Dent*, 1979, 41(5): 548-555.
- [18] CHOI BT, HWANG DY, LEE GH, *et al.* Computerized ultrasonic axiographic evaluation of condylar movement in patients with internal derangement of the temporomandibular joint [J]. *Angle Orthod*, 2019, 89(6): 924-929.
- [19] 徐婧, 施亮, 王晶晶, 等. 成人安氏 II 类 I 分类错伴有颞下颌关节紊乱病矫治前后面型侧貌变化[J]. *实用医学杂志*, 2016, 32(11): 1836-1839.
- [20] 常忠福, 陈杰. 恒牙殆 Angle III 类错殆伴颞下颌关节疾病患者髁突运动特征分析[J]. *上海口腔医学*, 2016, 25(6): 738-743.
- [21] IKEDA M, MIYAMOTO JJ, TAKADA J, *et al.* Association between 3-dimensional mandibular morphology and condylar movement in subjects with mandibular asymmetry [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2017, 151(2): 324-334.
- [22] LEE WJ, PARK KH, KANG YG, *et al.* Automated real-time evaluation of condylar movement in relation to three-dimensional craniofacial and temporomandibular morphometry in patients with facial asymmetry [J]. *Sensors*, 2021, 21(8): 2591.
- [23] TUN OO L, MIYAMOTO JJ, TAKADA JI, *et al.* Three-dimensional characteristics of temporomandibular joint morphology and condylar movement in patients with mandibular asymmetry[J]. *Prog Orthod*, 2022, 23(1): 50.
- [24] 鄢梨, 王为, 邱嘉旋. 不同稳定咬合板厚度对可复性前移位患者颞下颌关节应力分布影响[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(2): 280-286.
- YAN L, WANG W, QIU JX. Effects of different stabilization splint thicknesses on stress distribution in temporomandibular joint for patients with anterior disc displacement with reduction [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(2): 280-286.
- [25] HASHIMOTO T, KURODA S, TANIMOTO Y, *et al.* Correlation between craniofacial and condylar path asymmetry [J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2008, 66(10): 2020-2027.
- [26] OGAWA T, OGAWA M, KOYANO K. Different responses of masticatory movements after alteration of occlusal guidance related to individual movement pattern [J]. *J Oral Rehabil*, 2001, 28(9): 830-841.
- [27] OTAKE Y, SUZUKI N, HATTORI A, *et al.* Real-time mandibular movement analysis system using four-dimensional cranial bone model [J]. *Syst Comp Jpn*, 2006, 37(8): 1-12.
- [28] GALLO LM, BRASI M, ERNST B, *et al.* Relevance of mandibular helical axis analysis in functional and dysfunctional TMJs [J]. *J Biomech*, 2006, 39(9): 1716-

- 1725.
- [29] WOODFORD SC. Kinematics of the jaw following total temporomandibular joint replacement surgery [J]. *J Biomech*, 2023(159): 111741.
- [30] WOJCZYŃSKA A, LEIGGENER CS, BREDELL M, *et al.* Alloplastic total temporomandibular joint replacements: Do they perform like natural joints? Prospective cohort study with a historical control [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2016, 45(10): 1213-1221.
- [31] MERCURI LG, ANSPACH WE. Principles for the revision of total alloplastic TMJ prostheses [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2003, 32(4): 353-359.
- [32] WOJCZYŃSKA A, GALLO LM, BREDELL M, *et al.* Alterations of mandibular movement patterns after total joint replacement: A case series of long-term outcomes in patients with total alloplastic temporomandibular joint reconstructions [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2019, 48(2): 225-232.
- [33] UGOLINI A, MAPELLI A, SEGÙ M, *et al.* Kinematic analysis of mandibular motion before and after orthognathic surgery for skeletal Class III malocclusion: A pilot study [J]. *Cranio*, 2017, 35(2): 94-100.
- [34] ISHIHARA Y, KURODA S, SUGAWARA Y, *et al.* Long-term stability of implant-anchored orthodontics in an adult patient with A class II division 2 malocclusion and a unilateral molar scissors-bite [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2014, 145(4): S100-S113.
- [35] WAGNER A, SEEMANN R, SCHICHO K, *et al.* A comparative analysis of optical and conventional axiography for the analysis of temporomandibular joint movements [J]. *J Prosthet Dent*, 2003, 90(5): 503-509.
- [36] WANG S, PASSIAS P, LI G, *et al.* Measurement of vertebral kinematics using noninvasive image matching method-validation and application [J]. *Spine*, 2008, 33(11): E355-361.
- [37] TSAI TY, LI JS, WANG S, *et al.* A novel dual fluoroscopic imaging method for determination of THA kinematics: *In-vitro* and *in-vivo* study [J]. *J Biomech*, 2013, 46(7): 1300-1304.
- [38] MENEGAZ RA, BAIER DB, METZGER KA, *et al.* XROMM analysis of tooth occlusion and temporomandibular joint kinematics during feeding in juvenile miniature pigs [J]. *J Exp Biol*, 2015, 218(16): 2573-2584.
- [39] HENDERSON SE, TUDARES MA, TASHMAN S, *et al.* Decreased temporomandibular joint range of motion in a model of early osteoarthritis in the rabbit [J]. *J Maxillofac Oral Surg*, 2015, 73(9): 1695-1705.
- [40] TERSI L, BARRÉ A, FANTOZZI S, *et al.* *In vitro* quantification of the performance of model-based mono-planar and bi-planar fluoroscopy for 3D joint kinematics estimation [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2013, 51(3): 257-265.
- [41] TIAN S, DAI N, LI L, *et al.* Three-dimensional mandibular motion trajectory-tracking system based on BP neural network [J]. *Math Biosci Eng*, 2020, 17(5): 5709-5726.
- [42] CHEN CC, CHEN YJ, CHEN SC, *et al.* Evaluation of soft-tissue artifacts when using anatomical and technical markers to measure mandibular motion [J]. *J Dent Sci*, 2011, 6(2): 95-101.