

# 下颌运动分析系统在颞下颌关节疾病中的研究进展

张润东<sup>1,2</sup>, 章燕珍<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>浙江大学医学院国际健康研究院, 浙江 义乌

<sup>2</sup>浙江大学医学院附属第二医院综合牙科, 浙江 杭州

收稿日期: 2024年8月10日; 录用日期: 2024年9月2日; 发布日期: 2024年9月11日

## 摘要

颞下颌关节是人体唯一左右联动、相互协调的关节, 下颌运动受颞下颌关节和神经肌肉系统支配可直接反映口颌系统的生理功能, 对下颌运动轨迹进行研究有助于医师了解颞下颌关节相关疾病的生理病理, 辅助诊断及评估干预治疗手段。本文就下颌运动、下颌运动分析系统的下颌运动轨迹及肌电图在颞下颌关节疾病中的应用作一综述。

## 关键词

下颌运动, 下颌运动分析系统, 颞下颌关节, 颞下颌关节紊乱病, 肌电图

# Research Progress of the Mandibular Movement Analysis System in Temporomandibular Joint Diseases

Rundong Zhang<sup>1,2</sup>, Yanzhen Zhang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of International Institutes of Medicine, School of Medicine, Zhejiang University, Yiwu Zhejiang

<sup>2</sup>Department of General Dentistry, The Second Affiliated Hospital of School of Medicine, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang

Received: Aug. 10<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 2<sup>nd</sup>, 2024; published: Sep. 11<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The temporomandibular joint (TMJ) is the only joint with bilateral linkage and mutual coordination,

\*通讯作者。

文章引用: 张润东, 章燕珍. 下颌运动分析系统在颞下颌关节疾病中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(9): 583-589. DOI: 10.12677/acm.2024.1492502

and the mandibular movement governed by the TMJ and neuromuscular system can directly reflect the physiological function of the stomatognathic system. The study of the trajectory of mandibular movement can help physicians to understand the physiology and pathology of the TMJ related diseases, and to assist in the diagnosis and evaluation of the intervention and treatment means. This paper reviews the mandibular movement, the mandibular movement analysis system to record the mandibular movement trajectory, and electromyography in temporomandibular joint diseases.

## Keywords

**Mandibular Movement, Jaw Motion Analyzer System (JMA System), Temporomandibular Joint (TMJ), Temporomandibular Disorders (TMDs), Electromyography (EMG)**

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

颞下颌关节紊乱病(Temporomandibular disorders, TMDs)是一种临床发病率极高的口颌系统疾病, 涉及颞下颌关节(Temporomandibular joint, TMJ)、咀嚼肌及其相关软硬组织等多种结构, 其临床症状主要表现为疼痛, 下颌运动受限、关节弹响及杂音等[1]。目前, 大多数研究依据国际 DC/TMD 诊断标准(Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders, DC/TMD)对颞下颌关节紊乱病进行相关检查和诊断。DC/TMD 是以 1992 年美国国立牙科研究院提出的 RDC/TMD (Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders)为基础的改良, 具有更高的临床诊断价值和实用价值[2]。目前, 颞下颌关节磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)和锥形束 CT (Cone-beam Computer Tomography, CBCT)已经成为诊断颞下颌关节疾病的金标准, 其中 MRI 用于诊断关节盘是否移位, CBCT 是颞下颌关节骨关节病诊断的金标准[3] [4]。然而, 颞下颌关节紊乱病的发病机制复杂, MRI 及 CBCT 等设备价格高昂且不易得, 存在一定的局限性, 且 CBCT 仅在牙尖交错位(Intercuspal Position, ICP)进行一次关节结构的静态扫描, 无法满足对颞下颌关节软硬组织整体动态的观测[5] [6]。使用下颌运动分析系统对颞下颌关节的三维动态运动进行描述和观测, 从数字化的角度实时获取下颌三维运动状态及相应坐标及描绘肌电图, 可以使得对颞下颌关节疾病的诊断变得更加全面、客观和准确[7] [8]。研究者们使用下颌运动轨迹记录仪观测运动过程中髁突的位置, 当髁突位置在矢状面、冠状面和水平面上大于正常空间位置 0.3 mm 时, 即可认为髁突位置有偏差。人体在完成日常语言、进食及表情等口颌系统功能活动都需要以下颌的运动表现出来。下颌运动需颞下颌关节、咀嚼肌及牙齿咬合等多种因素共同协调工作, 因此对下颌运动轨迹和功能活动中肌电变化的记录和描述分析具有非常重要的意义[9] [10]。目前, 越来越多的学者已经使用各种下颌运动分析系统和肌电记录仪对口腔修复、口腔颌面外科及颞下颌关节相关疾病的下颌运动轨迹进行研究, 本文拟对此作一综述。

## 2. 下颌运动的形式

下颌运动受韧带、关节斜面及牙齿形态与排列的限制, 双侧联动的颞下颌关节决定了下颌运动是复杂的、相互关联的且涉及三维方向的转动和滑动运动。在功能运动中, 双侧髁突在关节窝内发生先转动再滑动的复杂运动, 单纯转动运动发生在小张口运动开口至 20~25 mm 左右, 之后随着张口运动的继续, 即开口铰链运动的第二阶段, 髁突滑动至关节结节最下方, 下颌转动至最大开口位。下颌运动包括各个

方向上的功能运动和边缘运动。一般认为边缘运动是指下颌在整个运动范围内移动时,产生的极限的具有可重复性的运动轨迹,具有一定的临床参考价值。下颌的边缘运动包括最大前伸运动(Maximum Protrusion Movement),最大左右侧侧方运动(Maximum Right/Left Lateral Excursion Movement)及最大张口运动(Maximum Opening Movement),包括 Posselt 运动。功能运动范围处于边缘运动范围内。下颌运动轨迹体现了由髁突、关节盘及其附着的肌肉、韧带、关节囊构成的盘髁复合体在中枢神经系统引导下相互制约,相互协调的功能潜力,可直观且客观地反映颞下颌关节的功能状态。下颌运动轨迹在一定程度上反映了髁突-关节盘复合体的运动协调一致性,有助于提高临床上颞下颌关节疾病的早期诊断率,具有一定的临床意义[11]-[13]。

### 3. 下颌运动轨迹的研究发展历史

19 世纪初 Gariot 为满足对患者进行体外全口义齿排牙及调骀的需求,发明了一种可以实现模拟无牙颌模型间开闭口运动的骀架,后续随着人们通过对大量尸体进行解剖等观察,Evens、Bonwell 和 Walker 等学者认识到不同个体间的髁突间距、髁道斜度等参数存在差异,进而设计了各种可调骀架使其能够更真实有效的模拟人体的下颌运动[9] [14]。1889 年 Luce 等利用 X 线摄影技术首次定量测量了矢状面张闭口运动过程中的双侧髁突运动轨迹;1921 年 McCollum 等使用机械式下颌运动描记装置研究髁突运动;Jankelson 等首次利用计算机系统控制的下颌运动轨迹描记仪器(MKG)记录下颌运动中的路线;1988 年,Slavicek 等发明了 Cadiax 数字化髁突运动轨迹描记系统;Hayashi 等制作出以光电技术为原理的数字化下颌运动轨迹描记仪;Shibasak 等基于压力传感技术发明了数字化下颌运动轨迹描记系统;2000 年,德国 Hensen 公司设计制作了基于超声波原理的描记仪。2001 年德国吉尔巴赫公司推出具有与义齿设计软件对接功能的下颌运动轨迹描记仪(Zebris Jaw Motion Analyser System, JMA system),该设备利用超声脉冲测量技术,可以按照操作者要求记录不同状态下的下颌运动轨迹,同时搭载肌电分析系统,可同时描述关节髁突及肌肉等多个结构的变化。

### 4. Zebris 超声脉冲式下颌运动分析系统

通过多普勒效应和刚体运动原理得到的超声波式下颌运动轨迹描记系统,其操作简单,界面清晰直观,与各类型义齿设计软件兼容性好,在正畸、修复、颌面外科、咬合重建、关节疾病等诸多领域应用迅速而广泛,大大弥补了普通运动面弓的不足之处[15]。Kordaß 等人的研究结果显示 Zebris 超声电子面弓在测量下颌运动各个角度的误差小于  $1.5^{\circ}$  [16]。Edinger 等认为 Zebris 下颌运动分析系统表现出 0.28 mm 的精确度[17],可靠性较好。该系统由一个固定有四个超声信号接收器的面弓和一个下颌金属骀叉(吸附有一个安装有 3 个信号发射器的磁性装置)构成,通过双侧耳塞经外耳道定位,以眶耳平面作为参考平面。测量中上颌接收器保持固定,下颌发射器在下颌运动过程中发射信号,工作时不影响上下颌牙列的正常咬合关系,设备通过信号来源的时间变化,计算并记录下颌的空间位置变化。所有记录的数据与计算机软件同步,能够与计算机辅助设计软件等多个系统兼容,提供医技之间良好交流的信息桥梁。

### 5. 下颌运动分析系统在颞下颌关节疾病诊断治疗中的应用

#### 5.1. 下切牙切端及髁突运动轨迹

理想的下颌运动轨迹测量应是无接触的、对患者无损伤的、无负荷的、操作简便的,传统下颌运动轨迹描记装置如哥特式弓等仅能记录到下切牙切端运动轨迹,且无法在不存在咬合干扰的情况下以双侧髁突作为轨迹观测点进行测量,因此较长时间内切牙运动轨迹逐渐成为研究者们的主要分析内容之一。MKG 等描记仪通过磁电或光电转换技术来显示下颌运动轨迹,可以简单快捷地记录下颌切牙点的运动轨

迹, 为医师了解 TMJ 的功能状态提供快速的参考[18]。尽管, 研究者们可以在下颌的各种运动中观测髁突的运动情况, Buschang 等认为切牙运动轨迹在侧方运动的直线距离可以更好的反映髁突的运动, 认为将侧方及前伸运动用于临床评估髁突的运动更为恰当[19]。Choi 等研究得出结论: 侧方运动时, 颞下颌关节内部病变会影响髁突的平衡工作[20]。

切牙运动轨迹在一定程度上可以间接反映下颌运动特征及 TMJ 内部功能状态, 切牙运动轨迹与髁突运动轨迹表现出中度相关性。最理想的对颞下颌关节状态的评估方法是直接描记髁突的运动轨迹, 然而记录髁突运动轨迹需首先建立起髁突观测点及相关三维坐标的确定。有关髁突运动轨迹髁突观测点的选择, 目前研究最多的是髁突旋转中心点(Center of Rotation, CoR), 将髁突运动铰链轴点作为观测髁突运动的标志点。髁突旋转中心点可认为是在下颌运动中, 髁突沿关节窝滑动时盘髁复合体的中心, 该点运动轨迹相对稳定, 受其他因素影响较小, 被大多数研究者认为最能代表髁突的运动[21]。有研究者指出使用 CoR 作为观测点具有一定的可靠性及精确度, 即小于 0.1 mm [22]。Zebirs 下颌运动分析系统以髁突中心点作为运动轨迹观测点, 反映颞下颌关节的内部形态与结构的相应状态, 以此为基础建立一套可靠的和具有临床意义的 TMJ 关节运动模型[23] [24]。

越来越多的研究者提出 TMD 患者的下颌运动轨迹明显异常于正常人群的下颌运动轨迹[25]。正常人的髁突运动轨迹平稳且可重复性较高, 运动始末髁突位置的落点差异较小。TMD 患者髁突运动轨迹路径不规则, 多出现转折、弹跳、颤抖、双侧不对称以及往返重合性差的特点, Sadat 等学者的研究显示 TMD 患者的髁突运动范围 4.1 mm 明显小于正常人群范围[21]。Taniguchi 等的研究内容同样显示 TMD 患者运动轨迹及咬合位置不稳定[26]。张春香等对伴有 TMD 的安氏 II 类 1 分类错骀患者的髁突运动轨迹进行分析, 发现错骀伴 TMD 患者的运动轨迹较不伴 TMD 的个别正常骀患者差, 曲线短小[27]。原因可能是安氏 II 类错骀患者磨牙处于远中关系, 缺乏良好的咬合引导, 且深覆骀同时对下颌运动起到一定的限制作用[28]。周燕丽等的研究显示双侧不可复性盘前移位患者髁突运动轨迹长度短, 曲度小, 整体较为平直, 且曲线重合性差。双侧可复性盘前移位患者运动往返曲线重合性差, 曲线交叉呈“8”字型, 曲线曲度较大[29]。Marpaung 等研究了平均年龄为 28 岁的 TMD 患者在旋转和平移结合的 6 个自由度上的运动特征, 并与 TMJ-MRI 结果对比发现, 使用下颌运动轨迹结合临床检查进行诊断, 其结果可与磁共振的诊断特异性达 96.6% [30] [31]。下颌运动轨迹由 TMJ、相关肌肉组织等共同协调决定, TMD 患者运动范围受限可能由于 TMJ 内部结构紊乱及颌面部肌肉疲劳、痉挛及功能障碍等因素共同引起, 导致患者髁突-关节盘复合体失去平衡协调状态, 不能平滑顺畅地支配下颌各功能运动及边缘运动[32]。有研究者指出使用下颌运动分析系统对 TMD 诊断具有较高的特异性, 但诊断的灵敏度相对较低, 可能原因是一些关节内部改变仅有影像学检查可以明确诊断, 但同时 Marpaung 指出诊断的准确性比灵敏度对于 TMD 的诊断更为重要, 可以在一定程度上防止过度医疗的发生。

## 5.2. 髁突位置

在 Zebirs 下颌运动分析系统的髁突位置模块中, 通过对患者进行反复多次指导, 获得患者在牙尖交错位、下颌姿势位、下颌后退位及习惯性咬合位等多个咬合状态下的双侧髁突坐标。针对咬合关系紊乱, 无法准确找到稳定颌位的患者, 可以通过多次咬合运动获取重复性最高的下颌位置, 寻找理想的适应性的髁突稳定位置, 为医师临床治疗方案的制定提供参考。也可作为评价各种咬合板如稳定性咬合板、再定位咬合板治疗颞下颌关节紊乱病疗效的评估工具。有学者对 29 例 TMD 患者使用下颌运动分析系统设计个性化治疗咬合板后, 再次使用下颌运动分析系统对髁突位置和肌电进行评估, 发现 21 例患者髁突位置和肌电测量趋于正常分布, 临床自评表满意。此外, 有研究者使用数字化电子面弓用于全口义齿修复前后的临床效果评价[33]。下颌运动轨迹分析可以提供客观的疗效评价, 使对关节病的治疗更加精准、规范。

### 5.3. 下颌运动与肌电活动

下颌运动不仅有赖于颞下颌关节和牙齿咬合的共同调控, 与 TMJ 相关的咀嚼肌在下颌行使功能中同样发挥重要的作用[34] [35]。表面肌电图(Surface Electromyography, sEMG)是使用电极获取肌肉兴奋时的肌电活动并通过电极片将信号导入肌电图仪器, 在示波屏上定量记录电信号放大的图像以供分析。表面肌电具有易操作且对患者无损伤性的优点, 尤其适用于口腔颌面部表浅肌肉功能的检查。1949 年 Moyer 首次使用肌电仪研究健康人群口腔颌面部的肌电活动, 对咬肌、颞肌前束、胸锁乳突肌, 二腹肌前腹等咀嚼肌的肌电图描记在口腔领域被广泛应用。肌电图可以客观地评价功能运动中咀嚼肌的生理状态, 记录不同疾病状态下异常的咀嚼肌肌电活动[36]。李波等通过对 36 名正常骀者进行肌电图测量发现正常人在下颌姿势位及前后运动中, 双侧同名肌作用基本相同[37]。即在口颌系统健康的条件下, 左右两侧咀嚼肌的肌电活动表现出协调一致的状态。Hannam 等得出结论当处于下颌姿势位时, 颞肌前束、咬肌、二腹肌前腹及胸锁乳突肌均保持轻微的肌电活动, 且颞肌前束大于咬肌大于二腹肌前腹[37]-[39]。颞肌在下颌姿势位中肌电活动最为明显的原因可能是颞肌前束是维持下颌姿势位的主要肌肉。胸锁乳突肌作为颈部肌肉也在下颌姿势位中表现出明显的肌电变化, 以维持下颌及头颈部的正常姿态。对下颌偏斜患者的肌电研究也显示出胸锁乳突肌等颈部肌群对下颌位置及头颈姿势位均起到重要作用。在 ICP 最大紧咬位时, 颞肌及咬肌均处于最大收缩状态, 反映了咀嚼肌在生理功能范围内的最大收缩力。其中咬肌的肌电活动最大, 表明最大咬合状态下的主要动力是咬肌。同时二腹肌前腹和胸锁乳突肌也表现出明显的肌电活动, 这被认为是一种保护性反射结果。颞下颌关节紊乱病患者的肌力较正常人群弱, 且双侧同名咀嚼肌表现出肌电不一致不对称的情况, 表明 TMD 患者双侧神经肌肉系统不协调。

对于下颌运动中的肌电变化, 有学者研究认为咬肌为下颌前伸运动时的主要肌肉, 也有研究指出二腹肌前腹的电位活动最大, 同时胸锁乳突肌等颈部肌群起到稳定下颌骨的作用。这些不同结果可能与研究者们使用不同的肌电仪器及电极放置位置不同等原因有关。侧方运动过程中, 工作侧咬肌肌电活动高于非工作侧咬肌, 同时双侧二腹肌前腹肌电活动未表现出明显差异。通过 Zebris 下颌运动分析系统, 下颌运动与肌电活动记录可在下颌功能运动实施过程中同步观测, 有助于依据定量的参数对口颌系统疾病进行诊断和治疗方案制定。

## 6. 总结与展望

传统经验式面弓转移上机械骀架的方式记录患者咬合关系的方法, 在实际临床应用中往往存在不可控的风险因素, 且十分依赖医师和技师的经验配合。下颌运动轨迹描记系统可以实时记录观察患者在行使功能运动中, 各个时间点和位置的下颌位置, 可辅助医生做出正确的诊断, 识别患者个体化的颞下颌关节疾病状态, 有助于制作出更加符合生理要求的修复体, 同时随着技术的不断发展, 下颌运动轨迹结合计算机数字化以来, 越来越多的研究表明下颌运动轨迹分析系统可以定量、客观地记录患者下颌运动的过程, 且其精确度、准确度也得到越来越多研究者的认可[40]。此外, 不仅在颞下颌关节疾病领域, 下颌运动分析系统也为颌面外科、修复、正畸、种植及咬合重建等领域提供一定的参考。

下颌运动分析可以提高医师对颞下颌关节疾病的理解, 将髁突的运动可视化, 但目前仍然不能代替影像学检查。随着计算机技术和生物医学的交叉发展, 未来研究者们可以通过不断改进可视化技术, 将运动轨迹更兼容的匹配患者的影像学资料并加强临床实用意义, 构建计算机辅助虚拟病人, 简化操作复杂程度, 帮助医师进一步认识并深入了解 TMJ 相关疾病的机制和病理生理。观察分析 TMJ 真实的运动, 精确模拟患者的关节运动, 对 TMD 的早期诊断和治疗提供一定的临床指导, 针对患者个体特征制作个性化咬合板, 使对 TMD 患者的精确治疗成为可能。

## 基金项目

国家中医药管理局科技司 - 浙江省中医药管理局共建科技计划项目(78GZY-ZJ-KJ-24078)。

## 参考文献

- [1] List, T. and Jensen, R.H. (2017) Temporomandibular Disorders: Old Ideas and New Concepts. *Cephalgia*, **37**, 692-704. <https://doi.org/10.1177/0333102416686302>
- [2] Schiffman, E., Ohrbach, R., Truelove, E., Look, J., Anderson, G., Goulet, J., *et al.* (2014) Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (DC/TMD) for Clinical and Research Applications: Recommendations of the International RDC/TMD Consortium Network\* and Orofacial Pain Special Interest Group. *Journal of Oral & Facial Pain and Headache*, **28**, 6-27. <https://doi.org/10.11607/jop.1151>
- [3] Ahmad, M., Hollender, L., Anderson, Q., Kartha, K., Ohrbach, R., Truelove, E.L., *et al.* (2009) Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (RDC/TMD): Development of Image Analysis Criteria and Examiner Reliability for Image Analysis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, **107**, 844-860. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2009.02.023>
- [4] Zhang, Y., Xu, X. and Liu, Z. (2017) Comparison of Morphologic Parameters of Temporomandibular Joint for Asymptomatic Subjects Using the Two-Dimensional and Three-Dimensional Measuring Methods. *Journal of Healthcare Engineering*, **2017**, Article ID: 5680708. <https://doi.org/10.1155/2017/5680708>
- [5] Chisnoiu, A.M., Picos, A.M., Popa, S., Chisnoiu, P.D., Lascu, L., Picos, A., *et al.* (2015) Factors Involved in the Etiology of Temporomandibular Disorders—A Literature Review. *Medicine and Pharmacy Reports*, **88**, 473-478. <https://doi.org/10.15386/cjmed-485>
- [6] de Melo, D.P., Sousa Melo, S.L., de Andrade Freitas Oliveira, L.S., Ramos-Perez, F.M.d.M. and Campos, P.S.F. (2015) Evaluation of Temporomandibular Joint Disk Displacement and Its Correlation with Pain and Osseous Abnormalities in Symptomatic Young Patients with Magnetic Resonance Imaging. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, **119**, 107-112. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2014.09.022>
- [7] da Cunha, D.V., Degan, V.V., Vedovello Filho, M., Bellomo, D.P., Silva, M.R., Furtado, D.A., *et al.* (2017) Real-Time Three-Dimensional Jaw Tracking in Temporomandibular Disorders. *Journal of Oral Rehabilitation*, **44**, 580-588. <https://doi.org/10.1111/joor.12521>
- [8] 郑红, 张志光, 张松梅, 薛鹏. 无症状颞下颌关节盘前移位个体的动态磁共振及髁突运动轨迹特点[J]. 解剖学报, 2017, 48(6): 715-720.
- [9] Bonjardim, L.R., Gavião, M.B.D., Pereira, L.J. and Castelo, P.M. (2004) Mandibular Movements in Children with and without Signs and Symptoms of Temporomandibular Disorders. *Journal of Applied Oral Science*, **12**, 39-44. <https://doi.org/10.1590/s1678-77572004000100008>
- [10] Mazzetto, M.O., Anacleto, M.A., Rodrigues, C.A., Bragança, R.M.F., Paiva, G. and Valencise Magri, L. (2016) Comparison of Mandibular Movements in TMD by Means of a 3D Ultrasonic System and Digital Caliper Rule. *CRANIO®*, **35**, 46-51. <https://doi.org/10.1080/08869634.2016.1149928>
- [11] Naeije, M. (2003) Measurement of Condylar Motion: A Plea for the Use of the Condylar Kinematic Centre. *Journal of Oral Rehabilitation*, **30**, 225-230. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2842.2003.01066.x>
- [12] 赵翰驰, 兰婷婷, 向碧璐, 李中杰, 刘洋. 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.
- [13] Scolaro, A., Khijmatgar, S., Rai, P.M., Falsarone, F., Alicchio, F., Mosca, A., *et al.* (2022) Efficacy of Kinematic Parameters for Assessment of Temporomandibular Joint Function and Dysfunction: A Systematic Review and Meta-analysis. *Bioengineering*, **9**, Article No. 269. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9070269>
- [14] Türp, J.C., Alpaslan, C. and Gerds, T. (2005) Is There a Greater Mandibular Movement Capacity Towards the Left? Verification of an Observation from 1921. *Journal of Oral Rehabilitation*, **32**, 242-247. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2004.01425.x>
- [15] Sójka, A., Huber, J., Kaczmarek, E. and Hędzielek, W. (2015) Evaluation of Mandibular Movement Functions Using Instrumental Ultrasound System. *Journal of Prosthodontics*, **26**, 123-128. <https://doi.org/10.1111/jopr.12389>
- [16] Kordaß, B., Bernhardt, O., Ruge, S., Ratzmann, A., Hugger, S. and Hugger, A. (2019) Standard and Limit Values for the Symmetry of Articulation Parameters in the Temporomandibular Joint Area—Evaluations of the Associated Project of the SHIP Study. *International Journal of Computerized Dentistry*, **22**, 353-362.
- [17] Edinger, D.H. (2004) Accuracy of a Robotic System for the Reproduction of Condylar Movements: A Preliminary Report. *Quintessence International (Berlin, Germany)*, **35**, 519-523.
- [18] 赖晓宇, 林雪峰, 吴夏怡. 青年安氏 II 类 1 分类错牙合患者下颌咀嚼运动轨迹特征的研究[J]. 实用口腔医学杂志, 2016, 32(1): 115-119.

- [19] Buschang, P.H., Throckmorton, G.S., Travers, K.H. and Hayasaki, H. (2001) Incisor and Mandibular Condylar Movements of Young Adult Females during Maximum Protrusion and Lateratrusion of the Jaw. *Archives of Oral Biology*, **46**, 39-48. [https://doi.org/10.1016/s0003-9969\(00\)00096-0](https://doi.org/10.1016/s0003-9969(00)00096-0)
- [20] Choi, B., Hwang, D., Lee, G., Moon, D. and Lee, K. (2019) Computerized Ultrasonic Axiographic Evaluation of Condylar Movement in Patients with Internal Derangement of the Temporomandibular Joint. *The Angle Orthodontist*, **89**, 924-929. <https://doi.org/10.2319/110618-792.1>
- [21] Sadat-Khonsari, R., Fenske, C., Kahl-Nieke, B., Kirsch, I. and Jde, H.D. (2003) Mandibular Instantaneous Centers of Rotation in Patients with and without Temporomandibular Dysfunction. *Journal of Orofacial Orthopedics*, **64**, 256-264. <https://doi.org/10.1007/s00056-003-0204-z>
- [22] Zhao, T., Yang, H., Sui, H., Salvi, S.S., Wang, Y. and Sun, Y. (2016) Accuracy of a Real-Time, Computerized, Binocular, Three-Dimensional Trajectory-Tracking Device for Recording Functional Mandibular Movements. *PLOS ONE*, **11**, e0163934. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163934>
- [23] Özcan, M. and Salihoğlu-Yener, E. (2011) A Technical Report on Repair of Amalgam-Dentin Complex. *Operative Dentistry*, **36**, 563-566. <https://doi.org/10.2341/10-359-t>
- [24] Ahn, S., Tsou, L., Antonio Sánchez, C., Fels, S. and Kwon, H. (2015) Analyzing Center of Rotation during Opening and Closing Movements of the Mandible Using Computer Simulations. *Journal of Biomechanics*, **48**, 666-671. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.12.041>
- [25] 周振, 王美青, 张俊华, 任燕. 咀嚼运动轨迹与颞下颌关节紊乱病患者症状和咬合异常的关系[J]. 口腔医学研究, 2007(1): 67-69.
- [26] Taniguchi, H., Ishiwata, H., Ohyama, T. and Shinozuka, O. (1997) Stability of the Mandibular Position in Occlusion of Mandibulectomy Patients with Lateral Discontinuity Defect. *Journal of Oral Rehabilitation*, **24**, 849-856. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.1997.tb00285.x>
- [27] 张春香, 王天齐, 刘冬巧, 段小妮, 智铖, 王静, 林晨. 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.
- [28] 侯文平, 龚忠诚, 迪丽努尔·阿吉, 等. 咬合异常与颞下颌关节紊乱病相关性调查研究[J]. 中国美容医学, 2015, 24(23): 68-71.
- [29] 周燕丽, 周薇娜, 于林凤, 王琛, 王冰洁, 张静露. 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.
- [30] Marpaung, C.M., Kalaykova, S.I., Lobbezoo, F. and Naeije, M. (2014) Validity of Functional Diagnostic Examination for Temporomandibular Joint Disc Displacement with Reduction. *Journal of Oral Rehabilitation*, **41**, 243-249. <https://doi.org/10.1111/joor.12130>
- [31] Marpaung, C., van Selms, M.K.A. and Lobbezoo, F. (2018) Temporomandibular Joint Anterior Disc Displacement with Reduction in a Young Population: Prevalence and Risk Indicators. *International Journal of Paediatric Dentistry*, **29**, 66-73. <https://doi.org/10.1111/ipd.12426>
- [32] Khawaja, S.N., McCall, W., Dunford, R., Nickel, J.C., Iwasaki, L.R., Crow, H.C., et al. (2015) Infield Masticatory Muscle Activity in Subjects with Pain-related Temporomandibular Disorders Diagnoses. *Orthodontics & Craniofacial Research*, **18**, 137-145. <https://doi.org/10.1111/ocr.12077>
- [33] 林洁欣. 数字化面弓应用于全口义齿修复的临床初步评价[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [34] 吴亚男, 方梦如, 王云, 汪萌芽. 正常牙合人群咀嚼肌表面肌电图及下颌运动轨迹的联合分析[J]. 皖南医学院学报, 2015, 34(1): 85-89.
- [35] Guo, J., Chen, J., Wang, J., Ren, G., Tian, Q. and Guo, C. (2022) EMG-Assisted Forward Dynamics Simulation of Subject-Specific Mandible Musculoskeletal System. *Journal of Biomechanics*, **139**, Article ID: 111143. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111143>
- [36] Moyers, R.E. (1949) Temporomandibular Muscle Contraction Patterns in Angle Class II, Division 1 Malocclusions: An Electromyographic Analysis. *American Journal of Orthodontics*, **35**, 837-857. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(49\)90078-0](https://doi.org/10.1016/0002-9416(49)90078-0)
- [37] 李波, 谭学新, 马丽. 正常(牙合)者下颌运动时的肌电活动研究[J]. 解剖科学进展, 2008(2): 158-160.
- [38] 华咏梅, 金蕾, 孟秀英. 正常牙合者下颌运动的肌电活动研究[J]. 中国实用美容整形外科杂志, 2006(1): 78-80.
- [39] Belser, U.C. and Hannam, A.G. (1986) The Contribution of the Deep Fibers of the Masseter Muscle to Selected Tooth-Clenching and Chewing Tasks. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **56**, 629-635. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(86\)90432-4](https://doi.org/10.1016/0022-3913(86)90432-4)
- [40] Ahlers, M.O., Bernhardt, O., Jakstat, H.A., Kordaß, B., Türp, J.C., Schindler, H.J. and Hugger, A. (2015) Motion Analysis of the Mandible: Guidelines for Standardized Analysis of Computer-Assisted Recording of Condylar Movements. *International Journal of Computerized Dentistry*, **18**, 201-223.