

下颌运动轨迹分析在颞下颌关节紊乱病诊疗中的应用进展

田鑫 阿迪力江·赛买提

新疆医科大学第一附属医院(附属口腔医院)口腔颌面创伤正颌外科,新疆维吾尔自治区

治区口腔医学研究所,乌鲁木齐 830000

通信作者:阿迪力江·赛买提,Email:290672000@qq.com

【摘要】 颞下颌关节紊乱病(TMD)作为一种口腔颌面部频发且处理困难的慢性疾患,其病理机制非常复杂。临床上常表现为下颌运动功能的显著异常。传统诊断依赖临床评估与影像学检查,存在主观性强、难以动态量化关节运动功能的局限。下颌运动轨迹分析可提供一种客观定量的核心评估手段,其经历了从机械式描记到数字化、三维实时追踪的技术变革。本文系统梳理了该技术的发展脉络,深入探讨其在TMD临床诊断及疗效评价中的实际应用现状,并客观剖析当下研究所面临的问题及未来的突破方向。

【关键词】 颞下颌关节紊乱病; 颞下颌关节; 下颌运动轨迹; 髁突运动

基金项目:新疆医科大学第一附属医院“青年科研起航”专项基金项目(2022YFY-QKQN-34)

引用著录格式:田鑫,阿迪力江·赛买提. 下颌运动轨迹分析在颞下颌关节紊乱病诊疗中的应用进展[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2026, 20(3): 238-244.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.03.010

Application progress of mandibular movement trajectory analysis in the diagnosis and treatment of temporomandibular disorders

Tian Xin, Adilijiang Saimaiti

Department of Oral and Maxillofacial Trauma and Orthognathic Surgery, First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University (Affiliated Stomatological Hospital), Xinjiang Uygur Autonomous Region Stomatological Research Institute, Urumqi 830000, China

Corresponding author: Adilijiang Saimaiti, Email: 290672000@qq.com

【Abstract】 Temporomandibular joint disorder is a chronic disease with high prevalence and difficult treatment in the oral and maxillofacial region, and its pathological mechanism is very complex. Clinically, it often directly manifests as a significant abnormality of mandibular motor function. Traditional diagnosis relies on clinical evaluation and imaging examination, which is subjective and difficult to dynamically quantify joint motor function. The analysis of mandibular movement trajectory can provide an objective and quantitative core evaluation

method, which has undergone a technological evolution from mechanical tracing to digital and three-dimensional real-time tracking. This article systematically reviews the development of this technology, deeply discusses its practical application status in clinical diagnosis and efficacy evaluation of TMD, and objectively analyzes the problems faced by current research as well as future directions for breakthroughs.

【Key words】 Temporomandibular joint disorders; Temporomandibular joint; Mandibular movement trajectory; Condylar movement

Fund program: "Youth Research Start" Special Fund Project of The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University(2022YFY-QKQN-34)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.03.010

作为连接下颌骨与颞骨的两侧滑膜关节,颞下颌关节(temporomandibular joint, TMJ)是人体内唯一需两侧协同运作才能实现其功能的关节结构^[1]。颞下颌关节紊乱病(temporomandibular joint disorders, TMD)是临床上常见的口腔颌面部疾患,其在全球范围内的发病率大约为20%~40%^[2],发病高峰多见于20~40岁的青壮年及中年人群,且女性患病比例明显高于男性^[3]。TMD并非单一病理性改变所致,而是一组累及咀嚼肌群、TMJ及其邻近相关结构的综合性疾患。核心症状包括持续性的关节区或咀嚼肌疼痛,张口时伴有清晰的弹响与杂音,直观的下颌运动受限及其轨迹异常^[4]。

TMD的诊断需结合临床症状、病史及辅助检查综合判断^[5],传统诊断模式以临床评估与影像学检查为核心。TMJ作为一种双侧联动关节,其运动过程涵盖精密的旋转与平移动作。患者所呈现的静态解剖结构异常,往往难以与具体临床症状直接对应^[6]。口腔全景曲面体层片、锥形束CT(cone-beam computed tomography, CBCT)和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)等传统临床检查手段,虽可提供精细静态结构信息,然而在量化评估方面能力有限,难以还原下颌真实运动中关节内部的复杂动态变化。口颌系统功能状态最直接的体现即为下颌运动,其运动轨迹若能被精准捕捉并记录,则对TMJ功能的评估、咀嚼肌功能紊乱的辅助诊断及咬合重建的指导,均具有重要临床意义^[7]。下颌运动轨迹

分析技术提供了一种非侵入性、可重复且高度客观的动态评估工具^[8]。研究者借助数字化手段记录下颌骨在三维空间中的真实运动路径,不仅可轻松获取张口度、运动速度、轨迹对称性、平滑度及分离度等常规量化指标^[9],也可深入解析瞬时旋转中心(instantaneous center of rotation, ICR)与有限螺旋轴(finite helical axis, FHA)分布等复杂生物力学参数,从而显著拓展对下颌功能状态的认知^[10-11]。数字化口腔医学正逐步迈入“4D”时代——即将患者静态三维解剖模型与动态下颌运动数据深度融合,这成为当前精准诊疗探索的一个重要方向^[12]。近年来,国内外学者利用不同类型的下颌运动记录系统,围绕TMD患者下颌运动特征开展了大量研究。本文旨在系统梳理相关研究进展,并对下颌运动轨迹分析系统及技术在TMD诊疗中的应用作一综述。

一、下颌运动轨迹分析系统及技术的发展历史

下颌运动是由TMJ、咀嚼肌群及咬合系统协同参与所完成的复杂三维动力学过程。下颌运动轨迹分析技术自机械描记开始,继而电子追踪,最终至当前实时光电捕捉与多模态融合的阶段,历经跨越式演进(表1)。此领域研究的开端可追溯至19世纪末,Luce于1889年借助摄影手段测量下颌运动,在矢状面中绘出首条具有定量意义的张闭口轨迹,为后继探索奠定基础^[13]。此后不久,Walker与Ulrich于1896年研制出图形化描记装置,借固定于下颌的描记针,在涂蜡记录板上刻画运动轨迹^[14]。至1900年,Gysi等推出机械式骀架连同配套轨迹描记仪^[15];10年后,又进一步发展出适应性骀架与“哥特式弓”描记器,使临床医师得以通过可视化的水平轨迹识别正中骀位及下颌边缘运动范围^[16]。1921年,McCollum等所研制的机械式下颌运动描记仪,结合面弓与描针,成功实现髁突三维运动轨迹的记录^[17]。1969年,Messerman所展示的Case Gnathic Replicator系统,采用6枚光电换能器对下颌全部6个自由度的三维运动进行捕捉,并首次通过计算机完成轨迹回放与解析^[18]。首款计算机控制的下颌运动轨迹描记仪于1975年由Jankelson等^[19]研制成功,数字化记录时代自此开启。1988年Slavicek等推出Cadiax数字化髁突运动轨迹描记系统^[20]。超声分析系统如KaVo Arcus Digma、Zebri等于2001年问世,临床应用由此获得更为多元的选择^[21]。2011年,Pinheiro等^[22]验证了低成本摄像机结合反光标记方案的可行性,平均误差<1.0%,为后续研究奠定了技术基础。2015年,Al-Saleh等^[23]将MRI软组织影

像与CBCT硬组织数据进行数字化配准,首次实现关节盘-髁突复合体在运动轨迹中的三维可视化呈现。近年来,智能化技术引入后,系统精度及临床适用性获得进一步提升。2020年,Tian等^[24]开发了基于反向传播(back propagation, BP)神经网络与三维补偿的光学捕捉系统,精度达0.0773 mm。Du等^[25]在2025年提出一种基于改良咬叉配准的新型红外线下颌追踪方法,整体均方根误差控制在0.35 mm以内,无需二次辐射暴露,为短期重复评估下颌运动提供了低成本的椅旁解决方案。

二、下颌运动轨迹分析在颞下颌关节紊乱病诊断中的应用

开口度测量、关节听诊及肌肉触诊这些传统手段,早已难以满足TMD的诊断需求,取而代之的是朝向生物力学模式识别方向的演进。该转向的关键,在于构建可量化的数学评价指标体系,使视诊所不能察觉的细微功能异常得以转化为标准化参数形式。

1. 基础运动参数:髁突运动轨迹作为评估TMJ功能状态的基石,在侧向运动分析中,Bennett角即非工作侧髁突在侧向运动中所走路径与矢状面之间的夹角,及矢状髁导斜度(sagittal condylar inclination, SCI)即髁突前伸运动路径与水平参考平面之间的交角,常被作为判断关节在功能负荷下稳定性的核心力学指标^[26]。轨迹的物理特性如平滑度、分离度与对称性亦展现出显著的临床价值。平滑度通常由多项式拟合($1-R^2$)定义,用以反映实际运动轨迹偏离理想生理路径的波动程度,TMD患者因关节面摩擦或肌肉痉挛,其平滑度显著低于健康个体;而分离度是量化开口与闭口路径在空间上不重合程度的指标,目前常通过动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法,计算对应时间点的开闭口轨迹点之间的欧氏距离得到,后者能直观揭示关节盘复位过程中存在的异常偏移;下颌运动的对称性,可通过量化左右髁突中心在开合过程中的轨迹相似性来评价,健康个体的轨迹具有高度同步性与对称性,而病理状态下常表现为严重的空间与时间不对称。Tang等^[9]通过将CBCT静态骨组织影像与下颌动态追踪数据进行深度融合,对上述平滑度、分离度及双侧运动对称性进行了多维度的三维定量分析,其研究证实TMD患者在这些参数上与健康人群存在显著的统计学差异,这为疾病的数字化分型与疗效评价提供了量化依据。

表1 下颌运动轨迹记录系统及分析技术演变特征

技术流派	典型系统/开发者	核心记录媒介	优势与局限性评价
早期机械式	Ulrich, Walker, Gysi	物理描记针、涂蜡板	确立了铰链轴与边界运动理论,但物理干扰大
电子/运动描记式	Kinesiograph, Cadiax	磁/电感传感器	实现了动态定量分析,但早期设备佩戴较沉重
超声波式	Zebri JMA, Arcus Digma	超声波脉冲时差	无电磁干扰,操作简便,但可能存在头部运动伪迹
电磁追踪式	微型电磁传感器	磁场感应位移	传感器微小可贴合牙面,对功能活动干扰极小
光电追踪/4D	Modjaw, Polaris, Optotrak	红外相机、反光标记	非侵入性、高精度,支持4D动态模型融合
人工智能/视觉	BP神经网络、CNN算法	普通视频摄像头	低成本、无标记点追踪,适用于大规模初筛

注:BP为反向传播;CNN为卷积神经网络。

2. 高阶生物力学参数: Jász 等^[27]观察到开口动作起始 1 mm 内即有髁突平移现象出现,此发现对“开口初期仅存在纯铰链旋转”这一传统观点构成直接挑战。面对复杂病例,单一几何轨迹往往无法揭示潜在的机械故障本质。为此,基于刚体运动学理论的高阶生物力学参数如 ICR 与 FHA 等被引入到下颌运动分析中^[11]。ICR 描述了下颌在任一瞬间的纯旋转中心,其分布模式可以反映关节旋转支点的稳定性。高频记录结果表明健康个体的 ICR 自髁突位置平滑地向后下方移动;而盘移位或韧带松弛患者,其 ICR 路径多呈弥散星形分布或发生突变,提示旋转中心极度不稳定^[28]。FHA 则是一个更为全面的六自由度(six degrees of freedom, 6-DOF)运动描述符,它是通过描述刚体在三维空间中绕瞬时轴线旋转并沿该轴平移来定义复杂运动的矢量参数。FHA 可实现旋转与平移的深度融合,其分布的离散程度能有效量化关节运动的稳定性与协调性。Ma 等^[11]以该轴分布的标准差作为稳定性评估依据,发现骨关节炎患者 FHA 分布显著增宽且方向波动剧烈,此类微观动力学异常用于疾病亚型判别的准确率可达 94.4%。

3. 不同 TMD 亚型轨迹特征:健康个体的下颌运动轨迹通常是平滑、连续且流畅的,而 TMD 患者,尤其是伴有肌肉功能紊乱或关节盘移位的患者,其运动轨迹常表现为不规则、抖动、中断或突然的变速^[8]。对于关节内结构紊乱,轨迹分析所揭示的异常常早于影像学改变而显现(表 2)。可复性盘前移位(anterior disc displacement with reduction, ADDwR)的诊断,传统上依赖听诊所得的弹响与开口度测量等;然而轨迹上呈现的特征性“S”型偏斜或“8”字交叉图形,则提供了更为客观的依据^[29]。关节盘复位的瞬间,髁突轨迹常出现突发性跳跃,运动速度曲线在弹响点附近呈现“减速-加速”的剧烈波动,双侧髁突运动呈明显时间异步性。不可复性盘前移位(anterior disc displacement without reduction, ADDwoR)则以患侧髁突运动路径的缩短为典型表现,下颌在开口期出现特征性的患侧偏转,最大开口运动速度显著降低,轨迹平滑度低,但分离度相对较小^[30]。骨关节炎(osteoarthritis, OA)涉及软骨降解及软骨下骨的重构过程^[31]。研究显示,髁突骨吸收多见于顶部区域,代偿性骨增生则好发于后缘与内侧部位^[32]。动态轨迹分析证实,骨质破坏的程度与关节间隙的动

态缩窄呈正相关,深层结构的改变最终体现为髁突运动轨迹空间波动性的增强、FHA 极度弥散无序,轨迹表现出持续抖动与不规则的波峰波谷^[33]。肌源性 TMD 表现出结构与功能相分离的特点。常规影像学检查中,患者多未见明显骨质或关节盘异常,然而其下颌运动质量已然显著降低。Surowiecki 等^[3]利用 Cadiax 系统发现,约 46.2% 的患者虽最大张口度处在正常范围,但轨迹分析却可识别出明显的髁突离散现象及侧向偏斜即 ΔY ,它指在矢状面上髁突运动轨迹偏离理想直线轨迹的偏差。此种异常实为肌肉因规避疼痛而产生的保护性动力学代偿所致。同步获取的表面肌电图(surface electromyography, sEMG)数据显示,最大自愿紧咬(maximum voluntary clenching, MVC)状态下颞肌电位出现衰减,双侧咀嚼肌收缩高度不对称,存在显著的肌电抑制或亢进^[30]。

4. AI 与聚类分析应用:三维轨迹数据所具有的高维非线性特性,对传统统计方法形成一定挑战。人工智能(artificial intelligence, AI)技术逐步应用在该领域,并展现出重要价值。Ryuji 等^[34]开展的研究实例表明,AI 在精准识别与疗效评估方面具备良好潜力。有研究者对下颌开口角度的时间序列实施傅里叶变换(Fourier transform, FT)以提取特征,继而通过主成分分析(principal component analysis, PCA)进行降维处理,再采用 K-means 聚类算法,成功将有症状与无症状受试者予以区分。该模型识别隐匿性肌源性疾病的曲线下面积(area under curve, AUC)高于 0.85,且治疗过程中功能改善可通过特征空间中的位移实现客观量化^[35]。

三、下颌运动轨迹分析在颞下颌关节紊乱病治疗中的应用

下颌运动轨迹分析在 TMD 诊疗里的作用不再是单一的诊断辅助工具,已经覆盖了疾病评估、治疗方案选择、殆垫设计制作、干预时机判断、疗效评价与监控全流程,是临床决策的核心依据,使得以往依赖医师主观经验判断的诊疗模式,变成依赖客观数据和动态功能指标共同支撑的模式。轨迹分析把原本抽象的关节功能转化成了平滑度、分离度、对称性和有限螺旋轴标准差这些可量化的参数,从干预时机判定、疗效评价和殆垫个体化选择 3 个方面调整了临床决策的思路。

表 2 不同颞下颌关节紊乱病(TMD)亚型轨迹特征

TMD 亚型	ICR 分布特征	FHA-SD 表现	平滑度与分离度	运动速度及其他动力学特征
可复性盘前移位(ADDwR)	存在突变与不稳定,路径发生不连续的突变或弥散。	波动增高,弹响时段波动尤甚。	平滑度低;分离度极高,呈“8”字或“S”形交叉。	弹响点附近出现“减速-加速”波动,双侧异步。
不可复性盘前移位(ADDwoR)	整体表现为受限但在局部区域内弥散。	增高,反应双侧代偿性运动不对称。	平滑度低;分离度相对较小,轨迹显著缩短并偏斜。	最大及平均速度显著降低,速度曲线低平。
骨关节炎(OA)	极度弥散与无序;范围广,反映严重结构破坏。	显著增高,方向波动剧烈,反映关节极度失稳。	平滑度极低,持续抖动;分离度表现为随机。	速度减慢,曲线极不规则,伴随多发小波峰波谷。
肌源性 TMD	相对稳定,但离散度可因肌肉规避性收缩而轻度增加。	轻度增高,反映神经肌肉失调及痉挛。	平滑度降低,常伴矢状面侧方偏斜;分离度多正常。	速度可能减慢,形态异常,sEMG 显示肌肉电位不对称。

注:ICR 为瞬时旋转中心;FHA-SD 为有限螺旋轴标准差;sEMG 为表面肌电图。

1. 干预时机判定:以往针对不可复性盘前移位的阶梯治疗,通常建议先长期佩戴骀垫,无效后再行关节穿刺术。但轨迹追踪数据显示,如果患者患侧髁突平移运动严重丧失,且FHA分布异常明显,只用保守治疗很难恢复关节动力学机能。Lee等^[36]的研究证实,参考轨迹参数直接采用关节穿刺术联合骀垫同步治疗,患者运动功能恢复正常的时间从24.69周缩短到8.65周,这证明将微创干预的时机提前是合理的。如果将轨迹分析和表面肌电同步使用,还能准确区分关节源性限制和肌源性保护性限制:开口受限的患者如果关节平移功能完好,只是张口速度低,同时肌电指标异常,直接行肌肉松弛治疗即可,避免不必要的关节腔内注射。

2. 疗效评价:传统TMD疗效的评价,多以VAS疼痛评分及张口度测量为依据^[36],轨迹分析逐步被视作客观评估疗效的关键手段。庞博^[37]利用超声面弓系统,对前伸再定位咬合板治疗后实施为期6个月的追踪,观察到术后3个月时患者轨迹平滑度与双侧重合度显著提升,矢状面波动范围逐步收敛至正常区间。骀垫治疗后,髁突运动协调性普遍改善,表现为最大张口度增加及轨迹趋于平滑^[38]。行全关节置换术(total joint arthroplasty, TJR)的重度TMD及关节强直患者,下颌运动范围虽不及健康人群,但轨迹分析仍可精准监测功能恢复进度与假体生物力学表现^[8]。Wojczyńska等^[39]通过FHA分析发现,置换术后患者平移运动受限,却能募集咬肌与翼内肌产生以旋转为主的代偿运动,其FHA异常增大构成假体功能的特征性标志。杨氏关节镜盘复位固定术后, Dong等^[40]通过MRI纵向评估揭示了青少年髁突强大的新骨形成能力,其新骨形成率高达94.3%,同步轨迹分析显示开闭口弹跳切迹消失,提示结构复位促进了功能动力学的恢复。慢性TMD女性患者接受自我护理与教育疗法后,下颌运动模式的积极转归亦可通过轨迹追踪捕捉到^[41]。

3. 骀垫个体化类型选择:骀干扰在TMD发病中所起的作用已获得广泛认同,而下颌运动轨迹的分析,则能在咀嚼周期内实时捕获骀接触模式。Minemura等^[42]指出非工作侧接触对髁突运动影响尤为突出。借助数字化轨迹系统,临床可精准识别破坏下颌稳定性的异常骀接触,为调骀及正畸干预提供客观依据^[43]。骀垫是TMD保守治疗的核心手段,不同类型骀垫的治疗原理不同,适用情况和预期达成的下颌运动轨迹优化目标差别显著。通过将光学下颌追踪系统记录的

患者特异性运动(patient specific motion, PSM)导入计算机辅助设计与制作(computer aided design/computer aided manufacturing, CAD/CAM)流程,现已能实现咬合板的全数字化定制^[44]。Modjaw系统可对咀嚼及边缘运动中患者所形成的包络面予以捕获,借助“对颌牙网格旋转”技术,即根据下颌运动包络面反向计算静态咬合接触的安全区,自动生成一个在动态运动中无任何咬合干扰的骀垫表面^[45]。明确各类骀垫的治疗目标和对应的轨迹优化目标,能极大方便临床选择和评估疗效(表3)。

髁突轨迹呈可复性盘前移位表现且双侧运动异步的患者,适用前伸再定位骀垫(anterior repositioning splint, ARS)。它靠咬合诱导斜面把下颌固定在前伸位,减轻双板区压迫,重建正常的盘-髁关系。轨迹优化以消除弹跳切迹、最小化分离度、恢复边缘运动范围及双侧髁道参数对称方向^[46-47]。若患者轨迹平滑度降低、伴随侧方偏斜,无明确关节源性异常,且sEMG显示双侧咀嚼肌不对称,更适合用稳定型骀垫(stabilization splint, SS),该骀垫通过均匀点状接触消除咬合干扰,使肌肉去程序化,引导下颌回到肌骨稳定位,优化目标是消除非工作侧干扰导致的偏折,提升闭口轨迹平滑度,恢复双侧髁突位移的对称性^[48]。针对急性ADDwoR或者严重关节间隙狭窄的情况,可选用枢轴型骀垫(pivot splint, PS)。它依靠后牙区的支点向下牵引关节,抵消关节内高压,为绞锁的关节盘创造松解空间,轨迹优化侧重恢复患侧髁突前下平移能力,纠正开口偏斜,引导ICR回归平滑后下移位的生理模式^[49]。前导型骀垫(anterior guidance splint, AGS)的作用是重建前牙引导,让后牙即刻分离,消除非工作侧干扰对髁突运动的影响,适合用来恢复平滑连续的侧方及前伸轨迹^[50]。

四、下颌运动轨迹分析的局限性与挑战

尽管数字化下颌运动轨迹分析展现出巨大潜力,但其全面转化仍受制于多维度的瓶颈。

首先是测量精度不稳定。现有数字化追踪系统的误差范围多在50~330 μm^[51]。不同技术路径的设备各有缺陷:光学追踪容易被面部标记点遮挡影响结果;超声系统对环境噪声敏感,部分商用设备采样频率难以有效捕获极短时程的弹响事件^[52];传感器还容易受温湿度、电磁干扰和人体生理微颤影响,标志物微小位移即可显著削弱数据真实性^[22]。核

表3 不同类型骀垫的适用情况、治疗目标与轨迹优化目标

骀垫类型	适用情况	治疗目标	轨迹优化目标
前伸再定位骀垫(ARS)	髁突轨迹呈可复性盘前移位(ADDwR)表现且双侧运动异步。	引导下颌至前伸位,重建生理性盘-髁关系。	消除弹响跳跃切迹,恢复开闭口轨迹分离度,提高双侧重合度。
稳定型骀垫(SS)	肌源性颞下颌关节紊乱病(TMD)及咬合干扰类TMD。	提供均匀点状接触,消除骀干扰,降低肌肉异常活动。	提升轨迹平滑度,恢复对称性,改善最大张口度及运动速度曲线。
枢轴型骀垫(PS)	急性不可复性盘前移位(ADDwoR)或严重关节间隙狭窄。	产生Ⅱ类杠杆效应,减轻关节内负荷。	扩增关节间隙,渐进恢复髁突运动范围。
前导型骀垫(AGS)	需消除非工作侧骀干扰对髁突运动的不良影响。	重建前牙引导,消除非工作侧骀干扰。	消除非工作侧接触导致的髁突运动偏转,恢复平滑的侧方及前伸轨迹。

心干扰源在于软组织伪迹(soft tissue artifact, STA),最大开口位时下颌缘或鼻翼区域可能出现显著的皮肤位移,这种移动足以掩盖关节盘复位的细微震颤^[53]。

其次是无法直接映射软组织变化。现在的轨迹分析大多只追踪硬组织位移,难以反映关节盘这类软组织的病理改变。动态MRI虽然能实时监测盘移位,但空间分辨率和采样频率都不够,无法做精细的动力学定量分析^[28]。如何将体表的高精度追踪数据和深层软组织的形变对应起来,实现多模态数据融合,仍有待深入探索^[54]。

再者是缺少适配国人的参考标准。下颌运动特征受个体因素影响显著,如安氏Ⅲ类错殆畸形患者常表现为最大张口度与Bennett角偏低^[1]。现有的参考标准大多基于高加索人群建立,国内暂无覆盖全年龄段、符合中国人特征的下颌运动常模,尚需多中心纵向研究来确立^[55]。同时,健康个体普遍存在的下颌运动不对称性及生理性差异,进一步加大了临床病理判读的复杂度^[56]。

最后是临床转化与基层普及的障碍。高端光学追踪系统采购成本高,校准步骤复杂,且对操作者生物力学知识储备要求极高,目前多局限在研究型教学医院,基层普及率极低^[57]。相关研究成果大多还停留在实验室,未转化成可以直接在临床使用的标准化操作流程^[58]。

五、总结与展望

本文系统综述了下颌运动轨迹分析技术的发展历程、其在TMD诊断与治疗中的应用及当前面临的局限与挑战。经过数年的发展,该分析手段已由实验室研究工具逐渐转变为支撑TMD精准诊疗的数字化手段。未来该领域的发展将聚焦于四大方向:第一,建立基于大规模人群的标准化运动参数常模数据库,为临床提供坚实参考;第二,引入数字孪生(digital twin,DT)模型,将CBCT、MRI等静态影像与亚微米级轨迹数据、sEMG及实时磁共振信息深度融合,使关节内物理交互在生物力学层面实现精准量化;第三,开发基于普通视频视觉[卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)算法]、智能手机或轻便穿戴设备的无感追踪技术,实现患者在自然生活状态下的全天候咀嚼功能监测;第四,探索利用AI算法对高维轨迹数据进行自动模式识别与亚型分类。最终推动下颌运动轨迹分析从前沿研究工具向常规临床诊断与疗效评估手段的转化。综上,虽然下颌运动轨迹分析在TMD诊疗中展现出巨大潜力,但需完善的方面仍有许多。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Silva J, Azevedo A, Martins E, et al. Mandibular kinematics on an orthodontic population assessed with an optical jaw tracking system: A comparative study[J]. Dent J, 2025, 13(5): 184. DOI: 10.3390/dj13050184.
- [2] Zieliński G. Quo vadis temporomandibular disorders? By 2050, the global prevalence of TMD may approach 44% [J]. J Clin Med, 2025, 14(13): 4414. DOI: 10.3390/jcm14134414.
- [3] Surowiecki D, Tomasik M, Kostrzewa - Janicka J. Qualitative alterations of mandibular kinematics in patients with myogenous temporomandibular disorders: An axiographic study using the cadiax diagnostic system[J]. Diagnostics(Basel), 2025, 15(23): 3044. DOI: 10.3390/diagnostics15233044.
- [4] Yilmaz MH, Kotanli S, Sağır E. Does orthodontic treatment have therapeutic effect on temporomandibular joint disorders?[J]. Int J Health Med Res, 2026, 5(1): 23-30. DOI: 10.58806/Ijhm.2026.V5i1n04.
- [5] Ozsari S, Yapicioglu FR, Yilmaz D, et al. Interpretation of magnetic resonance images of temporomandibular joint disorders by using deep learning [J]. IEEE Access, 2023 (11): 49102-49113. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3277756.
- [6] Mesnard M, Coutant JC, Aoun M, et al. Relationships between geometry and kinematic characteristics in the temporomandibular joint[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2012, 15(4): 393-400. DOI: 10.1080/10255842.2010.539560.
- [7] Yang J, Qin Z, Liao P. A visional method to evaluate mandibular motion by markerless stereo mandibular tracking system [J]. BOHR Int J Curr Res Dent, 2025, 4(1): 5-9. DOI: 10.54646/bijerid.2025.26.
- [8] Rahman F, Femiano F, Louis PJ, et al. An evaluation of jaw tracking movements in patients with total joint replacements versus a control group [J]. Medicina (Kaunas), 2022, 58(6): 738. DOI: 10.3390/medicina58060738.
- [9] Tang W, Wu Y, Ma J, et al. 3-Dimensional quantitative analysis of mandibular motion in TMD and healthy subjects: Comparison with clinical observations[J]. J Dent, 2025(153): 105534. DOI: 10.1016/j.jdent.2024.105534.
- [10] Merema BBJ, Witjes MJH, van Bakelen NB, et al. Four - dimensional determination of the patient - specific centre of rotation for total temporomandibular joint replacements: Following the Groningen principle[J]. J Pers Med, 2022, 12(9): 1439. DOI: 10.3390/jpm12091439.
- [11] Ma H, Shao B, Zheng T, et al. Differentiating temporomandibular disorder subtypes using advanced kinematic parameters: A novel approach to the diagnosis of temporomandibular disorders [J]. J Biomech, 2025 (189): 112849. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2025.112849.
- [12] D'Albis G, Forte M, Stef L, et al. A digital workflow for virtual articulator mounting using face scan and facebow capture: A proof-of-concept[J]. Dent J (Basel), 2025, 13(8): 378. DOI: 10.3390/dj13080378.
- [13] Bellomo Júnior DP. Caracterização de movimentos mandibulares na disfunção temporomandibular por meio de parâmetros cinemáticos [D]. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. DOI: 10.14393/ufu.te.2015.55.
- [14] Pillai MR, Gujjari AK, KN RS, et al. Artificial intelligence - enhanced virtual articulators: A narrative literature review [J]. Ind J Clin Res Dent, 2025, 6(2): 20-23. DOI: 10.53274/IJCRD.2025.6205.

- [15] Groß D, Groß K, Nitschke I. Alfred Gysi (1865 - 1957) - more than a pioneer of dental prosthetics and articulation [J]. *Swiss Dental Journal SSO*, 2021, 131(2): 125-132. DOI: 10.61872/sdj-2021-02-02.
- [16] Sonnahalli NK, Shetty PP, Chowdhary R. Hybrid tracer: A modified novel extra oral tracer [J]. *J Oral Biol Craniofac Res*, 2022, 12(6): 859-862. DOI: 10.1016/j.jobcr.2022.09.013.
- [17] Ahlers MO, Petersen T, Katzer L, et al. Condylar motion analysis: A controlled, blinded clinical study on the interindividual reproducibility of standardized evaluation of computer-recorded condylar movements [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 11721. DOI: 10.1038/s41598-023-37139-4.
- [18] Woodford SC, Robinson DL, Mehl A, et al. Measurement of normal and pathological mandibular and temporomandibular joint kinematics: A systematic review [J]. *J Biomech*, 2020 (111): 109994. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2020.109994.
- [19] Jankelson B, Swain CW, Crane PF, et al. Kinesiometric instrumentation: A new technology [J]. *J Am Dent Assoc*, 1975, 90(4): 834-840. DOI: 10.14219/jada.archive.1975.0164.
- [20] Buduru S, Hafidi S, Almäşan O, et al. Digital condylar parameter assessment using Cadiax® 2 and Modjaw® [J]. *Dent J (Basel)*, 2024, 12(11): 369. DOI: 10.3390/dj12110369.
- [21] Mazzetto MO, Anacleto MA, Rodrigues CA, et al. Comparison of mandibular movements in TMD by means of a 3D ultrasonic system and digital caliper rule [J]. *Cranio*, 2017, 35(1): 46-51. DOI: 10.1080/08869634.2016.1149928.
- [22] Pinheiro AP, Pereira AA, Andrade AO, et al. Measurement of jaw motion: The proposal of a simple and accurate method [J]. *J Med Eng Technol*, 2011, 35(3-4): 125-133. DOI: 10.3109/03091902.2010.542270.
- [23] Al-Saleh MAQ, Jaremko JL, Alsufyani N, et al. Assessing the reliability of MRI - CBCT image registration to visualize temporomandibular joints [J]. *Dentomaxillofac Radiol*, 2015, 44(6): 20140244. DOI: 10.1259/dmfr.20140244.
- [24] Tian S, Dai N, Li LL, et al. Three - dimensional mandibular motion trajectory-tracking system based on BP neural network [J]. *Math Biosci Eng*, 2020, 17(5): 5709-5726. DOI: 10.3934/mbe.2020307.
- [25] Du B, Wang X, Jiang H, et al. A pilot study on an infrared jaw-tracking method for mandibular motion based on modified bite-fork registration: Accuracy and feasibility [J]. *J Dent*, 2025(159): 105766. DOI: 10.1016/j.jdent.2025.105766.
- [26] Tăut M, Chanteux S, Kui A, et al. Condylar parameters and mandibular movement patterns in bruxers using an optical jaw tracking system [J]. *J Clin Med*, 2024, 13(24): 7761. DOI: 10.3390/jcm13247761.
- [27] Jász B, Balogh T, Ambrus S, et al. Pure rotation in the temporomandibular joint during jaw opening? A digital motion analysis [J]. *BDJ Open*, 2024, 10(1): 32. DOI: 10.1038/s41405-024-00213-8.
- [28] Mouchoux J, Sojka F, Kauffmann P, et al. An automatic tracking method to measure the mandibula movement during real time MRI [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 24125. DOI: 10.1038/s41598-024-74285-9.
- [29] 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. DOI: 10.13701/j.cnki.kqxyj.2022.02.018.
- [30] Zhang R, Lai D, Zhang F, et al. A comparative analysis of temporomandibular disorders using a jaw motion analyzer and surface electromyography [J]. *Int Dent J*, 2025, 75(3): 1843-1853. DOI: 10.1016/j.identj.2025.03.023.
- [31] Wang XD, Zhang JN, Gan YH, et al. Current understanding of pathogenesis and treatment of TMJ osteoarthritis [J]. *J Dent Res*, 2015, 94(5): 666-673. DOI: 10.1177/0022034515574770.
- [32] Han K, Kim MC, Kim YJ, et al. A long-term longitudinal study of the osteoarthritic changes to the temporomandibular joint evaluated using a novel three - dimensional superimposition method [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 9389. DOI: 10.1038/s41598-021-88940-y.
- [33] Yu W, Jeon HH, Kim S, et al. Correlation between TMJ space alteration and disc displacement: A retrospective CBCT and MRI study [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 14(1): 44. DOI: 10.3390/diagnostics14010044.
- [34] Rajaraman V, Nallaswamy D, Shenoy A. Artificial intelligence and machine learning in diagnosing and managing temporomandibular disorders: A systematic review and Meta-analysis [J]. *J Oral Biol Craniofac Res*, 2025, 15(6): 1591-1600. DOI: 10.1016/j.jobcr.2025.09.013.
- [35] Shigemitsu R, Ogawa T, Sato E, et al. Kinematic classification of mandibular movements in patients with temporomandibular disorders based on PCA [J]. *Comput Biol Med*, 2025 (184): 109441. DOI: 10.1016/j.combiomed.2024.109441.
- [36] Lee HS, Baek HS, Song DS, et al. Effect of simultaneous therapy of arthrocentesis and occlusal splints on temporomandibular disorders: Anterior disc displacement without reduction [J]. *J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg*, 2013, 39(1): 14-20. DOI: 10.5125/jkaoms.2013.39.1.14.
- [37] 庞博. 电子面弓对颞下颌关节紊乱患者殆垫治疗前后下颌运动功能的研究 [D]. 广州: 广州医科大学, 2023. DOI: 10.27043/d.cnki.ggzyc.2023.000601.
- [38] Pang B, Yao J, Chen K, et al. Mandibular movement function before and after anterior repositioning occlusal device treatment for temporomandibular disorders assessed using an ultrasonic facebow [J]. *J Prosthet Dent*, 2025, 133(5): 1275.e1-1275.e12. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.03.021.
- [39] Wojczyńska AZ, Markova M, Ettlin DA, et al. *In-vivo* kinematic assessment of alloplastic temporomandibular joint replacements by means of helical axis: A cohort study with historical control [J]. *J Biomech*, 2021 (122): 110494. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2021.110494.
- [40] Dong M, Jiao Z, Sun Q, et al. The magnetic resonance imaging evaluation of condylar new bone remodeling after Yang's TMJ

- arthroscopic surgery[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1):5219. DOI: 10.1038/s41598-021-84591-1.
- [41] Giro G, Policastro VB, Scavassin PM, et al. Mandibular kinesiographic pattern of women with chronic TMD after management with educational and self-care therapies: A double-blind, randomized clinical trial[J]. *J Prosthet Dent*, 2016, 116(5):749-755. DOI:10.1016/j.prosdent.2016.03.021.
- [42] Minemura E, Takeuchi Y, Manome Y, et al. An advanced method of individual jaw movement analysis[J]. *Showa Univ J Med Sci*, 2022, 34(4):200-208. DOI:10.15369/sujms.34.200.
- [43] Skármeta NP. Occlusal stability and mandibular stability: The major part of dentistry we are still neglecting[J]. *Cranio*, 2017, 35(4):201-203. DOI:10.1080/08869634.2017.1329686.
- [44] Aslanidou K, Kau CH, Vlachos C, et al. The fabrication of a customized occlusal splint based on the merging of dynamic jaw tracking records, cone beam computed tomography, and CAD-CAM digital impression[J]. *J Orthod Sci*, 2017, 6(3):104-109. DOI:10.4103/jos.JOS_61_16.
- [45] Felenc S, Jaisson M. Esthetic & function: The 4D solution a clinical evaluation[J]. *MADOHC*, 2018, 2(3):2-10. DOI: 10.32474/MADOHC.2018.02.000137.
- [46] 文佳玉,武峰.再定位咬合板治疗颞下颌关节盘前移位的研究进展[J]. *口腔医学研究*, 2024, 40(10):861-866. DOI: 10.13701/j.cnki.kqxyj.2024.10.003.
- [47] 汪存艺,胡济安,施洁珺.下颌前伸再定位治疗在颞下颌关节紊乱病中的应用进展[J]. *口腔医学*, 2023, 43(10):920-924. DOI:10.13591/j.cnki.kqyx.2023.10.011.
- [48] Ahmed MMS, Chen P, Xiao Z, et al. Three-dimensional changes in hard - tissue symmetry and soft - tissue parameters after stabilization splint therapy in adult patients with temporomandibular joint disorders and mandibular deviation: A retrospective study[J]. *J Am Dent Assoc*, 2025, 156(8):626-637. DOI:10.1016/j.adaj.2025.05.012.
- [49] 陈思思,刘亚丽.颞下颌关节紊乱病咬合板治疗的临床应用进展[J]. *医学综述*, 2018, 24(9):1785-1789. DOI:10.3969/j.issn.1006-2084.2018.09.024.
- [50] Ma Y, Li W, Li L, et al. Clinical evaluation of 3D printed splint in the treatment of temporomandibular disorders[J]. *BMC Oral Health*, 2025, 25(1):1263. DOI:10.1186/s12903-025-06622-x.
- [51] Farook TH, Rashid F, Alam MK, et al. Variables influencing the device - dependent approaches in digitally analysing jaw movement: A systematic review[J]. *Clin Oral Investig*, 2023, 27(2):489-504. DOI:10.1007/s00784-022-04835-w.
- [52] Gu X, Hu T, Zhang Z, et al. Comparison of the accuracy of an ultrasonic-based jaw tracking device with conventional electronic tracking device[J]. *J Adv Prosthodont*, 2025, 17(1):47-58. DOI:10.4047/jap.2025.17.1.47.
- [53] 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. DOI: 10.1016/j.jds.2011.03.010.
- [54] Jeon KJ, Kim YH, Ha EG, et al. Quantitative analysis of the mouth opening movement of temporomandibular joint disorder patients according to disc position using computer vision: A pilot study[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2022, 12(3):1909. DOI: 10.21037/qims-21-629.
- [55] Leissner O, Maulén-Yáñez M, Meeder-Bella W, et al. Assessment of mandibular kinematics values and its relevance for the diagnosis of temporomandibular joint disorders[J]. *J Dent Sci*, 2021, 16(1):241-248. DOI:10.1016/j.jds.2020.05.015.
- [56] Marcelino V, de Rovere S, Paço M, et al. Masticatory function in individuals with temporomandibular disorders: A systematic review and Meta-analysis[J]. *Life(Basel)*, 2023, 13(2):472. DOI:10.3390/life13020472.
- [57] Couldwell S, Pichardo CM, Radomski K, et al. Optical mandibular movement tracking devices, clinical uses and indications[J]. *Aust Dent J*, 2025(70):S25-S34. DOI:10.1111/adj.70026.
- [58] Farook TH, Dudley J. Understanding occlusion and temporomandibular joint function using deep learning and predictive modeling[J]. *Clin Exp Dent Res*, 2024, 10(6):e70028. DOI:10.1002/cre2.70028.

(收稿日期:2026-03-21)

(本文编辑:王嫚)