

·综述·

骀架的发展及其在口腔修复中的临床应用

易维^{1,2}综述, 廖红兵^{1,2}审校

(1.广西医科大学附属口腔医院口腔修复科 广西南宁 530000; 2.广西口腔虚拟现实技术工程研究中心 广西南宁 530000)

[摘要] 骀架在口腔修复临床诊疗过程中具有重要作用, 医生或技工常需要在骀架上模拟患者的动静态咬合, 从而指导与骀相关诊疗计划的制定和实施以及修复体的制作。随着数字化的发展, 骀架由传统的机械骀架逐渐发展为基于数字化技术的虚拟骀架, 革新了传统口腔临床诊疗流程。本文基于相关文献, 对骀架的研究背景、发展历程及骀架在修复科的临床应用进行综述。

[关键词] 虚拟骀架; 虚拟面弓; 动态咬合; 咬合分析; 机械骀架; 临床应用

[中图分类号] R783 [文献标志码] A [文章编号] 1008-6455 (2026) 01-0162-06

Development and Clinical Applications of Dental Articulators in Prosthodontics

YI Wei^{1,2}, LIAO Hongbing^{1,2}

(1. Department of Prosthodontics, Affiliated Stomatological Hospital of Guangxi Medical University, Nanning 530000, Guangxi, China; 2. Guangxi Engineering Research Center of Virtual Reality Technology in Stomatology, Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract: The Articulator plays a crucial role in the clinical diagnosis and treatment of Prosthodontics. Dentists or dental technicians often need to simulate a patient's dynamic and static occlusion on an articulator to guide the formulation and implementation of occlusion-related diagnosis/treatment plans and the fabrication of prostheses. With the advancement of digital technology, articulators have evolved from traditional mechanical devices to digital technology-based virtual articulators, revolutionizing the conventional clinical workflow in dentistry. Based on relevant literature, this article reviews the research background, development history of articulators, and the clinical applications of virtual articulators in prosthodontics.

Key words: virtual articulator; virtual facebow; dynamic occlusion; occlusal analysis; mechanical articulator; clinical application

骀架为一种用来模拟颞下颌关节以及颌骨结构的机械装置, 通过将上下颌模型固定于该装置, 可复现部分或全部的下颌运动^[1]。骀架自19世纪被引入口腔领域, 通过在体外环境模拟患者下颌的下颌运动与正中关系, 为诊断、设计、制作和调整修复体提供了可重复、可验证的机械或数字环境, 骀架的发展对口腔修复学具有重要意义。本文就骀架的发展历程及骀架在修复科的临床应用展开综述。

1 机械骀架

1.1 机械骀架的发展史: 下颌运动是颌系统功能的重要形式, 在神经、肌肉、颞下颌关节、骀的共同作用下完成。为避免下颌运动与骀的失调, 我们需要精准地在体外模拟患者口内的咬合及下颌运动情况。为此, 学者们开始研究机械骀架, 尝试将在口外重现患者的下颌运动。机械骀架的发展距今已有200多年历史, 根据其结构以及对下颌运动情况重现程度不同, 可分为简单骀架、半可调骀架、全可调骀架三类。

1805年, Gariot研发了第一种简单机械骀架(又称不可调节骀架), 由上下骀架环和铰链转动轴组成, 此时骀架的开闭口弧线及骀架的铰链轴相关, 并不能完全模拟真实患者的实际开闭口轨迹, 且无法模拟前伸及侧方运动。19世纪后期, 为了更好地在骀架中重现下颌运动, 学者们尝试改良骀架结构, 使其除了模拟开闭口运动外, 还能模拟前伸、侧方等运动。1854年, Bonwill WGA^[2]提出bonwell triangle理论, 即两侧的髁突与下切牙中点的连线应形成等边三角形, 首次在骀架上设置前伸髁导结构, 通过此结构骀架可同时模拟开闭口及前伸运动, 但此时髁导的运动被设定为双侧水平向前。1866年, Walker W^[3]提出髁突运动并非水平, 而是沿髁突-切点的倾斜运动, 并发明相应的倾斜髁导结构, 测量出前伸髁导斜度的平均值为26°。在此基础上, Gysi A教授在1908年通过增加切导装置, 研发出首个半可调骀架(Gysiv架), 骀架的前方切导针与后方双侧的髁导结构形成三点稳定结构。2年后, Gysi A教授又

基金项目: 国家自然科学基金(地区基金项目)(编号: 82160192)

通信作者: 廖红兵, 教授; 研究方向为口腔种植修复。E-mail: 941682243@qq.com

第一作者: 易维, 主治医师; 研究方向为口腔数字化修复。E-mail: 472567411@qq.com

发明哥特式弓用于记录下颌前伸及侧方运动轨迹，并将记录转移至机械殆架中模拟下颌前伸及侧方运动^[4]。此后，Summa R等^[5-6]在此基础上进一步完善改良了半可调殆架的髁导等结构，半可调殆架的出现为个性化修复治疗提供了可能，但此时殆架中模型的各方位运动皆为直线运动。20世纪，殆学进入快速发展阶段。1921年，McCollum BB教授^[7]研发出机械面弓锥形，客观证明了铰链轴的存在。1924年，McCollum BB教授等联合发明全可调殆架。相较于半可调殆架，全可调殆架在此基础上通过配置个性化切导盘实现了曲线髁导，显著提升了机械殆架的个性化模拟能力。

1.2 机械殆架的临床应用：将模型转移至机械殆架的操作流程如下。①信息采集与记录：首先需获取患者的上下颌牙列模型，并获取相关咬合记录（如：牙尖交错位、前伸颌位、侧方颌位等）；②通过机械面弓转移患者上颌（或颌骨）相对于铰链轴的相对位置关系至机械殆架中，通过面弓中的殆叉固定上颌模型，再通过相关咬合记录转移下颌模型至殆架上；③设置个性化参数：通过前伸、侧方咬合记录在殆架中设定相应的前伸髁导斜度、侧方髁导斜度等相关参数。

临床中，半可调殆架通过机械面弓转移上颌位置时常采用经验铰链轴，此方法虽简便操作，但对于颞下颌关节紊乱患者可能并不适用。且半可调殆架的运动参数通常是使用平均值参数或通过公式计算（侧方髁导斜度=前伸髁导斜度/8+12），其重现的下颌运动为直线运动。但全可调殆架可通过个性化面弓转移或辅助使用下颌运动描记仪进行转移，这种精确转移使得转移的颌位关系与口内情况高度一致，且全可调殆架通过个性化切导盘实现曲线髁导，同时可模拟迅即侧移等下颌特征，这些特征在模拟患者前伸、侧方等功能运动中具有重要意义。

1.3 机械殆架的局限性：尽管机械殆架能一定程度上模拟患者的口内情况，辅助医生评估患者的咬合状态及修复体的制作，但其应用仍存在明显的局限。①在机械殆架中难以直观地观察牙列模型的动态咬合情况。②其模型咬合精度易受多种因素影响，如印模材料变形、石膏模型膨胀/收缩、咬合记录材料变形、机械面弓人为转移误差等。除此之外，石膏模型在反复运动过程中会出现磨损，导致咬合面形态的破坏和精度下降。③因受限于机械殆架的刚性结构，殆架切导、髁导等结构难以真实复现下颌在软组织、关节盘、肌肉模式及弹性作用下的复杂咀嚼运动，将其肌肉简化为线性力，忽略了真实肌肉在收缩过程中的动态变化^[8]。④咬合复现程度有限：Tamaki K等^[9]学者通过比较机械殆架中模型模拟的咬合接触点与口内实际记录，发现前伸运动中平均仅66%的接触面积一致，侧方运动为81%。且需要重点注意的是，分别有20%和27%的受试者在前伸及侧方运动中出现了口内记录未见的额外非正中接触点，一定程度上证明了机械殆架重现口内真实动态咬合接触的精度有待提升。

为解决这些问题，国内外学者开始探索数字化技术在口腔中的应用，使用数字化技术如口腔扫描仪获取牙列数

据及咬合情况，发现其可显著缩短操作时间，且其咬合重现精度高^[10]。在此之后，为进一步实现全流程的数字化技术，学者们开始探索虚拟殆架，通过虚拟现实技术来替代传统的物理殆架，在特定软件中对咬合及下颌运动特征进行定量分析从而指导口腔修复方案的设计。

2 虚拟殆架

2.1 虚拟殆架的发展史：1999年，Szentpétery A教授^[11]提出虚拟殆架的概念，2002年，Bisler A教授^[12]团队实现并应用。虚拟殆架技术其实是一种计算机软件工具，通过对数据的处理与图像功能替代常规实体殆架设备，在软件中复现患者的咬合关系。虚拟殆架通过转移上下颌牙列相对关系可实现静态咬合的重现；通过融合面部扫描数据，可构建3D虚拟患者，用于美学修复；在此基础上整合下颌运动轨迹数据，可扩展为具备动态咬合功能的4D患者模型^[13]，可显示下颌随时间变化的动态信息（时间分辨率60 FPS，每秒采集60帧，即16.67毫秒/帧），医生可在集动态咬合数据的虚拟殆架中进行咬合设计等操作。

相比于机械殆架，虚拟殆架实现如下突破。①实现虚拟患者构建：通过整合口内扫描（牙列形态）、3D面部扫描（美学关系）及CBCT影像（骨组织结构），构建包含解剖、功能与美学的动态三维虚拟可视化患者模型^[17]，可多角度观察咬合以及颞下颌关节运动。②实现动态咬合分析：其突破机械殆架依赖静态咬合纸或硅橡胶记录的局限，虚拟殆架可实现可视化动态咬合分析及虚拟调殆；③不受限于机械殆架的结构，避免了石膏、咬合记录材料变形等造成的转移误差。同时，通过下颌轨迹扫描记录仪可记录真实状态下患者的下颌运动轨迹并精准复现于虚拟殆架中。

2.2 虚拟殆架的临床操作流程：根据下颌运动转移的方式不同，虚拟殆架分为以下两种，第一种为基于实体殆架的虚拟殆架，可在数字化软件中重现机械殆架的参数运动；第二种为基于口颌系统的虚拟殆架，通过记录的下颌运动轨迹在数字化软件中模拟患者的真实运动情况（见图1）。

2.2.1 基于实体殆架的间接转移法：基于实体殆架的间接转移法是通过逆向工程原理，在软件中复制机械殆架的形态及结构。首先需要通过实体机械殆架获取患者的髁导切导等参数，随后将这些个性化参数输入计算机软件，在软件中重现机械殆架的参数运动。具体如下：①通过口内扫描或模型扫描获取牙列数据，利用机械面弓等转移上颌位置至机械殆架中，通过前伸、侧方等咬合记录获取下颌运动参数；②将上下颌模型上好殆架后，通过特定扫描仪扫描实体殆架，以获取上下颌模型在其中的位置；③在匹配的虚拟殆架中设置对应的实体殆架参数，从而进行修复体数字化设计，实现在虚拟环境中复现实体机械殆架的参数运动。因此，该方法仅适用于支持逆向工程转换的实体殆架产品，如德国Amann Girrbach公司的Ceramill虚拟殆架系统中便复制了该公司的Artex实物殆架产品。

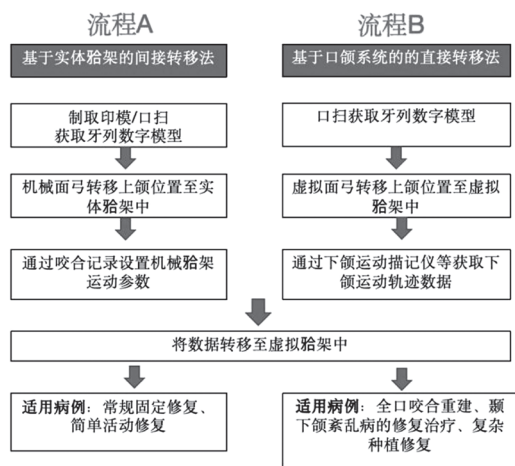


图1 虚拟殆架的转移方法

为了评估此间接转移法的真实性与准确性,有学者开展了相关研究。Úry E等^[15]通过对比194个石膏模型咬合接触点与其在虚拟殆架中的对应点位置,发现93%的模型接触点与虚拟殆架中的点相匹配,96%的石膏模型第一接触点同样作为第一接触点出现在虚拟殆架中。该研究证实,模型上的咬合接触点的数量和位置与其在虚拟殆架中的呈现具有高度一致性。Hsu MR等^[16]通过调整虚拟殆架与机械殆架的前伸髁斜度与切导针位置,比较调整后殆架上的模型位置关系,显示虚拟殆架与机械殆架上的模型位置差异不超过100 μm 。机械殆架与通过其间接转移的虚拟殆架咬合重现相似度较高^[17]。

然而,由于此间接方式仍需要借助实体殆架进行转移,依然受限于机械殆架的刚性结构,通过参数转移的下颌运动往往被简单记录为运动起点及终点的直线运动,难以真实复现下颌在软组织、关节盘、肌肉模式及弹性作用下的真实曲线运动轨迹。此外,传统机械安装程序会耗费医生的额外操作时间,且无法避免实体殆架自身装置及转移过程等问题带来的机械及人为误差,从而影响转移的精确性^[18]。

2.2.2 基于口颌系统的直接转移法:为了更大程度地在体外复现患者的真实运动轨迹,学者们开始研究不依赖于实体殆架的转移方法。基于口颌系统的直接转移法基于患者的真实运动轨迹,可不受机械殆架的参数限制。为在虚拟殆架中重现铰链轴位置,学者们尝试通过基于超声、光电类下颌分析系统等进行铰链轴及下颌运动的转移,也有学者通过虚拟面弓转移铰链轴位置。

下颌运动分析系统可通过超声、电磁、光学信号记录下颌运动数据,基于下颌运动数据转移运动铰链轴位置。常见的下颌运动分析系统有KaVo ARCUS digma系统、Zebris、Modjaw等品牌。Nebe M等^[19]使用光学下颌分析系统(Tizian JMA Optic, Zebris Medical GmbH)来测量下颌运动和髁突位置的可靠性。研究发现下颌运动中张口运动(ICC=0.95)与前伸运动(ICC=0.94)的可靠性极高,侧移运动稍低(ICC=0.87~0.89),髁突位置重复性

达ICC=0.98,证实该光学下颌分析系统在转移下颌运动及髁突位置时稳定性较高。除此之外,也有学者通过虚拟面弓进行铰链轴的转移。Solaberrieta E等^[20]在2015年提出建立虚拟面弓,虚拟面弓是将数字化上下颌模型组装到虚拟殆架中的关键环节。通常需要在颌颌面数据上定位3个点来共同构成所需的参考平面,分别为2个后参考点和1个前参考点(其中2个后部参考点将用于确定横向的铰链轴位置)。常用的转移方式有通过拍摄二维图片、三维面部扫描、CBCT数据等进行转移(见图2)。

Petre A等^[21]通过在患者面部标定标记点并拍摄二维图片,通过拟合患者口内扫描牙列数据、面部微笑正侧面图片(需要尽量多的牙列信息辅助后期匹配)及带殆叉的面部图片等,确立上颌与牙列关系,通过匹配皮肤上髁突标志点与虚拟殆架中的髁球位置,从而实现上颌位置的转移。该方法操作简便,但也存在局限性,仅适用于微笑时能显露上颌前牙的患者。对于上颌前牙多数缺失或低位笑线而无法显露上下前牙的患者,有学者^[22]通过增加使用唇颊侧拉钩辅助暴露牙列信息,佩戴机械面弓拍摄正侧面照片辅助定位,从而在CAD软件中进行拟合完成虚拟殆架的转移。但利用图片的方式进行虚拟面弓转移受限于图片拍摄质量及患者拍摄体位的影响,一定程度上降低了匹配精度。

为进一步提升转移准确性,学者们^[23-24]通过专业面部扫描仪获取面部三维数据,通过咬合转移板将面部三维数据与口内扫描数据进行配准,同时将面部标志点与虚拟殆架上的髁球重合,从而在计算机软件上模拟生成包含牙列、咬合记录的面部模型,实现口颌系统在虚拟咬合装置上的准确转移,并发现该转移方法导致的下颌牙列咬合误差不超过1 mm。除此之外,也有研究者通过锥形束计算机断层扫描(CBCT)数据进行转移。研究者^[25]利用逆向工程软件处理患者的CBCT数据,并与口内扫描得到的数字化数据进行拟合,再将患者CT中的铰链轴位置转移到虚拟殆架上进行后续的设计工作。Lepidi L等^[26]以牙列为共同区域配准口内扫描数据与CBCT图像,通过CBCT重建的上颌骨确定参考平面,通过参考平面将其转移至虚拟殆架中。基于此方法,将CADIAX电子描记仪(下颌运动分析系统)转移的铰链轴作为金标准,比较基于虚拟面弓与机械面弓转移的铰链轴位置与金标准的差异,研究发现虚拟面弓转移的角度偏差为 0.44° ,机械面弓的角度偏差为 0.53° ,均在临床可接受范围内。但通过CBCT数据进行转移需要提前获取患者的大视野CBCT数据(有效辐射剂量 $68\sim 368\ \mu\text{Sv}$),按照ALARA原则(在能够获得满足诊断需求的必要医学信息的前提下,对患者的辐射暴露控制在合理范围内的最低水平),故此技术可应用于已有CBCT数据的患者或因必要情况需拍摄大视野CBCT的患者,将其应用于简单的修复案例是不合理的。

随着数字技术的发展,虚拟殆架的使用日益普及。尽管如此,在某些特殊的临床治疗或技工操作流程中,单纯使用虚拟殆架可能并不可行。必要时仍需要将虚拟殆架转

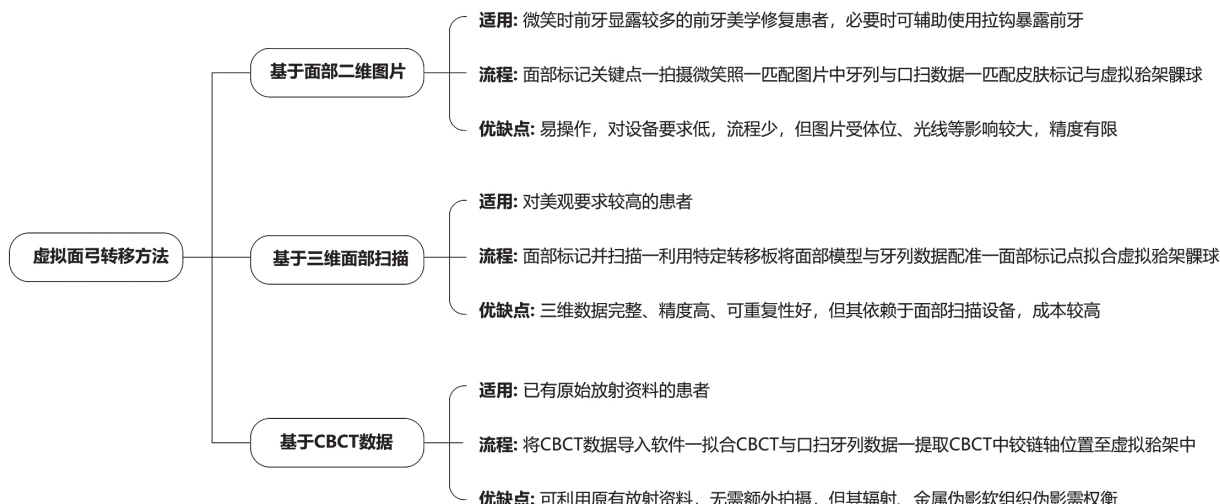


图2 虚拟面弓转移方法

移至机械骀架中进一步修复体的制作及调整。此时，可通过3D打印个性化转移板将扫描模型从虚拟骀架转移至机械骀架，可一定程度避免转移误差^[27]。

3 虚拟骀架在修复科的临床应用

3.1 常见的虚拟骀架系统

3.1.1 Cerec系统: Cerec系统(Dentsply Sirona)的虚拟骀架无实物原型,但可通过设置参数模拟常见的实物骀架。但其无法转移患者的个性化较链轴参数,适用于单次就诊的简单修复病例,如全瓷冠、嵌体和高嵌体修复,其对复杂病例中的咬合模拟功能的精细度较差。

3.1.2 3Shape系统: 3Shape系统的Dental System虚拟骀架深度集成于整个数字化工作流程中,但其兼容性较差,与自家数字化设备融合更佳。该系统支持将下颌运动分析系统(如Modjaw和ZebriS)的数据导入,可实现患者特异性下颌运动数据的传输和应用。3Shape系统的虚拟骀架适用于复杂修复病例,如全口咬合重建、种植修复和美学修复病例。该系统能够提供精确的咬合关系以及机械骀架难以实现的动态咬合分析和调整能力。

3.1.3 exocad系统: exocad软件的功能以模块化形式呈现,其中Virtual Articulator模块用于虚拟咬合分析。该软件的虚拟骀架系统同样支持下颌运动分析系统(如Modjaw和ZebriS)数据的导入,实现精准的数字化颌位关系转移和动态咬合调整。该系统优势在于拥有较高的兼容性,可以适配市面常见的口腔扫描仪、面部扫描仪等数字化设备,其模块化购买的方式使其可能更具成本效益。

3.2 虚拟骀架在口腔修复中的临床应用

3.2.1 前牙美学设计-虚拟患者构建: 通过整合口内扫描数据、3D面部扫描数据及动态咬合数据,构建“解剖-功能-美学”一体化模型,有利于在虚拟患者中进行前牙美学设计^[28]。研究证明,在前牙美学区,通过基于患者真实运动曲线的虚拟骀架进行前导咬合设计在恢复自然前导方面更有效^[29]。

3.2.2 修复体设计-动静态咬合分析: 针对牙体缺损患者,有研究比较了通过机械骀架与虚拟骀架设计的全瓷单冠的静态咬合,通过测量咬合的接触点、接触面积及咬合力的百分比峰值来评估咬合接触的准确性,发现通过虚拟骀架设计的单冠比机械骀架设计的修复体对牙间咬合的恢复效果更好,并且产生的动态咬合干扰较小^[30]。

3.2.3 TMD患者-下颌动态轨迹模拟: 在TMD诊治方面, Lee KC等^[31]通过虚拟牙骀架对TMD和不稳定咬合患者进行咬合评估,发现其可以准确地诊断和分析咬合状况,提高治疗的精度和效率。Aslanidou K等^[32]在虚拟骀架中将下颌运动数据与CBCT数据进行融合,用来分析下颌运动过程中颞下颌关节间隙和咬合接触的关系,并据此为颞下颌关节紊乱病患者制作骀垫。Kühnöl C等^[33]进行咬合重建修复时,也使用虚拟骀架对关节间隙与咬合状态进行了分析,避免对关节产生不利影响,均获得良好的效果。

4 虚拟骀架转移精度的影响因素

大量研究已证明虚拟骀架在个性化转移中的精确度及临床可靠性。数字化的流程可一定程度减少人为误差,但数字化设备如CBCT精度、光学扫描仪精度、不同咬合配准方法、不同较链轴转移方法等也会影响虚拟骀架的转移准确性^[34-35]。

4.1 光学扫描仪的精度差别: 不同扫描仪的扫描精度可能影响上下颌关系的准确性。Revilla-León M等^[36]通过评估不同的数字化技术(4种口内扫描仪+光学下颌追踪系统Modjaw)与传统方法记录CR位置时上下颌关系的准确性,发现其真实度排名顺序分别为: iTero (0.14±0.09) mm, Modjaw (0.20±0.04) mm, TRIOS4 (0.22±0.09) mm, Primescan (0.26±0.13) mm, i700 (0.40±0.22) mm, iTero最佳; 精密度与真实度趋势一致, iTero、Modjaw、TRIOS4无显著差异,显著优于i700和Primescan。故 iTero、Modjaw、TRIOS4表现最佳, i700的准确性最低。Mandelli F等^[37]通过用工业高精度扫描仪获得标准单牙基

台模型的三维数据,并以此作为标准,检测7种口外扫描仪真实度为 $7.7\sim 31.1\mu\text{m}$,精密度为 $4.0\sim 16.3\mu\text{m}$ 。除此之外,不同面部扫描仪之间也存在精度差异,研究发现使用高精度设备可提升虚拟患者建模的准确性^[38]。

4.2 不同咬合配准方法精度差异:当使用不同咬合配准方法获取上下牙列相对位置关系时,其配准精度也存在差异。有学者发现,使用双侧咬合记录扫描与全牙弓咬合扫描进行数字化模型虚拟殆架配准时,前者平均偏差为 $(0.053\pm 0.051)\text{mm}$,而后者为 $(0.265\pm 0.241)\text{mm}$ 。这两种方法的前牙区和后牙区的配准精度均存在显著差异^[39]。

4.3 铰链轴转移方法的选择及准确性:当使用不同的转移方法转移铰链轴时,其相对置关系也存在差异。在一项自身对照临床研究中,研究者们比较了间接转移法(基于机械面弓和实体殆架)与5种直接转移法(直接平均值转移、基于手机二维图片转移、基于面扫三维信息转移、融合CBCT数据转移、基于下颌运动分析系统转移)在自然头位下转移虚拟殆架的准确性,以电子面弓(下颌运动分析系统)为金标准对照,发现基于CBCT的虚拟面弓转移法以最低髁突偏差 $(2.76\pm 1.59\text{mm})$ 和 $<1^\circ$ 参考平面误差表现最佳;基于专业面部扫描仪与基于智能手机拍摄图片转移的位置无显著差异,角度误差均 $<1^\circ$,基于传统机械面弓的间接转移法与直接根据咬合平面安装的平均安装法误差最大,后者参考平面偏差高达 8.23° 。因此,CBCT适合复杂病例,手机面部扫描为高性价比替代方案,数字化流程具临床可行性^[40]。

4.4 不同下颌分析系统精度差异:有学者评估了三种常见的下颌运动分析系统的精确度和真实度,发现三种系统精确度均良好。在真实度方面,KaVo ARCUSdigma(基于超声原理)、Modjaw(基于光学原理)真实度良好,而SDiMatrix(基于光学原理)显著偏低,提示其设备需进一步优化^[41]。

5 不足和展望

数字化技术在口腔医学中的应用具有较大潜力^[42]。然而,其发展仍面临一些挑战。未来可以聚焦于以下几个途径解决问题。①推广分级应用模式:由于基层医院的经济与设备可及性有限,实现全数字化流程实施较为困难。初级医院可采用口扫+模型扫描的方式,配合使用平均值虚拟殆架,实现基础的数字化,提升效率;对于高级医院,可配备全套高端设备,承接基层单位转诊的复杂病例。②进一步提升数据采集精度:当前的虚拟殆架技术精度仍受到各种数字化设备的限制,如CBCT存在散射伪影和部分体积效应,导致牙齿轮廓模糊,通过校正散射与束硬化伪影的算法,可提升CT图像的均匀性、对比度及边缘清晰度。后期应致力于提升数字化设备的分辨率和精确度,提高数据的一致性和准确性。③降低多源数据配准误差:在无牙颌患者中,口内扫描与CBCT基于软组织配准的平均误差为 $0.15\sim 0.16\text{mm}$,但软组织易产生形变,导致口扫与CBCT采集时的形态不一致,且CBCT中软组织对比度低,难以准确

分割,进一步影响配准精度^[43-44]。未来可尝试基于大规模案例库等开发深度学习智能算法、提升软组织分割精度。

④AI赋能个性化修复设计:多位学者已尝试使用AI及机器学习等前沿技术实施在口腔修复治疗各个阶段(包括治疗计划规划、比色^[45]、义齿设计和制作^[46])。通过大数据和人工智能技术,基于大规模数据库分析不同患者的咬合特征开发个性化的虚拟殆架的设计方案将成为研究重点。但是,AI辅助并不能完全替代医生设计,数据的标准化、隐私保护以及不同设备之间的兼容性仍然是亟待解决的问题。未来,随着数字化发展,虚拟殆架的应用将更加个性化和高效。可期通过多源数据融合与自动配准来建立高精度的虚拟患者模型;利用机器学习可预测配准误差并引导转移方案选择;基于多源病例数据库支持AI辅助个性化治疗及预测。

[参考文献]

- [1]Layton D M, Morgano S M, Muller F, et al. The glossary of prosthodontic terms 2023: Tenth edition[J]. J Prosthet Dent, 2023, 130(4 Suppl 1): Se1-Se3.
- [2]Bonwill W G A. Geometrical and mechanical laws of articulation[J]. Trans Odont Soc Perio, 1885:119-133.
- [3]Walker W. Prosthetic dentistry: The glenoid fossa; the movements of mandible; the cusps of the teeth[J]. Dent Cosmos, 1895,38:34-43.
- [4]Gysi A. The problem of articulation[J]. Dent Cosmos, 1910,52:148-169.
- [5]Summa R. The importance of the inter-articular fibro-cartilage of the temporo-mandibular articulation[J]. Dent Regist, 1918,72(7):330-334.
- [6]Prentiss H J. A preliminary report upon the temporo-mandibular articulation in the human type[J]. Dent Cosmos, 1918,60:505-507.
- [7]McCollum B B. The mandibular hinge axis and a method of locating it[J]. J Prosthet Dent, 1960,10(3):428-435.
- [8]She Y L, Sun Y X, Jiang N. The mechanics of tissue-engineered temporomandibular joint discs: Current status and prospects for enhancement[J]. J Biomater Appl, 2024, 39(4):269-287.
- [9]Tamaki K, Cělar A G, Beyrer S, et al. Reproduction of excursive tooth contact in an articulator with computerized axiography data[J]. J Prosthet Dent, 1997,78(4):373-378.
- [10]Lee J D, Gallucci G O, Lee S J. An in-vitro evaluation of articulation accuracy for digitally milled models vs. conventional gypsum casts[J]. Dent J (Basel), 2022, 10(1):11.
- [11]Szentpétery A. Dynamic correction of occlusal surfaces by means of the CAD-CAM methods. II[J]. Fogorv Sz, 1999,92(9):263-272.
- [12]Bisler A, Bockholt U, Kordass B, et al. The virtual articulator[J]. Int J Comput Dent, 2002,5(2/3):101-106.
- [13]Zambrana N, Sesma N, Fomenko I, et al. Jaw tracking integration to the virtual patient: A 4D dynamic approach[J]. J Prosthet Dent, 2024,131(3):370-374.
- [14]Keul C, Güth J F. Accuracy of full-arch digital impressions: an in vitro and in vivo comparison[J]. Clin Oral Investig, 2020,24(2):735-745.
- [15]Úry E, Fornai C, Weber G W. Accuracy of transferring analog dental casts to a virtual articulator[J]. J Prosthet Dent, 2020,123(2):305-313.

- [16]Hsu M R, Driscoll C F, Romberg E, et al. Accuracy of dynamic virtual articulation: Trueness and precision[J]. *J Prosthodont*, 2019,28(4):436-443.
- [17]He M Z, Ding Q, Li L L, et al. The accuracy of transferring casts in maximal intercuspal position to a virtual articulator[J]. *J Prosthodont*, 2022,31(4):326-332.
- [18]Saini R S, Alshoail H H, Kanji M A, et al. Virtual articulator software: accuracy, usability, and clinical applicability: A systematic review[J]. *Int Dent J*, 2025,75(3):1691-1704.
- [19]Nebe M, Fenske F, Grau E, et al. Reliability of measuring mandibular movement and condylar position using an optical jaw registration system[J]. *Int J Comput Dent*, 2025.DOI: 10.3290/j.ijcd.b6173234.
- [20]Solaberrieta E, Garmendia A, Mínguez R, et al. Virtual facebow technique[J]. *J Prosthet Dent*, 2015,114(6):751-755.
- [21]Petre A, Drafta S, Stefanescu C, et al. Virtual facebow technique using standardized background images[J]. *J Prosthet Dent*, 2019,121(5):724-728.
- [22]Kois J C, Kois D E, Zeitler J M, et al. Digital to analog facially generated interchangeable facebow transfer: Capturing a standardized reference position[J]. *J Prosthodont*, 2022,31(S1):S13-S22.
- [23]Yang S T, Feng N, Li D, et al. A novel technique to align the intraoral scans to the virtual articulator and set the patient-specific sagittal condylar inclination[J]. *J Prosthodont*, 2022,31(1):79-84.
- [24]Revilla-León M, Zeitler J M, Kois J C. Scan body system to translate natural head position and virtual mounting into a 3-dimensional virtual patient: A dental technique[J]. *J Prosthet Dent*, 2024,131(5):787-792.
- [25]Yang S T, Dong B, Zhang Q Q, et al. An indirect digital technique to transfer 3D printed casts to a mechanical articulator with individual sagittal condylar inclination settings using CBCT and intraoral scans[J]. *J Prosthodont*, 2022,31(9):822-827.
- [26]Lepidi L, Chen Z, Rávda A, et al. A full-digital technique to mount a maxillary arch scan on a virtual articulator[J]. *J Prosthodont*, 2019,28(3):335-338.
- [27]Yang S T, Wu L, Alabkaa B, et al. Digital cross-mounting of intraoral scan casts from a virtual articulator to a mechanical articulator by using a custom transfer plate: A dental technique[J]. *J Prosthet Dent*, 2024,134(4):914-920.
- [28]Yue Z G, Luo Z Q, Hou J X, et al. Application of 3D digital smile design based on virtual articulation analysis in esthetic dentistry: A technique[J]. *J Prosthet Dent*, 2025,133(1):24-30.
- [29]Feng Y, Sun X R, Li J Y, et al. Is dynamic occlusal design necessary for anterior guidance recovery in the computer-aided design process? An in vitro study[J]. *J Dent*, 2024,142:104833.
- [30]Yuan Y, Xu E X, Xu X R, et al. Accuracy of occlusal contacts of all-ceramic single crowns designed by virtual articulators from a CAD/CAM system: A preliminary evaluation[J]. *Int J Prosthodont*, 2024,37(1):109.
- [31]Lee K C, Park J H, Kim J C, et al. Digital application of three-dimensional diagnosis and treatment with a virtual articulator[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2024,36(5):710-722.
- [32]Aslanidou K, Kau C H, 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.
- [33]Kühnöl C, Kordaß B. Digital workflow for TMD diagnostics and bite alteration: description of a case treated using Sicut Function[J]. *Int J Comput Dent*, 2019,22(3):283-292.
- [34]Morsy N, El Kateb M. Accuracy of intraoral scanners for static virtual articulation: A systematic review and meta-analysis of multiple outcomes[J]. *J Prosthet Dent*, 2024,132(3):546-552.
- [35]Essam Y, El Kateb M, Morsy N. Accuracy of virtual articulation in maximal intercuspal position in direct and indirect digital workflows for fixed partial denture fabrication[J]. *J Prosthodont*, 2025,34(5):540-544.
- [36]Revilla-León M, Agustín-Panadero R, Zeitler J M, et al. Differences in maxillomandibular relationship recorded at centric relation when using a conventional method, four intraoral scanners, and a jaw tracking system: A clinical study[J]. *J Prosthet Dent*, 2024,132(5):964-972.
- [37]Mandelli F, Gherlone E, Gastaldi G, et al. Evaluation of the accuracy of extraoral laboratory scanners with a single-tooth abutment model: A 3D analysis[J]. *J Prosthodont Res*, 2017,61(4):363-370.
- [38]Amezua X, Iturrate M, Garikano X, et al. Analysis of the influence of the facial scanning method on the transfer accuracy of a maxillary digital scan to a 3D face scan for a virtual facebow technique: An invitro study[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(5):1024-1031.
- [39]Lee J D, Luu D, Yoon T W, et al. Accuracy comparison of bilateral versus complete arch interocclusal registration scans for virtual articulation[J]. *J Prosthet Dent*, 2024,132(5):1038-1043.
- [40]Lin H L, Pan Y, Wei X, et al. Comparison of the performance of various virtual articulator mounting procedures: a self-controlled clinical study[J]. *Clin Oral Investig*, 2023,27(7):4017-4028.
- [41]Zhao W, Feng Y, Cao R K, et al. Comparative analysis of three jaw motion tracking systems: A study on precision and trueness[J]. *J Prosthodont*, 2025,34(3):263-270.
- [42]Wang J, Wang B, Liu Y Y, et al. Recent advances in digital technology in implant dentistry[J]. *J Dent Res*, 2024,103(8):787-799.
- [43]Hegazy M A A, Cho M H, Cho M H, et al. 3D digital modeling of dental casts from their 3D CT images with scatter and beam-hardening correction[J]. *Sensors (Basel)*, 2024,24(6):1995.
- [44]Deferm J T, Baan F, Nijsink J, et al. Intraoral scanning of the edentulous jaw without additional markers: An in vivo validation study on scanning precision and registration of an intraoral scan with a cone-beam computed tomography scan[J]. *Imaging Sci Dent*, 2023,53(1):21-26.
- [45]Shetty S, Gali S, Augustine D, et al. Artificial intelligence systems in dental shade-matching: A systematic review[J]. *J Prosthodont*, 2024,33(6):519-532.
- [46]Ali I E, Tanikawa C, Chikai M, et al. Applications and performance of artificial intelligence models in removable prosthodontics: A literature review[J]. *J Prosthodont Res*, 2024,68(3):358-367.

[收稿日期]2025-07-20

本文引用格式: 易维, 廖红兵. 颌架的发展及其在口腔修复中的临床应用[J]. 中国美容医学, 2026, 35(1): 162-167.