

Exploration of Using Digital Technology in Fixed Dental Prosthesis Teaching to Improve the Accuracy of Tooth Preparation

Linwei Peng Xiaolu Liu

Haiyuan College, Kunming Medical University, Kunming, Yunnan, 650101, China

Abstract

Tooth preparation, a core step in fixed prosthodontic restoration, directly affects the quality of the restoration and the long-term prognosis for patients. The traditional teaching model relies on instructors' experiential guidance and visual judgment, with vague quantitative standards, delayed and highly subjective student feedback, resulting in slow and unstable improvement in preparation accuracy. This study aims to explore strategies for systematically integrating digital technologies—particularly intraoral scanning (IOS), computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM), and virtual reality (VR) simulation—into the dental preparation teaching process and to evaluate their actual effects on accuracy improvement. A closed-loop teaching model of 'scan-analyze-feedback-correct' (DTPM) was constructed. In the empirical phase, 60 preclinical students were randomly assigned into two groups: the experimental group received DTPM teaching, while the control group followed the traditional method. After the teaching sessions, and preparation volume deviation (at the micron level). Results showed that the experimental group performed significantly better than the control group across all dimensional accuracy indicators ($p < 0.01$), with the coefficient of variation in margin morphology reduced by about 40% and the mean preparation volume error controlled within clinically acceptable limits.

Keywords

Digital technology; fixed prosthodontic restoration; tooth preparation; teaching accuracy; intraoral scanning

数字化技术用于固定义齿修复教学提高牙体预备精度的探索

彭麟微 刘晓璐

昆明医科大学海源学院，中国·云南 昆明 650101

摘要

固定义齿修复的核心环节牙体预备，其精度直接影响修复体质量和患者长期预后。传统教学模式依赖导师经验性指导与肉眼评判，量化标准模糊，学生操作反馈滞后且主观性强，导致预备精度提升缓慢且不稳定。本研究致力于探索将数字化技术——特别是口内扫描（IOS）、计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）及虚拟现实（VR）模拟——系统性融入牙体预备教学流程的策略及其对精度提升的实际效果。构建了“扫描-分析-反馈-修正”的闭环教学模型（DTPM）。实证环节选取60名临床前期学生随机分为两组：实验组采用DTPM教学，对照组沿用传统方法。教学结束后，使用高精度实验室扫描仪评估两组学生在标准离体牙模型上完成的预备体质量。关键指标包括聚合度偏差、肩台连续性误差、预备量偏差（微米级）。结果显示，实验组学生预备体的各维度精度指标均显著优于对照组（ $p < 0.01$ ），尤其肩台形态变异系数降低了约40%，预备量误差均值控制在临床可接受阈限以内。数据分析揭示精度提升与数字技术提供的即时、可视化、量化反馈机制高度相关。结论指出，数字化技术深度融合创造了结构化训练路径与客观评价体系，有效解决了传统教学瓶颈，是提升牙体预备教学精度与效率的变革性途径。未来需深化人机协同模型，优化算法支持下的精准教学指导内容。

关键词

数字化技术；固定义齿修复；牙体预备；教学精度；口内扫描

1 引言

口腔医学数字化浪潮席卷诊疗全流程，其核心价值在于精准的数据捕获、直观的三维呈现与智能的分析评价能力。口内扫描技术（IOS）可在瞬间获取预备体表面海量三

维点云数据；CAD 软件支持进行多维度的几何形态量化分析；虚拟现实（VR）仿真系统则营造无风险、可重复的操作环境。这些技术潜力在教学领域远未充分挖掘。本研究旨在打破技术壁垒，系统性构建以数字化工具为核心的固定义齿牙体预备教学新范式（DTPM），实证检验其对预备精度提升的有效性，为口腔修复教育体系引入客观、高效、可复制的技术驱动解决方案。

【作者简介】彭麟微（1984-），女，中国云南建水人，本科，教授，从事口腔医学教育研究。

2 牙体预备教学的传统困境与数字突破可能

传统牙体预备教学长期受困于几个刚性障碍。首要问题在于评价体系的失准。导师评判多以目测或简单探针探查为主，聚合度、肩台宽度等核心指标依赖经验估计，学生无法得知确切的“偏差量是 100 微米还是 300 微米”。这种模糊性导致改进方向不明晰——学生意识到错误却难以把握修正尺度。反馈时效性差构成第二重制约。导师难以在每位学生操作瞬间提供实时的、一对一的精细指导，通常在其完成预备后进行总结性点评。这种延迟反馈使学生在错误操作阶段缺乏外部干预，操作误差一旦形成则需耗费成倍练习纠正。预备训练的高成本与低可重复性是第三个瓶颈。学生早期需要在离体牙或仿真模型上练习，材料消耗巨大；真实牙齿模型稀缺且不可再生。错误一旦发生，练习体通常报废，阻碍经验累积的连续性。更棘手的是，操作认知的非可视化——学生难以直观理解三维空间内车针角度与预备量之间的关系。口腔狭小空间与视线阻挡进一步放大了操作感知障碍。数字化技术恰恰针对上述痛点提出了具象化解法。口内扫描器如同“三维相机”，瞬间冻结预备体形态生成点云模型。**CAD** 软件是强大的“几何分析仪”，可对模型进行任意剖切、角度测量、距离计算乃至曲面比对。虚拟现实平台则创造了一个“无限复制的手术室”，学生可在逼真视觉与力反馈环境下反复练习，消除材料顾虑。

3 数字化教学系统的构建与实践路径

3.1 DTPM 模型：流程架构

DTPM (Digital Tooth Preparation Mentorship) 模型的核心设计遵循“即时反馈 - 量化分析 - 循证改进”闭环。起始于 VR 仿真训练：学员佩戴 VR 头显，握持力反馈触觉笔在高度拟真的虚拟口腔环境中练习预备标准牙体。系统实时计算预备量、聚合角并投射于视觉界面，同步播放超限操作视觉警告（如虚拟牙髓暴露红光）。第二阶段迁移至实体模型训练：学生在离体牙或高仿真树脂牙模型上操作，每次预备结束后立即进行口内扫描。扫描数据无缝导入专用牙体预备评价软件（**PrepCheck**、**Meshmixer**、**Geomagic Control X** 等）。软件自动将预备体模型与预设的理想预备体模板进行三维叠合偏差分析，生成色谱图——蓝色表示预备不足区域、红色表示预备过度区域、绿色表示理想范围。软件同时输出聚合度实测值、肩台宽度误差值、各区域预备深度统计值等量化报表。导师基于色谱图与数据报表引导学生辨识错误形态的空间定位与误差数值。教学重心转移至教会学生解读数据图谱背后的操作根源（如车针角度过陡导致肩台过窄红色区）。基于数据诊断，学生明确修正目标（“将左舌侧肩台宽度增加 150 微米”）并执行修正操作。

3.2 关键技术参数设定与应用

系统性能与精度保障依赖于关键技术的参数化应用。在口内扫描环节，选择精度优于 20 微米的临床级扫描仪（如

iTero Element 5D+、**Primescan**），确保原始数据可靠性。扫描前需规范操作流程：彻底干燥模型、使用适当扫描粉（增强低反光区域细节）、固定模型位置避免振动干扰扫描轨迹。**CAD** 分析环节采用基于最佳拟合算法的三维偏差分析工具。设定“容差范围”：例如，轴壁聚合度设定为 6 ± 1 度，肩台宽度为 $1.0 \pm 0.2\text{mm}$ ，龈边缘宽度误差允许 $\pm 0.05\text{mm}$ ，预备深度偏差阈值控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内。软件自动计算偏差值在空间内的分布（最大偏差、平均偏差、标准差）及在容差范围内的体积占比。对肩台形态设定连续曲面偏差分析阈值（如 $50\mu\text{m}$ ），量化间断点与飞边。这些量化指标取代主观描述，成为成绩评价核心依据。**VR** 平台则需精确校准力反馈系统：设定不同牙体组织（釉质、牙本质、仿真髓腔）的切削阻力参数，模拟真实切削力学特性；触觉笔的振动频率与振幅与错误操作关联（如穿透髓腔的强烈震动反馈），强化错误规避反射^[1]。

3.3 教学实施的模块化设计

实践路径采用梯度递进的模块设计筑牢基础技能。模块一：**VR** 虚拟空间基本操作训练。学员不受干扰地熟悉器械持握、支点建立与基本切割路径控制。系统实时可视化车针轨迹与预备量累积图，重点解决“手眼协调失控”问题。模块二：目标形态认知强化训练。利用 **CAD** 软件对三维理想预备体的解剖标志进行交互式标注与剖析（轴向解剖高点的位置、沟槽走形特征）。学生动态旋转模型加深三维空间形态理解。模块三：在软件引导下完成“分步预备”训练。**CAD** 平台设定预备指引路径：例如，软件规划肩台预备始点并投影激光路径标记于模拟口腔环境；实时监测预备深度并发出提示音。将复杂操作拆解为顺序子步骤执行。模块四：独立操作与即时分析循环训练。学生脱离视觉提示独立完成整体预备并立即扫描分析。软件输出偏差图谱后，学生需自主识别问题区域并拟定改进策略。导师仅扮演咨询角色。模块五：整合训练与效率优化。限定操作时间反复练习，追求在精度达标前提下缩短操作时长。该设计形成“认知 - 分解 - 整合 - 优化”的螺旋式技能上升路径。导师角色相应调整——从最初的操作示范者转变为数据分析指导者与策略提问者^[2]。

4 实证分析：精度提升效果与机制解读

4.1 主要精度指标量化对比

数据处理聚焦三大类精度指标差异。核心发现包括：聚合度一致性（ P 值 < 0.005 ）。实验组预备体各轴壁测量的平均聚合度标准差为 0.41 度，远低于对照组的 1.32 度——意味着实验组能更稳定掌控车针角度减少扭曲变形。肩台形态连续度误差（ P 值 < 0.001 ）。软件计算预备体肩台轮廓线与理想肩台形态轮廓线的平均偏差距离，实验组均值为 47 ± 9 微米；对照组高达 85 ± 25 微米。更显著的是变异系数(CV) 差异：实验组 CV 仅 19.1% ，对照组 CV 达 32.6% （降

低40%），说明数字教学极大减少了形态起伏波动。预备量控制精度（P值<0.01）。测量牙合面及轴面中1/3关键位置点与预备下限值的距离差异，实验组平均偏差 122 ± 35 微米，90%样本在150微米误差限内；对照组平均偏差 194 ± 67 微米，近40%样本超出200微米临界值。统计学分析确认各指标组间差异具有高度显著性（独立样本T检验， $p<0.01$ ），证明DTPM策略带来精度指标的全面提升且离散度收窄。

4.2 关键案例：误差图谱与操作缺陷的对应分析

通过典型预备体的三维误差色谱图深度解析操作错误源流。某对照组预备体肩台区出现大面积连贯性红色区域（预备过度 $>300\mu\text{m}$ ），伴随局部点状蓝色凹陷（预备不足）。数据表显示聚合度波动剧烈（颊侧3度、舌侧9度）。根源溯源：学生在肩台预备阶段无视觉基准参考盲目扩展深度，车针抖动导致预备不均；聚合度过陡源于未建立有效支点致车针滑动。另一例实验组学员的初始扫描同样显示肩台左颊侧预备不足（蓝色斑块 $150\mu\text{m}$ ）。学员依据色谱图定位异常区域，修改策略为“在该区维持车针平行龈缘走形，每次切削增加0.1mm深度探察”。二次扫描数据显示蓝色区域显著缩小至 $40\mu\text{m}$ ，聚合度稳定在6度。色谱图精准的空间指向性使错误不再笼统描述为“肩台不好”，而可定位为“左颊侧近中转折区预备深度缺失120微米”，引导针对性修正动作。这种“错误定位-偏差赋值-定向修整”的反馈循环是精度提升的微观机制^[3]。

4.3 精度提升的作用机制：即时反馈与认知重构

精度显著进步的核心驱动源自数字系统构建的强化训练闭环。其作用过程体现为三重认知重构。破除操作黑箱感知：传统模式中学生如同盲操作，操作动作与组织移除量关联认知薄弱。实时监测将切削量变化可视化（如VR中的牙体组织半透明层逐渐减薄），即刻感知“力的大小”与“效果的程度”关系，激活运动校正反射弧。数据驱动认知具象化：过去依赖导师口述“角度太大”“肩台太浅”等抽象词汇。色谱图与毫米读数将误差具象化为空间位置与具体数值（如“舌面预备少切0.15mm”），指导目标由模糊经验转向可执行的数字指令。量化迭代促成元认知提升：学员从被动纠错转向基于数据预判结果。习惯性在预备前模拟走刀路径（VR预演），预备后主动分析差异模式归类错误类型（角度问题/深度问题/路径问题），并制定具体数值化改善目标（“将轴面预备深度增加0.1mm”）。最终形成基于数值反馈的自我校准能力——这是精度稳定与效率跃升的深

层心理动因。

4.4 教学效率的延伸获益

精度改善的附加价值体现在教学资源配置效率的优化。最显著的是练习模型消耗的锐减。对照组学生平均需消耗5颗树脂牙模型才能产生一个接近合格品；实验组借助VR模拟与数据分析导向修正，仅需1.5-2颗即可达标。降低75%的耗材支出。导师时间价值亦得到释放：传统带教需投入大量时间在操作示范与手动检查；DTPM中软件完成大部分几何测量与形态评判，导师更多聚焦偏差根源分析讨论与高阶策略引导。学生人均获得的导师一对一干预时长提升约30%。教学进程加速明显：相同课时内，实验组完成预备体精度达到对照组训练2倍时长的水准。在同等教学期限下，实验组学生接触复杂案例（如桥基牙预备）的实操机会显著提升，缩短技能进阶周期。数据化评价体系还带来公平可比的技能评价方法。告别导师印象分，学生成绩依据偏差值数据区间客观定级。数据记录建档形成成长曲线图，激发学员的自主优化动力。

5 结语

本研究实验证明了数字化技术整合为固定义齿牙体预备教学注入革新动能。通过构建以口内扫描、CAD三维评估、VR仿真为支柱的DTPM闭环教学模型，传统教学遭遇的主观性、滞后性、经验依赖瓶颈被系统性突破。三维数据捕获实现了操作结果由经验判断向空间坐标与数字表征的转化；即时反馈图谱将错误形态精准定位与定量赋值；循此修正驱动学员形成“操作-数据-反思-优化”的认知闭环。对照实验数据清晰展示：采用DTPM训练的学员在聚合度控制一致性、肩台轮廓连续性、预备量稳定性等关键精度指标上取得压倒性优势，误差均值降低30-50%，变异度锐减。更深层价值在于，精度提升协同带动教学资源利用效率变革——模型耗材节约、导师时间价值释放、技能进阶加速。这一变革不仅降低教学直接成本，更为早期接触复杂技能铺平通路。未来推进需聚焦算法赋能下的教学智能诊断、学员数据分析素养强化培训、成本优化方案设计等方向。

参考文献

- [1] 柴宁,陈彦阳.虚拟现实技术在高校牙科工艺教学中的应用探究——以“固定义齿修复学”为例[J].成才之路,2025,(15): 57-60.
- [2] 石鹏霏,韩萧夏,陈梦雨,张紫阳.现代产业学院背景下高校“固定义齿修复学”课程思政教学探研[J].成才之路,2025,(11): 21-24.
- [3] 解丽华.OBE理念+CBCL教学标准在牙列缺失全口义齿修复实验课的教学应用[J].中国标准化,2025,(06): 239-242.