

# 复合牙齿模型在无托槽隐形矫治中的研究进展

龚唯一<sup>1,2,3,4</sup>, 郑雷蕾<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>重庆医科大学附属口腔医院, 重庆

<sup>2</sup>口腔疾病研究重庆市重点实验室, 重庆

<sup>3</sup>口腔生物医学工程重庆市高校市级重点实验室, 重庆

<sup>4</sup>重庆市卫生健康委口腔生物医学工程重点实验室, 重庆

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月22日; 发布日期: 2026年2月27日

## 摘要

长期以来, CBCT和数字化模型广泛应用于口腔医学领域, 在正畸学特别是无托槽隐形矫治中应用较多, 大大帮助了临床医生诊断和治疗疾病, 对治疗效果也有显著提升。然而, CBCT与数字化模型结合形成的复合牙齿模型在无托槽隐形矫治中的应用仍处于早期阶段。本文的目的是强调复合牙齿模型在无托槽隐形矫治中的应用, 并阐述CBCT和数字化模型在无托槽隐形矫治中的应用。分析表明, 将复合牙齿模型应用于无托槽隐形矫治可以帮助正畸医生进行诊断、治疗模拟、定制矫治器制作、检测正畸治疗期间和之后的牙根运动。

## 关键词

复合牙齿模型, 无托槽隐形矫治, 临床应用

# Research Progress on Composite Tooth Models in Clear Aligner Therapy

Weiye Gong<sup>1,2,3,4</sup>, Leilei Zheng<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>The Affiliated Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

<sup>2</sup>Chongqing Key Laboratory of Oral Diseases, Chongqing

<sup>3</sup>Chongqing Municipal Key Laboratory of Oral Biomedical Engineering of Higher Education, Chongqing

<sup>4</sup>Chongqing Municipal Health Commission Key Laboratory of Oral Biomedical Engineering, Chongqing

Received: January 27, 2026; accepted: February 22, 2026; published: February 27, 2026

## Abstract

For a long time, CBCT and digital models have been widely used in dental medicine, with particularly

\*通讯作者。

frequent applications in orthodontics, especially for clear aligner therapy. They have greatly assisted clinicians in diagnosing and treating conditions and have significantly improved treatment outcomes. However, the application of composite tooth models, which integrate CBCT and digital model data, in clear aligner therapy is still in its early stages. The purpose of this study is to highlight the use of composite tooth models in clear aligner therapy and to describe the roles of CBCT and digital models in this context. Analysis indicates that applying composite tooth models in clear aligner treatment can assist orthodontists in diagnosis, treatment simulation, custom aligner fabrication, and monitoring tooth root movement during and after treatment.

## Keywords

Composite Tooth Model, Clear Aligner Therapy, Clinical Application

Copyright © 2026 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

在过去的几十年中, 口腔医学的发展在概念和技术上经历了许多改革与发展。尽管使用 CBCT 来实现 3D 测量分析在正畸领域中受到了广泛好评, 但其在无托槽隐形矫治特别是与数字化三维模型结合构建复合牙齿模型中的应用仍处于早期阶段。本文概述了复合牙齿模型在无托槽隐形矫治从诊断到治疗模拟等各种临床中的应用。还进行了 CBCT 和数字化模型的简要概述。

## 2. 背景

1998 年, 美国爱齐公司推出了隐适美无托槽隐形矫治系统。该系统具有外观隐蔽、佩戴舒适等特点 [1]。随着材料性能的提升及附件等辅助手段的引入, 隐形矫治的适应范围不断扩大, 已由早期的轻中度错合畸形延伸至拔牙病例及复杂治疗情形 [2]-[4]。相关研究显示, 与传统固定矫治器相比, 透明矫治器在牙根根尖吸收及牙周健康方面具有一定优势, 但其在拔牙间隙关闭过程中对牙根控制的稳定性仍存在争议 [5]-[8]。因此, 隐形矫治治疗效果的精准评估具有重要意义。

CBCT 自 1998 年应用于口腔医学领域以来, 因其成像速度快、三维精度高、辐射剂量相对较低, 逐渐成为颅颌面部常用影像学检查手段 [9] [10]。大视野 CBCT 的出现使单次扫描即可获取完整颅颌面三维信息, 为正畸治疗中牙根形态、牙槽骨结构及其空间关系的分析提供了可靠工具。

与此同时, 数字化模型技术在正畸临床中的应用日益广泛。与传统石膏模型相比, 数字化模型在存储、测量及分析方面更具优势 [11]。目前, 口内扫描和模型扫描是获取数字化模型的主要方式, 相关研究表明两种方法均可获得满足临床需求的精度 [12]-[14]。上述影像与数字化技术的发展, 为正畸治疗效果的三维定量分析奠定了基础。

## 3. 复合牙齿模型

### 3.1. 发展历史

全景 X 线摄影被认为是足够准确的, 可以评估牙列(包括牙根)的排列, 尽管它有着畸变, 重叠和放大等几个缺点 [15] [16]。然而, 临床医生需要在严重的骨骼错牙合和萌发干扰相关的相邻根等几种临床情况下检查根位置(3D)。随着锥束 X 射线计算机断层成像(CBCT)的引入, 在三维坐标系中检测根部位置已

成为可能。然而, 因为这种三维成像技术涉及比全景放射照相更多的辐射暴露, 临床上并不推荐在正畸治疗期间重复 CBCT 扫描[17]-[19]。相比之下, 口内扫描可以在需要的时候进行, 而不需要辐射照射。此外, 具有详细的咬合面的冠状图像可以通过快速捕获的口内扫描仪获得, 其准确性和可靠性已知在临床上是可接受的[20]-[22]。这种方法的主要缺点是不能代表实际牙根。通过结合这两种三维成像技术的互补特征, 尝试建立一个具有精确牙冠和牙根的三维牙齿模型, 并将其命名为“复合牙模型”(CTM)[23]。

### 3.2. 研究进展

最初, 复合牙齿模型的主要应用是在需要同时评估牙冠和牙根的情况下进行诊断、治疗模拟和定制矫治器制造[24]-[26]。最近, 使用这种 CTM, 仅通过口腔内扫描就可以监测正畸治疗期间和之后的牙根运动[27][28]。

通过在治疗前阶段使用单个 CBCT 构建的复合牙齿模型的应用, 治疗期间或治疗后的三维根部位置可以单独通过口内扫描进行检查。许多研究试图建立三维牙齿模型并将其应用于临床实践。Macchi 等人通过集成多层 X 射线计算机断层成像和激光扫描, 构建了一个 3D 模型来可视化正畸治疗前后的牙齿运动[24]。

Guo 等[25]应用了一个由 CBCT 和光学扫描相结合构建的三维建模来构建间接键合系统。Kihara 等[26]证明, 使用三维牙齿模型预测治疗后的牙根位置是可靠的。Lee 等[27]使用离体 Typodon 模型监测牙齿运动, 并证明上颌和下颌牙齿中预期和真实根位置之间的根表面差异分别为  $0.02 \pm 0.32$  mm 和  $0.09 \pm 0.25$  mm。随后, Lee 等[29]使用更多的人类受试者验证了该方法的准确性和可靠性。他们的模型证明治疗后的 CBCT 扫描和预期的牙根位置设置之间的远中角度和颊舌倾斜度其牙齿模型的平均差异为  $1.39 \pm 1.05^\circ$  和  $1.30 \pm 0.92^\circ$ , 说明操作者之间的可靠性很高。然而, 11.6%和 9.6%的牙齿测量的近远端成角和颊舌倾斜在 $\pm 2.5^\circ$ 的临床可接受范围之外。

### 3.3. 多源数据融合算法

为了构建具有完整牙冠与牙根信息的三维复合牙齿模型(CTM), 需将口内扫描(IOS)与 CBCT 数据进行配准融合。配准方法主要有基于表面特征和基于标志点两类策略。基于表面特征的配准常利用牙冠的几何形状进行全弓或分段匹配, 通过整体牙弓或单个弓段的表面拟合, 使 IOS 与 CBCT 冠部模型对齐。临床研究表明, 当 CBCT 被分割成 STL 表面模型用于与 IOS 进行配准时, 所选分割阈值显著影响配准后的空间偏差, 尤其在冠根方向上更明显, 这提示分割阈值选择与 IOS-CBCT 融合精度密切相关[30]。基于标志点的配准则通常选取牙尖、窝点等明显解剖特征作为参考, 再通过算法优化配准过程, 这类方法可为初始对齐提供合理起点并减少局部误差(例如迭代最近点 ICP 算法)。

此外, 对于 CBCT 数据的处理, 阈值设定对牙根形态的重建质量同样有显著影响。已有体外研究显示, 不同阈值和体素大小设置下, CBCT 重建的牙齿体积和表面形态会发生变化, 进而影响与 IOS 数据融合后的整体模型精度; 在优化分割和融合算法下, 融合后的模型牙根位置平均偏差可控制在约 0.04~0.09 毫米[31]。基于以上配准和分割策略的多源数据融合算法, 为复合牙齿模型在临床监测牙根位移和三维分析中提供了可接受的准确性。

### 3.4. 三维重叠技术

目前, CBCT 数据重叠主要依赖两种技术[32]。第一种是基于参考点的重叠方法。该方法需要在颅面骨骼上选择稳定的标志点。随后, 对两次 CBCT 扫描的头颅进行定点操作。最后, 通过匹配这些标志点完成图像重叠。目前市场上有多款软件可实现该方法, 如正畸软件 Dolphin Imaging 和逆向工程软件

Mimics。此外, 也有方法先确定一个参考平面, 再以平面作为重叠参考, 其本质仍依赖标志点的确定。这类技术需要人工定点, 定点的准确性是主要误差来源。

第二种方法是基于表面的重叠。通常先将 CBCT 三维数据从 Dicom 格式转换为 STL 格式, 然后选择颅颌面部的稳定区域进行表面重叠。关于两种方法的准确性, Park 等人[33]对下颌骨进行了研究。他们发现, 在分析下牙列变化时, 选择下颌体下缘和下颌升支后缘进行表面重叠, 具有较好的可重复性和准确性。

### 3.5. 数字化排牙技术

在数字化排牙技术引入正畸诊疗之前, 正畸医生主要依靠诊断性牙排列试验来辅助判断部分牙列拥挤的恒牙列患者是否需要减数拔牙[34]。这种方法是基于拔牙或非拔牙方案, 在石膏模型上重新排列牙齿。通过观察牙齿移动的距离和方向, 以及拔牙间隙关闭的情况(如前牙远移、后牙近移的分配), 正畸医生可以辅助制定矫治方案。然而, 石膏模型难以精准完成牙齿排列, 操作繁琐, 使其临床应用受限。

数字化排牙技术的出现大大缩短了操作时间。正畸医生可以在数字化模型上进行多次排牙, 以不同方案进行对比, 最终选择最合适的设计。有研究显示[35], 约 24%的病例在数字化排牙后更改了矫治方案。除了人工排牙, 一些口内扫描系统还提供人工智能排牙功能。患者完成口扫后, 系统可以快速完成牙齿分割和自动排牙。然而, 该技术目前仅能实现简单排齐, 通常用于患者展示, 并未考虑牙量、骨量不足或拔牙需求等因素。因此, 其在正畸临床中的应用仍需进一步完善[36]。

## 4. 小结

在 CBCT 中, 光束硬化、截断和散射辐射可能影响骨和根的对比度。此外, 来自支架或金属修复体的条纹伪影使得从 CBCT 图像中难以分割牙冠[37]。

复合牙齿模型的应用将具有临床价值, 因为在最初的 CBCT 之后不需要额外的辐射照射。复合牙齿模型的构建应仅限于因合理原因接受初次 CBCT 的患者, 如严重的骨骼错位、颅面畸形和异位萌出牙齿。如此, 最初的 CBCT 扫描不仅可以用于诊断, 还可以用于检查根部位置的变化。

另一方面, 复合牙齿模型也存在一些不足。对于评估一些病理变化, 如外部牙根吸收和骨变化, 需要额外的影像学检查。在复合牙齿模型能够在临床条件下可靠地使用之前, 许多技术方面需要改进。最重要的是, 这种方法的劳动密集型和耗时性仍有待解决[38]。在这方面, 采用自动分割技术和开发复合牙齿模型的一体式软件可能有助于提高效率。

## 参考文献

- [1] Cardoso, P.C., Espinosa, D.G., Mecenas, P., *et al.* (2020) Pain Level between Clear Aligners and Fixed Appliances: A Systematic Review. *Progress in Orthodontics*, **21**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1186/s40510-019-0303-z>
- [2] Harris, K., Ojima, K., Dan, C., *et al.* (2020) Evaluation of Open Bite Closure Using Clear Aligners: A Retrospective Study. *Progress in Orthodontics*, **21**, Article No. 23. <https://doi.org/10.1186/s40510-020-00325-5>
- [3] Weir, T. (2017) Clear Aligners in Orthodontic Treatment. *Australian Dental Journal*, **62**, 58-62. <https://doi.org/10.1111/adj.12480>
- [4] 金作林. 无托槽隐形矫治技术对于不同错(牙合)畸形的分级诊治[J]. 实用口腔医学杂志, 2021, 37(6): 733-738.
- [5] Gandhi, V., Mehta, S., Gauthier, M., *et al.* (2021) Comparison of External Apical Root Resorption with Clear Aligners and Pre-Adjusted Edgewise Appliances in Non-Extraction Cases: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Journal of Orthodontics*, **43**, 15-24. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjaa013>
- [6] Rossini, G., Parrini, S., Castroflorio, T., *et al.* (2015) Periodontal Health during Clear Aligners Treatment: A Systematic Review. *European Journal of Orthodontics*, **37**, 539-543. <https://doi.org/10.1093/ejo/cju083>
- [7] Baldwin, D.K., King, G., Ramsay, D.S., *et al.* (2008) Activation Time and Material Stiffness of Sequential Removable

- Orthodontic Appliances. Part 3: Premolar Extraction Patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **133**, 837-845. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.06.025>
- [8] Aman, C., Azevedo, B., Bednar, E., *et al.* (2018) Apical Root Resorption during Orthodontic Treatment with Clear Aligners: A Retrospective Study Using Cone-Beam Computed Tomography. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **153**, 842-851. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2017.10.026>
- [9] Mozzo, P., Procacci, C., Tacconi, A., *et al.* (1998) A New Volumetric CT Machine for Dental Imaging Based on the Cone-Beam Technique: Preliminary Results. *European Radiology*, **8**, 1558-1564. <https://doi.org/10.1007/s003300050586>
- [10] 张倩倩, 于艳玲. CBCT 应用于口腔正畸领域的研究进展[J]. 中华口腔正畸学杂志, 2013(3): 170-172.
- [11] Rossini, G., Parrini, S., Castroflorio, T., *et al.* (2016) Diagnostic Accuracy and Measurement Sensitivity of Digital Models for Orthodontic Purposes: A Systematic Review. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **149**, 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2015.06.029>
- [12] Ender, A., Attin, T. and Mehl, A. (2016) *In Vivo* Precision of Conventional and Digital Methods of Obtaining Complete-arch Dental Impressions. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, **115**, 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.09.011>
- [13] Ender, A., Zimmermann, M., Attin, T., *et al.* (2016) *In Vivo* Precision of Conventional and Digital Methods for Obtaining Quadrant Dental Impressions. *Clinical Oral Investigations*, **20**, 1495-1504. <https://doi.org/10.1007/s00784-015-1641-y>
- [14] Flügge, T.V., Schlager, S., Nelson, K., *et al.* (2013) Precision of Intraoral Digital Dental Impressions with iTero and Extraoral Digitization with the iTero and a Model Scanner. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **144**, 471-478. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.04.017>
- [15] Garcia-Figueroa, M.A., Raboud, D.W., Lam, E.W., Heo, G. and Major, P.W. (2008) Effect of Buccolingual Root Angulation on the Mesiodistal Angulation Shown on Panoramic Radiographs. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **134**, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.07.034>
- [16] Mckee, I.W., Glover, K.E., Williamson, P.C., Lam, E.W., Heo, G. and Major, P.W. (2001) The Effect of Vertical and Horizontal Head Positioning in Panoramic Radiography on Mesiodistal Tooth Angulations. *The Angle Orthodontist*, **71**, 442-451.
- [17] Song, I.T., Cho, J.H., Chae, J.M. and Chang, N.Y. (2011) Evaluation of Mesiodistal Tooth Axis Using a CBCT-Generated Panoramic View. *The Korean Journal of Orthodontics*, **41**, 255-267. <https://doi.org/10.4041/kjod.2011.41.4.255>
- [18] Lascala, C.A., Panella, J. and Marques, M.M. (2004) Analysis of the Accuracy of Linear Measurements Obtained by Cone Beam Computed Tomography (CBCT-NewTom). *Dentomaxillofacial Radiology*, **33**, 291-294. <https://doi.org/10.1259/dmfr/25500850>
- [19] Sameshima, G.T. (2012) A New Method to Measure Mesiodistal Angulation and Faciolingual Inclination of Each Whole Tooth with Volumetric Cone-Beam Computed Tomography Images. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **142**, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2011.12.027>
- [20] Ender, A. and Mehl, A. (2011) Full Arch Scans: Conventional versus Digital Impressions—An *In-Vitro* Study. *International Journal of Computerized Dentistry*, **14**, 11-21.
- [21] Hayashi, K., Sachdeva, A.U., Saitoh, S., Lee, S.P., Kubota, T. and Mizoguchi, I. (2013) Assessment of the Accuracy and Reliability of New 3-Dimensional Scanning Devices. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **144**, 619-625. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.04.021>
- [22] Sun, L., Lee, J.S., Choo, H.H., Hwang, H.S. and Lee, K.M. (2018) Reproducibility of an Intraoral Scanner: A Comparison between *In-Vivo* and *Ex-Vivo* Scans. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **154**, 305-310. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2017.09.022>
- [23] Lim, S.W., Hwang, H.S., Cho, I.S., Baek, S.H. and Cho, J.H. (2020) Registration Accuracy between Intraoral-Scanned and Cone-Beam Computed Tomography-Scanned Crowns in Various Registration Methods. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **157**, 348-356. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.04.031>
- [24] Macchi, A., Carrafiello, G., Cacciafesta, V. and Norcini, A. (2006) Three-Dimensional Digital Modeling and Setup. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **129**, 605-610. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.01.010>
- [25] Guo, H., Zhou, J., Bai, Y. and Li, S. (2011) A Three-Dimensional Setup Model with Dental Roots. *Journal of Clinical Orthodontics*, **45**, 209-216.
- [26] Kihara, T., Tanimoto, K., Michida, M., Yoshimi, Y., Nagasaki, T., Murayama, T., *et al.* (2012) Construction of Orthodontic Setup Models on a Computer. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **141**, 806-813. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2011.10.027>
- [27] Lee, R.J., Pham, J., Choy, M., Weissheimer, A., Dougherty Jr., H.L., Sameshima, G.T., *et al.* (2014) Monitoring of

- Typodont Root Movement via Crown Superimposition of Single Cone-Beam Computed Tomography and Consecutive Intraoral Scans. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **145**, 399-409. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2013.12.011>
- [28] Lee, R.J., Weissheimer, A., Pham, J., Go, L., de Menezes, L.M., Redmond, W.R., *et al.* (2015) Three-Dimensional Monitoring of Root Movement during Orthodontic Treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **147**, 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2014.10.010>
- [29] Lee, R.J., Pi, S., Park, J., Devgon, D., Nelson, G., Hatcher, D., *et al.* (2018) Accuracy and Reliability of the Expected Root Position Setup Methodology to Evaluate Root Position during Orthodontic Treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **154**, 583-595. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2018.05.010>
- [30] Lo Russo, L., Lorusso, M., Ercoli, C., *et al.* (2025) Effect of the CBCT Data Segmentation Threshold on Registration Accuracy with Surface Scanning. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.10.044>
- [31] Zhang, Y.S., Liu, Y.X., Liu, T.Q., *et al.* (2024) Evaluation of CBCT Reconstructed Tooth Models at Different Thresholds and Voxels and Their Accuracy in Fusion with IOS Data: An *in Vitro* Validation Study. *BMC Oral Health*, **24**, Article No. 1571. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05395-z>
- [32] 王斯维, 刘怡. 三维头影测量的研究现状与展望[J]. 中华口腔正畸学杂志, 2016(1): 33-38.
- [33] Park, T.J., Lee, S.H. and Lee, K.S. (2012) A Method for Mandibular Dental Arch Superimposition Using 3D Cone Beam CT and Orthodontic 3D Digital Model. *The Korean Journal of Orthodontics*, **42**, 169-181. <https://doi.org/10.4041/kjod.2012.42.4.169>
- [34] 傅民魁, 主编, 丁寅, 王林, 邓锋, 等, 编. 口腔正畸学供口腔医学类专业用[M]. 第 6 版. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 358.
- [35] Hou, D., Capote, R., Bayirli, B., *et al.* (2020) The Effect of Digital Diagnostic Setups on Orthodontic Treatment Planning. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **157**, 542-549. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.09.008>
- [36] 叶年嵩, 房兵. 数字化正畸发展现状[J]. 实用口腔医学杂志, 2022, 38(6): 707-712.
- [37] Sang, Y.H., Hu, H.C., Lu, S.H., Wu, Y.W., Li, W.R. and Tang, Z.H. (2016) Accuracy Assessment of Three-Dimensional Surface Reconstructions of *in Vivo* Teeth from Cone-Beam Computed Tomography. *Chinese Medical Journal*, **129**, 1464-1470. <https://doi.org/10.4103/0366-6999.183430>
- [38] Lim, S., Moon, R., Kim, M., Oh, M., Lee, K., Hwang, H., Kim, T., Baek, S. and Cho, J. (2020) Construction Reproducibility of a Composite Tooth Model Composed of an Intraoral-Scanned Crown and a Cone-Beam Computed Tomography-Scanned Root. *Korean Journal of Orthodontics*, **50**, 229-237. <https://doi.org/10.4041/kjod.2020.50.4.229>