

# 三种数字化分析算法测量咬合接触分布及面积的对比研究

萧 宁, 孙玉春, 赵一姣<sup>△</sup>, 王 勇<sup>△</sup>

(北京大学口腔医学院·口腔医院, 口腔医学数字化研究中心, 口腔修复教研室 国家口腔疾病临床医学研究中心  
口腔数字化医疗技术和材料国家工程实验室 口腔数字医学北京市重点实验室 北京 100081)

**[摘 要]** 目的: 研究三种数字化分析算法测量石膏牙颌模型三维咬合接触分布及面积的检测效果, 并与传统咬合分析方法进行比较, 探究各数字化分析算法的特点和应用。方法: 选取一副正常受试者的上、下颌石膏牙颌模型, 使用 3shape E4 牙颌模型三维扫描仪进行数字化扫描得到数字模型, 在三维测量分析软件 Geomagic Studio 2013 及 Geomagic Qualify 2013 中采用“三维偏差色阶图法”、“点云统计分析法”和“虚拟咬合纸法”三种数字化分析算法获得相应的三维咬合接触分布及面积, 同时使用骰记录硅橡胶法及咬合纸扫描法两种传统咬合分析方法获得咬合接触分布和面积。各方法的咬合检测阈值为 100  $\mu\text{m}$ , 量化评价各数字化分析算法与传统咬合分析方法的检测结果。结果: 上述五种方法所得的全牙列咬合接触分布的定性评价结果基本一致, 三维偏差色阶图法、点云统计分析法、虚拟咬合纸法、骰记录硅橡胶法和咬合纸扫描法所得到的总咬合接触面积分别为 133.10  $\text{mm}^2$ 、142.08  $\text{mm}^2$ 、128.95  $\text{mm}^2$ 、163.31  $\text{mm}^2$ 、100.55  $\text{mm}^2$ 。三种数字化分析算法间的检测结果差异性不大, 数字化方法与传统方法检测的总咬合接触面积有一定差异。结论: 三种数字化分析算法均可提供较为可靠、准确的牙颌模型咬合接触分布及面积量化分析结果, 可为口腔临床修复体数字化设计制作及咬合分析提供参考。

**[关键词]** 咬合力; 牙模型; 牙骰; 成像, 三维

**[中图分类号]** R783 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-167X(2020)01-0144-08

**doi:** 10.19723/j.issn.1671-167X.2020.01.023

## Preliminary study on three digital analysis methods for analyzing the distribution and area of occlusal contacts

XIAO Ning, SUN Yu-chun, ZHAO Yi-jiao<sup>△</sup>, WANG Yong<sup>△</sup>

(Center of Digital Dentistry, Department of Prosthodontics, Peking University School and Hospital of Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering Laboratory for Digital and Material Technology of Stomatology & Beijing Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing 100081, China)

**ABSTRACT Objective:** To analyze the distribution and area of occlusal contacts of clinical dental model using three kinds of digital analysis methods, to compare the results of these methods and traditional occlusal analysis method, and to further analyze the characteristics of each digital analysis method. **Methods:** A set of plaster models of normal subjects was selected. The models were scanned by lab scanner 3shape E4 and the files were exported in a stereolithography file format. In 3D analysis software Geomagic Studio 2013 and Geomagic Qualify 2013, the corresponding results of 3D occlusal contact distribution and occlusal contact area were obtained through three digital analysis methods: “3D color difference map method”, “point cloud analysis method”, and “virtual articulating paper method”. The occlusal contact distribution and occlusal contact area were also obtained by two traditional occlusal analysis methods: “silicone interocclusal recording material method” and “scanned articulating paper mark method”. A threshold of 100  $\mu\text{m}$  was used to analyze the occlusal contacts and 100  $\mu\text{m}$  was also the thickness of articulating paper used in this study. The results of these five different occlusal analysis methods were evaluated qualitatively and quantitatively. **Results:** The results of 3D occlusal contact distribution obtained by the above five methods were basically consistent. The total occlusal contact area obtained by 3D color difference map method, point cloud analysis method, virtual articulating paper method, silicone interocclusal recording material method and scanned articulating paper mark method were 133.10  $\text{mm}^2$ , 142.08  $\text{mm}^2$ , 128.95  $\text{mm}^2$ , 163.31  $\text{mm}^2$ , and 100.55  $\text{mm}^2$  respectively. There was little difference between the results of three digital analysis methods. The results of occlusal contact area obtained by the digital

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(81870815)、国家重点研发计划课题(2018YFB1106903)、宁夏回族自治区重点研发计划重点项目课题(2018BEG02012) Supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (81870815), the National Key R&D Program of China (2018YFB1106903), the Key R&D Program of Ningxia Hui Autonomous Region (2018BEG02012)

<sup>△</sup> Corresponding author's e-mail, kqcadcs@bjmu.edu.cn, kqcade@bjmu.edu.cn

网络出版时间: 2019-12-25 10:08:04 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4691.R.20191225.0955.002.html>

methods and the traditional methods were different. **Conclusion:** The three digital analysis methods can provide reliable and accurate analysis results of occlusal contact distribution and occlusal contact area of dental model. The results obtained by these methods can serve as references for the digital occlusal surface design of dental prosthesis and clinical occlusal analysis.

**KEY WORDS** Bite force; Dental models; Dental occlusion; Imaging, three-dimensional

口颌系统协调行使生理功能依赖于良好的咬合关系,在口腔修复、正畸、牙周、牙体等学科领域中,咬合分析是临床关注的重要环节<sup>[1-4]</sup>。精确的咬合分析是技工室与椅旁调颌的前提,有助于实现针对复杂口颌系统环境的个性化咬合设计<sup>[5-6]</sup>。目前临床工作中普遍使用的咬合检测方法有咬合纸法、软蜡片法、金属箔法、高点显示剂法和硅橡胶印模法等,这些方法易受咬合材料本身性质、医生经验、使用方法及患者配合的影响<sup>[7-8]</sup>。随着近年来数字化技术在口腔领域的快速发展,以 T-scan 系统为典型代表的定量咬合分析方法倍受关注。T-scan 系统能够准确记录颌接触顺序、分布及颌力大小,具有较好的测量稳定性和可重复性<sup>[7,9]</sup>,然而,上述咬合分析方法因为检测介质的存在,均在一定程度上使原有咬合关系发生变化<sup>[10]</sup>,因此,不依赖检测介质的数字咬合分析方法成为本领域的研究热点。赵一姣等<sup>[11]</sup>曾借助逆向工程软件 Geomagic 7.0 对位于牙尖交错位的扫描重建牙颌模型进行数字咬合分析,取得了与咬合纸测量法一致的咬合接触分布结果,初步实现了三维无介质咬合接触面积的定量分析。近年来口内扫描技术的不断发展以及配套商业软件的功能完善,实现了更加便捷的数字化咬合分析及设计<sup>[12]</sup>。类似方法也被陆续应用于正常受试者、正畸治疗患者及修复治疗患者的咬合分析研究<sup>[5,13-16]</sup>。影响数字化咬合分析结果准确性的原因主要与其数据获取方式和软件分析算法两个因素密切相关,针对不同软件分析算法对数字化咬合分析结果的影响研究目前尚未见报道。

本研究旨对三种无介质数字化咬合分析软件算法进行横向比较研究,基于具有稳定咬合关系的个别正常殆石膏模型,对不同软件算法获得的三维咬合接触分布和三维咬合面积情况进行定量分析,并与传统殆记录硅橡胶测量法及咬合纸测量法结果进行比较,以期对数字化咬合分析软件算法的临床应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验模型

选取 1 例个别正常殆受试者,口内天然牙列完

整,无修复体,无明显牙列拥挤,无明显牙体缺损,上、下颌牙尖交错位稳定。采用硅橡胶印模材料(中国沪鸽)制取该受试者的上、下颌牙列开口式印模,使用白色超硬石膏(德国 SRL Dental)灌制上、下颌石膏模型。采用硅橡胶咬合记录材料 O-bite(德国 DMG)制取口内牙尖交错位时的双侧后牙区咬合记录。

### 1.2 设备与软件

仪器设备以及使用的软件分别为:半可调殆架 GIRRBACH Artex TK(奥地利 Amann Girrbach),牙颌模型三维扫描仪 3shape E4(丹麦 3shape,精度 4  $\mu\text{m}$ ),三维测量分析软件 Geomagic Studio 2013(美国 3D System),三维测量分析软件 Geomagic Qualify 2013(美国 3D System),电子表格软件 Microsoft excel 2019(美国 Microsoft),三维建模软件 3ds Max2018(美国 Autodesk),齿科咬合纸 BK52(德国 Bausch,厚度 100  $\mu\text{m}$ ),口内扫描仪 Medit i500(韩国 Medit,精度 21  $\mu\text{m}$ ),硅橡胶咬合记录材料 O-bite(德国 DMG),光固化三维打印机 DLP 1080E(中国大族激光,分辨率 1 280  $\times$  800)。

### 1.3 实验方法

将制取的上、下颌石膏模型使用半可调殆架 GIRRBACH Artex TK 按照标准流程进行模型上殆架操作,依照双侧后牙区咬合记录恢复牙尖交错位(图 1)。将上、下颌石膏模型以及位于牙尖交错位的咬合模型分别使用 3shape E4 牙颌模型三维扫描仪进行数字化扫描,并在配套软件中按照软件步骤恢复上、下颌模型空间位置关系,以三角网格数据(stereolithography, STL)格式保存。将 STL 格式文件导入 Geomagic Studio 2013 软件中,对上、下颌模型数据进行三角网格细化处理,获得平均点距约为 0.1 mm 的均匀网格模型(图 2)。

**1.3.1 三维偏差色阶图法** 在 Geomagic Qualify 2013 软件中,对下颌模型点云数据进行“法线翻转”,使上、下颌模型咬合接触区域的牙列数据表面法线方向一致。使用软件的“3D 比较”功能,设置上颌模型为“参考模型”,下颌模型为“测试模型”,将最大偏差设置为 0.1 mm(咬合阈值)进行上、下颌模型间的三维距离检测并生成偏差分析色阶图。使用“结果转到多边形”进行色彩投影,并通过手动

勾勒边界的方法精确选择模型上的着色区域,在软件内计算勾勒区域数据的曲面面积即可得到牙列咬合接触面积(图3)。

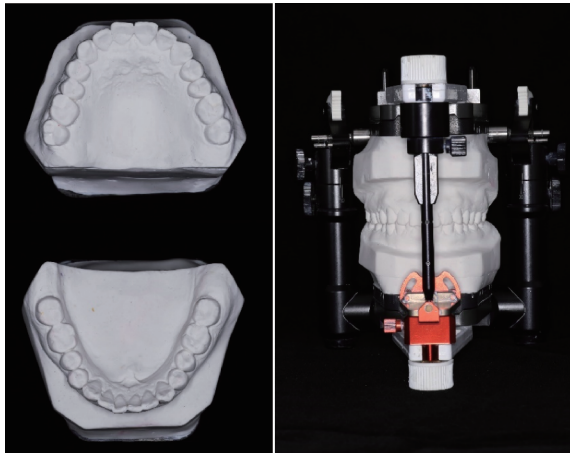


图1 实验用上、下颌石膏模型  
Figure 1 The plaster models used in the study

**1.3.2 点云统计分析法** 同1.3.1小节中的软件操作,将下颌模型进行法线翻转处理并裁剪牙列以外的区域,计算下颌牙列模型的总曲面面积 $S_{total}$ 。使用“3D比较”功能(咬合阈值设为一较大值以使测试模型上全部数据点都纳入3D比较计算,此例咬合阈值设为50 mm)并选择“导出偏差表”命令将结果以csv格式保存。csv格式的逗号分隔值文件包含“3D比较”所得偏差结果中测试模型上各点坐标、参考模型上对应点坐标以及各个点对之间的偏差大小信息。将csv格式文件在Microsoft excel 2019软件中打开,统计数据列表中“偏差”列数值绝对值在0.1 mm以内的点数 $N_{occlusal}$ 以及总点数 $N_{total}$ ,计算咬合接触区域面积 $S_{occlusal} = S_{total} \times N_{occlusal} / N_{total}$ 。在Microsoft excel 2019软件中编辑csv文件,选中并只保留所有偏差绝对值在0.1 mm以内的数据行,并将编辑后的数据再次导入Geomagic Qualify 2013软件中,生成牙列咬合接触区域分布示意图(图4)。

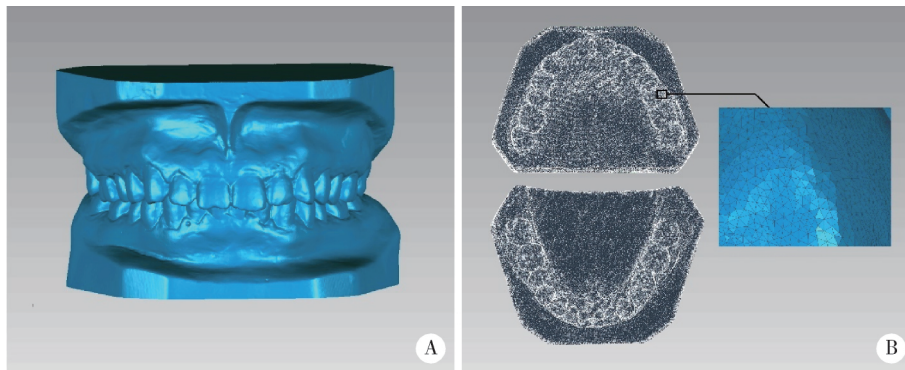


图2 上、下颌数字模型(A)和上、下颌均匀网格模型(B)  
Figure 2 Digital models (A) and unified triangular mesh data (B)

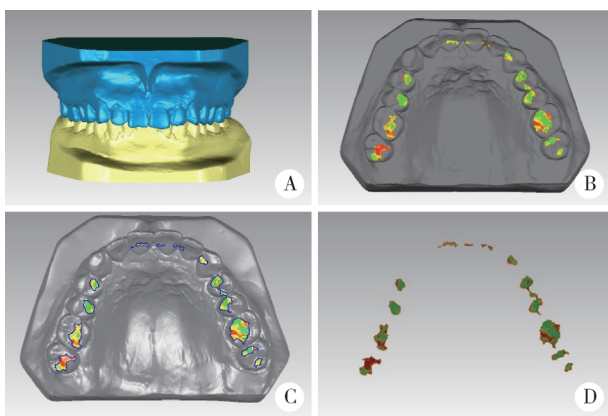


图3 翻转下颌模型法线(A)、3D偏差分析色阶图(B)、手动勾勒着色区域边界(C)和牙列咬合接触区域提取结果(D)

Figure 3 Flipping the normal of mandibular model (A), 3D color difference map (B), manually selecting the boundaries of colored areas (C), and the result of occlusal contacting area (D)

**1.3.3 虚拟咬合纸法** 在Geomagic Studio 2013软件中选择下颌模型牙列表面的咬合相关区域,使用

“抽壳”工具将所选区域沿曲面表面的法向方向增厚0.1 mm,形成厚度为0.1 mm的“虚拟咬合纸”。将抽壳后得到的“虚拟咬合纸”模型与上颌模型进行布尔运算,得到“咬合纸”与上颌牙列相交部分的三维数据,选取相交区域数据朝向下颌模型一侧的三角面片并计算曲面面积,得到牙列咬合接触区域面积(图5)。

**1.3.4 殆记录硅橡胶法** 在3ds Max2018软件中构建3个直径为5 mm的3/4球体,使用光固化三维打印机DLP 1080E进行打印得到标志球体。将3个标志球体分别粘固于下颌模型底座的前牙区、双侧后牙区得到下颌组合模型,使用3shape E4牙颌模型三维扫描仪扫描下颌组合模型并保存为stl格式文件。将硅橡胶咬合记录材料O-bite快速、均匀注射于半可调殆架GIRRBACH Artex TK上的上颌石膏模型与下颌组合模型牙列之间,之后将模型置于牙尖交错位,待硅橡胶咬合记录材料完全凝固,经

轻分离硅橡胶与上颌石膏模型,确保硅橡胶与下颌组合模型间紧密嵌合,将带有硅橡胶咬合记录的下颌组合模型再次使用 3shape E4 牙颌模型三维扫描仪扫描并保存为 stl 格式文件。将上述两个 stl 格式文件导入 Geomagic Qualify 2013 软件,基于两模型的 3 个标志球体区域数据进行区域配准。使用 1.3.1 小节中的方法进行 3D 偏差分析,手动勾勒下颌牙列位置的着色区域面积,计算其曲面面积即可得到牙列咬合接触面积(图 6)。

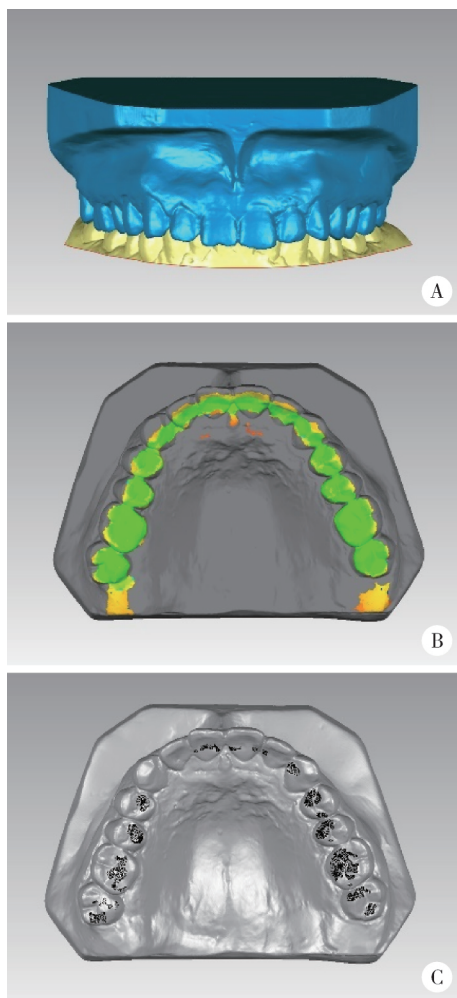


图 4 裁剪下颌模型( A )、3D 偏差分析结果( B )和咬合接触区域分布示意图( C )

Figure 4 Clipped mandibular model ( A ), the result of 3D deviation analysis ( B ), and occlusal contact distribution ( C )

**1.3.5 咬合纸扫描法** 将齿科咬合纸 BK52 稳定置于半可调殆架 GIRRBAACH Artex TK 上的上、下颌石膏模型牙列之间,将模型进行反复咬合操作至牙列咬合区域的咬合印记明显、轮廓清晰。使用口内彩色扫描仪 Medit i500 扫描上颌石膏模型的牙列区域,将扫描结果保存为 ply 格式文件,导入 Geomagic Studio 2013 软件。在软件内手动勾勒红色着色区域

边界,计算勾勒区域的曲面面积即可得到牙列咬合接触面积(图 7)。

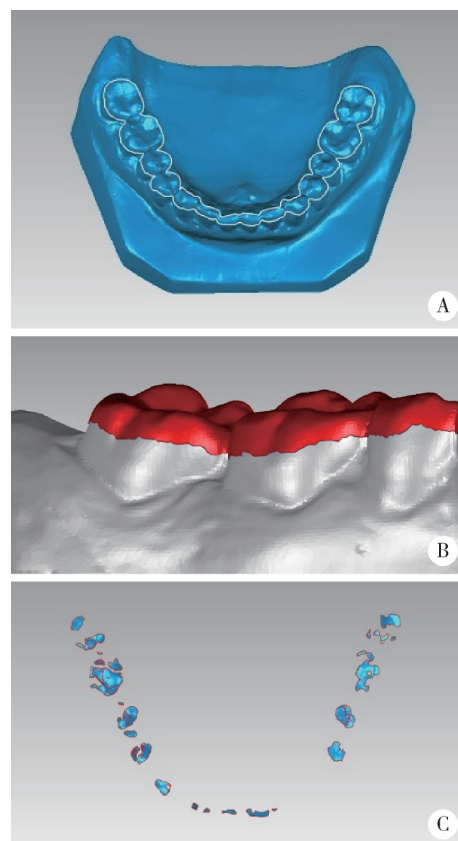


图 5 选取下颌牙列咬合相关区域( A )、构建“虚拟咬合纸”模型( B )和咬合接触区域分布示意图( C )

Figure 5 Selecting the occluding-related area of mandibular model ( A ), establishment of “virtual articulating paper” model ( B ), and occlusal contact distribution ( C )

## 2 结果

各方法均可获得咬合关系石膏模型的咬合接触分布区域以及咬合接触面积,各方法所得的全牙列咬合接触分布情况基本一致(图 8)。

三维偏差色阶图法、点云统计分析法、虚拟咬合纸法、殆记录硅橡胶法以及咬合纸扫描法所得到的牙列咬合接触面积如表 1 所示,其中传统咬合分析方法中,咬合纸扫描法各项咬合接触面积相对较小,而殆记录硅橡胶法相对较大。除前牙区咬合接触面积结果中三维偏差色阶图法最小以外,三种数字化咬合分析算法的结果均介于咬合纸扫描法和殆记录硅橡胶法之间,从大到小依次是:点云统计分析法、三维偏差色阶图法、虚拟咬合纸法。三种数字化咬合分析算法所得咬合接触面积相差不大,其中总咬合接触面积差异在  $4.15 \sim 13.13 \text{ mm}^2$ ,右侧牙列咬合接触面积差异仅为  $0.27 \sim 2.89 \text{ mm}^2$ 。



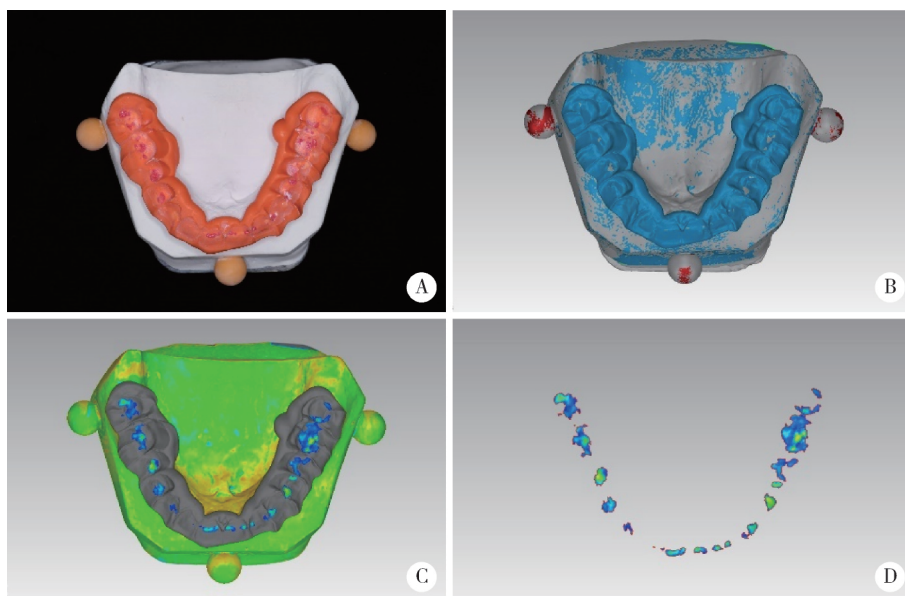


图 6 嵌合硅橡胶的下颌组合模型( A )、双次扫描配准结果( B )、咬合记录厚度分析结果( C )和咬合接触区域分布示意图( D )

**Figure 6** The mandibular model combined with ball markers and silicone interocclusal recording material ( A ) , the result of superimposition ( B ) , analyzing the thickness of silicone material ( C ) , and occlusal contact distribution ( D )

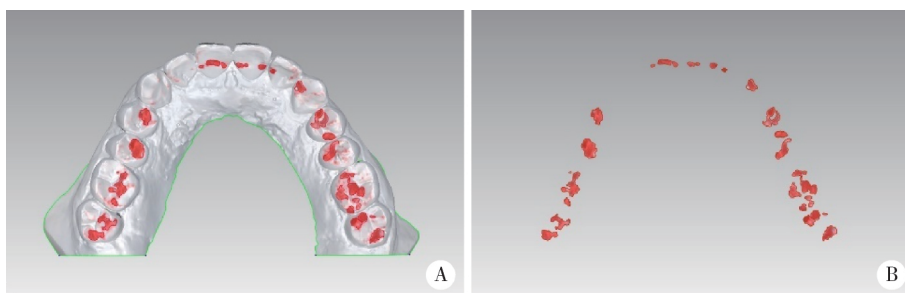
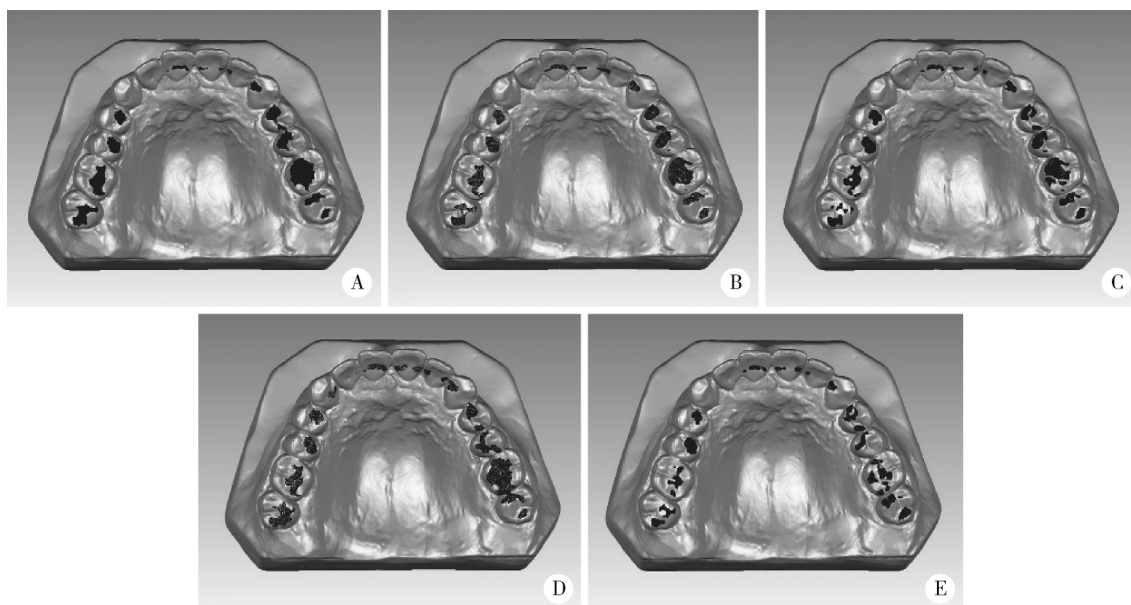


图 7 口内扫描咬合纸印记模型( A )和咬合接触区域分布示意图( B )

**Figure 7** The result of scanning the articulating paper marks ( A ) and occlusal contact distribution ( B )



A , 3D color difference map method; B , point cloud analysis method; C , virtual articulating paper method; D , silicone interocclusal recording material method; E , articulating paper mark scanning method.

图 8 各方法所得全牙列咬合接触分布图

**Figure 8** The occlusal contact distribution obtained by five methods

表 1 各方法获得的牙列咬合接触面积比较

Table 1 Comparison of the occlusal contact area obtained by five methods

Items	Digital occlusal analysis methods			Traditional occlusal analysis methods	
	3D color difference map method	Point cloud analysis method	Virtual articulating paper method	Silicone interocclusal recording material method	Articulating paper marking method
Occlusal contact area of anterior region	11.06	16.49	14.69	25.26	12.78
Occlusal contact area of posterior region	122.04	125.59	114.26	138.04	87.77
Occlusal contact area of left side	78.76	87.47	77.22	97.49	60.31
Occlusal contact area of right side	54.34	54.61	51.72	65.82	40.24
Total occlusal contact area	133.10	142.08	128.95	163.31	100.55

3 讨论

3.1 数字化咬合分析算法具有更好的真实性

咬合纸法是临床实践中最常使用的传统咬合分析方法,各种厚度、材质的咬合纸可适用于不同临床需求,然而由于患者配合情况以及唾液等因素影响,咬合纸在口内的可重复性较差<sup>[17]</sup>。Cohen-Levy等<sup>[18]</sup>同时使用传统咬合纸法与 T-scan 系统对正畸治疗患者进行咬合分析,两者所得结果有明显差异。口外模型咬合分析的研究中也发现,咬合纸法的客观性和可重复性均欠佳,且咬合纸印记的面积大小及颜色深浅与局部咬合力无明显相关性<sup>[19-22]</sup>。基于压力感应片的 T-scan 系统是咬合接触量化检测工具的代表,但有研究发现该系统的精确度和灵敏度略有不足<sup>[23]</sup>。此外,T-scan 系统计算咬合接触面积是通过计算 1.6 mm<sup>2</sup>大小像素点的数量,其结果的精度受到单位像素点大小的限制。Dental Prescale 系统是另一种主流咬合接触量化检测工具,其核心技术是 100 μm 厚度的压力敏感薄膜,受压时薄膜内含有染料的微囊泡破裂导致变色,采用配套的设备可以进行定量分析,在后牙区具有较好可靠性<sup>[24]</sup>,然而该薄膜在咬合力较小时并不能很好反映咬合接触情况<sup>[25]</sup>。硅橡胶透光法常作为咬合检测的金标准,可用于分析咬合接触分布以及计算咬合接触面积,但在咬合力较大时,受试者常常无法在硅橡胶材料完全硬化前保持一致的咬合位置,导致结果出现偏差<sup>[25]</sup>。上述咬合分析方法均依赖于在牙列之间放置特定的介质,而介质对于原有咬合关系的影响不可忽视,这与不同介质的物理性质相关,如形状、厚度、硬度、形变能力、粗糙程度等因素。Forrester 等<sup>[10]</sup>研究了不同介质对于颞肌前束及咬肌浅层肌肉活动的影响,发现 96 μm 厚度的条状 T-scan 感应片和 200 μm 厚度的咬合纸都可以带来表面肌

电信号的改变,提示咬合位置的变化,且 T-scan 感应片的 U 型形状在临床应用中对咬合的影响可能比实验中更加明显。Augusti 等<sup>[26]</sup>的研究发现,单侧牙列放置 200 μm 和 40 μm 厚度的咬合纸均可引起咀嚼肌表面肌电信号不对称的改变,且改变程度与咬合纸的厚度呈正相关关系。与 T-scan 类似,Dental Prescale 系统所用的 100 μm 厚度薄膜也能够引起咬合变化<sup>[27]</sup>。另外,上述各种测量介质的物理性质局限性导致其无法充分贴合牙齿表面,只能体现咬合接触区域在二维平面上的投影面积,咬合接触区域尖窝沟嵴的复杂牙面形态会导致二维面积结果与实际三维面积存在较大区别,因而无法反映真实的三维咬合接触面积。相比上述传统方法,本研究采用的三种基于软件算法建立的无介质数字化咬合分析算法,可以记录不受测量介质诸多因素干扰的咬合状态,可较为真实地获得三维咬合接触面积,具有很好的临床应用前景。

3.2 数字化咬合分析算法结果具有较好的临床参考价值

咬合分析中,咬合力、咬合接触分布情况以及咬合接触面积是临床医生普遍关注的重要指标<sup>[28]</sup>,其中咬合力与咬合接触面积呈现一定的正相关关系,咬合面积可以间接反映受试者的咬合力水平<sup>[29]</sup>。口腔生理相关研究也发现,咬合接触面积与咀嚼效能有明显关联。Horie 等<sup>[30]</sup>通过硅橡胶透光法测量发现,距离在 200 μm 以内的咬合相关区域面积都与咀嚼效率有关。本研究使用的数字化咬合分析算法均可得到与咬合纸扫描法以及殆记录硅橡胶法基本一致的咬合接触分布情况,而五种方法所得到的咬合接触面积略有不同,从大到小依次为:殆记录硅橡胶法、点云统计分析法、三维偏差色阶图法、虚拟咬合纸法和咬合纸扫描法。咬合纸扫描法和殆记录硅橡胶法作为两种传统咬合分析方法,其所得结果

分别为五种方法中的最小值和最大值,相差较大。分析原因认为,咬合纸扫描法所得咬合接触面积一定程度上受咬合纸性质的影响,临床常用的厚型咬合纸由浸入染色剂的纤维制成,染色剂需在咬合接触时受到挤压才可在接触点形成着色<sup>[31]</sup>,因此齿科咬合纸 BK52 的实际着色范围可能小于 100  $\mu\text{m}$ ,导致面积检测结果偏小。殆记录硅橡胶法中模型配准是关键步骤,本研究使用加入标志球体的方法提高配准精度,但由于扫描精度等技术限制,尚无法实现双次扫描数据高精度重合(图 6B),可能是产生接触面积检测结果较大的原因。此外,殆记录硅橡胶法记录了对颌牙列间发生咬合接触直到滑动至牙尖交错位这一短暂过程中牙面接触的累积结果,且硅橡胶材料硬化过程中石膏模型的微动会造成硅橡胶材料的额外形变,这也可能使该方法所得咬合接触面积结果偏大。

本研究三种数字化咬合分析算法的咬合接触面积检测结果介于上述两种传统咬合分析方法之间。三维偏差色阶图法和点云统计分析法均基于 Geomagic Qualify 2013 软件中的“3D 比较”功能,其算法原理为在一定临界角的范围内沿任意方向寻找最近点并计算模型间最近点的距离;虚拟咬合纸法则是通过“抽壳”增厚的算法功能,实现沿咬合面曲面的法向寻找上、下颌模型间的最近点距离,为沿指定方向的检测算法。后者相对保守的距离检测方式可能是导致虚拟咬合纸法的咬合接触面积结果比点云统计分析法和三维偏差色阶图法偏小的原因。虚拟咬合纸法一定程度上模拟了临床咬合纸的检测方式,因此其所得的咬合接触分布情况与传统咬合纸法结果最为接近(图 8),而三维偏差色阶图法与点云统计分析法的多向检测原理可能更适合于模拟咀嚼时食团在牙列间的广泛分布情况,能在一定程度上反映咀嚼效能。在同样的算法原理下,三维偏差色阶图法是基于三角面片数量计算咬合总面积,点云统计分析法是基于空间中点云分布数量来推算咬合总面积,虽然本研究在模型预处理时通过“重划网格”命令使模型在不丢失细节信息的前提下尽量使点云分布均匀,但两种方法所得的面积计算结果仍有一定差异,分析原因可能与点云统计分析法避免了三维偏差色阶图法中手动勾勒着色区域边界的步骤所带来的人工误差有关。此外,点云统计分析法获得的 csv 文件包含了大量咬合接触信息,除可计算某一特定咬合检测阈值范围内的接触面外,还可对不同间距的咬合相关区域进行统计及可视化分析,有助于个性化咬合面设计的深入研究。

本研究为实验室方法学研究,传统方法组采用的 100  $\mu\text{m}$  厚度咬合纸为临床中常用的咬合纸类型<sup>[31]</sup>,与较薄的咬合纸(20/30  $\mu\text{m}$ )相比,可以检测更多咬合相关区域信息,获得广泛的咬合接触分布结果<sup>[32]</sup>;数字化方法组也采用 100  $\mu\text{m}$  作为咬合检测阈值,可获得较为显著的色阶图效果以验证各数字化方法的可行性。未来可根据不同临床需求改变算法中的检测阈值,进一步利用数字化咬合分析算法进行分析。

### 3.3 数字化咬合分析是发展方向

由于牙周膜的存在使得天然牙列在咬合时存在各向动度,大量研究发现,口内实际咬合情况要比口外石膏模型更加紧密、广泛<sup>[33-34]</sup>。程明轩等<sup>[34]</sup>基于口内扫描牙列及咬合关系和扫描传统石膏模型所获得的数据分别进行数字化咬合分析,发现口内扫描所得结果反映出更加紧密的咬合关系。然而,有研究发现不同厂商的口内扫描系统所得到的咬合分析结果并不一致<sup>[12]</sup>。Ayuso-Montero 等<sup>[35]</sup>的研究发现,口内扫描所得到的咬合接触面积结果与 T-scan 和硅橡胶透光法相差较多。高精度扫描是数字化咬合分析中的重要前提,它直接影响牙列咬合面形态以及配准后的上、下颌空间位置关系。目前对于多牙扫描,普遍认为模型扫描的精度高于口内扫描,本研究使用的 3shape E4 牙颌模型三维扫描仪精度达到 4  $\mu\text{m}$ ,可以提供可靠的扫描数据来源。

Komiyama 等<sup>[33]</sup>尝试用 Triple Tray 托盘制取处于咬合力状态下的闭口式托盘并灌制石膏模型,虽然这种方法所测得的咬合接触面积比传统石膏模型的结果有所提高,但仍然远远小于口内测得的咬合接触面积。除此之外,口内实际咬合情况远比石膏模型复杂,咬合力的大小、体位的变化以及咬合力难以在一定记录时间内保持一致等因素导致口内咬合记录的可重复性欠佳<sup>[36-37]</sup>。

本研究对三种数字化咬合分析算法的实验结果仅针对具有稳定咬合关系的口外石膏模型的情况,可用于辅助分析口内实际咬合情况。未来随着牙列功能状态下形态获取技术的进一步研究和应用,本研究的数字化咬合分析算法或可实现更为精确、真实的口内实际咬合检测效果。

综上所述,本研究使用的三种数字化咬合分析算法可以提供可靠、准确的牙颌模型咬合接触分布及咬合接触总面积分析结果,可为口腔医学临床治疗、修复体设计制作及咬合分析研究提供参考。

### 参考文献

[1] 马斐斐,胡秀莲,林野. 口腔种植修复与咬合[J]. 实用口腔

- 医学杂志, 2013, 29(1): 121-123.
- [2] Foz AM, Artese HP, Horliana AC, et al. Occlusal adjustment associated with periodontal therapy: A systematic review [J]. J Dent, 2012, 40(12): 1025-1035.
- [3] 曾艳, 王嘉德. 牙体牙髓病临床问题解析 II. 牙齿的慢性损伤性疾病 [J]. 中华口腔医学杂志, 2009, 44(7): 441-443.
- [4] 谢秋菲. 牙体解剖与口腔生理学 [M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2013.
- [5] Abduo J, Bennamoun M, Tennant M, et al. Effect of prosthodontic planning on intercuspal occlusal contacts: Comparison of digital and conventional planning [J]. Comput Biol Med, 2015, 60: 143-150.
- [6] Moreno-Hay I, Okeson JP. Does altering the occlusal vertical dimension produce temporomandibular disorders? A literature review [J]. J Oral Rehabil, 2015, 42(11): 875-882.
- [7] 韩科, 张豪. 殆学理论与临床实践 [M]. 北京: 人民军医出版社, 2014.
- [8] 宋倩, 王辉, 冯春雷, 等. 咬合纸指导调殆可靠性的定量研究 [J]. 牙体牙髓牙周病学杂志, 2016, 26(2): 86-90.
- [9] Koos B, Godt A, Schille C, et al. Precision of an instrumentation-based method of analyzing occlusion and its resulting distribution of forces in the dental arch [J]. J Orofac Orthop, 2010, 71(6): 403-410.
- [10] Forrester SE, Presswood RG, Toy AC, et al. Occlusal measurement method can affect SEMG activity during occlusion [J]. J Oral Rehabil, 2011, 38(9): 655-660.
- [11] 赵一蛟, 王勇, 吕培军. 一种基于数字化牙颌模型的三维咬合分析方法 [J]. 北京大学学报(医学版), 2008, 40(1): 109-111.
- [12] Gintaute A, Keeling AJ, Osnes CA, et al. Precision of maxillo-mandibular registration with intraoral scanners *in vitro* [J]. J Prosthodont Res, 2019, pii: S1883-1958(19)30145-8. doi: 10.1016/j.jpor.2019.05.006. [Epub ahead of print].
- [13] Lee H, Cha J, Chun YS, et al. Comparison of the occlusal contact area of virtual models and actual models: a comparative *in vitro* study on Class I and Class II malocclusion models [J]. Bmc Oral Health, 2018, 18(1): 109.
- [14] 陈磊, 张豪, 冯海兰, 等. 正常受试者单侧咀嚼运动中的殆接触模式 [J]. 北京大学学报(医学版), 2009, 41(1): 90-94.
- [15] Abduo J. Geometrical effects of conventional and digital prosthodontic planning wax-ups on lateral occlusal contact number, contact area, and steepness [J]. J Oral Sci, 2017, 59(3): 431-438.
- [16] Iwase Y, Saitoh I, Okamoto A, et al. Do occlusal contact areas of maximum closing position during gum chewing and intercuspal position coincide? [J]. Arch Oral Biol, 2011, 56(12): 1616-1623.
- [17] Schelb E, Kaiser DA, Brukl CE. Thickness and marking characteristics of occlusal registration strips [J]. J Prosthet Dent, 1985, 54(1): 122-126.
- [18] Cohen-Levy J, Cohen N. Computerized analysis of occlusal contacts after lingual orthodontic treatment in adults [J]. Int Orthod, 2011, 9(4): 410-431.
- [19] Qadeer S, Kerstein R, Kim RJ, et al. Relationship between articulation paper mark size and percentage of force measured with computerized occlusal analysis [J]. J Adv Prosthodont, 2012, 4(1): 7-12.
- [20] Kerstein RB. Articulating paper mark misconceptions and computerized occlusal analysis technology: A clinical brief [J]. Dent Implantol Update, 2008, 19(6): 41-46.
- [21] Toledo MF, J6ias RP, Marques-Iasi YS, et al. Thickness and marking quality of different occlusal contact registration strips [J]. J Appl Oral Sci, 2014, 22(6): 516-521.
- [22] Malta Barbosa J, Urtula AB, Hirata R, et al. Thickness evaluation of articulating papers and foils [J]. J Esthet Restor Dent, 2018, 30(1): 70-72.
- [23] Saraçoğlu A, Özpınar B. *In vivo* and *in vitro* evaluation of occlusal indicator sensitivity [J]. J Prosthet Dent, 2002, 88(5): 522-526.
- [24] Matsui Y, Ohno K, Michi K, et al. A computerized method for evaluating balance of occlusal load [J]. J Oral Rehabil, 1996, 23(8): 530-535.
- [25] Imamura Y, Sato Y, Kitagawa N, et al. Influence of occlusal loading force on occlusal contacts in natural dentition [J]. J Prosthodont Res, 2015, 59(2): 113-120.
- [26] Augusti D, Augusti G, Re D, et al. Effect of different dental articulating papers on SEMG activity during maximum clenching [J]. J Electromyogr Kinesiol, 2015, 25(4): 612-618.
- [27] Sharma A, Rahul GR, Poduval ST, et al. History of materials used for recording static and dynamic occlusal contact marks: a literature review [J]. J Clin Exp Dent, 2013, 5(1): e48-e53.
- [28] 易新竹. 殆学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2012.
- [29] Makino E, Nomura M, Motegi E, et al. Effect of orthodontic treatment on occlusal condition and masticatory function [J]. Bull Tokyo Dent Coll, 2014, 55(4): 185-197.
- [30] Horie T, Kanazawa M, Komagamine Y, et al. Association between near occlusal contact areas and mixing ability [J]. J Oral Rehabil, 2014, 41(11): 829-835.
- [31] 刘洋. 调殆——临床实用技术图解 [M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2018.
- [32] Brizuela-Velasco A, Álvarez-Arenal Á, Ellakuria-Echevarria J, et al. Influence of articulating paper thickness on occlusal contacts registration: A preliminary report [J]. Int J Prosthodont, 2015, 28(4): 360-362.
- [33] Komiyama O, Obara R, Iida T, et al. Comparison of direct and indirect occlusal contact examinations with different clenching intensities [J]. J Oral Rehabil, 2015, 42(3): 185-191.
- [34] 程明轩, 姜婷, 孙玉春, 等. 比较口内扫描和模型扫描对数字化牙列模型咬合定量分析的影响 [J]. 北京大学学报(医学版), 2018, 50(1): 136-140.
- [35] Ayuso-Montero R, Mariano-Hernandez Y, Khoury-Ribas L, et al. Reliability and validity of T-scan and 3D intraoral scanning for measuring the occlusal contact area [J]. J Prosthodont, 2019. doi: 10.1111/jopr.13096.
- [36] Gupta S, Tarannum F, Gupta NK, et al. Effect of head posture on tooth contacts in dentate and complete denture wearers using computerized occlusal analysis system [J]. J Indian Prosthodont Soc, 2017, 17(3): 250-254.
- [37] Nishimori H, Iida T, Kamiyama H, et al. Comparing the occlusal contact area of individual teeth during low-level clenching [J]. J Oral Sci, 2017, 59(3): 337-342.

(2019-10-10 收稿)  
(本文编辑: 任英慧)