

디지털 치의학 시대의 교합

서울대학교치과병원 원스톱협진센터

이재현

ABSTRACT

Occlusion and articulation in digital dentistry: A review

Department of Prosthodontics, One-Stop Specialty Center,
Seoul National University Dental Hospital

Jae-Hyun Lee, DMD, MSD, PhD

With the fourth industrial revolution, digitization is accelerating in all healthcare areas. In the field of dentistry, active discussions on digital dental technologies are ongoing, with increasing interest from clinicians daily. Thus far, accuracy and efficiency have primarily been emphasized in digital dentistry, and interest in occlusion has been relatively low. This is because digital dentistry has been predominantly used to restore small numbers of teeth rather than extensive prosthetic reconstruction. However, in the future, most dental treatments will undergo a digital transformation that will require the application of digital technology to more extensive prosthetic rehabilitation, for which discussion of occlusion is essential. In extensive prosthetic reconstruction, occlusion and articulation involve determining the position of the dental arch in relation to the reference plane of the skull or the long axis of the face and the position of the transverse horizontal axis. It also includes determining an occlusal surface with a shape that allows the mandible to move in an eccentric path and masticate most efficiently without any occlusal interference. To better understand how digitization will impact dentistry, this review article summarizes and discusses occlusion and articulation using digital dental technologies. This discussion is divided into several aspects, including facial scan, virtual articulation, augmented reality, and virtual reality.

Keywords : augmented reality, digital dental technologies, facial scan, occlusion, virtual articulation, virtual reality

Corresponding Author

Jae-Hyun Lee, DMD, MSD, PhD

Department of Prosthodontics, One-Stop Specialty Center, Seoul National University Dental Hospital,
Daehak-ro 101, Jongro-gu, Seoul 03080, Korea.

E-mail: jhlee.snudh@gmail.com

I. 서론

4차 산업혁명과 함께 디지털 혁신은 다양한 분야에서 이루어지고 있으며, 이는 치의학 분야에서도 마찬가지이다¹⁾. 현대 정보 기술의 발전을 바탕으로, 불과 몇 년 전 까지도 임상 워크 플로우에 존재하던 한계와 장애물들을 극복해내고 있다²⁾. 또한 스마트폰과 태블릿 PC가 사물 인터넷(IoT)과 결합되어 높은 편의성을 보이며, 보다 높은 효율성을 원하는 시장을 바탕으로 사회의 디지털화 추세를 촉진하고 있다³⁾.

디지털 치의학은 초기에는 악궁 내 한 두개 정도의 수복물의 제작에 사용되는 것이 고작이었지만, 갈수록 적응증이 확대되어 현재는 광범위한 보철 작업, 임플란트 기반 보철물 및 총의치의 설계 및 제작에까지 사용되고 있다^{4,5)}. 새로 개발된 디지털 치의학 시스템들에는 가상 교합기가 있어 교합적으로 더욱 적합한 형태를 디자인할 수 있게 되었다. 이 가상 교합기는 안면 스캔 또는 과두 움직임의 디지털 분석과 같은 디지털 방법을 통해 과두 프로그래밍을 적용할 수 있다⁶⁻⁸⁾. 디지털 교합 분석기 기들도 시중에 유통되고 있으며, 이를 통해 하악 운동 중 교합 접촉 점과 접촉 강도의 분석도 가능하다⁹⁾.

단순히 한 개의 치아 또는 한 개의 치아 내에서도 작은 일부 부분만 수복하는 것에 한정하여 디지털 치의학 기술을 사용한다면 과두의 경로나 여러 기준 평면에 대한 고려는 그렇게 중요하지 않을 수 있다. 그러나 보다 광범위한 영역을 보철 수복 하려면 가상 교합이나 가상 교합기에 대한 고려가 필수적일 것이다.

II. 안면 스캔

1. 치의학에서 안면 스캔의 적용

환자의 얼굴 또는 다른 신체 부위의 3차원 (3D) 이미

지를 얻는 개념은 예전부터 시도되어 왔다. 촬영 시간이 나 컴퓨터 기술 및 랜드 마크의 정확도와 같은 요소들은 지난 수십 년 동안 개선되어왔다¹⁰⁾. 안면 스캐너는 현재 구순구개열 환자의 안면 측정 같은 악안면 및 악교정 수술과 교정 치료의 계획단계에 적용되고 있다. 또한 성장, 발달 및 성별 차이에 대한 양적 및 질적 평가를 위해서도 사용되고 있다¹¹⁾. 오늘날, 3D 안면 스캔 데이터는 콘빔 전산화 단층 촬영 (CBCT) 데이터와도 최소한의 오류로 성공적으로 중첩되어 사용될 수 있다¹²⁾. 3D 안면 스캔 데이터를 CBCT 데이터와 중첩하는 방법은 고난도의 임플란트 케이스에서 식립 위치에 대한 치료 계획 수립을 더욱 용이하게 한다¹³⁾. 또한 3D 안면 스캔을 통해 특히 복잡한 보철 수복이 필요한 환자에게 가능한 치료 결과를 가상으로 시뮬레이션해 제시함으로써 환자와의 의사 소통에 도움을 주고 치료에 대한 기대치나 치료 결과를 협의하는 데 도움을 줄 수 있다. 현재는 고가의 안면 스캔 장비를 따로 구매하지 않더라도 스마트폰의 카메라와 안면인식 기능을 활용한 응용 프로그램 (Dental Pro App, Bellus 3D, Los Gatos, CA, USA)으로도 치과 임상에 활용 가능한 수준의 3차원 안면 데이터를 획득할 수 있게 되었다(그림 1). 스마트폰으로 획득한 이 데이터를 다양한 포맷으로 추출하여 다른 치과 프로그램들을 이용하여 진료에 적용할 수 있다.

2. 동적 안면 스캔

동적 안면 스캔을 위해서 안면에 여러 개의 랜드 마크를 배치하여 안면 움직임 및 안면 연조직 기능을 추적 표시하여 기록할 수 있다^{14, 15)}. 최근에 출시된 4D 시스템 (3dMD Systems, 3dMD, Atlanta, GA, USA)에는 오디오 녹음 기능도 포함되어 있다. 이러한 기능은 치의학에서 중요한 의미를 가지는 발음인 "m-", "s-" 및 "f-"사운드와 같은 음성을 분석하는 데 사용할 수 있다. Popat 등¹⁶⁾은 3D 모션 캡처 시스템 (3dMDFace Dynamic System,

3dMD)으로 말을 하는 동안 입술 움직임을 평가하였다. 이러한 유형의 기술을 개발하는 회사는 치의학 분야에 동적 스캔을 도입하기 위해 열심히 노력하고 있고, 이는 진단, 치료 계획 및 치과의사와 치기공사에게 제공할 수 있는 정보를 크게 향상시킬 것이다. 보철 치료 전 또는 치료 중의 객관적인 평가를 통해 임상에서는 치료 계획을 평가하거나 보철 수복의 결과를 모니터링 할 수 있을 것이다. 이를 활용하여 기능 장애나 잠재적 장애를 발견할 수 있을 뿐만 아니라, 보철 수복에 따른 심미적 결과와 구사하는 발음을 미리 시뮬레이션해 볼 수도 있다^{3,10)}.

III. 가상 교합 (virtual articulation)

가상 교합 (virtual articulation)은 치과에서 광범위한 분야에 적용될 수 있다. 여러 적용 방법 중의 하나는 디

지털 기록을 바탕으로 환자의 하악의 움직임을 시뮬레이션하여 기능 장애가 있는지 진단하는 것이다. 또다른 예로는 교정치료에서 치아의 움직임을 시각적으로 시뮬레이션 하는 것인데, 치아의 가상 셋업을 통하여 결과에 대한 기대치를 확인할 수 있다.

수복 치의학에서 가상 교합은 컴퓨터 보조 설계 (CAD) 소프트웨어를 사용하여 교합의 형태를 만드는 데 적용된다. 이를 가상 교합기라고도 부른다. 일반적으로 3Shape (Copenhagen, Denmark), Exocad (Darmstadt, Germany), Dental Wings (Chemnitz, Germany) 같은 CAD 시스템에서 가상 교합은 라이브러리의 치아가 자동으로 만들어지는 방식으로 교합의 형태를 형성하게 된다. 그리고 라이브러리에서 불러 온 교합면이 하악의 동적 움직임 패턴에 대한 간섭이 없도록 줄여지는 방법으로 조정된다. 이 절차는 본질적으로 종래의 가공실에서 행해지는 왁스-업 기술의 절차와 유사하다.



그림 1. 치과진료에 활용하기 위해 스마트폰 어플리케이션으로 획득한 안면의 3차원 모형.

다른 방법으로, CEREC의 지식 기반 접근법 (Biogenic/Biojaw CEREC Dentsply Sirona, Bensheim, Germany)이라는 것이 있다. 이는 치아 형태 라이브러리 뿐만 아니라 교합 (articulation)에 관한 정보까지 조합시켜 치아의 형태를 만들기 때문에 다수 치아의 수복에도 적용하기 유리하다^{17, 18}. 정적 교합 동안은 이러한 개념을 적용하는 것에 문제가 없으나 아직 동적 교합에 적용하기에는 정확도 측면에서 개선의 필요가 남아있다고 보고되고 있다¹³.

1. 가상 공간에서 악궁의 위치 결정

보철적 측면에서, CAD 소프트웨어 상에서 악궁이 3차원적으로 가상 마운팅 되는 위치와 방향은 2차원인 모니터의 스크린에서 표현되는 3차원 객체의 관점과 동작 방향에 영향을 미친다. 두개 평면이나 수평 접변축에 대한 기준점이 없다면, 전치의 절단면 같은 전방부의 위치를 변경하거나 교합평면을 변경하는 것은 보철수복의 결과에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. 그래서 3차원 모형이 가상 교합기의 가상 공간에 배치되는 방식이 중요하다. 환자의 정중선, 교합면 및 절단면을 컴퓨터 화면에 전송 및 배치되는 방식으로 가상 마운팅이 되는데, 이 가상 절치는 종래형 교합기에서 사용되는 방법과 유사하다. 실제 환자의 악구강계와 최대한 유사하게 시뮬레이션하려면, 정의된 레퍼런스 평면과 환자의 랜드마크를 소프트웨어에서 참조하고 그에 맞추어 환자에서 해당 랜드마크를 확인해야 한다. 그리고 환자의 기준 평면이 가상 교합기의 해당 평면과 일치하도록 정확하게 정렬해야 한다. 이를 일반적으로 "가상 참조점-기반 마운팅"이라고 한다. 결론적으로, 악간 관계, 하악의 움직임, 기준 평면에 맞춘 정렬이라는 세가지 주요한 측면을 잘 반영하는 가상 교합기가 적절한 교합의 치아를 형성하는데 필요한 것이다¹³.

2. 가상 교합의 개념

컴퓨터 모니터 화면을 통하여 가상 교합기에 마운팅 되어 있는 모형을 볼 때, 이렇게 시뮬레이션된 교합기의 움직임이 실제 환자의 구강에서의 움직임과 얼마나 유사한 지에 관한 의문이 생긴다. 사실, 실제 환자와 동일한 움직임을 시뮬레이션 하는 것은 소프트웨어의 가상 교합기에 실제 환자의 움직임이 맞춤형으로 프로그래밍 된 경우에만 가능하다. 가상 교합을 적절히 구성하기 위해서는 스캔하여 획득한 영역의 크기, 가상 공간에서의 악궁의 위치, 악간 관계 전달 방법, 그리고 하악의 움직임이 중요한 요소이다¹³. 디지털 치의학 기술 개발의 초기에는 구강 내에서 전악을 정확히 스캔하는 것에 어려움이 있었다. 이러한 기술 부족 때문에, 기능 운동로 (FGP) 기술의 개념에 따라 교합인기재를 스캔하는 방식이 사용되었다. 따라서, 설계된 교합은 대합치로부터의 움직임 정보에 맞추어졌다. 이런 식으로 하악골의 움직임과 최대 감합위가 통합되어 적용될 수 있었다. 이러한 방법은 기능은 하지만 적응증이 제한적이었다. 또한 사용되는 교합인기재의 물성도 교합면을 디자인하는데 사용하기에 충분한 정확도를 제공하지 못한다는 한계가 있었다¹⁸.

디지털 기술의 발전으로 최근에는 환자의 디지털 전악 스캔 데이터를 쉽게 얻을 수 있게 되었다. 그러나 가상 교합기에 제공되는 데이터의 품질 및 호환성에는 여전히 문제가 남아 있다. 하악 움직임의 디지털 분석 기술의 발전으로 보철 수복 분야에 신뢰할 수 있는 고품질의 개별 환자 데이터를 제공할 수 있게 되었지만,¹⁹ 어떻게 여러 다른 소스 (악궁 스캔 데이터 및 하악의 움직임 데이터)에서 얻은 데이터들을 하나의 디지털 워크플로우를 통해 하나의 작업 플랫폼으로 통합시킬 수 있을지에 대한 의문이 남아 있다. 아직도 소프트웨어의 기능과 주어진 시스템 데이터의 호환성의 조합은 각 치과 CAD 시스템에서 해결해야 할 과제이다. 하악의 움직임

을 시뮬레이션 하는 대부분의 시스템들은 종래의 기계식 접변식(hinge) 교합기의 움직임과 유사한 임의의 방식으로 하악의 움직임을 시뮬레이션한다. 이 시뮬레이션은 교합을 간단하면서도 적절하게 부여할 수 있도록 미리 설정된 값들을 적용한다. 따라서, 이러한 디지털 절차는 종래의 간단한 보철 수복 방법과 유사한 접근 방법을 반영한다.

최근에는 Jaw Motion Analyzer 시스템 (Zebris Medical, Isny, Germany) 같은 기술들처럼 새로운 워크 플로우를 통해 환자의 기능운동을 진단한 데이터를 CAD 소프트웨어의 가상 교합기로 직접 전송할 수 있는 방법도 개발되고 있다. 이를 가능하게 하기 위해 새로운 디지털 시스템은 데이터를 XML 형식으로 기록할 수 있으며, 약간 관계 뿐만 아니라 하악 운동과 관련된 모든 정보를 통합할 수 있게 되었다. 이러한 방법은 개별 환자에 맞춘 실제 생체 역학 기하학을 디지털 보철 수복에 적용하는 것을 가능하게 한다¹³⁾.

3. 디지털 방법을 이용한 교합의 형성

보철 수복물의 해부학적 윤곽을 가상 디자인하는 것의 목표는 적절한 인접면 접촉을 유지하면서도 정적 및 동적 교합에서 간섭없이 자연치열에 조화되는 형태를 형성하는 것이다. 치아의 교합면은 교두-와 관계를 가지고 있어 음식을 갈아낼 수 있다. 그러기 위해서는 중심위 접촉에서 안정적이어야 하고 비중심위로 움직일 때 간섭이 없어야 한다. 또한, 교합력은 잔존 치열이나 보철물로 흡수될 수 있어야 한다. 인공지능으로 맞춤형 형태를 디자인 할 수 없었던 기본 솔루션만 탑재된 CAD 프로그램은 단순히 사용 가능한 왁스 업 형태를 복제해내는 기능만 가지고 있었다. 오늘날 CAD 프로그램은 이러한 작업을 치아 형태의 품질이 떨어지지 않도록 더욱 잘 해낼 수 있게 되었다. 또한 CAD 소프트웨어의 기능은 임시 치아를 스캔하여 그 형태를 최종 보철물의 형태로 사용하

는 것도 가능하게 하였다. 이렇게 하면 환자의 구강 내에서 이미 적응을 마친 교합 관계를 정확하게 최종 보철물로 옮길 수 있다. 같은 맥락으로, 치아를 복제하거나 악궁내 반대 쪽의 치아의 형태를 미러링해서 사용하는 것도 실용적인 옵션이 된다.

교합면 형태를 만들기 위해 다양한 해부학적 스타일의 라이브러리를 사용하는 것도 일반적인 방법이다. 라이브러리의 치아는 잔존 치열의 상황에 맞게 디지털 방식으로 조정되어, 기능 간섭이 없는 교합면으로 디자인할 수 있다. 기능 운동로 (FGP) 또는 사전 프로그래밍된 가상 교합기로 하악의 움직임에 대한 정보가 있다면 라이브러리의 치아를 그에 맞추어 자동적으로 조정할 수도 있다. 이러한 자동 공정은 기존 왁스 업에 비교하여 디지털 방법이 가지는 주요한 장점 중 하나이다.

교합을 생성하기 위해 여러 라이브러리를 다양하게 사용하는 것 외에도 Biogeneric/Biojaw (CEREC Dentsply Sirona)라는 이름으로 다른 개념의 방법이 개발되어 있다¹⁸⁾. 모든 CEREC 소프트웨어 제품에 적용되고 있는 이 시스템에서는 교두 높이 또는 구의 각도와 깊이 같은 치아의 다양한 측면을 인접한 잔존 치열에서 수집한 정보와 관련시켜 형성한다. 그 후 수복물의 디자인은 잔존 치아와 가상 치아 라이브러리의 해부학적 정보의 조합을 통해 통합되어 생성된다. 생성된 외형은 제한된 공간에 통합 될 때까지 동적으로 자체 조정된다. 향후 이러한 과정을 더욱 향상시키기 위해서는, 환자 개인의 하악의 움직임과 기준 평면을 기반으로 각각의 환자에 대한 맞춤형으로 개별화한 것을 바탕으로 설계를 하는 프로세스를 운영해야 한다. 이러한 방법은 더 높은 수준의 보철물을 제작할 수 있도록 해 줄 것이며, 일반적인 환자들 뿐만 아니라 기능 장애나 수직 고경의 소실 같은 복잡한 보철 수복이 필요한 상황을 가진 환자들을 디지털 치의학 방법으로 치료할 수 있는 가능성을 높여 줄 것이다³⁾.

IV. 증강현실과 가상현실

증강현실 (augmented reality, AR)은 컴퓨터 애니메이션 시각 정보를 통해 실제 환경을 향상시키는 상호작용 방식의 기술이다. 다시 말해 증강현실은 가상 콘텐츠로 현실 세계를 확장한다. 대부분의 경우 사진이나 동영상에 디지털 정보가 추가적으로 중첩되는 방법으로 표현된다. 반면에 가상현실 (virtual reality, VR)은 현실과 연결된 것이 아닌, 컴퓨터로 인공적으로 만들어진 시나리오를 표현한다²⁰⁾. 이 기술을 사용해서 시각, 청각, 촉각을 독립적 또는 복합적으로 체험할 수 있다. 최근, 치의학 분야에서 증강현실과 가상현실 기술의 적용이 급속히 증가하고 있으며, 환자와 의료 서비스 제공자 모두를 위한 많은 흥미로운 개발들이 이루어지고 있다²¹⁻²³⁾.

증강현실과 가상현실 소프트웨어를 통해 술자는 가상으로 생성된 시각적 디자인을 환자의 모습에 자연스럽게 중첩할 수 있다. 예를 들면, 침습적 술식을 하기 전에도 미리 예상한 최종 보철물 디자인을 2차원적 사진이나 3차원적 모델을 통해 환자에게 가상으로 중첩시켜 다양한 치료 결과를 미리 시뮬레이션 할 수 있다 (그림 2).²⁴⁾ 이를 활용하여 디지털 디자인을 실시간으로 보면서 환

자와 의사 소통을 할 수 있고, 환자가 복잡한 치료 결과를 미리 파악할 수 있을 뿐만 아니라 치과의사도 치료를 보다 예측 가능하고 효율적으로 수행할 수 있다. 향후에도 이러한 기술은 계속 발전하여 일상적인 치과 진료를 더욱 용이해지도록 향상시킬 것이다. 증강현실 안경을 쓰고 CBCT를 기반으로 한 가상 임플란트 계획을 바탕으로 구강 내에 직접 이미지를 투영시켜 수술을 하게 되는 흥미로운 방법도 개발될 수 있을 것이다²⁵⁾.

V. 고려사항 및 발전방향

표 1은 디지털 치의학이 아닌 종래의 보철 치료에서 사용되던 다양한 종류의 교합기의 장단점이 정리되어 있는 것으로, Rosenstiel 등의 보철학 교과서에 나오는 표를 요약한 것이다²⁶⁾. 보다 정교하고 완전히 조절 가능한 교합기는 환자의 과두 경로를 정확하게 따르도록 프로그래밍 할 수 있는 광범위한 조정 범위를 가지고 있다. 그런 완전조절성 교합기들은 과두의 움직임과 전방 운동시 그리고 측방 운동시의 치아의 접촉을 복제할 수 있도록 설계되어 있다. 반조절성 교합기는 더 적은 범위로



그림 2. 디지털 기술을 활용하여 환자의 치아에 예상되는 치료 결과를 시뮬레이션한 모습.

조정할 수 있는데, 과두경사와 하악 측방 이동 같은 하악 운동의 가장 중요한 임상적 특징들을 시뮬레이션하도록 설계되어 있다.

이 표 1에서는 눈 여겨 볼 것은 보철 수복의 범위나 환자의 구강 상태에 따라 추천되는 교합기의 종류가 다르다는 것이다. 또한, 보다 복잡하고 정교한 교합기를 사용할 수록 진단 시의 진료 시간은 길어지지만, 반면에 보철물 장착시에 보철물 조정에 필요한 시간은 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 정교한 교합기를 사용하지 않고 단순한 비조절성 교합기를 사용하여 보철물을 제작하게 되면 안궁이전 등의 작업이나 체크 바이트법을 통한 과로각 분석 등의 작업이 생략되니 진단 시의 진료는 금방 끝나지만, 대신에 보철물을 장착하는 날 보철물 조정이 많이 필요하여 진료 시간이 오래 걸리게 된다는 것이다.

이 표 1에 제시되어 있는 원리는 디지털 치의학을 이용한 보철 수복에도 그대로 적용될 것이다. 현재 디지털 치의학에 이용한 보철 수복에서 우리가 CAD 프로그

램 상에서 사용하는 가상 교합기가 이 표에 제시되어 있는 여러 교합기 중에 어느 교합기와 유사한 것인지를 파악하고 사용해야 할 것이며, 환자 구강 상태에 따라 해당 치료의 적응증에 맞게 선택해야 할 것이다. 디지털 치과 기술을 사용하면 종래의 진료방법보다 진료시간이 적게 걸릴 것이라는 단순한 믿음으로 CAD의 가상 교합기의 적응증에 맞지않는 치료를 진행한다면, 표 1에 제시되어 있듯이 인상 채득까지는 쉽고 빠르게 진행되더라도 보철물을 장착하는 날에는 오히려 진료 시간이 더 오래 걸리는, 환자와 술자 모두에게 비효율적인 진료경험을 하게 될 수도 있을 것이다. 디지털 치의학이 소수의 치아의 수복이나 인레이, 온레이 등의 수복에만 한정되지 않고 광범위한 보철 수복에 일상적으로 적용되기 위해서는, 디지털 기술의 정확도나 편의성에 대한 연구 뿐만 아니라 가상 교합에 대한 심도 깊은 논의와 연구가 필요할 것이다.

표 1. 고정성 보철학에서의 교합기의 선택

종류	완전 조절성 교합기	반조절성 교합기		비조절성 교합기		마운팅하지 않음	
		ARCON	NONARCON	LARGE	SMALL	ARCH	QUADRANT
제공 가능한 진단 정보	많음	←	←	←	←	←	적음
기공실로 전달해 줄 수 있는 교합 정보	많음	←	←	←	←	←	적음
진단 시에 필요한 진료 시간과 기술	많음	←	←	←	←	←	적음
보철물 장착 할 때 필요한 진료 시간	적음	→	→	→	→	→	많음
적응증	대합 되는 다수의 보철물 수복 시. 전방 유도가 없을 시, 교합 질환이 있을 시.	고정성 보철 수복이 필요한 대부분의 환자의 진단과 치료 시.		큰 교합기는 단일 치아 수복에 사용 가능: 추후 약간의 조정이 필요함. 작은 접면 교합기는 교합의 영향이 거의 없는 경우에만 사용 가능.		교합의 영향이 거의 없는 경우에만 사용가능.	

참 고 문 헌

- Gopal G, Suter-Crazzolara C, Toldo L, Eberhardt W. Digital transformation in healthcare – architectures of present and future information technologies. *Clin Chem Lab Med*. 2019;57(3):328–335.
- Weber GM, Mandl KD, Kohane IS. Finding the missing link for big biomedical data. *JAMA*. 2014;311(24):2479–2480.
- Joda T, Waltimo T, Pauli-Magnus C, Probst-Hensch N, Zitzmann NU. Population-Based Linkage of Big Data in Dental Research. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(11):2357.
- Di Fiore A, Meneghello R, Graiff L, Savio G, Vigolo P, Monaco C et al. Full arch digital scanning systems performances for implant-supported fixed dental prostheses: a comparative study of 8 intraoral scanners. *J Prosthodont Res*. 2019;63(4):396–403.
- Latham J, Ludlow M, Mennito A, Kelly A, Evans Z, Renne W. Effect of scan pattern on complete-arch scans with 4 digital scanners. *J Prosthet Dent*. 2020;123(1):85–95.
- Buduru S, Mesaros A, Talmaceanu D, Baru O, Ghiurca R, Cosgarea R. Occlusion in the digital era: a report on 3 cases. *Med Pharm Rep*. 2019;92(S3):S78–S84.
- Franklin P, McLelland R, Brunton P. An investigation of the ability of computerized axiography to reproduce occlusal contacts. *Eur J Prosthodont Restor Dent*. 2010;18(1):17–22.
- Maestre-Ferrin L, Romero-Millan J, Penarrocha-Oltra D, Penarrocha-Diago M. Virtual articulator for the analysis of dental occlusion: an update. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. 2012;17(1):e160–e163.
- Solaberrieta E, Etxaniz O, Otegi JR, Brizuela A, Pradies G. Customized procedure to display T-Scan occlusal contacts. *J Prosthet Dent*. 2017;117(1):18–21.
- Gwilliam JR, Cunningham SJ, Hutton T. Reproducibility of soft tissue landmarks on three-dimensional facial scans. *Eur J Orthod*. 2006;28(5):408–415.
- Naudi KB, Benramadan R, Brocklebank L, Ju X, Khambay B, Ayoub A. The virtual human face: superimposing the simultaneously captured 3D photorealistic skin surface of the face on the untextured skin image of the CBCT scan. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2013;42(3):393–400.
- Jayaratne YS, McGrath CP, Zwahlen RA. How accurate are the fusion of cone-beam CT and 3-D stereophotographic images? *PLoS One*. 2012;7(11):e49585.
- Att W, Witkowski S, Strub J. *Digital Workflow in Reconstructive Dentistry*. 1st Edition. Quintessence Publishing Co., Inc. 2019.
- Popat H, Richmond S, Playle R, Marshall D, Rosin P, Cosker D. Three-dimensional motion analysis – an exploratory study. Part 1: assessment of facial movement. *Orthod Craniofac Res*. 2008;11(4):216–223.
- Popat H, Richmond S, Playle R, Marshall D, Rosin P, Cosker D. Three-dimensional motion analysis – an exploratory study. Part 2: reproducibility of facial movement. *Orthod Craniofac Res*. 2008;11(4):224–228.
- Popat H, Richmond S, Zhurov AI, Rosin PL, Marshall D. A geometric morphometric approach to the analysis of lip shape during speech: development of a clinical outcome measure. *PLoS One*. 2013;8(2):e57368.
- Mehl A, Blanz V, Hickel R. A new mathematical process for the calculation of average forms of teeth. *J Prosthet Dent*. 2005;94(6):561–566.
- Mehl A. A new concept for the integration of dynamic occlusion in the digital construction process. *Int J Comput Dent*. 2012;15(2):109–123.
- Kordass B, Gärtner C, Söhnel A, Bisler A, Voss G, Bockholt U et al. The virtual articulator in dentistry: concept and development. *Dent Clin North Am*. 2002;46(3):493–506.
- Sutherland J, Belec J, Sheikh A, Chepelev L, Althobaity W, Chow BJW et al. Applying Modern Virtual and Augmented Reality Technologies to Medical Images and Models. *J Digit Imaging*. 2019;32(1):38–53.
- Farronato M, Maspero C, Lanteri V, Fama A, Ferrati F, Pettenuzzo A et al. Current state of the art in the use of augmented reality in dentistry: a systematic review of the literature. *BMC Oral Health*. 2019;19(1):135.
- Joda T, Gallucci GO, Wismeijer D, Zitzmann NU. Augmented and virtual reality in dental medicine: A systematic review. *Comput Biol Med*. 2019;108:93–100.
- Kwon HB, Park YS, Han JS. Augmented reality in dentistry: a current perspective. *Acta Odontol Scand*. 2018;76(7):497–503.
- Joda T, Gallucci GO. The virtual patient in dental medicine. *Clin Oral Implants Res*. 2015;26(6):725–726.
- Joda T, Bomstein MM, Jung RE, Ferrari M, Waltimo T, Zitzmann NU. Recent Trends and Future Direction of Dental Research in the Digital Era. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(6):1987.
- Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J. *Contemporary Fixed Prosthodontics*. 5th Edition. Mosby. 2015.