https://doi.org/10.22974/jkda.2022.60.3.003

4차 산업혁명과 턱교정수술

박재봉

내소구강악안면외과치과의원

ABSTRACT

4th industrial revolution in Orthognahtic surgery

Jae-bong Park

Gnatho Oral and Maxillofacial Surgery clinic

Historically, the emergence of new technologies has had a major impact on industries as a whole. The field of orthodontic surgery was no different, especially with the advent of computers in the 20th century, oral and maxillofacial surgeons and orthodontists were able to make more accurate and precise diagnoses, resulting in improved results of double jaw surgery. In this manuscript, I will introduce some studies on how robots and artificial intelligence, which are said to be two new technologies in the era of the 4th industrial revolution, are being applied to the field of orthognathic surgery.

Key words : Orthognathic surgery, Artificial intelligence, Robot, 4th industrial revolution.

Corresponding Author
Jae-bong-Park, DDS, MSD, PhD, https://orcid.org/0000-0003-1686-1713
Gnatho OMS clinic, 434, Bongeunsa-ro, Gangnam-gu, Seoul, Republic of Korea
Tel: +82-02-512-3318 fax: +82-02-512-6636
E-mail : bellagio@snu.ac.kr

1. 서론

턱교정수술은, 1849년 미국 외과의사 Hullihen이 시행한 하악 치조골의 수술적 이동이 최초 보고된 이래, 유럽에서 Pichler, Turner, Koele and Obwegeser등의 비엔나 학파와 Wassmund, Schuchardt등의 독일학파에 의해 수술의 방법이 크게 발전하였다. 이후에는 새로운 과학 기술들이 지속적으로 적용되며 턱교정수술의 연구에 바탕이 되었고, 구강악안면외과 의사와 치과 교정과 의사는 더 정확하고 안전한 수술 결과를 얻을 수 있게 되었다.

20세기말 컴퓨터 프로그램이 턱교정수술 연구들에 접목되면서, 환자의 분석, 진단 그리고 수술 후 평가 등에 이르기까지 폭넓은 부분에 도움을 주었다. 예를 들면, 기존에 치과의사가 연필로 직접 하던 측모두부규격 방사선 사진의 트레이싱 작업도, 2D 프로그램을 이용하여 트레이싱 및 분석을 손쉽게 진행할 수 있게 되었고, 모든 임상자료를 데이터화 하여 저장 및 관리하는 것이 가능해졌다. 또한, 3D CT와 프로그램의 개발으로 환자 안모의 수많은 정보를 확인하여, 한 차원 높은 분석과 진단, 수술 계획의 수립 그리고 가상수술까지 가능 해졌다[1-5]. 최근에는 3D scanner, 3D printing 기술이 턱교정수술에 적용되면서, 기존 수술의 한계점으로 지적되었던 페이스보우트랜스퍼(Face-bow transfer), 모델서저리(Mock surgery) 및 스플린트(Intermediate splint) 제작 그리고 하악의 회전(Mandibular autorotation)을 이용한 상악의 재위치 과정 등을 부분적으로 개선 혹은 완전히 대체하여 정밀성(Precision)과 재연성(Reproducibility)을 획기적으로 발전시켰고 임상에서도 널리 사용되고 있다[1,6~10].

그렇다면 최근 미디어를 통해 자주 접하게 되는 4차 산업혁명의 새로운 기술들은 턱교정 수술에 어떻게 적용이 되고 있을까. 4차 산업혁명이란 기존의 정보통신기술(ICT)이 융합 되며 출현한 급격한 변화의 흐름으로서, '초연결', '초지능', '초융합'이라는 단어로 대표될 수 있다. 대표적으로 인공지능(Artificial intelligence) 기술, 빅데이터(Big data)와 클라우드(Cloud) 그리고 로봇 기술(Robot technology) 등이 있으며, 이미 Siri, Alexa 모바일 안면인식 알고리즘, 자율주행자동차등 우리 일상에도 깊숙이 뿌리내리고 있다.

이번 원고에서는 이러한 기술들이 턱교정수술분야에 어떻게 적용되고 있는지, 최근의 연구와 진행중인 프로젝트를 기반으로 간략하게 소개하고자 한다.

2. 본론

A. 턱교정수술과 로봇기술 (Robot technology in Orthognathic surgery)

로봇이 의료에 적용된 것은 1987년 프랑스에서 복강경 담낭 절제술에 사용된 것이 최초이다. 90년대부터는 미국에서 로봇을 이용한 복강경 수술이 급격히 증가하게 되었고, 잘 알려진 다빈치(DaVinci) 시스템이 1999년 처음 선보이게 된다. 현재까지 로봇 기술은, 최소 침습으로 수술 부위를 접근하고 내시경을 통해 시야를 확보하는 역할이나, 높은 정밀성과 고단위의 반복을 요구하는 분야에 주로 사용되고 있다[11].

턱교정수술 분야에 처음 로봇이 응용된 것은 Tamer[12] 등이 수동 로봇 팔을 이용하여 모델서저리에 사용한 것으로서, 수술계획의 전후방적/수직적 재연성에 있어서 손으로 한 결과에 비해 유의미하게 높은 정확도를 보여주었다. 이후 발표된 로봇 연구들은 로봇의 종류와 세부적인 방법은 차이가 있으나, 로봇 팔을 이용하여 절골된 상악을 수술 계획대로 정확히 위치시키는 프로세스를 개발하는 것이 공통된 목적이였다[19,25~30].

일반적인 턱교정 수술 과정에서는 상악을 르포트씨 1형 절골법 (LeFort I osteotomy)을 이용하여 분리 후, 미

리 제작해 놓은 수술용 스플린트(Intermediate splint)와 하악의 자유회전(Mandibular autorotation)을 이용하여 상악을 재위치 시킨다(Fig. 1). 하지만 이 방식은, 측두하악관절(TMJ)의 유동적인 성질 때문에 1) 수술 전과 수술 중 하악과두의 중심위(Centric relation)재연이 어렵고, 2) 스플린트 두께 때문에 입을 벌리는 정도가 달라지면서 하악과두의 회전중심 (center of rotation)이 변하게 되며 3) 수술시의 근이완제 및 포지션 변화로 과두의 위치와 움직임 등이 오차를 발생시켜, 기존 수술 과정의 한계점으로 알려져 있다[1,2,6,8,10,13].

이를 근본적으로 해결하고자 절골 라인 상방의 상악벽을 기준으로 위턱을 위치시키는 환자 맞춤형 수술용 스플린트의 제작 및 3D 프린팅 연구도 진행되었고, 대부분 임상 적용에 문제가 없을 정도의 정확성을 보였으며, 실제로 최근 클리닉에서도 많이 사용되고 있다[1,2,7,9,14~20]. 다른 방식으로는 네비게이션 화면을 보면서 위턱을 수술계획대로 정확하게 재위치 시키는 연구 등도 진행되었으며 임상적으로 만족할 만한 수준의 결과를 보여주었다[21~23]. 그러나 템플릿의 이용한 수술가이드는 수술 중에 계획의 변화를 정밀하게 반영하지 못하는 한계가 있고, 네비게이션 연구에서는 술자의 손의 떨림과 피로도 때문에 상악을 재위치 시키는 과정이 불편하고, 오래 걸리는 단점이 있다.

이러한 한계를 개선하고 수술결과의 정밀도를 올리기 위하여 턱교정 수술에 로봇 팔과 네비게이션 시스템을 적용하는 연구가 진행되었다[30]. 보통 로봇 팔 시스템은 여러 개의 관절로 이루어져 있는 본체와, 본체의 끝부분에 부착하여 외부와 상호작용을 하는 엔드-이펙터(End effector), 프로그램 구동을 위한 컴퓨터 및 로봇 콘트롤러로 구성 되어있으며, 이번 연구에서는 턱교정 수술 연구에서는 물체를 잡을 수 있는 그리퍼(Gripper)를 엔드이펙터로 사용하여, 위턱과 연결된 스플린트를

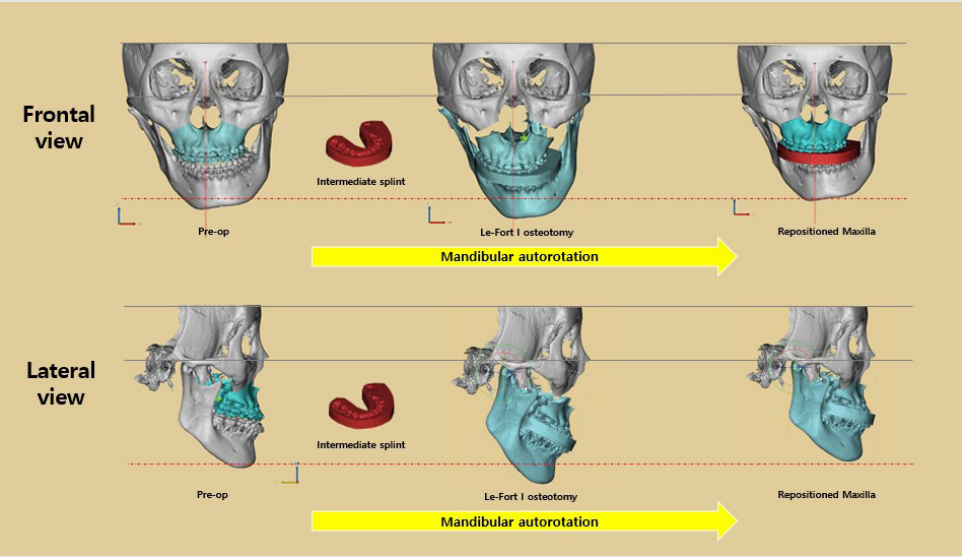

Fig. 1. 수술용 스플린트와 하악의 자유회전을 이용하여 상악을 재 위치시키는 과정. (Mimics, Materialise)

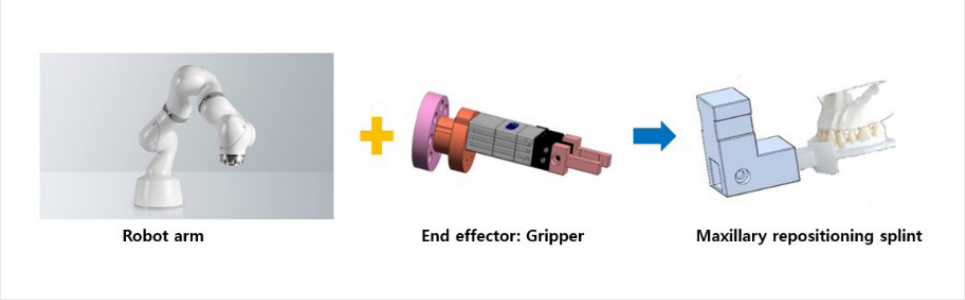

Fig. 2. 독일 KUKA사의 7축 로봇 팔 시스템과 상악 재위치용 스플린트 (LBR iiwa, KUKA, Augusburg, Germany).

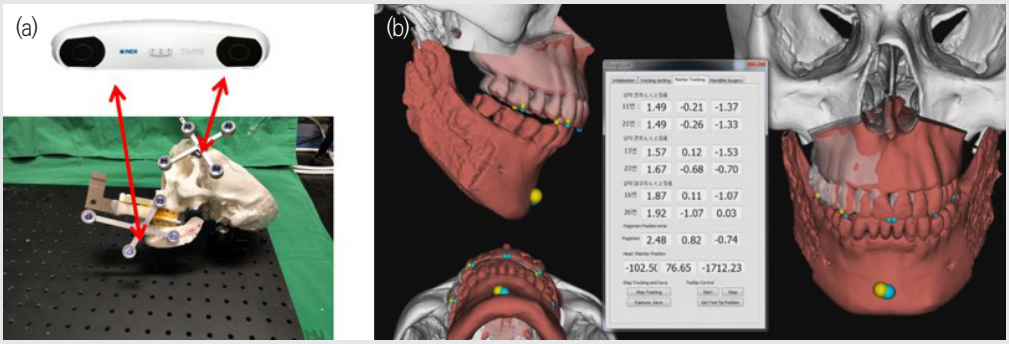

Fig. 3a. 네비게이션 시스템과 모형 스컬에 부착된 광반사체 (POLARIS SPECTRA, Northern Digital Inc., Ontario, Canada)
3b. 가상공간과 실제공간의 모델이 정합 되어 상, 하악골의 실시간 움직임을 디스플레이에서 확인할 수 있다.

잡고 상악을 재위치 시키는 방식으로 실험을 진행하였다(Fig. 2).

한편, 네비게이션 시스템은 모형 스컬의 머리와 상악에 각각 위치한 광 반사체를 인지하여, 상, 하악골의 움직임을 실시간 모니터를 통해 추적하도록 하였다(Fig. 3).

수술을 위한 준비가 완료된 이후에는, 실제 수술과 동일하게 상악을 절골하고 로봇 팔과 로봇 컨트롤러를 이용하여 수술계획대로 상악을 재 위치 시키고 고정한다. 마지막으로는 전체 과정의 정확도를 평가하기 위하여 수술 후 모형의 3D CT 데이터를, 가상수술결과와 중첩하여 정확성을 평가하게 된다(Fig. 4).

이처럼 로봇과 네비게이션을 이용해 분리된 상악골을 재위치 시키는 방법을 개발한 연구들은, 기존수술방법의 한계로 지적되었던 하악의 자유 회전 대신 로봇 팔을 턱교정 수술에 적용했으며, 수술 전 계획과 수술 결과를 비교 시 임상적으로도 만족할 만한 수준의 정확도를 보였다[25~30]. 특히, 우등은[19] 로봇 팔과 네비게이션 그리고 3D 프로그램 등을 이용하여, 술자의 개입없이 위의

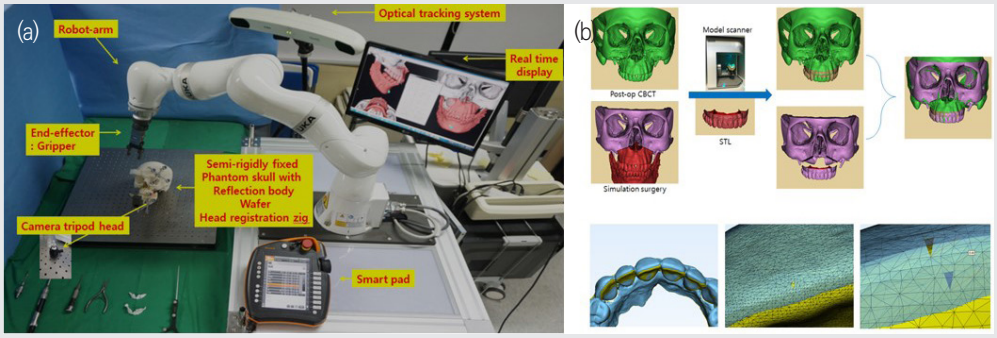

Fig. 4a. 로봇 팔과 네비게이션 시스템을 이용한 상악골의 재위치 실험이 준비되었다.
4b. 가상수술과 수술 후 3D 모델을 중첩하여 전체 과정의 오차를 측정하게 된다. (Mimics & 3-matics, Materialise)

과정을 로봇 팔이 자동으로 상악을 재 위치시키는 연구도 진행하였고, 박[30] 등은 실제 환자의 조건과 비슷하게 모형 스컬을 고정하지 않은 상태에서 위 과정을 진행하는 방법을 개발하여 임상적으로 만족할 만한 수준의 결과를 발표하였다.

소개한 바와 같이, 턱교정수술에서 로봇 기술의 적용은 현재까지는 실험적인 단계로서, 구강악안면외과 의사를 도와 상악을 정밀하게 재위치 시키는 부분에 연구되고 있다. 아직은 로봇 팔의 높은 가격과, 조작이 어려운 점 그리고 의료기기로서의 승인 문제 등의 이유로 실제 임상에 활발하게 사용되기까지는 어려운 점이 많지만, 향 후 기술이 보편화되고 의료용으로서 조작이 간편해진다면, 턱교정수술 뿐 아니라 치과 내 다른 여러 진료보조에도 충분히 임상적 사용을 고려할 수 있을 것으로 생각된다.

B. 턱교정수술과 인공지능 기술 (A.I technology in Orthognathic surgery)

인공지능(AI)기술은 말그대로 인간이 지닌 지적 능력을 인공적으로 구현하기 위한 노력의 산물이다. 기술의 철학적 근거가 되는 튜링테스트는 1950년 앨런 튜링에 의해 고안이 되었지만, 실제로 용어가 확립된 것은 1956년 '스스로 학습할 수 있는 기계'를 만들기 위해 모인 미국 다트머스 대학의 회의에서 존 맥카시가 사용한 이후이다.

몇번의 성장기와 침체기를 거치며 조금씩 발전되어 오다가, 최근에는 딥러닝(Deep learning)으로 알려져 있는 합성곱 신경망 (Convolutionary neural network) 알고리즘의 개발, 클라우드를 이용한 빅데이터 수집의 용이성 그리고 연산을 병력적으로 처리하는 GPU 컴퓨팅 파워의 개선 등을 바탕으로, 인공지능 기술은 산업 전반에 적용되며 큰 영향을 끼치고 있다[31].

인공지능 기술은 의료용 방사선 이미지를 분석 및 진단하는 부분에도 적용되어왔는데, 이미 이미지 인식 능력에서는 인간의 능력을 앞지른다는 연구결과가 보고되었다[32~36]. 치과학에서도 측모두부방사선사진이나 파노라마사진등에서 자동으로 해부학적 랜드마크를 탐지(Automated landmark detection)하는 인공지능기술이 연구되었으며, 특히 치아 교정과 턱교정수술 과정에

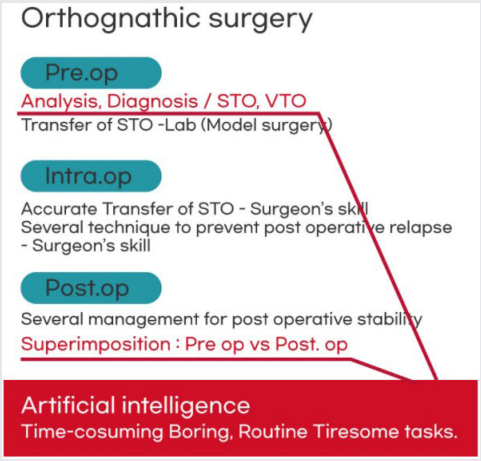

Fig. 5. 인공지능 기술은 턱교정수술과정에서 수술 전 분석 및 진단 단계와 수술 후 평가단계에 적용되고 있다.

서는 이미 임상적으로 널리 사용되고 있다[37~41].

턱교정수술은 크게 수술 전 준비, 수술 그리고 수술 후 관리의 3단계의 과정으로 나눌 수 있는데, 현재 인공지능 기술은 수술 전 준비 단계에서 측모두부방사선 사진을 트레이싱하고 환자의 치아/골격/안모를 분석 및 진단하는 부분과 수술 후 결과를 평가하는 부분에 주로 적용되고 있다. (Fig. 5).

이 과정은 높은 정밀함이 필요한 중요한 과정이지만, 술자의 많은 시간과 노력이 필요한 반복적이고 힘든 과정 이기도 했다. 하지만 최근 개발되는 인공지능 기반 자동 랜드마크 탐지 기능을 이용하면, 중요한 해부학적 계측점을 찾아서 분석법을 적용 하는데 까지 수초 이내로 가능하다. 정확도면에서도 많은 연구가 진행되어왔으며, 인공지능 모델 간 정확성을 겨루는 심포지엄도 매년 꾸준히 열리고 있다. 2017년에는 이 분야에 처음으로 딥러닝 (CNNs)를 이용한 연구가 진행되어, 기존의 기계 학습 (Machine learning) 방법에 비해 높은 정확성을 보여주었다[42]. 또한, Hwang [46]등은 딥러닝을 이용하여 만든 인공지능 모델과 사람의 정확도를 비교하는 연구를 하였는데, 반복 측정 부분은 인공지능 모델의 재연성이 단연 우수하였고, 실제 랜드마크와의 오차도 인공지능과 실험자간 0.9mm 이하의 작은 차이를 보이며 높은 정확도를 보여주었다.

전세계적으로 널리 사용되고 있는 인공지능 기반 치아교정/양악수술 분석 솔루션인WEBCEPH™ (AssembleCircle, South Korea)을 예로 들어 탐지 기술의 과정과 몇가지 임상적 적용을 소개하고자 한다. 자동 계측점 탐지를 위해서는, 우선 치과의사가 측모두부 방사선 이미지 데이터를 입력하면, 데이터의 복잡성을 줄이고 학습 알고리즘에서 특정패턴을 보다 잘 보이게 하는 전처리 과정인 피쳐 엔지니어링 (Feature engineering) 과정을 거치게 된다. 이후 서로 다른 인공지능 모델을 이용하여 1) 랜드마크의 포함 영역 탐지, 2) 영역내 특정 랜드마크 탐지 등의 순차적 과정을 거치고 최종 출력물을 내놓게 된다[47](Fig. 6). 이렇게 나온 출력물의 랜드마크 중, 임상적 허용 오차 범위 이상인 출력 값을 개선하기 위하

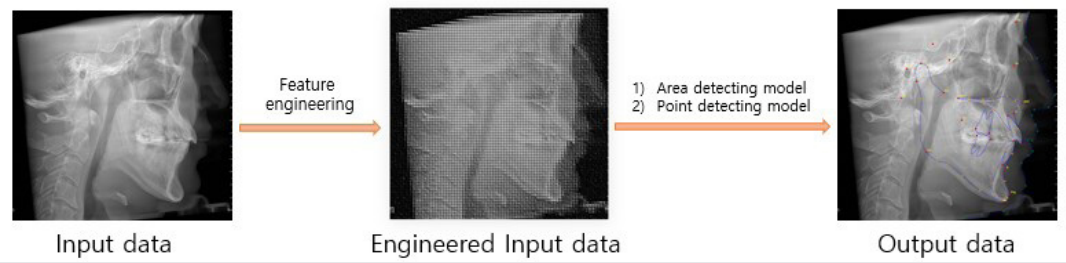

Fig. 6. 인공지능 기반 자동 랜드마크 탐지 기능의 일반적인 과정 (WEBCEPH, Assemblecircle)

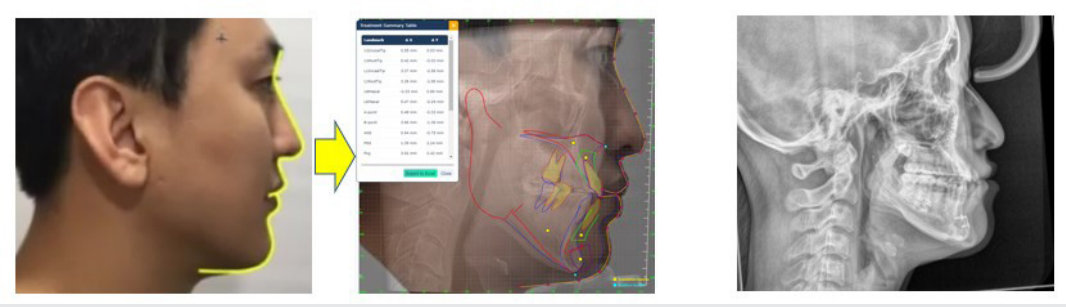

Fig. 7a. 연조직 랜드마크 탐지, 방사선사진 중첩 및 VTO 기능 7b. 치료 전 후 방사선사진 중첩 기능 (WEBCEPH, Assemblecircle)

여, 최종적으로 술자가 한 번 더 수정할 수 있도록 절차적인 보완을 마련하고있다[42~45,47]. 비슷한 구동 방식으로, 측모두부방사선사진과 측모 사진의 연조직의 아웃라인을 찾아내어 자동 중첩을 하고 수술 계획 대로 VTO를 진행하는 기술도 구현되었으며, 수술 전과 후의 측모 방사선 사진을 중첩하여 결과를 평가하는 기술에도 적용되어 술자 및 환자에게 많은 도움을 주고 있다(Fig. 7).

현재는 위와 같이 주로 단순하지만 기존에 시간이 많이 소요되는 부분에서 적용되어 치과의사를 돕고있으나, 최근 몇 년간 발표되는 연구 들에서는 턱교정수술의 진단에 관한 부분까지 점차 적용되고 있다. 2019년 최 등은[48] 316명을 대상으로 진행한 인공지능 모델 기반 턱교정수술 혹은 비수술 교정의 진단 부분에서 96프로의 확률로 진단 성공율을 보였고, 이듬해인 2020년 이 등은[49] 딥러닝 모델을 적용하여 95%가 넘는 진단 성공율을 발표하였다.

소개한 바와 같이, 인공지능기술은 현재 턱교정수술 환자의 분석 및 수술 후 평가의 단계에 적용되어 임상가와 환자에게 큰 도움을 주고 있다. 진단과 관련된 연구들은 아직은 실제 임상에 사용할 범용 모델로 보기는 어렵지만, 턱교정수술 진단 연구의 새로운 지평을 열었다는 점에서 큰 의미가 있다고 볼 수 있겠다.

맺음말

본 원고에서는 4차 산업혁명의 대표적인 기술로 꼽히는 로봇과 인공지능 기술이 턱교정수술분야에서 어떻게 적용되고 있는지 살펴보았다. 턱교정수술에서의 로봇 기술 적용은 아직 실험적인 연구 단계이지만, 향 후 의료용 로봇 팔 자체가 좀 더 보편화 된다면 수술의 정확성을 올리는 과정과 수술의 보조를 하는 분야에서 충분히 사용될 수 있을 것이라 생각된다. 인공지능기술은 현재까지 환자의 진단 부분에서 술자의 시간과 실수를 줄이는 부분으로 많이 연구되고 있으며, 미래에는 진단 및 치료계획에 이르는 부분까지 영역을 넓혀 임상가와 환자 모두에게 도움이 되는 방향으로 발전하기를 기대해본다.

참 고 문 헌

1. Han JJ, Yang HJ, Hwang SJ. Repositioning of the Maxillomandibular Complex Using Maxillary Template Adjusted Only by Maxillary Surface Configuration Without an Intermediate Splint in Orthognathic Surgery. J Craniofac Surg. 2016;27(6):1550–1553.
2. Zinser MJ, Sailer HF, Ritter L, Braumann B, Maegele M, Zoller JE. A paradigm shift in orthognathic surgery? A comparison of navigation, computer-aided designed/computer-aided manufactured splints, and "classic" intermaxillary splints to surgical transfer of virtual orthognathic planning. J Oral Maxillofac Surg. 2013;71(12):2151 e2151–2121.
3. Aboul-Hosn Centenero S, Hernandez-Alfaro F. 3D planning in orthognathic surgery: CAD/CAM surgical splints and prediction of the soft and hard tissues results – our experience in 16 cases. J Craniomaxillofac Surg. 2012;40(2):162–168.
4. Chen X, Li X, Xu L, Sun Y, Politis C, Egger J. Development of a computer-aided design software for dental splint in orthognathic surgery. Sci Rep. 2016;6:38867.
5. Li B, Wei H, Zeng F, Li J, Xia JJ, Wang X. Application of A Novel Three-dimensional Printing Genioplasty Template System and Its Clinical Validation: A Control Study. Sci Rep. 2017;7(1):5431.
6. Ellis E, 3rd. Accuracy of model surgery: evaluation of an old technique and introduction of a new one. J Oral Maxillofac Surg. 1990;48(11):1161–1167.
7. Li B, Zhang L, Sun H, Yuan J, Shen SG, Wang X. A novel method of computer aided orthognathic surgery using individual CAD/CAM templates: a combination of osteotomy and repositioning guides. Br J Oral Maxillofac Surg. 2013;51(8):e239–244.
8. Olszewski R, Reychler H. [Limitations of orthognathic model surgery: theoretical and practical implications]. Rev Stomatol Chir Maxillofac. 2004;105(3):165–169.
9. Bai S, Shang H, Liu Y, Zhao J, Zhao Y. Computer-aided design and computer-aided manufacturing locating guides accompanied with prebent titanium plates in orthognathic surgery. J Oral Maxillofac Surg. 2012;70(10):2419–2426.
10. Kahnberg KE, Sunzel B, Astrand P. Planning and control of vertical dimension in Le Fort I osteotomies. J Craniomaxillofac Surg. 1990;18(6):267–270.
11. Peters BS, Armijo PR, Krause C, Choudhury SA, Oleynikov D. Review of emerging surgical robotic technology. Surg Endosc. 2018 Apr;32(4):1636–1655. doi: 10.1007/s00464-018-6079-2. Epub 2018 Feb 13. PMID: 29442240.
12. Theodossy T, Bamber MA. Model surgery with a passive robot arm for orthognathic surgery planning. J Oral Maxillofac Surg. 2003 Nov;61(11):1310–7. doi: 10.1016/s0278-2391(03)00733-x. PMID: 14613088.
13. Ferguson JW, Luyk NH. Control of vertical dimension during maxillary orthognathic surgery. A clinical trial comparing internal and external fixed reference points. J Craniomaxillofac Surg. 1992;20(8):333–336.
14. Suojanen J, Leikola J, Stoor P. The use of patient-specific implants in orthognathic surgery: A series of 32 maxillary osteotomy patients. J Craniomaxillofac Surg. 2016;44(12):1913–1916.
15. Gander T, Bredell M, Eliades T, Rucker M, Essig H. Splintless orthognathic surgery: a novel technique using patient-specific implants (PSI). J Craniomaxillofac Surg. 2015;43(3):319–322.
16. Mazzoni S, Bianchi A, Schiariti G, Badiali G, Marchetti C. Computer-aided design and computer-aided manufacturing cutting guides and customized titanium plates are useful in upper maxilla waferless repositioning. J Oral Maxillofac Surg. 2015;73(4):701–707.
17. Polley JW, Figueroa AA. Orthognathic positioning system: intraoperative system to transfer virtual surgical plan to operating field during orthognathic surgery. J Oral Maxillofac Surg. 2013;71(5):911–920.
18. Brunso J, Franco M, Constantinescu T, Barbier L, Santamaria JA,

참 고 문 헌

Alvarez J. Custom-Machined Miniplates and Bone-Supported Guides for Orthognathic Surgery: A New Surgical Procedure. J Oral Maxillofac Surg. 2016;74(5):1061 e1061-1061 e1012.
19. Woo SY, Lee SJ, Yoo JY, et al. Autonomous bone reposition around anatomical landmark for robot-assisted orthognathic surgery. J Craniomaxillofac Surg. 2017;45(12):1980-1988.
20. Suojanen J, Leikola J, Stoor P. The use of patient-specific implants in orthognathic surgery: A series of 30 mandible sagittal split osteotomy patients. J Craniomaxillofac Surg. 2017;45(6):990-994.
21. Chapuis J SA, Pappas I, et al. A new system for computer-aided preoperative planning and intraoperative navigation during corrective jaw surgery. IEEE Trans Inf Technol Biomed 2007;2007;11:274-287.
22. Lee SJ, Woo SY, Huh KH, et al. Virtual skeletal complex model- and landmark-guided orthognathic surgery system. J Craniomaxillofac Surg. 2016;44(5):557-568.
23. Berger M, Nova I, Kallus S, et al. Can electromagnetic-navigated maxillary positioning replace occlusional splints in orthognathic surgery? A clinical pilot study. J Craniomaxillofac Surg. 2017;45(10):1593-1599.
24. Beasley RA. Medical Robots: Current Systems and Research Directions. Journal of Robotics. 2012;Volume 2012, Article ID 401613, 14 pages.
25. Wang X SR, Liu X, et al. System design for orthognathic aided robot. In: The 5th annual IEEE International Conference on cyber technology in automation, control and intelligent systems. 2015.
26. Burgner J TM, Vieira V, et al. System for robot assisted orthognathic surgery. Int J Comput Assist Radiol Surg 2007;2007:419-421.
27. Burgner J ZY, Raczkowsky J, et al. Methods for end-effector coupling in robot assisted invervention. In: Robotics and automation, 2008 ICRA 2008 IEEE International Conference on Pasadena, CA, USA. 2008.
28. Vieira VMM KG, Ionesco H, et al. Light-weight robot stability for orthognathic surgery. Phantom and animal cadavar trials.
29. Han JJ, Woo SY, Yi WJ, Hwang SJ. Robot-Assisted Maxillary Positioning in Orthognathic Surgery: A Feasibility and Accuracy Evaluation. J Clin Med. 2021 Jun.
30. Park JB "Development of repositioning method of maxillomandibular complex under movable head position using robot with 3D position recognizing function and navigation system in orthognathic surgery." 국내박사학위논문 서울대학교 대학원, 2019. 서울.
31. Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio and P. Haffner, "Gradient-based learning applied to document recognition," in Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 11, pp. 2278-2324, Nov. 1998, doi: 10.1109/5.726791.
32. He, K., Zhang, X., Ren, S. and Sun, J. Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification. IEEE International Conference on Computer Vision. 2015;1502. 10.1109/ICCV.2015.123.
33. Spampinato, C.; Palazzo, S.; Giordano, D.; Aldinucci, M.; Leonardi, R. Deep learning for automated skeletal bone age assessment in X-ray images. Medical image analysis 2017, 36, 41-51, doi:10.1016/j.media.2016.10.010.
34. Nogay, H.S.; Adeli, H. Detection of Epileptic Seizure Using Pretrained Deep Convolutional Neural Network and Transfer Learning. European neurology 2020, 83, 602-614, doi:10.1159/000512985.
35. Men, K.; Chen, X.; Zhang, Y.; Zhang, T.; Dai, J.; Yi, J.; Li, Y. Deep Deconvolutional Neural Network for Target Segmentation of Nasopharyngeal Cancer in Planning Computed Tomography Images. Frontiers in Oncology 2017, 7, doi:10.3389/fonc.2017.00315.
36. Lee, K.-S.; Jung, S.-K.; Ryu, J.-J.; Shin, S.-W.; Choi, J. Evaluation of Transfer Learning with Deep Convolutional Neural Networks for Screening Osteoporosis in Dental Panoramic Radiographs. Journal of clinical medicine 2020, 9, 392, doi:10.3390/jcm9020392.
37. Neelapu, B.C.; Kharbanda, O.P.; Sardana, V.; Gupta, A.; Vasamsetti, S.; Balachandran, R.; Sardana, H.K. Automatic localization of three-dimensional cephalometric landmarks on CBCT images by extracting symmetry features of the skull. Dentomaxillofacial Radiology 2018, 47, 20170054, doi:10.1259/dmfr.20170054.
38. Montúfar, J.; Romero, M.; Scougall-Vilchis, R.J. Hybrid approach for automatic cephalometric landmark annotation on cone-beam computed tomography volumes. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics 2018, 154, 140-150, doi:10.1016/j.ajodo.2017.08.028.
39. Nishimoto, S.; Sotsuka, Y.; Kawai, K.; Ishise, H.; Kakibuchi, M. Personal Computer-Based Cephalometric Landmark Detection With Deep Learning, Using Cephalograms on the Internet. Journal of Craniofacial Surgery 2019, 30, 91-95, doi:10.1097/scs.0000000000004901.
40. Baksi, S.; Freezer, S.; Matsumoto, T.; Dreyer, C. Accuracy of an automated method of 3D soft tissue landmark detection. European journal of orthodontics 2020, 10.1093/ejo/cjaa069, doi:10.1093/ejo/cjaa069.
41. Grau, V.; Alcañiz, M.; Juan, M.C.; Monserrat, C.; Knoll, C. Automatic Localization of Cephalometric Landmarks. Journal of biomedical informatics 2001, 34, 146-156, doi:10.1006/jbin.2001.1014.
42. Arik SÖ, Ibragimov B, Xing L. Fully automated quantitative cephalometry using convolutional neural networks. J Med Imaging (Bellingham). 2017;4(1):014501. doi:10.1117/1.JMI.4.1.014501.
43. Wang CW, Huang CT, Hsieh MC, Li CH, Chang SW, Li WC, Vandaele R, Marée R, Jodogne S, Geurts P, Chen C, Zheng G, Chu C, Mirzaalian H, Hamarneh G, Vrtovec T, Ibragimov B. Evaluation and Comparison of Anatomical Landmark Detection Methods for Cephalometric X-Ray Images: A Grand Challenge. IEEE Trans Med Imaging. 2015 Sep;34(9):1890-900. doi: 10.1109/TMI.2015.2412951. Epub 2015 Mar 16. PMID: 25794388.

참 고 문 헌

44. Wang CW, Huang CT, Lee JH, Li CH, Chang SW, Siao MJ, Lai TM, Ibragimov B, Vrtovec T, Ronneberger O, Fischer P, Cootes TF, Lindner C. A benchmark for comparison of dental radiography analysis algorithms. Med Image Anal. 2016 Jul;31:63-76. doi: 10.1016/j.media.2016.02.004. Epub 2016 Feb 28. PMID: 26974042.
45. Shahidi Sh, Oshagh M, Gozin F, Salehi P, Danaei SM. Accuracy of computerized automatic identification of cephalometric landmarks by a designed software. Dentomaxillofac Radiol. 2013;42(1):20110187. doi: 10.1259/dmfr.20110187. Erratum in: Dentomaxillofac Radiol. 2013;42(4):20139010. Shahidi, S [corrected to Shahidi, Sh]. PMID: 23236215; PMCID: PMC3746488.
46. Hwang HW, Park JH, Moon JH, et al. Automated identification of cephalometric landmarks: Part 2-Might it be better than human?. Angle Orthod. 2020;90(1):69-76. doi:10.2319/022019-129.1.
47. Kim YH. Web based and Artificial Intelligence driven Orthodontic Analysis System. J Clin Digit Dent. 2019;1(2):24-28. www.jcdd.org
48. Choi HI, Jung SK, Baek SH, Lim WH, Ahn SJ, Yang IH, Kim TW. Artificial Intelligent Model With Neural Network Machine Learning for the Diagnosis of Orthognathic Surgery. J Craniofac Surg. 2019 Oct;30(7):1986-1989. doi: 10.1097/SCS.0000000000005650. Erratum in: J Craniofac Surg. 2020 Jun;31(4):1156. PMID: 31205280.
49. Lee, K. S., Ryu, J. J., Jang, H. S., Lee, D. Y., & Jung, S. K. (2020). Deep convolutional neural networks based analysis of cephalometric radiographs for differential diagnosis of orthognathic surgery indications. Applied Sciences (Switzerland), 10(6), [2124]. https://doi.org/10.3390/app10062124.