

술자의 영상정합의 경험이 컴퓨터 단층촬영과 광학스캔 영상 간의 정합 정확성과 작업시간에 미치는 영향

Effect of image matching experience on the accuracy and working time for 3D image registration between radiographic and optical scan images

마이항나¹·이두형^{1,2*}

Hang-Nga Mai¹, Du-Hyeong Lee^{1,2*}

경북대학교 ¹치의학중재연구소, ²치과대학 치과보철학교실

¹Institute for Translational Research in Dentistry, ²Department of Prosthodontics, School of Dentistry, Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea

ORCID iDs

Hang-Nga Mai

<https://orcid.org/0000-0002-9832-3312>

Du-Hyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0003-2803-7457>

Corresponding Author

Du-Hyeong Lee

Department of Prosthodontics,
School of Dentistry, Institute
for Translational Research in
Dentistry, Kyungpook National
University, 2175 Dalgubeol-daero,
Jung-gu, Daegu 41940, Republic of
Korea

+82 (0)53 600 7651

dewylee@knu.ac.kr

Article history Received March 25,
2021 / Last Revision June 7, 2021 /
Accepted June 14, 2021

This work was supported by the Korea Medical Device Development Fund grant funded by the Korea government (the Ministry of Science and ICT, the Ministry of Trade, Industry and Energy, the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea, the Ministry of Food and Drug Safety) (202011A02), and the Bio & Medical Technology Development Program of the National Research Foundation (NRF) funded by the Korean government (MSIT) (2020R111A1A01062967).

Purpose. The purpose of the present study was to investigate the effects of image matching experience of operators on the accuracy and working time of image registration between radiographic and optical scan images. **Materials and methods.** Computed tomography and optical scan of a dentate dental arch were obtained. Image matching between the computed tomography and the optical scan (IDC S1, Amann Girrbach, Koblah, Austria) was performed using the point-based automatic registration method in planning software programs (Implant Studio, 3Shape, Copenhagen, Denmark) using two different experience conditions on image registration: experienced group and inexperienced group (n = 15 per group, N = 30). The accuracy of image registration in each group was evaluated by measuring linear discrepancies between matched images, and working time was recorded. Independent t test was used to statistically analyze the result data ($\alpha = .05$). **Results.** In the linear deviation, no statistically significant difference was found between the experienced and inexperienced groups. Meanwhile, the working time for image registration was significantly shorter in the experienced group than in the inexperienced group ($P = .007$). **Conclusion.** Difference in the image matching experience may not influence the accuracy of image registration of optical scan to computed tomography when the point-based automatic registration was used, but affect the working time for the image registration. (J Korean Acad Prosthodont 2021;59:299-304)

Keywords

Accuracy; Computed tomography; Experience; Image registration; Optical scan; Working time

© 2021 The Korean Academy of Prosthodontics

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

컴퓨터를 이용한 임플란트 수술은 소프트웨어 상에서 임플란트를 위치하고 computer-aided design-computer-aided manufacturing (CAD-CAM)을 이용하여 가이드 형판을 설계, 출력하는 과정을 포함한다.^{1,2} 컴퓨터 소프트웨어를 이용한 수술 계획 수립의 신뢰성을 높이기 위해서는 기본적으로 3차원 방사선 영상자료와 구강 스캔이 정확하게 정합되어야 한다.³ 영상 정합을 위하여 일반적으로 대응되는 3차원 영상 표면에서 공통적인 형상의 부분을 이용하는 표면기반 매칭이 사용된다.⁴ 표면기반 매칭 과정에서 매칭점을 기준으로 해서 영상을 정합하는 방식은 방사선 영상과 광학스캔에서 동일한 해부학적 위치를 술자에 의해 수동으로 지정하는 과정을 수반한다.⁵ 치아가 있는 악궁에서는 치아의 외형이 두 영상에서 모두 관찰 가능하므로 치아의 교두 혹은 열구가 일반적으로 영상 중첩을 위한 매칭점으로 선정된다.¹

Iterative closest points (ICP) 알고리즘은 치과용 컴퓨터 디자인 소프트웨어에서 3차원 point cloud간의 정확한 정합을 위해 많이 이용되는 기술이다.⁶ ICP 알고리즘은 두 개의 영상이 3차원 좌표계에서 서로 최근접 위치로 이동할 수 있도록 계산한다.⁷ 술자에 의해 양측 영상에 지정된 매칭점은 정합의 최종 중첩 결과에 영향을 미칠 수 있다.⁶ 만약 대응되는 매칭점의 위치가 많이 다른 경우 반복적인 영상근접 과정에서 결과적인 오차를 야기할 수 있다. 현재 매칭점을 수동으로 지정하지 않고 영상정합을 완전히 자동화하는 기술이 여러 소프트웨어 프로그램에서 소개되고 있지만, 실제적으로 아직까지 매칭점을 부여해 주는 방식이 정합의 속도와 정확성에서 유리하다고 보고되고 있다.⁸ 특히 불분명한 선각이나 형태를 포함하는 영상에서는 이러한 반자동식의 영상정합이 정확성을 향상하기 위해 추천된다.⁹

표면 기반 매칭에서 자동 영상정합 과정 전에 수동으로 매칭 참고점을 지정하는 방식에서는 최소 3점의 매칭점이 필요하다.¹⁰ 전체적인 정합의 정확성을 높이기 위해서는 3개의 매칭점이 악궁 내에서 가급적 서로 멀리 떨어져 있는 것이 좋으며, 적어도 1점은 수술 예정인 영역과 근접되게 지정되어야 한다.^{10,11} 비록 영상 정합을 위한 프로토콜이 제시되고 있고 자동정합 자체의 과정은 컴퓨터 계산에 의해 수행되지만, 매칭점의 지정은 술자의 판단에 의존한다. 그러므로 술자에 따라 방사선 영상과 광학스캔 영상에서 서로 대응되는 매칭점의

지정 정확도는 다를 수 있다. 이러한 사람의 판단과 수행에 있어서 차이는 결과적으로 영상 정합의 정확도에 영향을 미칠 수 있는데, 최근에 두 개의 대응되는 매칭점의 위치적 차이가 영상의 정합에 미치는 영향이 분석되기도 하였다.¹²

컴퓨터 소프트웨어를 이용함에 있어 술자의 이전 경험은 결과에 중요한 영향을 줄 수 있는 요소이다. 본 연구의 목적은 구강 방사선 영상과 광학스캔의 정합과정에 대한 술자의 경험의 정도가 두 영상의 정합 정확성과 작업시간에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 연구의 귀무가설은 영상 정합에 대한 경험의 차이는 구강 방사선 영상과 광학스캔의 정합 정확성과 작업시간에 영향을 미치지 않는다 이다.

재료 및 방법

금속 치아보철물 혹은 치아결손이 없는 건전한 치열의 성인 악궁이 본 연구를 위해 선택되었다. 방사선 영상을 채득하기 위해 콘빔 컴퓨터 단층촬영을 80 kVp, 8 mA, 24 s pulsed scan, field of view of 120 × 80 mm, 0.2 mm slice thickness 조건에서 촬영하였다(Pax-i3D Smart, Vatech, Hawseong, Korea). 하악의 치아의 3차원 표면 영상은 실리콘 인상재로 인상채득하고 초경석고로 제작된 석고모형을 데스크톱 스캐너로 스캔함으로써 얻어졌다(IDC S1, Amann Girrbach, Koblach, Austria).

콘빔 컴퓨터 단층촬영과 광학 스캔하여 얻어진 2개의 영상을 컴퓨터 가이드 수술을 위한 컴퓨터 소프트웨어 프로그램(Implant Studio, 3Shape, Copenhagen, Denmark)로 전달 후 영상매칭(image matching) 과정을 통해 정합(registration)하였다. 하악의 영상매칭은 양측 제2대구치의 근심 협측 교두와 우측 중절치의 절단연의 3점을 실험자가 각 영상의 대응되는 위치에 지정하는 방식으로 수행되었다(Fig. 1). 그 후 소프트웨어 내의 매칭점 기반의 자동정합 알고리즘(point-based best-fit algorithm)에 의해 영상중첩이 진행되었다. 본 정합과정은 임플란트 진단 소프트웨어의 사용 경험이 3년 이상인 15 명(경험자군)과 경험이 없는 15 명(미경험자군)으로 진행되었고, 모든 참여자는 본 연구의 목적을 알지 못했다(blinded study). 영상정합을 위해 매칭점의 선정에 요소 되는 시간을 추가적으로 측정하고 기록하였다. 소요 시간은 소프트웨어 프로그램에 콘빔 컴퓨터 단층촬영 영상과 광학스캔 영상이 각각 보이는 상태에서 시작해서 술자가 두

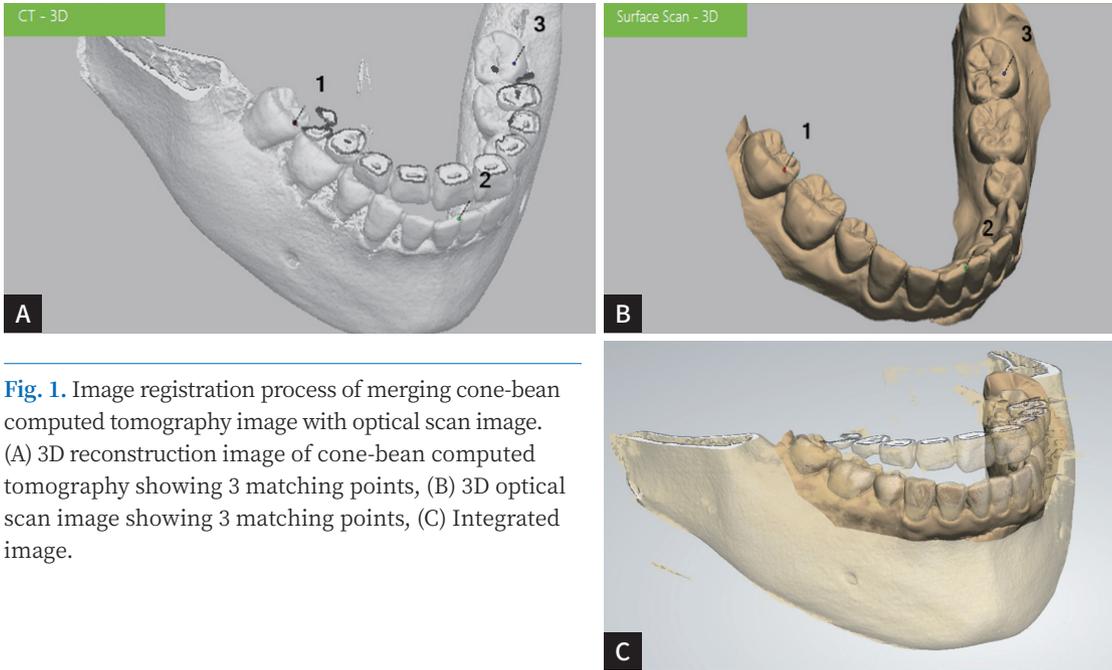
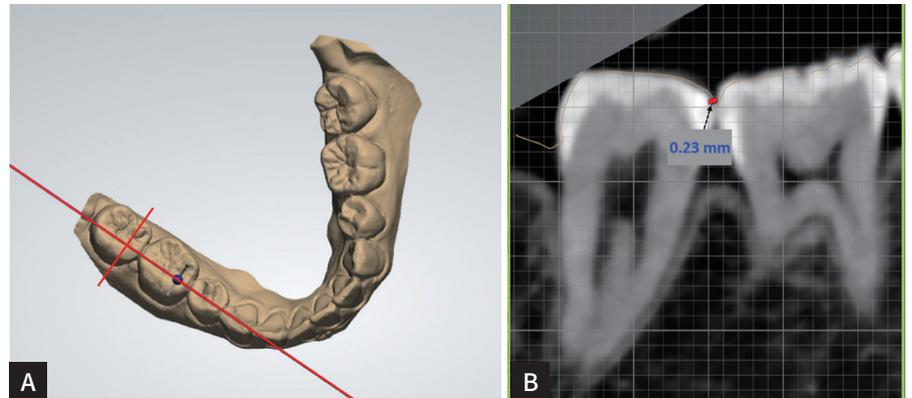


Fig. 1. Image registration process of merging cone-bean computed tomography image with optical scan image. (A) 3D reconstruction image of cone-bean computed tomography showing 3 matching points, (B) 3D optical scan image showing 3 matching points, (C) Integrated image.

Fig. 2. Evaluation of matching discrepancy. (A) Reference line designation in the second molar, (B) Measurement of linear deviation between outlines of 3D optical scan and radiographic images.



영상에서 3쌍의 대응되는 매칭점을 컴퓨터 마우스로 모두 선정하기까지의 시간으로 측정하였다. 본 연구의 과정은 경북대학교치과병원 임상시험심사위원회의 승인 하에 진행되었다 (KNUDH 2019-03-05-00).

구치부에서의 영상정합의 정확도를 평가하기 위해 제2대구치 근원심, 협설, 교합치는 방향에서 횡단면 영상(cross-sectional image)을 형성하고, 각 근심면, 협면, 교합면에서 단층촬영 영상과 광학스캔 영상의 윤곽선의 법선 상 위치적 차이를 거리편차로 측정하였다 (Fig. 2). 그 후 측정값을 합산하여 3차원 벡터 변이값으로 계산하였다:

Global deviation, $d = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$
 d: 3차원 변이값, a: 근원심측 방향에서 측정값, b: 협설측 방향에서 측정값, c: 교합치은측 방향에서 측정값

모든 정확성 측정은 1명의 작업자에 의해서 진행되었다. 측정된 결과값을 이용하여 경험자 군과 미경험자 군에서 평균과 표준편차가 계산되었고, 군 간의 비교를 위해서 SPSS 25.0 for Windows (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 상에서 정규성(Shapiro-Wilk test)을 검증 후, 독립표본 t검정(independent sample t test)이 이용되었다. 통계적 차이는 유의수준

(a) 0.05에서 검증하였다.

결과

자료의 정규성 검증을 위한 Shapiro-Wilk 검정에서 유의 확률은 0.084로 나타났다. 이는 유의수준 0.05보다 크므로, 자료가 정규분포를 따른다고 가정할 수 있었다. 컴퓨터 단층촬영 영상과 광학스캔 영상 간의 정합 변이값의 평균과 표준편차는 소프트웨어 경험자 군에서 0.329 ± 0.037 mm, 미경험자 군에서 0.337 ± 0.098 mm 으로 나타났다. 정합 오차에 대한 군간 통계값의 차이는 유의하지 않았다 ($P = .787$, Fig. 3A). 영상 정합에 소요된 작업시간의 평균과 표준편차는 영상정합 경험자 군에서 8.4 ± 3.0 초, 미경험자 군에서 15.97 ± 8.9 초로 기록되었다. 정합 시간에 대한 군간 통계값은 유의한 차이를 보였다 ($P = .007$, Fig. 3B).

고찰

본 연구의 목적은 영상정합의 경험이 컴퓨터 단층촬영과 광학스캔을 정합할 때 정확성과 작업시간에 미치는 영향을 분석하는 것이었다. 영상정합의 경험 정도가 다른 군 간에 영상정합의 정확도는 유의한 차이가 없었고, 작업시간에는 차이가 있었다. 그러므로 경험이 영상정합의 정확성과 작업시간에 영향을 미치지 않는다는 귀무가설은 부분적으로 기각되었다.

본 연구에서 사용된 영상중첩 방법은 매칭점 기반의 자동정

합 방식이었다. 3차원 다각형 메시 영상은 작업자에 의해 지정된 대응되는 매칭점에 기반하여 best-fit 알고리즘에 의해 최근접 위치로 서로 배열되었다.¹³ 본 연구의 결과는 영상 정합의 정확성이 작업자의 경험에 유의하게 영향 받지 않는다는 것을 보여준다. 본 결과는 술자가 컴퓨터 화면상에서 대응점을 얼마나 유사하게 지정하는지가 엄밀하게 중요하지는 않다는 것으로 과거의 Mai 등의 연구결과로 뒷받침될 수 있다. Mai와 Lee¹²의 연구는 대응되는 점간의 작은 위치 오차는 영상 정합의 질에 영향을 미치지 않는다고 했다. 그 이유로 컴퓨터 소프트웨어 알고리즘에서 영상 중첩을 위해 기반하는 영역은 정확히 술자가 지정한 점만이 아니라 그 주위의 메시 표면을 반영하기 때문인 것으로 생각된다. 그래서 두 개의 영상이 완벽히 같은 형태라면 그 영상은 컴퓨터 계산에 의해 같은 3차원 좌표계로 위치될 수 있다. 참고로 본 연구의 결과값을 보면 약 0.3 mm의 정합오차가 존재하는 데 이것은 근본적으로 두 개의 영상이 형태가 다른 것에 기인할 수 있다. 콘빔 컴퓨터 단층촬영에서 방사선 촬영이 영상이 재조합되어 만들어지는 과정, 그리고 광학스캔에서 영상수집과 스티칭(stitching) 과정에서 영상은 왜곡되고 변형될 수 있기 때문이다.¹⁴ 그래서 술자는 영상정합 시 두 개의 영상 간의 필연적인 형태의 상이함을 감안하면서 관심이 있는 수술부위에서 정합이 최적화될 수 있는 방식으로 정합을 수행하는 것이 추천된다.

본 연구에서 영상정합에 소요된 시간은 비경험자 군에서 경험자 군보다 유의하게 길게 나타났다. 이것은 인간의 뇌에서는 물체의 특징적인 형태를 발견하고 인지하는 데 선행적 경

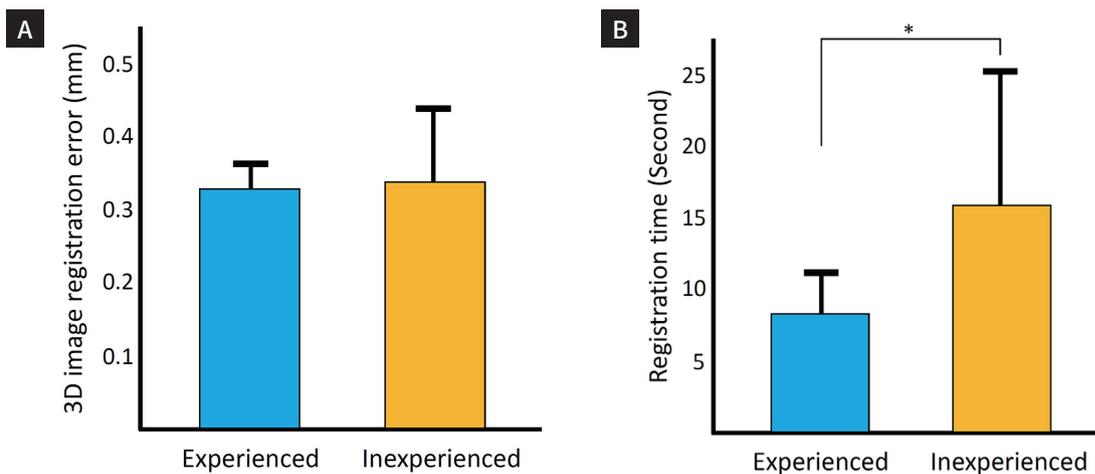


Fig. 3. (A) Image registration error, (B) Working time used for registration.

험이 영향을 미치기 때문이다.¹⁵ 영상 인지에서 관련 사전 지식의 정도 또한 연관적 요소이다. 본 연구에서 구강 영상정합에 경험이 없었던 참여자는 매칭점 선정을 위해 치아의 해부학적 구조를 관찰하고 구분하는 데 시간이 더 많이 소요된 것으로 보인다. 또한 3차원 영상 모델을 소프트웨어 상에서 조작하는 데 익숙하지 않아 시간을 필요로 하였다. 그 반면, 경험자군의 참여자는 매칭점을 선정하는 데 신속하였으며 3차원 모델을 소프트웨어 프로그램 상에서 움직이는 데 어려움이 없었다. 이에 기반하여 생각할 때 미경험자에서 점 기반 영상정합의 속도를 향상시키기 위해서는 정합의 위한 프로토콜을 설명하고 치아 해부학적 형태를 사전에 학습하는 것이 필요할 수 있다.

본 연구에서 건전한 치아만을 포함하는 악궁만이 이용된 것은 연구의 제한적 요소가 될 수 있다. 실제 임상에서는 환자분들의 악궁의 크기, 악궁의 폭, 무치악의 위치와 크기, 치아 형태 등이 다양하므로 본 연구 결과를 일반화하기 위해서는 다양한 참여자를 포함하는 임상연구가 필요하다. 그리고 구치부 영역에서만 선택적으로 영상정합의 정확도가 측정되었는데 향후 연구에서는 전체 영역의 평균적 오차 혹은 다른 영역에서의 정확도 분석 또한 필요할 것이다. 금속 보철물이 구강 내에 있는 경우 컴퓨터 단층촬영과 구강내 광학스캔의 영상의 질에 영향을 미칠 수 있으므로, 금속 보철물을 포함한 경우에서도 술자 경험과 영상정합 간의 관련성 평가가 필요하다. 추가적으로 제조사 간의 컴퓨터 소프트웨어의 정합 알고리즘의 차이에 따라라도 영상정합은 영향을 받을 수 있으므로 이와 관련된 연구도 미래에 수행되어야 할 것이다.

결론

매칭점 기반 자동정합을 이용한 구강 컴퓨터 단층촬영 영상과 광학스캔의 병합과정에서 술자의 영상정합의 경험 정도는 작업시간에는 영향을 주지만 정합결과의 정확성에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

References

1. Flügge T, Derksen W, Te Poel J, Hassan B, Nelson K, Wismeijer D. Registration of cone beam computed tomography data and intraoral surface scans - A prerequisite for guided implant surgery with CAD/CAM

- drilling guides. *Clin Oral Implants Res* 2017;28:1113-8.
2. Lee DH, An SY, Hong MH, Jeon KB, Lee KB. Accuracy of a direct drill-guiding system with minimal tolerance of surgical instruments used for implant surgery: a prospective clinical study. *J Adv Prosthodont* 2016;8:207-13.
3. Widmann G, Bale RJ. Accuracy in computer-aided implant surgery-a review. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2006;21:305-13.
4. Lin X, Chen T, Liu J, Jiang T, Yu D, Shen SG. Point-based superimposition of a digital dental model on to a three-dimensional computed tomographic skull: an accuracy study in vitro. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2015;53:28-33.
5. Rangel FA, Maal TJJ, de Koning MJJ, Bronkhorst EM, Bergé SJ, Kuijpers-Jagtman AM. Integration of digital dental casts in cone beam computed tomography scans-a clinical validation study. *Clin Oral Investig* 2018;22:1215-22.
6. He Y, Liang B, Yang J, Li S, He J. An iterative closest points algorithm for registration of 3D laser scanner point clouds with geometric features. *Sensors (Basel)* 2017;17:1862.
7. Almukhtar A, Ju X, Khambay B, McDonald J, Ayoub A. Comparison of the accuracy of voxel based registration and surface based registration for 3D assessment of surgical change following orthognathic surgery. *PLoS One* 2014;9:e93402.
8. Xie Z, Xu S, Li X. A high-accuracy method for fine registration of overlapping point clouds. *Image Vis Comput* 2010;28:563-70.
9. Cheng L, Tong L, Li M, Liu Y. Semi-automatic registration of airborne and terrestrial laser scanning data using building corner matching with boundaries as reliability check. *Remote Sens* 2013;5:6260-83.
10. Choi YD, Mai HN, Mai HY, Ha JH, Li LJ, Lee DH. The effects of distribution of image matched fiducial markers on accuracy of computer-guided implant surgery. *J Prosthodont* 2020;29:409-14.
11. Jamjoom FZ, Kim DG, Lee DJ, McGlumphy EA, Yilmaz B. Effect of length and location of edentulous area on the accuracy of prosthetic treatment plan incorporation into cone-beam computed tomography scans. *Clin Implant Dent Relat Res* 2018;20:300-

- 7.
12. Mai HY, Lee DH. Impact of matching point selections on image registration accuracy between optical scan and computed tomography. *Biomed Res Int* 2020;2020:3285431.
13. Akyalcin S, Dyer DJ, English JD, Sar C. Comparison of 3-dimensional dental models from different sources: diagnostic accuracy and surface registration analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013;144:831-7.
14. Woo HW, Mai HN, Lee DH. Comparison of the accuracy of image registration methods for merging optical scan and radiographic data in edentulous jaws. *J Prosthodont* 2020;29:707-11.
15. Kozunov VV, West TO, Nikolaeva AY, Stroganova TA, Friston KJ. Object recognition is enabled by an experience-dependent appraisal of visual features in the brain's value system. *Neuroimage* 2020;221:117143.

술자의 영상정합의 경험이 컴퓨터 단층촬영과 광학스캔 영상 간의 정합 정확성과 작업시간에 미치는 영향

마이항나¹·이두형^{1,2*}

경북대학교 ¹치의학중개연구소, ²치과대학 치과보철학교실

목적: 본 연구의 목적은 컴퓨터 단층촬영과 광학스캔 영상의 정합에서 술자의 경험이 정합의 정확성과 소요시간에 미치는 영향을 조사하는 것이다. **재료 및 방법:** 치아결손이 없는 성인 악궁의 컴퓨터 단층촬영과 광학스캔 영상(IDC S1, Amann Girrbach, Koblah, Austria)이 수집되었다. 두 영상간의 영상정합이 임플란트 진단 소프트웨어(Implant Studio, 3Shape, Copenhagen, Denmark)에서 점 기반 자동매칭 방식으로 행해졌다. 영상정합 경험자 군과 미경험자 군으로 나누어 진행되었으며 작업시간이 기록되었다(군당 15명). 각 군의 영상 정합 정확성은 구치부에서의 선형 오차값으로 측정되었다. 정확성 값과 작성시간의 통계적 비교 분석을 위해 유의수준 0.05에서 독립표본 t검정이 이용되었다. **결과:** 영상정합의 선형오차값은 경험자 군과 미경험자 군 간에 통계적인 차이가 없었다. 영상정합에 소요한 시간은 경험자 군이 미경험자 군에 비해 유의하게 짧았다($P = .007$). **결론:** 술자의 영상정합의 경험의 차이는 점 기반 자동정합이 사용된 경우 정합 정확성에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 경험자에서 정합에 소요된 시간은 짧았다. (대한치과보철학회지 2021;59:299-304)

주요단어

정확성; 컴퓨터 단층촬영; 경험; 영상정합; 광학스캔; 작업시간

교신저자 이두형
41940 대구 중구 달구벌대로 2175
경북대학교 치과대학 치과보철학교실
053-600-7651,
dewylee@knu.ac.kr

원고접수일 2021년 3월 25일
원고최종수정일 2021년 6월 7일
원고채택일 2021년 6월 14일

© 2021 대한치과보철학회
© 이 글은 크리에이티브 커먼즈
코리아 저작자표시-비영리
4.0 대한민국 라이선스에
따라 이용하실 수 있습니다.