3차원 레이저 스캔영상 채득 시 스캔각도와 횟수에 따른 정확도

이경민[a] · 송효영[a] · 이기헌[b] · 황현식[c]

본 연구는 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 안면 입체영상을 재구성할 때 스캔각도와 횟수에 따른 입체영상의 정확도를 평가하고자 시행되었다. 사람의 얼굴형상을 한 두부 마네킹 10개를 대상으로 안면에 마커를 부착하고 비접촉식 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 정면, 정면에 대해 각각 좌우 20도, 45도, 60도 측방면을 스캔하고 좌우 20도 측방면을 스캔한 2가지 영상, 정면과 좌우 20도 측방면을 스캔한 3가지 영상, 좌우 45도 측방면을 스캔한 2가지 영상, 정면과 좌우 45도 측방면을 스캔한 3가지 영상, 정면과 좌우 60도 측방면을 스캔한 3가지 영상, 정면과 좌우 20도, 60도 측방면을 스캔한 5가지 영상 등 6가지 방법으로 3차원 역설계 소프트웨어 프로그램을 이용하여 재구성한 다음 각 방법에 따른 입체영상에서 마커간 거리를 측정하고 마네킹에서의 실측치와 비교하였다. 마네킹 실측치에 대한 레이저 스캔영상 계측치의 확대율은 0.14 - 0.26%로 나타났다. 좌우 20도 측방면을 스캔한 경우, 정면과 좌우 20도 측방면을 스캔한 경우와 좌우 45도 측방면을 스캔한 경우는 여러 계측치가 실측치와 차이를 보인 반면, 정면과 좌우 45도 혹은 정면과 좌우 60도 측방면을 스캔한 경우와 정면과 좌우 20도와 60도를 스캔한 경우는 한 계측치(Pn-Pg')를 제외한 모든 계측항목에서 실측치와 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 본 연구 결과는 스캔각도와 횟수가 안면 입체영상의 정확도에 영향을 미치는 것을 의미하며 정확한 재구성을 위해서는 좌우 45도 이상의 측방면을 스캔하는 것이, 그리고 정면을 포함하여 최소 3개의 영상을 이용하여 합성하는 것이 바람직함을 시사하였다. (**대치교정지** 2011;41(2):76-86)

주요 단어: 레이저 스캐너, 스캔각도, 스캔횟수

서론

최근 3차원 영상제작을 위한 기술과 장비의 발달로 전산단층촬영(computed tomography), 3차원 레이저 스캔, 3차원 카메라 등의 방법이 두개안면영역의 분석 및 진단에 이용되고 있다.[1] 3차원 레이저 스캔은 저출력 레이저와 CCD 카메라를 이용하여 물체 표면의 3차원 영상 정보를 얻을 수 있는 방법으로 인체에 안전한 클래스 1 레이저(FDA)를 광원으로 사용하며 오토 포커싱의 기능과 함께 조작이 편리해짐에 따라 특히 안면 연조직 연구에 이용되고 있다.

Kusnoto와 Evans[2]는 12개 계측점을 표시한 안면 석고모형을 시간차 및 거리차를 두고 레이저 스캔하여 얻은 데이터를 실제 석고모형 상에서 측정한 실측치와 비교하여 레이저 스캔의 정확성을 보고하였고, Kau 등[3,4]은 시간차를 두고 반복 촬영하여 얻은 실제 환자의 안면 입체영상이 시간경과에 관계없이 재현 가능함을 보고하였다. 나아가 Baik 등[5]은 3차원 레이저 스캔으로 얻은 안면 입체영상에서 재현성이 높은 계측점 설정이 가능함을 보고하여 레이저 스캔의 임상적용 가능성을 제시하였다. 그 외에도 3차원 레이저 스캔으로 안면 입체영상의 정상 기준모델을 제시하거나,[6-9] 환자의 성장을 평가하고,[10,11] 교정치료 전후 비교[12-14] 그리고 악교정 수술 전후 비교[15,16] 등 레이저 스캔영상을 임상에 이용하려는 시도가 계속되고 있다.

[a]대학원생, [b]부교수, [c]교수, 전남대학교 치의학전문대학원 치의학연구소, 2단계 BK21 연구사업단, 교정학교실.
*교신저자: **황현식**.*
광주시 북구 용봉동 300번지 전남대학교 치의학전문대학원 교정학교실.
062-530-5656; e-mail, hhwang@chonnam.ac.kr.
원고접수일: 2011년 1월 10일 / 원고최종수정일: 2011년 2월 28일 / 원고채택일: 2011년 3월 3일.
DOI:10.4041/kjod.2011.41.2.76

3차원 레이저 스캔의 효율적인 임상적용을 위해서는 스캔방법에 대한 규격화가 필요하다. Kau 등[3,4,6,8,10,15]과 Moss 등[9,14]은 안면 정중선에 대해 좌우 20도 측방에서, Ferrario 등[17]은 좌우 45도 측방에서 스캔한 2개의 영상으로 안면 입체영상을 재구성하였고, Baik 등,[5] Kusnoto와 Evans,[2] Choi 등[18]은 정면과 좌우 45도 측방에서 스캔한 3개의 영상으로 안면 입체영상을 재구성하였다. 이처럼 연구마다 서로 다른 각도와 횟수로 스캔하여 안면 입체영상을 재구성하고 있으나 정확한 영상 채득을 위해서는 스캔각도나 횟수에 대한 규격화가 필요한 실정이다.

본 연구는 두부 마네킹을 이용하여 안면부에 표식이 가능한 마커를 부착하고 3차원 레이저 스캔의 각도와 횟수를 변화시켜가며 재구성한 각각의 안면 입체영상의 계측치와 마네킹의 실측치를 비교 분석함으로써 3차원 레이저 스캔방법에 따른 안면 입체영상의 정확도를 평가하고자 시도되었다.

연구방법

연구재료

본 연구는 사람의 얼굴 형상을 갖고 있으면서 움직임이나 형태변화 없이 일정한 자세를 유지할 수 있는 서로 다른 형태의 두부 마네킹 10개를 연구재료로 사용하였다.

연구방법

마커부착

빨간색으로 X 표시를 한 직경 3.0 mm의 흰색 원형 스티커를 마커로 사용하여 중앙과 좌우 이마 부위(forehead area, F); 미간 부위(glabella area, G); 좌우 눈 사이 부위(soft tissue nasion area, N'); 좌우 외측 눈꼬리(exocanthion area, Ex); 좌우 광대뼈 부위(zygion area, Zy); 좌우 볼 부위(cheek area, Ck); 코끝(pronasale area, Pn); 윗입술 부위(upper lip area, UL); 아래입술 부위(lower lip area, LL); 좌우 입꼬리(cheilion area, Ch); 턱끝(soft tissue pogonion area, Pg'); 좌우 하악각(soft tissue gonion area, Go'); 좌우 귓구멍 전방부위(tragus area, Tra) 등 마네킹의 안면부에 부착하였다 (Fig 1).

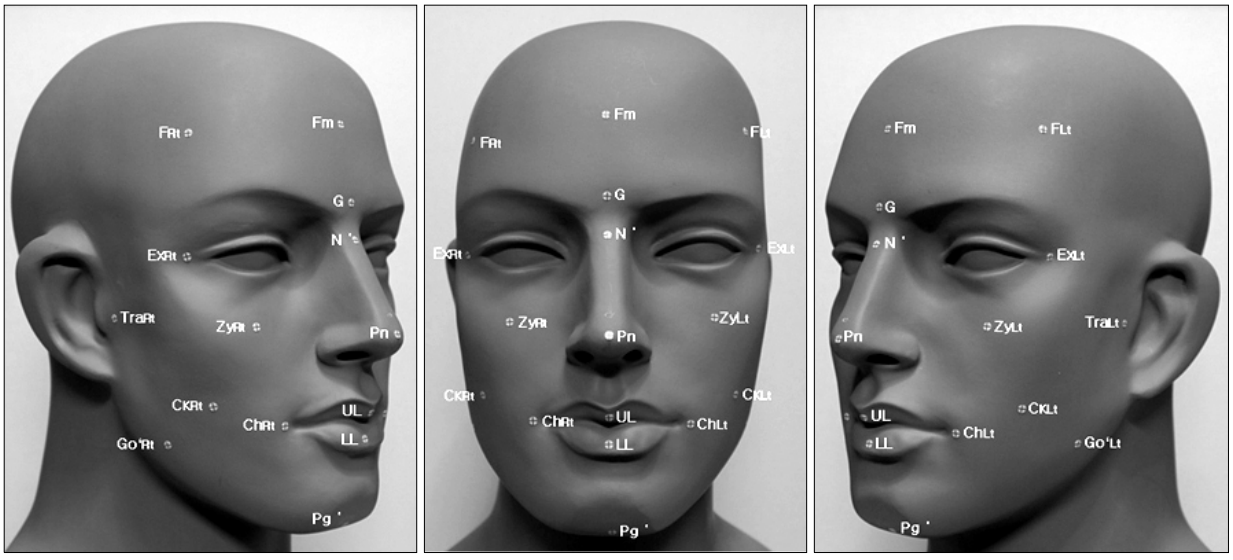


Fig 1. The positions of the facial markers used in this study: F_{Rt}, right area of forehead; F_{Lt}, left area of forehead; F_m, middle area of forehead; G, glabella; N', soft tissue nasion; Pn, pronasale; Ex_{Rt}, right exocanthion; Ex_{Lt}, left exocanthion; Zy_{Rt}, right zygion; Zy_{Lt}, left zygion; Ck_{Rt}, right cheek; Ck_{Lt}, left cheek; Ch_{Rt}, right cheilion; Ch_{Lt}, left cheilion; UL, upper lip; LL, lower lip; Go'_{Rt}, right soft tissue gonion; Go'_{Lt}, left soft tissue gonion; Pg', soft tissue pogonion; Tra_{Rt}, right tragus; Tra_{Lt}, left tragus.

3차원 레이저 스캔영상 채득 및 안면 입체영상 재구성

3차원 레이저 스캔영상의 채득은 비접촉식 레이저 스캐너(Vivid 910, Minolta, Tokyo, Japan)를 이용하였다. 두부 마네킹을 고정하고 원하는 각도로 회전하여 스캔하기 위해 각도기가 하방에 위치된 rotator를 제작한 후 레이저 스캐너와 rotator 사이를 90 cm가 되도록 하여[3,18] 각 마네킹의 정면, 정면에 대해 각각 좌우 20도, 45도, 60도 측방면 등 총 7방향에서 스캔하였다 (Fig 2).

마네킹 당 7방향에서 채득된 레이저 스캔영상을 3차원 역설계 소프트웨어 프로그램(RapidForm^{TM} 2006, Inus, Seoul, Korea)을 이용하여 다음과 같은 6가지 방법으로 재구성하여 총 60개의 안면 입체영상을 제작하였다.

1) 제1방법: 마네킹 정면에 대해 좌우 20도 측방면을 스캔한 2가지 영상을 이용하여 하나의 안면 입체영상 재구성

2) 제2방법: 마네킹 정면과 좌우 20도 측방면을 스캔한 3가지 영상을 이용하여 하나의 안면 입체영상 재구성

3) 제3방법: 마네킹 정면에 대해 좌우 45도 측방면을 스캔한 2가지 영상을 이용하여 하나의 안면 입체영상 재구성

4) 제4방법: 마네킹 정면과 좌우 45도 측방면을 스캔한 3가지 영상을 이용하여 하나의 안면 입체영상 재구성

5) 제5방법: 마네킹 정면과 좌우 60도 측방면을 스캔한 3가지 영상을 이용하여 하나의 안면 입체영상 재구성

6) 제6방법: 마네킹 정면과 좌우 20도와 60도 측방면을 스캔한 5가지 영상을 이용하여 하나의 안면 입체영상 재구성

마네킹과 안면 입체영상의 각 마커간 거리 계측

마네킹의 실측치는 Pn-F_m, Pn-F_{Rt}, Pn-F_{Lt}, Pn-G, Pn-N', Pn-Ex_{Rt}, Pn-Ex_{Lt}, Pn-Zy_{Rt}, Pn-Zy_{Lt}, Pn-Ck_{Rt}, Pn-Ck_{Lt}, Pn-Ch_{Rt}, Pn-Ch_{Lt}, Pn-UL, Pn-LL, Pn-Pg', Pn-Go'_{Rt}, Pn-Go'_{Lt}, Pn-Tra_{Rt}, Pn-Tra_{Lt}, F_{Rt}-F_{Lt}, Ex_{Rt}-Ex_{Lt}, Zy_{Rt}-Zy_{Lt}, Ck_{Rt}-Ck_{Lt}, Ch_{Rt}-Ch_{Lt}, Go'_{Rt}-Go'_{Lt} 등 26개의 계측항목을 디지털 켈리퍼(Mitutoyo, Japan)를 이용하여 한 명의 검사자가 2주 간격으로 2회에 걸쳐 0.01 mm 단위로 측정하여 그 평균치를 사용하였다 (Fig 3).

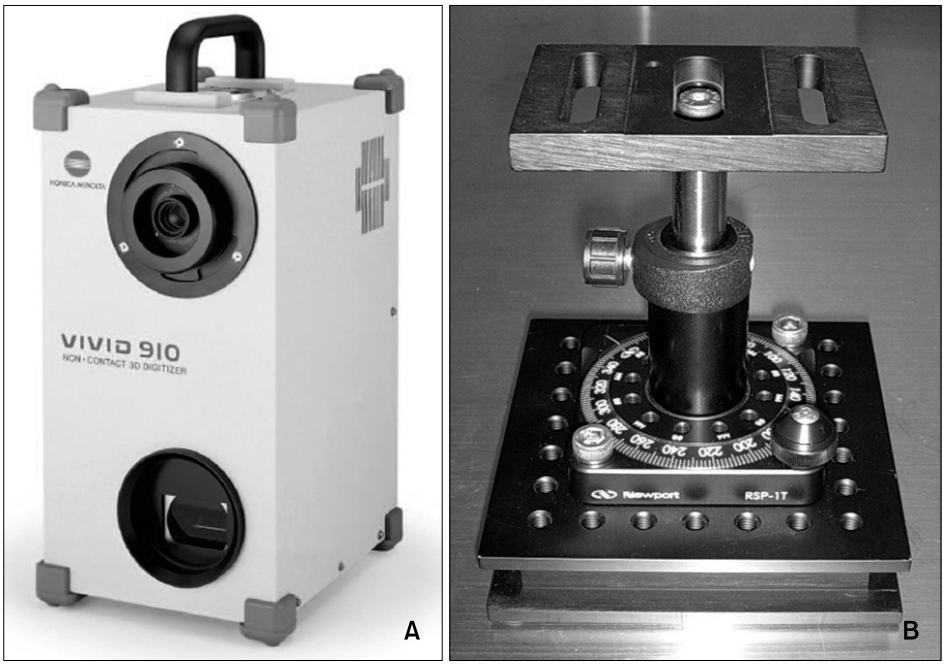


Fig 2. The laser scanner and rotator used in this study. **A**, Vivid 910 3D laser scanner (Minolta, Tokyo, Japan); **B**, rotator fabricated for this study. Protractor is attached at the base of the rotator.

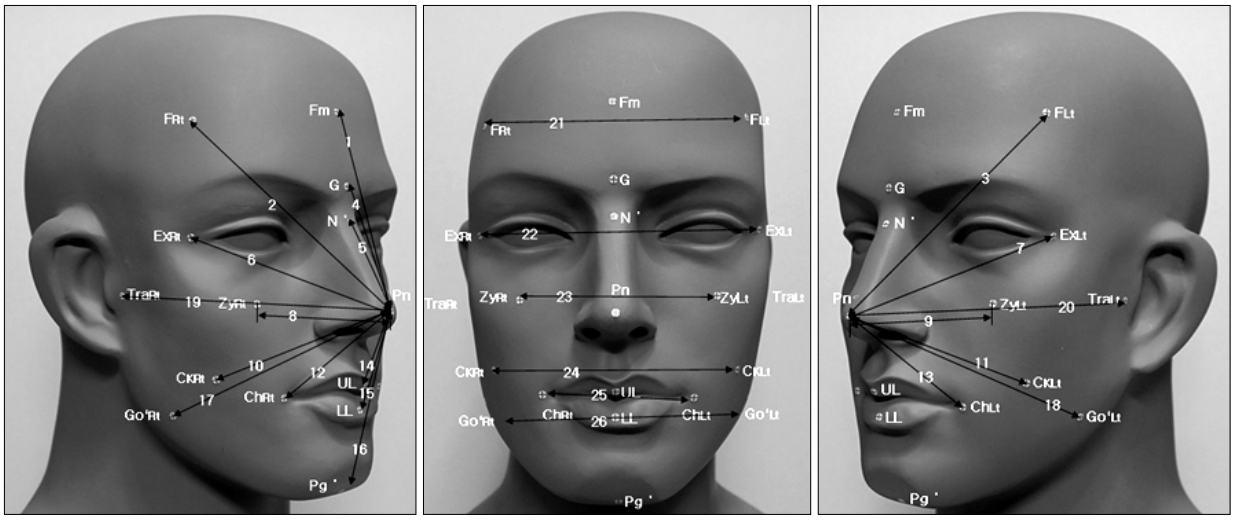


Fig 3. Linear measurements used in this study: 1, Pn-F_m; 2, Pn-F_{Rt}; 3, Pn-F_{Lt}; 4, Pn-G; 5, Pn-N'; 6, Pn-Ex_{Rt}; 7, Pn-Ex_{Lt}; 8, Pn-Zy_{Rt}; 9, Pn-Zy_{Lt}; 10, Pn-Ck_{Rt}; 11, Pn-Ck_{Lt}; 12, Pn-Ch_{Rt}; 13, Pn-Ch_{Lt}; 14, Pn-UL; 15, Pn-LL; 16, Pn-Pg'; 17, Pn-Go'_{Rt}; 18, Pn-Go'_{Lt}; 19, Pn-Tra_{Rt}; 20, Pn-Tra_{Lt}; 21, F_{Rt}-F_{Lt}; 22, Ex_{Rt}-Ex_{Lt}; 23, Zy_{Rt}-Zy_{Lt}; 24, Ck_{Rt}-Ck_{Lt}; 25, Ch_{Rt}-Ch_{Lt}; 26, Go'_{Rt}-Go'_{Lt}.

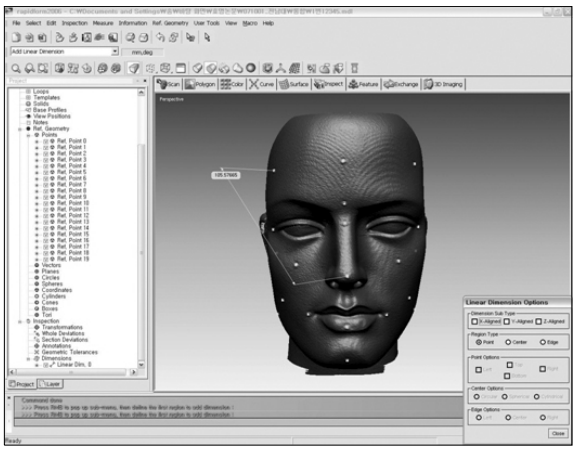


Fig 4. Integrated 3D laser scan images were created in RapidForm software, and measurements were obtained using the 3D measure function.

10개의 마네킹에서 6가지 방법으로 재구성한 총 60개의 입체영상에서 마커의 중심위치(X의 교차점)를 찾고 마네킹에서 측정한 동일 계측항목에 대해 3차원 역설계 소프트웨어 프로그램의 계측기능을 이용하여 한 명의 검사자가 2주 간격으로 2회에 걸쳐 측정하여 그 평균치를 사용하였다 (Fig 4).

통계 및 분석

본 연구에서는 통계처리를 위해 SPSS version 12.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) 프로그램을 이용하였다. 각 계측항목에 대한 마네킹의 실측치와 입체영상의 계측치의 차이를 절대값으로 구하고 평균과 표준편차 및 최대값과 최소값을 구하고 도표를 작성하였다. 레이저 스캔각도와 횟수에 따라 안면 입체영상의 정확도에 차이가 있는지 알아보기 위해 마네킹에서 측정한 26개 계측항목의 실측치와 입체영상에서 측정한 동일 계측항목의 계측치를 Kolmogorov-Smirnov 및 Shapiro-Wilk 정규성 검정 후 각각 paired *t*-test를 시행하여 비교분석하였다. 또한 각 계측항목에 대한 마네킹의 실측치와 입체영상 계측치 간 차이를 실측치로 나누어 100을 곱한 값을 확대율(%)로 하여[5] 평균을 구해 각 방법에 대한 정확성을 비교분석하였다. 부가적으로 Bland-Altman plot을 적용하여 x축은 각 계측항목에 대한 마네킹의 실측치와 입체영상의 계측치와의 평균을, y축은 두 수치의 차이값을 도표화하여 차이의 분포와 허용범위를 확인하였다.

연구성적

3차원 레이저 스캔 시 스캔각도와 횟수에 따른 입체영상의 정확도를 평가하기 위해 설정한 26가지

계측항목에 대해 마네킹에서 측정한 실측치와 6가지 방법으로 재구성된 안면 입체영상에서 측정한 계측치의 평균과 표준편차를 산출하여 Table 1과 같은 결과를 얻었다. 입체영상을 재구성한 모든 방법에서 이마 부위, 눈 부위, 뺨 부위 및 입술 부위를 포함한 계측치(Pn-F, Pn-G, Pn-N, Pn-Ex, Pn-Zy, Pn-Ck, Pn-Ch, Pn-UL, Pn-LL)는 실측치와 유의한 차이를 보이지 않았으나 턱끝을 포함한 계측치(Pn-Pg')는 실측치보다 유의하게 크게 나타났다.

2개의 스캔영상을 이용하여 입체영상을 재구성한 경우인 제1방법과 제3방법 중 정면에 대해 좌우 20도 측방면 스캔영상을 이용한 경우(제1방법)에서는 코끝에서 하악각 부위와 귓구멍 전방부위, 턱끝까지의 계측치($Pn\text{-}Go'_{Rt}$, $Pn\text{-}Go'_{Lt}$, $Pn\text{-}Tra_{Rt}$, $Pn\text{-}Tra_{Lt}$, Pn-Pg')와 안면의 양측성 계측치($Ex_{Rt}\text{-}Ex_{Lt}$, $Ck_{Rt}\text{-}Ck_{Lt}$, $Go'_{Rt}\text{-}Go'_{Lt}$)가 실측치보다 유의하게 크게 나타났으

Table 1. Measurements of each integrated 3D laser scan image and their comparison with the physical measurements of the manikins (mm) (n = 10)

	Control*	3D laser scan images					
		Method 1	Method 2	Method 3	Method 4	Method 5	Method 6
	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean± SD	Mean ± SD
$Pn\text{-}F_m$	68.32 ± 7.84	68.44 ± 7.91	68.45 ± 7.86	68.44 ± 7.87	68.46 ± 7.91	68.45 ± 7.89	68.45 ± 7.84
$Pn\text{-}F_{Rt}$	90.99 ± 9.82	91.00 ± 9.79	91.04 ± 9.76	91.09 ± 9.79	91.06 ± 9.83	91.10 ± 9.84	91.05 ± 9.85
$Pn\text{-}F_{Lt}$	88.74 ± 9.93	89.01 ± 9.00	89.03 ± 10.00	89.00 ± 10.06	88.97 ± 10.04	88.97 ± 9.99	88.99 ± 10.06
Pn-G	46.47 ± 7.30	46.60 ± 7.36	46.62 ± 7.37	46.63 ± 7.37	46.63 ± 7.35	46.65 ± 7.34	46.59 ± 7.41
Pn-N′	33.26 ± 7.98	33.37 ± 8.05	33.31 ± 8.07	33.42 ± 8.08	33.34 ± 8.13	33.38 ± 8.12	33.30 ± 8.09
$Pn\text{-}Ex_{Rt}$	69.58 ± 7.84	69.69 ± 7.94	69.72 ± 7.81	69.70 ± 7.89	69.70 ± 7.84	69.60 ± 7.92	69.65 ± 7.82
$Pn\text{-}Ex_{Lt}$	69.25 ± 7.89	69.41 ± 7.87	69.39 ± 7.89	69.35 ± 7.95	69.35 ± 7.95	69.33 ± 7.97	69.35 ± 7.95
$Pn\text{-}Zy_{Rt}$	45.22 ± 5.05	45.24 ± 5.12	45.27 ± 5.12	45.31 ± 5.00	45.24 ± 5.09	45.27 ± 5.06	45.20 ± 5.14
$Pn\text{-}Zy_{Lt}$	45.98 ± 4.62	46.04 ± 4.55	46.06 ± 4.55	46.10 ± 4.63	46.05 ± 4.56	45.97 ± 4.56	46.09 ± 4.54
$Pn\text{-}Ck_{Rt}$	63.70 ± 4.66	63.78 ± 4.75	63.79 ± 4.67	63.77 ± 4.57	63.78 ± 4.65	63.89 ± 4.75	63.83 ± 4.78
$Pn\text{-}Ck_{Lt}$	63.93 ± 4.32	64.07 ± 4.39	64.10 ± 4.43	64.08 ± 4.47	64.07 ± 4.49	64.00 ± 4.57	63.98 ± 4.57
$Pn\text{-}Ch_{Rt}$	48.81 ± 5.82	48.93 ± 5.88	48.92 ± 5.86	48.92 ± 5.85	48.96 ± 5.86	48.89 ± 5.85	48.95 ± 5.86
$Pn\text{-}Ch_{Lt}$	48.83 ± 5.95	48.95 ± 6.05	48.97 ± 6.09	48.96 ± 6.05	49.00 ± 6.10	48.92 ± 6.15	49.01 ± 6.05
Pn-UL	27.77 ± 3.74	27.75 ± 3.80	27.83 ± 3.78	27.79 ± 3.77	27.75 ± 3.80	27.70 ± 3.84	27.81 ± 3.76
Pn-LL	39.38 ± 3.75	39.52 ± 3.95	39.53 ± 3.92	39.54 ± 3.88	39.49 ± 3.89	39.47 ± 3.89	39.50 ± 3.76
Pn-Pg′	62.10 ± 5.82	62.55 ± 5.89†	62.58 ± 5.85†	62.73 ± 5.75†	62.55 ± 5.81†	62.52 ± 5.87†	62.60 ± 5.83†
$Pn\text{-}Go'_{Rt}$	82.43 ± 9.18	82.84 ± 9.34†	82.86 ± 9.27†	82.54 ± 9.28	82.44 ± 9.28	82.45 ± 9.33	82.47 ± 9.28
$Pn\text{-}Go'_{Lt}$	81.99 ± 10.16	82.49 ± 10.12†	82.51 ± 10.15†	82.17 ± 10.22	82.16 ± 10.25	82.06 ± 10.37	82.10 ± 10.31
$Pn\text{-}Tra_{Rt}$	86.30 ± 14.25	86.59 ± 14.47†	86.58 ± 14.32§	86.40 ± 14.35	86.38 ± 14.38	86.27 ± 14.36	86.30 ± 14.39
$Pn\text{-}Tra_{Lt}$	87.08 ± 15.58	87.46 ± 15.34†	87.49 ± 15.36†	87.23 ± 15.39	87.23 ± 15.34	87.24 ± 15.49	87.25 ± 15.51
$F_{Rt}\text{-}F_{Lt}$	99.02 ± 7.76	99.08 ± 7.79	99.06 ± 7.76	99.19 ± 7.71†	99.13 ± 7.75	99.13 ± 7.72	99.12 ± 7.73
$Ex_{Rt}\text{-}Ex_{Lt}$	100.44 ± 5.98	100.62 ± 5.92†	100.52 ± 5.91	100.65 ± 5.98†	100.54 ± 5.99	100.55 ± 6.03	100.52 ± 5.91
$Zy_{Rt}\text{-}Zy_{Lt}$	71.73 ± 5.32	71.74 ± 5.34	71.79 ± 5.35	71.96 ± 5.26†	71.85 ± 5.26	71.79 ± 5.11	71.76 ± 5.25
$Ck_{Rt}\text{-}Ck_{Lt}$	94.91 ± 3.56	95.13 ± 3.52†	95.07 ± 3.53	95.22 ± 3.55†	95.10 ± 3.55	94.97 ± 3.53	95.03 ± 3.54
$Ch_{Rt}\text{-}Ch_{Lt}$	55.05 ± 8.12	55.17 ± 8.10	55.19 ± 8.10	55.22 ± 8.13	55.20 ± 8.04	55.16 ± 8.14	55.13 ± 8.10
$Go'_{Rt}\text{-}Go'_{Lt}$	100.28 ± 7.35	100.49 ± 7.36†	100.49 ± 7.39†	100.51 ± 7.32†	100.40 ± 7.35	100.40 ± 7.39	100.41 ± 7.44

SD, Standard deviation. *The control was obtained from physical measurements of manikins; †$p < 0.05$; ‡$p < 0.01$; §$p < 0.001$.

며, 정면에 대해 좌우 45도 측방면 스캔영상을 이용한 경우(제3방법)에서는 Pn-Pg'와 안면의 양측성 계측치(F_{Rt}-F_{Lt}, Ex_{Rt}-Ex_{Lt}, Zy_{Rt}-Zy_{Lt}, Ck_{Rt}-Ck_{Lt}, Go'_{Rt}-Go'_{Lt})가 실측치보다 유의하게 크게 나타났다.

3개의 스캔영상을 이용하여 입체영상을 재구성한 경우인 제2, 4, 5의 세 방법 중 정면과 정면에 대해 좌우 20도 측방면 스캔영상을 이용한 경우(제2방법)에서는 코끝에서 하악각 부위와 귓구멍 전방부위, 턱끝까지의 계측치(Pn-Go'_{Rt}, Pn-Go'_{Lt}, Pn-Tra_{Rt}, Pn-Tra_{Lt}, Pn-Pg')와 안면의 양측성 계측항목 중 좌우 하악각 부위 간 계측치(Go'_{Rt}-Go'_{Lt})가 실측치보다 크게 나타났으나, 정면과 20도보다 더 측방인 좌우 45도 혹은 60도 측방면 스캔영상을 이용한 경우(제4, 5방법)에서는 Pn-Pg'를 제외한 모든 계측치에서 실측치와 유의한 차이를 보이지 않았다. 정면과 정면에 대해 좌우 20도와 60도 측방면을 스캔한 5개의 영상을 이용하여 재구성한 경우(제6방법)에는 Pn-Pg'를 제외한 모든 계측치에서 실측치와 유의한 차이를 보이지 않았다 (Table 1). 제4, 5, 6방법에서 실측치와 통계적으로 유의한 차이를 보인 Pn-Pg' 항목의 경우 Bland-Altman plot을 분석한 결과 측정값들이 Bland-Altman plot의 허용범위 내에 있었다 (Fig 5).

각 계측항목에 대한 마네킹의 실측치와 각 입체영상의 계측치 차이를 절대값으로 구한 결과, 정면에 대해 좌우 20도 측방면을 스캔한 경우(제1방법) 0.26 mm, 정면과 좌우 20도 측방면을 스캔한 경우(제2방법) 0.27 mm, 좌우 45도 측방면을 스캔한 경우(제3방법) 0.25 mm, 정면과 좌우 45도 측방면을 스캔한 경우(제4방법) 0.23 mm, 정면과 좌우 60도 측방면을 스캔한 경우(제5방법) 0.23 mm, 정면과 좌우 20도와 60도 측방면을 스캔한 경우(제6방법) 0.22 mm의 차이를 보였다 (Fig 6).

한편, 마네킹에 대한 입체영상의 평균확대율은 정면에 대해 좌우 20도 측방면을 스캔한 경우(제1방법) 0.24%, 정면과 좌우 20도 측방면을 스캔한 경

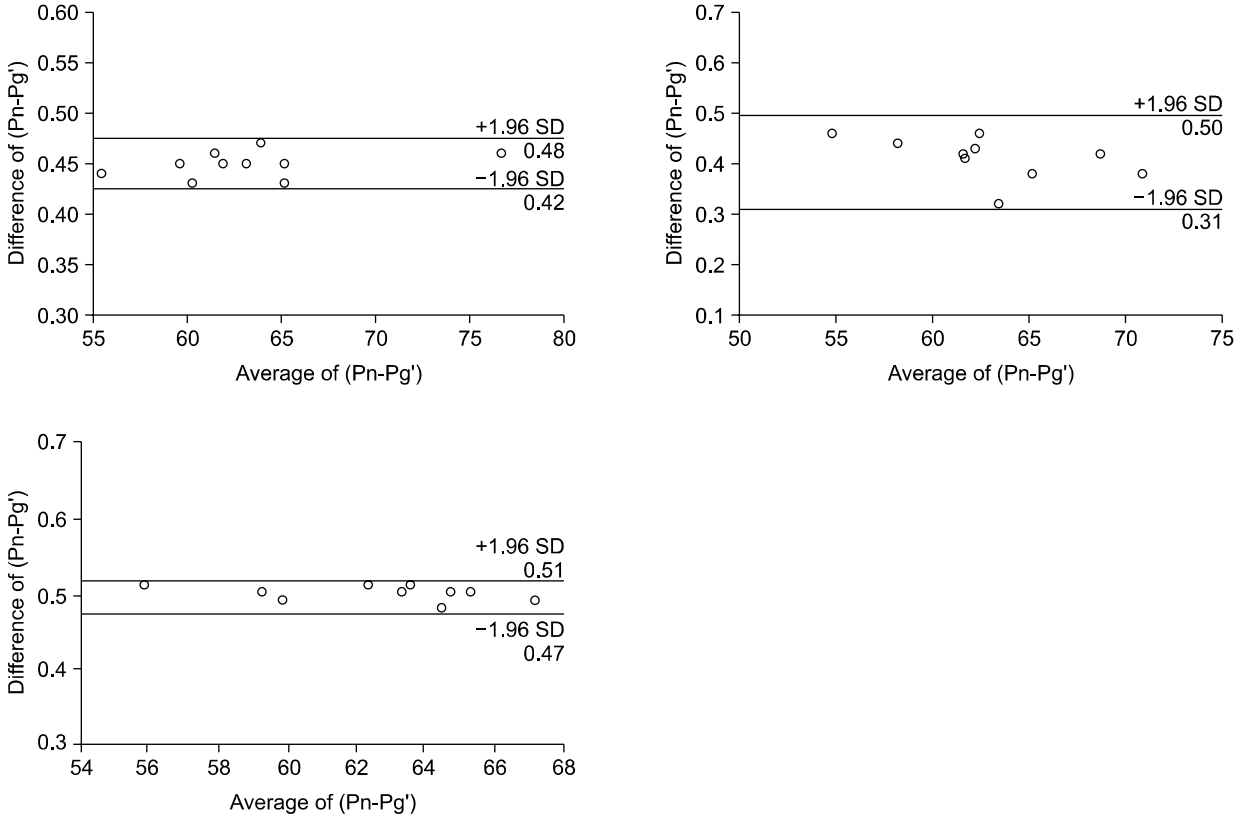


Fig 5. Bland-Altman plots for variations in (Pn-Pg') of Methods 4, 5, and 6. The x-axis shows the average of each integrated 3D laser scan image with physical measurements of manikins, whereas the y-axis represents the difference between the 2 measurements. The limits of agreement are indicated by horizontal lines.

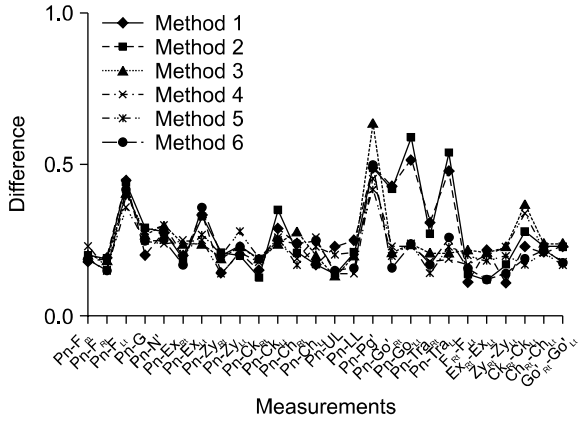


Fig 6. Differences between each integrated 3D laser scan image and the physical measurements of the manikins (mm).

우(제2방법) 0.24%, 좌우 45도 측방면을 스캔한 경우(제3방법) 0.26%, 정면과 좌우 45도 측방면을 스캔한 경우(제4방법) 0.19%, 정면과 좌우 60도 측방면을 스캔한 경우(제5방법) 0.14%, 정면과 좌우 20도, 60도 측방면을 스캔한 경우(제6방법) 0.17%로 나타나 제1, 2, 3방법의 경우는 0.25% 내외의 확대율을, 제4, 5, 6방법의 경우는 0.20% 미만의 비교적 작은 확대율을 보였다 (Table 2).

고찰

Broadbent[19]에 의해 소개된 두부방사선규격사진은 교정학에서 두개악안면영역의 성장 및 치열과의 관

Table 2. Mean magnification of each integrated 3D laser scan image in comparison to the physical measurements of manikins (%)

	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4	Method 5	Method 6
Pn-F_m	0.18	0.19	0.18	0.20	0.19	0.19
Pn-F_{Rt}	0.01	0.05	0.11	0.08	0.12	0.07
Pn-F_{Lt}	0.30	0.33	0.29	0.26	0.26	0.28
Pn-G	0.28	0.32	0.34	0.34	0.39	0.26
Pn-N′	0.33	0.15	0.48	0.24	0.36	0.12
Pn-Ex_{Rt}	0.16	0.20	0.17	0.17	0.03	0.01
Pn-Ex_{Lt}	0.23	0.20	0.14	0.14	0.12	0.14
Pn-Zy_{Rt}	0.04	0.11	0.20	0.04	0.11	−0.04
Pn-Zy_{Lt}	0.13	0.17	0.26	0.15	−0.02	0.24
Pn-Ck_{Rt}	0.13	0.14	0.11	0.13	0.11	0.06
Pn-Ck_{Lt}	0.22	0.27	0.23	0.22	0.11	0.08
Pn-Ch_{Rt}	0.25	0.23	0.23	0.31	0.16	0.29
Pn-Ch_{Lt}	0.25	0.29	0.27	0.35	0.18	0.37
Pn-UL	−0.07	0.22	0.07	−0.07	−0.25	0.14
Pn-LL	0.36	0.38	0.41	0.28	0.23	0.30
Pn-Pg′	0.72	0.77	1.01	0.72	0.68	0.81
Pn-Go'_{Rt}	0.50	0.52	0.13	0.01	0.02	0.05
Pn-Go'_{Lt}	0.61	0.63	0.22	0.21	0.09	0.13
Pn-Tra_{Rt}	0.34	0.32	0.12	0.09	−0.03	0.00
Pn-Tra_{Lt}	0.44	0.47	0.17	0.17	0.18	0.20
F_{Rt}-F_{Lt}	0.06	0.04	0.17	0.11	0.11	0.10
Ex_{Rt}-Ex_{Lt}	0.18	0.08	0.21	0.10	0.11	0.08
Zy_{Rt}-Zy_{Lt}	0.01	0.08	0.32	0.17	0.08	0.04
Ck_{Rt}-Ck_{Lt}	0.23	0.17	0.33	0.20	0.06	0.13
Ch_{Rt}-Ch_{Lt}	0.22	0.25	0.31	0.27	0.20	0.15
Go'_{Rt}-Go'_{Lt}	0.22	0.21	0.23	0.12	0.12	0.13
Total	0.24	0.26	0.26	0.19	0.14	0.17

계에 대한 분석, 교정치료의 진단과 치료결과의 평가 등 다양한 분야의 자료로 사용되고 있으며 규격화된 촬영과 분석방법에 대한 연구[20-24]가 계속되고 있다. 그러나 2차원 두부방사선규격사진으로는 두개악안면 형태의 3차원적인 분석과 안면 연조직 분석에 어려움이 있다. 최근 3차원 레이저 스캔이 이용됨에 따라 안면 연조직 부위의 3차원적인 분석과 진단이 가능해지고 있으며 이를 임상적으로 이용하려는 시도가 계속되고 있다.[6-16] 임상에서 레이저 스캔을 유용하게 적용하기 위해서는 스캐너와 피사체 간 스캔각도 그리고 스캔횟수에 대한 스캔방법의 규격화가 필요한 바 본 연구는 두부 마네킹을 이용하여 3차원 레이저 스캔의 각도와 횟수를 변화시켜가며 얻은 안면 입체영상의 계측치와 마네킹 상의 실측치를 비교하여 3차원 레이저 스캔방법에 따른 영상의 정확도를 평가하였다.

비접촉식 3차원 레이저 스캐너인 Vivid 910 (Minolta, Tokyo, Japan)은 1회 스캔 시 2.5초 이내의 시간이 소요되고 측정대상의 물체가 스캔영역 내 어느 곳에 위치하더라도 획득된 3차원 데이터가 실치수와 동일한 값을 얻을 수 있도록 하는 이미지 자동 보정기능과 오토 포커스 기능이 내장되어 촬영이 용이한 장점이 있다. 스캔횟수와 각도에 따른 정확한 비교연구를 위해서는 각 스캔 시 그 외 조건은 동일해야 하는 반면 실제 사람을 피사체로 이용할 경우 호흡과 연하 등으로 인한 움직임을 완전히 동일하게 할 수는 없으므로 본 연구에서는 마네킹을 이용하였다. 또한 촬영 시 마네킹의 두부자세를 일정하게 유지하고 동일한 위치에서 정확한 스캔각도를 얻기 위해 두부 마네킹을 고정하고 원하는 각도만큼 회전시켜가며 스캔할 수 있도록 하방에 각도기가 위치된 rotator를 제작하여 사용하였다.

RapidForm™ 2006 (Inus, Seoul, Korea) 프로그램은 iterative closest point (ICP) 알고리즘을 사용하는데 면과 면의 중복된 부분에서 반복적인 샘플링을 통해 가장 가까운 거리에 있는 점들을 찾은 후 컴퓨터 연산 과정에 의해 점간 거리의 일정한 기준치(threshold)를 결정하고 점간 거리가 기준치 이상이 되는 점(outlier)들을 통합과정에서 배제한 다음 best-fit point to surface 알고리즘을 통해 점 배제과정에서의 오차를 다시 확인해 나가는 식으로 3차원 스캔 데이터를 합성한다.[25] 이러한 영상합성을 위해 많은 수의 스캔영상이 이용되는 것이 보다 정확한 3차원 영상제작에 도움이 될 수 있을 것으로 예상되지만 어느 정도 개수의 스캔영상이 필요한지 그리고 같은 개수라 할지라도 어느 각도로 스캔한 영상이 정확도 증진에 도움이 되는지 알아보고자 본 연구를 시행하였다.

사용된 스캔영상 개수와 이용된 영상의 스캔각도에 따라 6가지 방법으로 입체영상을 제작한 다음 각 입체영상 계측치와 실측치를 비교한 결과, 모든 방법에서 실측치보다 큰 경향을 보였으며 0.14 - 0.26%의 확대율을 보였다. Baik 등[5]은 본 연구와 같은 3차원 레이저 스캔영상에서 본 연구 결과보다 다소 큰 평균 0.66%의 확대율을 보고하였는데 이는 계측항목의 차이, 사용된 마커의 차이에 기인한 것으로 생각된다.

또한 입체영상을 재구성한 모든 방법에서 이마 부위, 눈 부위, 뺨 부위 및 입술 부위가 포함된 계측치는 실측치와 유의한 차이를 보이지 않은 반면 턱끝이 포함된 Pn-Pg'의 계측치는 통계적으로 유의하게 크게 나타났다. 인체를 대상으로 정면과 좌우 45도 측방면을 스캔한 3가지 영상을 사용한 Choi 등[18]은 턱끝과 하악각 부위에서, 안면 석고모형을 대상으로 한 Kusnoto와 Evans[2]도 턱끝에서 그 값이 실측치보다 크게 나타났다고 했다. Choi 등[18]은 스캔이 진행되는 동안 발생하는 하안면 부위의 움직임이, Kusnoto와 Evans[2]는 스캔 시 소요되는 시간이 영상의 정확성에 영향을 미치는 것으로 보았다. 본 연구에서 사용된 두부 마네킹은 턱끝 부위가 뚜렷하게 돌출된 형태적 특징을 가지고 있어 마커가 턱끝의 가장 돌출된 전방부위보다 상대적으로 하방에 부착되는 경우 음영이 생겨 안면에 대해 수직으로 조사되는 레이저의 입력영역에서 벗어나게 되어 정확하게 스캔되지 않은 것으로 생각된다. 또 마네킹의 FH plane과 rotator의 회전판이 평행하게 위치되지 않은 채로 스캔되는 경우에도 턱끝 부위가 잘 나오지 않았을 것으로 생각된다. 따라서 정확한 안면 입체영상을 얻기 위해서는 턱끝 부위의 형태나 두부자세에 대한 고려가 필요하리라 생각된다. Ferrario 등[17]과 같이 레이저의 수직적인 조사각도와 Baik 등[7]이 시행했던 방법처럼 추가적인 스캔을 고려하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

정면에 대해 좌우 20도 측방면을 포함하여 입체영상을 재구성한 경우(제1방법, 제2방법)는 코끝에서 하악각 부위와 귓구멍 전방부위까지의 $Pn\text{-}Go'_{Rt}$, $Pn\text{-}Go'_{Lt}$, $Pn\text{-}Tra_{Rt}$, $Pn\text{-}Tra_{Lt}$ 계측치가 통계적으로 크게 나타났는데 이는 20도의 측방면 스캔 시 하악각 부위와 귓구멍 전방부위가 레이저의 입력영역에서 벗어나 마커 부위가 정확히 스캔되지 않은 것에 기

인한 것으로 보인다. 그러므로 하악각 부위 및 귓구멍 전방부위까지의 정확한 안면 입체영상을 얻기 위해서는 정면에서 20도보다 더 큰 각도로 측방면을 스캔하는 것이 필요함을 알 수 있었다. Kau 등[3,4,10,15]은 정면에 대해 좌우 20도 측방면 스캔영상을 이용하여 입체영상을 재구성하였는데 하악각 부위나 귓구멍 전방부위를 포함하지 않고 안면의 중앙부위에 가깝게 존재하는 내, 외측 눈꼬리 부위 및 코끝 부위의 계측점만을 사용하였다. 따라서 안면의 가장자리까지 포함하여 안면 입체영상을 재구성하기 위해서는 20도보다 큰 각도로 스캔하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

2개의 스캔영상으로 재구성한 경우 코끝에서 하악각 부위를 제외한 안면의 측면부위까지의 계측치는 실측치와 유의한 차이를 보이지 않았는데 이는 한 번의 측방면 스캔으로 이 부위의 마커들이 모두 포함되어 스캔되기 때문으로 이들 계측항목은 하나의 입체영상으로 재구성될 때 중첩면적의 크고 작음에 영향을 받지 않는 것이라 생각된다. 또한 가까운 거리에 있는 좌우 입꼬리 부위의 양측성 계측항목인 Ch_{Rt}-Ch_{Lt}의 계측치 역시 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다. 정면을 포함한 3개의 영상으로 재구성한 경우 중 정면과 정면에 대해 좌우 20도 측방면을 스캔한 경우(제2방법)는 코끝에서 하악각 부위와 귓구멍 전방부위, 턱끝까지의 Pn-Go'_{Rt}, Pn-Go'_{Lt}, Pn-Tra_{Rt}, Pn-Tra_{Lt}, Pn-Pg' 계측치가 실측치보다 크게 나타났으나, 정면과 좌우 45도 혹은 60도 측방면(제4, 5방법)을 스캔하여 재구성한 경우는 Pn-Pg'를 제외한 나머지 계측치에서 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 이들 결과는 하악각 부위 및 귓구멍 전방부위까지 정확한 안면 입체영상을 얻기 위해서는 20도보다 더 큰 각도로 측방면을 스캔하는 것이 바람직하며 충분한 중첩범위를 확보하기 위해서 정면을 포함한 스캔이 필요하다는 것을 시사한다. 정면을 포함하여 좌우 20도 측방면을 스캔하는 경우에서도 Go'_{Rt}-Go'_{Lt}의 계측치는 통계적으로 유의하게 크게 나타났는데 이는 하악각 부위가 레이저의 입력영역에서 벗어나 실측치와 차이가 커진 것으로 볼 수 있다. 정면과 정면에 대해 좌우 20도와 60도 측방면을 스캔한 5개의 영상을 사용한 경우(제6방법)는 Pn-Pg'의 계측치를 제외한 모든 계측항목에서 실측치와 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았고 이는 정면을 포함하여 좌우 45도 혹은 60도 측방면을 스캔한 3개의 영상을 사용한 경우(제4, 5방법)와 실측치를 비교한 결과와 동일하므로 입체영상을 재구성하기 위해서는 최소 3개의 스캔영상이 필요함을 알 수 있다. 6가지 방법으로 만들어진 입체영상의 계측치와 마네킹의 실측치와의 거리 차를 절대값으로 비교한 결과, 0.5 mm를 넘는 차이를 보였던 계측항목은 좌우 20도 혹은 45도 측방면을 스캔한 2개의 영상을 사용한 경우(제1, 3방법)와 정면을 포함하여 좌우 20도 측방면을 스캔한 3개의 영상을 사용한 경우(제2방법)에서 나타났다. 따라서 입체영상을 재구성하기 위해서는 최소 3개의 스캔영상이 필요하고 20도보다는 큰 각도로 좌우 측방면을 스캔하는 것이 필요하다고 생각된다.

본 연구는 레이저 스캔의 효율적인 임상적용을 위한 스캔방법에 대한 규격화를 위해 시행되었으며 정확한 입체영상을 위해서는 좌우 45도 이상의 측방면을 스캔하는 것이, 그리고 정면을 포함하여 최소 3회 스캔하는 것이 바람직함을 시사하였다. 그러나 본 연구는 각 스캔에서의 조건을 같게 하고자 마네킹을 대상으로 한 반면 실제 인체를 대상으로 하여 스캔한 경우에도 이와 같은 유의한 결과가 나오는지는 확실하지 않으므로 인체를 대상으로 한 추가연구가 필요하리라 생각된다.

결론

두부 마네킹 10개를 대상으로 비접촉식 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 스캔각도와 횟수를 변화시켜가며 재구성한 각각의 안면 입체영상에서의 계측치를 마네킹의 실측치와 비교분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 레이저 스캔영상 계측치는 마네킹 실측치보다 0.14 - 0.26% 크게 나타났다.
2. 좌측 및 우측 20도 또는 45도 측방 스캔한 2개의 영상을 이용한 경우와 정면 및 좌우 20도 스캔한 3개의 영상을 이용하여 합성영상을 제작한 경우 많은 계측치가 실측치보다 통계적으로 유의하게 큰 수치를 보였다.
3. 정면과 좌우 45도의 3개의 영상, 정면과 좌우 60도의 3개의 영상 그리고 정면과 좌우 20도와 60도의 5개의 영상을 이용하여 합성영상을 제작한 경우 Pn-Pg'를 제외한 모든 계측치에서 실측치와 유의한 차이를 보이지 않았다.

이상의 결과는 스캔각도와 횟수가 안면 입체영상

의 정확도에 영향을 미치는 것을 의미하며 정확한 안면 입체영상의 재구성을 위해서는 좌우 45도 이상의 측방면을 스캔하는 것이, 그리고 정면을 포함하여 최소 3개의 영상을 이용하여 합성하는 것이 바람직함을 시사하였다.

참고문헌

1. Mah J, Hatcher D. Current status and future needs in craniofacial imaging. Orthod Craniofac Res 2003;6(Suppl 1):10-6.
2. Kusnoto B, Evans CA. Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2002;122:342-8.
3. Kau CH, Richmond S, Zhurov AI, Knox J, Chestnutt I, Hartles F, et al. Reliability of measuring facial morphology with a 3-dimensional laser scanning system. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2005;128:424-30.
4. Kau CH, Richmond S, Savio C, Mallorie C. Measuring adult facial morphology in three dimensions. Angle Orthod 2006;76: 773-8.
5. Baik HS, Lee HJ, Jeon JM. A proposal of soft tissue landmarks for craniofacial analysis using three-dimensional laser scan imaging. Korean J Orthod 2006;36:1-13.
6. Kau CH, Zhurov A, Richmond S, Cronin A, Savio C, Mallorie C. Facial templates: a new perspective in three dimensions. Orthod Craniofac Res 2006;9:10-7.
7. Baik HS, Jeon JM, Lee HJ. A study of facial soft tissue of Korean adults with normal occlusion using a three-dimensional laser scanner. Korean J Orthod 2006;36:14-29.
8. Kau CH, Zhurov A, Richmond S, Bibb R, Sugar A, Knox J, et al. The 3-dimensional construction of the average 11-year-old child face: a clinical evaluation and application. J Oral Maxillofac Surg 2006;64:1086-92.
9. Moss JP, Linney AD, Lowey MN. The use of three-dimensional techniques in facial esthetics. Semin Orthod 1995;1: 94-104.
10. Kau CH, Zhurov A, Bibb R, Hunter L, Richmond S. The investigation of the changing facial appearance of identical twins employing a three-dimensional laser imaging system. Orthod Craniofac Res 2005;8:85-90.
11. Hennessy RJ, Moss JP. Facial growth: separating shape from size. Eur J Orthod 2001;23:275-85.
12. McDonagh S, Moss JP, Goodwin P, Lee RT. A prospective optical surface scanning and cephalometric assessment of the effect of functional appliances on the soft tissues. Eur J Orthod 2001;23:115-26.
13. Ismail SF, Moss JP, Hennessy R. Three-dimensional assessment of the effects of extraction and nonextraction orthodontic treatment on the face. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2002;121:244-56.
14. Moss JP, Ismail SF, Hennessy RJ. Three-dimensional assessment of treatment outcomes on the face. Orthod Craniofac Res 2003;6(Suppl 1):126-31.
15. Kau CH, Cronin A, Durning P, Zhurov AI, Sandham A, Richmond S. A new method for the 3D measurement of postoperative swelling following orthognathic surgery. Orthod Craniofac Res 2006;9:31-7.
16. McCance AM, Moss JP, Fright WR, Linney AD, James DR. Three-dimensional analysis techniques--Part 2: Laser scanning: a quantitative three-dimensional soft-tissue analysis using a color-coding system. Cleft Palate Craniofac J 1997;34:46-51.
17. Ferrario VF, Sforza C, Poggio CE, Serrao G. Facial three-dimensional morphometry. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1996;109:86-93.
18. Choi HH, Cho JH, Park HJ, Oh HK, Choi JH, Hwang HS, et al. Validity of superimposition range at 3-dimensional facial images. J Korean Assoc Maxillofac Plast Reconstr Surg 2009;31:149-57.
19. Broadbent BH. A new x-ray technique and its application to orthodontia. Angle Orthod 1931;1:45-66.
20. Sanborn RT. Differences between the facial skeletal patterns of Class III malocclusion and normal occlusion. Angle Orthod 1955;25:208-22.
21. Steiner CC. The use of cephalometrics as an aid to planning and assessing orthodontic treatment. Am J Orthod 1960;46: 721-35.
22. Song JM, Lee KH, Hwang HS. A comparative study of guiding methods for natural head posture in cephalometrics. Korean J Orthod 2005;35:341-50.
23. Kim EH, Hwang HS. The validity of head posture aligner in posteroanterior cephaiometry. Korean J Orthod 2000;30: 543-52.
24. Downs WB. Analysis of the dentofacial profile. Angle Orthod 1956;26:191-212.
25. Besl PJ, Mckay ND. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 1992;14:239-56.

Influence of the angles and number of scans on the accuracy of 3D laser scanning

Kyung-Min Lee, DDS, MSD,[a] **Hyo-Young Song,** DDS, MSD,[a]
Ki-Heon Lee, DDS, MSD, PhD,[b] **Hyeon-Shik Hwang,** DDS, MSD, PhD[c]

Objective: To investigate whether the accuracy of 3D laser scanning is influenced by the angles and number of scans. **Methods:** Using a 3D laser scanner, 10 manikins with facial markers were scanned at 7 horizontal angles (front view and at 20°, 45°, and 60° angles on the right and left sides). Three-dimensional facial images were reconstructed by 6 methods differing in the number and angles of scans, and measurements of these images were compared to the physical measurements from the manikins. **Results:** The laser scan images were magnified by 0.14 - 0.26%. For images reconstructed by merging 2 scans, excluding the front view; and by merging 3 scans, including the front view and scans obtained at 20° on both sides; several measurements were significantly different than the physical measurements. However, for images reconstructed by merging 3 scans, including the front view; and 5 scans, including the front view and scans obtained at 20° and 60° on both sides; only 1 measurement was significantly different. **Conclusions:** These results suggest that the number and angle of scans influence the accuracy of 3D laser scanning. A minimum of 3 scans, including the front view and scans obtained at more than 45° on both sides, should be integrated to obtain accurate 3D facial images. **(Korean J Orthod 2011;41(2):76-86)**

Key words: 3D laser scanner, Scan angle, Number of scans

[a]Graduate Student, [b]Associate Professor, [c]Professor, Department of Orthodontics, Dental Science Research Institute, School of Dentistry, 2nd Stage of Brain Korea 21, Chonnam National University.
Corresponding author: Hyeon-Shik Hwang.
Department of Orthodontics, School of Dentistry, Chonnam National University, 300 Yongbong-dong, Buk-gu, Gwangju 500-757, Korea.
+82 62 530 5656; e-mail, hhwang@chonnam.ac.kr.
Received January 10, 2011; Last Revision February 28, 2011; Accepted March 3, 2011.