

구면좌표계식 기구를 이용한 인공치아의 3차원 측정시스템 개발

맹희영⁺, 성봉현*

(논문접수일 2009. 11. 24, 심사완료일 2010. 7. 30)

Development of 3D Measuring System for Artificial Pontic using Spherical Coordinate System Mechanism

Hee-young Maeng⁺, Bong-Hyun Sung*

Abstract

With recent increased demand for reverse engineering in dental machining, the 3D laser scanner is widely used for inspection of artificial pontic. In order to overcome the optical drawback of laser scanner, such as irregular scatter, direction of beam, and the influence of surface integrity, it is developed in this study a new 3D measuring system for artificial pontic using spherical coordinate system mechanism by point laser sensor, which keeps the direction of beam normal to surface consistently. The comprehensive integrated system is established to evaluate the improvement of accuracy with data acquisition system. The experimental results for measuring a master ball and pontic models shows the excellent form accuracy and repeatability compared with conventional apparatus. Also, these results shows the possibility to apply this system for the measuring purpose within 0.05mm accuracy of pontic at the sharp edge or margin contour, which was difficult to measure at the conventional systems.

Key Words : 3D Measuring System(3차원 측정 시스템), Artificial Pontic(인공 치아), Point Laser Sensor(포인트 레이저 센서), Spherical Coordinate System Mechanism(구면 좌표계 기구), Form Accuracy(형상 정밀도), Repeatability(반복 정밀도), Improvement of Measuring Accuracy(측정 정밀도 향상)

+ 서울산업대학교 공과대학 기계설계자동화공학부 (maeng@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉동 172번지

* 서울산업대학교 산업대학원, (주)유니슨

1. 서론

최근 인공지능의 치기공 분야에서는 다양한 방법의 3차원 레이저 측정 장비가 널리 사용되고 있다. 광학식 측정의 특성상 측정 속도와 안정성, 가격성 측면에서 우수한 장점을 갖고 있기 때문이다.^(1,2)

그러나 레이저 응용 측정은 빔의 난반사라든지 표면을 바라보는 측정각에 따라 큰 오차가 발생하는 단점이 있다. 불규칙한 표면이나 난반사를 일으키는 매질을 측정하는 데에는 적합하지 않으며, 이러한 경우에는 독특한 측정 메커니즘 또는 측정물 셋업 방법 등을 통하여 오차를 보상하여야 한다. 특히, 인공지능과 같이 상면과 측면이 방향 차이를 크게 보이는 형상은 직교좌표계식 측정 기구로는 전체 표면을 한꺼번에 측정하기가 곤란하며, 측정 데이터도 특정 부위에 집중하여 분포하게 마련이다.^(3,4)

이러한 레이저 센서의 광학적 단점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 포인트 레이저 센서를 사용하면서 레이저 빔의 조사 방향이 측정 표면의 법선 방향을 향하도록 안내하는 구면좌표계식의 측정 메커니즘을 고안하였다. 스폿 크기가 작은 포인트 레이저를 사용함으로써 난반사의 영향이 적도록 하였으며, 빔의 조사 방향을 구면좌표계의 원점을 향하도록 유지함으로써 측정 데이터가 인공지능의 표면에 고르게 분포되는 측정 효과를 거두고자 하였다.

이 측정 메커니즘은 구면좌표계식 구동 장치와 제어 장치, 데이터 수집 장치 등으로 구성되어 통합 시스템으로 제작되었으며, 표면 상태가 악조건인 인공지능 모델을 대상으로 성능 실험을 실시하여 소요의 형상 정밀도를 만족할 수 있는지 그 적용 가능성을 평가하였다.

2. 구면좌표계식 측정 기구 및 원리

구면좌표계 방식의 레이저 측정 기구는 Fig. 1과 같이 피 측정물을 X-Y 평면상에서 회전시키고 포인트 레이저 센서의 빔이 이 회전축의 센터를 향하도록 하면서 포인트 레이저 센서와 카메라가 장착된 수직 기구부 전체도도 Z-X 평면상에서 회전하도록 하는 2개 회전 기구로 구성하였다.

구면좌표계 방식으로 측정된 데이터의 좌표는 2개의 각도와 하나의 반지름으로 이루어지기 때문에 이를 곡면 모델링용 삼각 메쉬의 STL(stereo-lithography interface) 형식으로 데이터를 변환하기 위해서는 다음과 같이 원통좌표계로 변환하는 것이 편리하다.⁽⁵⁾

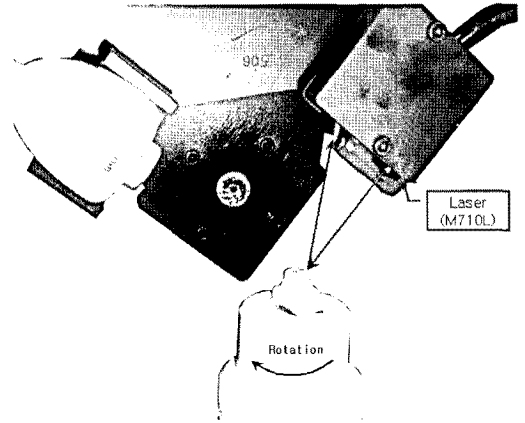


Fig. 1 Configuration of spherical coordinate system mechanism

$$P(\theta, \bar{R}, z) = (\theta, R\cos\phi, R\sin\phi) \quad (1)$$

측정 데이터의 각도 θ 는 일정한 주기로 샘플링 할 수 있으므로 측정 데이터를 θ 별로 재배열 할 수 있는 장점이 있다. 이때 측정 주기에 따른 샘플링 각을 α 라고 하면, 측정 데이터는 다음과 같이 재배열 할 수 있다.

$$P(\theta_i) = \{P_0, P_1, P_2, \dots, P_{n-1} : 0 \leq i \leq \frac{360}{\alpha}\} \quad (2)$$

단, 식 (2)에서 각도별 리스트의 수 n 은 데이터 수집시 회전축 구동계의 동기성을 맞추어 360°를 α 로 나눈 정수가 되도록 할 수 있다.

그리고 원통좌표계로 표현된 측정 데이터는 일반화된 형상모델링 시스템과 인터페이스 되어야 하기 때문에, 동기성에 맞추어 측정된 수많은 점들을 주어진 형상공차와 분해능에 맞추어 다음과 같이 사각 메쉬 형태의 점 데이터 배열로 매핑시켜 재구성하였다.

우선 X-Y 평면상에서 측정 데이터의 산포 범위를 구하고, 이 범위의 최대값과 최소값 사이를 주어진 분해능에 맞추어 사각 간격으로 등분할하여 메쉬를 구성하였다. 그런 다음 Fig. 2에서 보는 바와 같이 각 메쉬의 절점에 대해 이 절점이 속한 구면좌표계의 θ_{n-1} 과 θ_{n+1} 구간을 구하고, \bar{R} 값을 환산하였다. 그런 다음 각 절점에 대한 Z값은 이 절점에 가까운 여러 점들의 Z값들을 보간하여 해당 메쉬의 Z값으로 결정하는 방법을 사용하였다.⁽⁶⁾

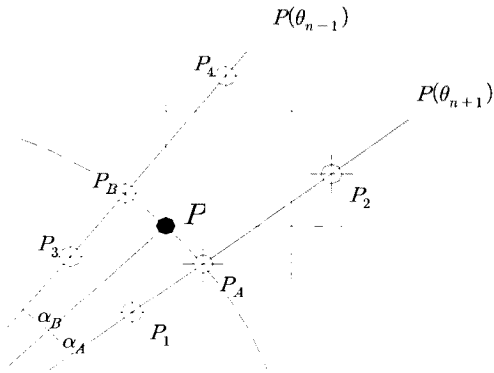


Fig. 2 Determination of node point P in mesh nearing P_1, P_2, P_3, P_4

즉, Fig. 2에서 점선은 측정 원점을 중심으로 하고, 메쉬상의 한점 P 까지의 거리 R_0 를 반지름으로 하는 가상원이라 할 때, 리스트 $P(\theta_{n-1})$ 에서 가상원과 교차하는 점을 P_A , 리스트 $P(\theta_{n+1})$ 에서 가상원과 교차하는 점을 P_B 라고 하면, 점 P 의 Z값은 P_A 와 P_B 의 Z값의 비례식으로 구할 수 있다.

점 P_A 의 Z값을 Z_A 라고 할 때, P_1 과 P_2 에 대한 비례 관계를 적용하면 Z_A 는 다음과 같다.

$$(L_2 - L_1) : (R_0 - L_1) = (Z_2 - Z_1) : (Z_A - Z_1)$$

$$Z_A = Z_1 + (Z_2 - Z_1) \frac{(R_0 - L_1)}{(L_2 - L_1)} \quad (3)$$

마찬가지로, 점 P_B 의 Z값을 Z_B 라고 할 때, P_3 와 P_4 에 대한 비례 관계를 적용하면 Z_B 는 다음과 같다.

$$(L_4 - L_3) : (R_0 - L_3) = (Z_4 - Z_3) : (Z_B - Z_3)$$

$$Z_B = Z_3 + (Z_4 - Z_3) \frac{(R_0 - L_3)}{(L_4 - L_3)} \quad (4)$$

따라서 측정원점과 점 P 가 이루는 벡터와 $P(\theta_{n-1}), P(\theta_{n+1})$ 리스트가 이루는 각도를 각각 α_A, α_B 라고 하면, 점 P 의 Z값은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$(Z_B - Z_A) : (Z_P - Z_A) = \alpha_{step} : \alpha_A$$

$$Z_P = (Z_B - Z_A) \frac{\alpha_A}{\alpha_{step}} + Z_A \quad (5)$$

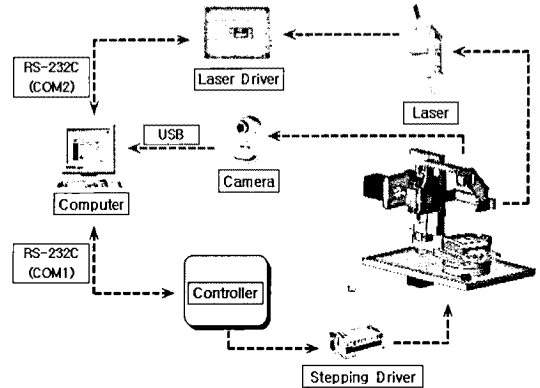


Fig. 3 Overall layout of 3D measuring system using spherical coordinate mechanism

이때 측정각이 α_{step} 면, $\alpha_{step} = \alpha_A + \alpha_B$ 를 만족한다.

3. 측정 시스템의 구성 및 설계

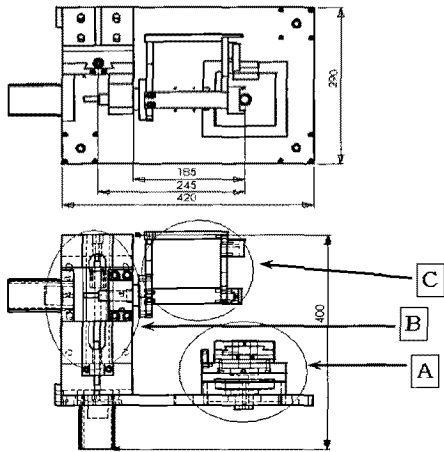
본 시스템은 Fig. 3과 같이 크게 피측정물을 회전시켜 주는 테이블, 포인트 레이저 센서와 비전 카메라가 부착되어 있는 측정 헤드부, 그리고 시스템 제어부로 구성하였다.

3.1 기구 장치

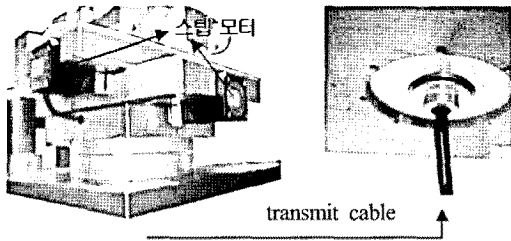
기구 장치는 Fig. 4와 같이 3축 자유도로 구성되어 있으며, 구동 요소로 5상 스텝핑 모터를 사용하여 백래쉬가 없도록 직접 타이밍 벨트와 벨트풀리로 전달하였다. 크기는 420×290×400mm이며, 주요 유닛은 회전 테이블(A), Z축 이송부(B), 측정 헤드부(C)로 구성하였다.

회전 테이블은 또한 X-Y 스테이지 위에 장착되어 있으며 자동으로 스테이지를 이동하여 세팅할 수 있도록 하였다. 회전시 신호선의 꼬임 현상을 방지하기 위해 슬립링(브러쉬 접촉식)을 사용하였으며, 구동축과 벨트 풀리의 감속비는 4:1로 하였다.

레이저 센서 회전 기구는 USB 카메라와 레이저 센서 장착 부분으로 구성되어 있으며, 레이저 센서는 측정 범위가 40~50mm인 MEL사의 M7시리즈 M7L10을 사용하였고 마이크로미터 헤드를 통해 거리 조절이 가능하도록 하였다. USB 카메라는 회전부의 중심과 일치시키도록 세팅하였다. 구동에 사용된 스텝핑 모터는 5상 스텝핑 모터 A3K-S545와 A16K-M569 규격을 사용하였다.



(a) Structure of system mechanism



(b) Configuration of mechanism assembly

Fig. 4 Structure and configuration of 3D measuring mechanism of dental pontic

3.2 인터페이스 프로그램

인터페이스 프로그램은 PC 제어의 기본창으로 Fig. 5에서 보는 바와 같이 측정물 이미지 디스플레이 창(Ⓐ), 마이크 제어 아이콘(Ⓑ), 측정 데이터 출력 창(Ⓒ), 측정 데이터 그래픽 창(Ⓓ) 등의 4개 영역으로 구성하였다.

이미지 디스플레이 창에서는 회전축 중심을 비전으로 볼 수 있게 함으로써 측정부 중심과 회전 테이블 중심이 일치하는 것을 쉽게 점검하고 정밀도에 관련된 여러 기본 세팅에 이용할 수 있게 하였다. 측정 준비가 완료된 이후에는 자동 모드 스위치를 눌러 측정을 시작하도록 프로그램 하였다.

3.3 제어기의 구성

제어기는 크게 레이저 제어기와 기구 제어기로 구성하였다. 레이저 제어기는 MEL사의 전용 제어기를 사용하였고, 기구 제어기는 ATmega128L 제어기를 소요 목적에 맞도록 보완하여 사용하였다.⁽²⁾

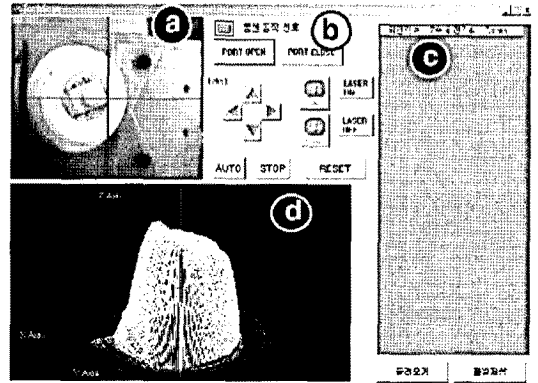


Fig. 5 Template of PC interface program

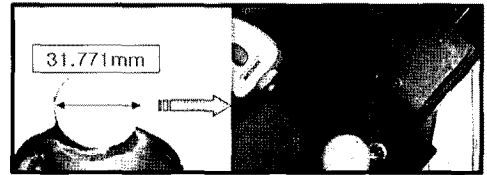
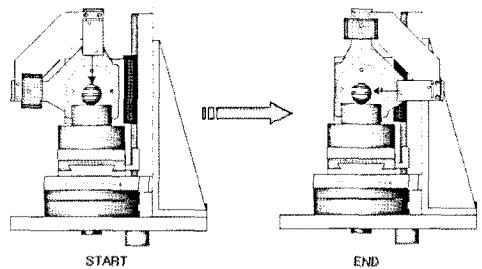


Fig. 6 Acceptance test of setting condition by measurement of master ball

피측정물 회전부와 레이저 회전부는 5상 스테핑 모터 드라이버와 마이크로 스텝 모터 드라이버로 구동하였으며 각각의 회전 스텝은 $0.0625^\circ (=0.72/80)$ 로 설정하였다.

3.4 측정 테이블과 센서부의 세팅 및 검사

본 시스템은 2개의 회전 자유도를 갖기 때문에 기구 조립이 복잡하여 기구적인 오차가 발생하기 쉽다. 초기 조립 이후 조립 공차를 반복하여 측정해 가면서 계속 줄여야만 정밀한 조립이 가능하다. 피측정물 회전부와 레이저 회전부의 회전 중심이 직각을 유지하면서 0.01mm 오차 범위에서 일치할 수 있도록 지그 클램프를 통해 조립하였다.⁽⁷⁾

조립의 적합성 검사는 Fig. 6과 같이 진구도가 $3\mu\text{m}$ 이내

인 마스터 볼을 이용하여 회전축의 정밀도를 검사하는 방법을 사용하였다. 조립 초기에는 마스터 볼의 원주를 측정하면서 조립 정밀도를 점차 높여 갔으며, 조립을 보정하는 중간 단계에서는 3곳의 높이에 대한 진원도를 검사하였고, 최종적인 검사에서는 측정 헤드부의 처짐과 레이저 변위센서의 평행도 등을 보정하여 측정 데이터의 진구도가 0.02mm 이내에 들어 올 수 있도록 보정하였다.

3.5 시스템 소프트웨어의 구성

본 측정 시스템의 소프트웨어는 Fig. 7에서 보이는 바와 같이(*.dat) 형식으로 저장된 측정 데이터를 CAD 형상화 할 수 있는(*.scn) 파일로 변환해 주는 과정을 거쳐서, 최종적으로는 형상화된 데이터를 보간, 필터링, 트리밍 등의 변환 과정⁽⁵⁾을 거쳐 데이터의 신뢰성을 높이는 모듈로 구성되어 있다. 시스템 대화창의 구성을 살펴보면, A의 아이콘 그룹은 D화면에 디스플레이 되어 있는 형상을 관리하기 위한 도구 아이콘으로 구성하였고, B의 구동제어 창은 구동 상태를 작동하고 구동 정보를 표현해 주는 기능으로 구성하였다. 그리고 C 대화창은 형상화된 데이터를 보간, 필터링, 컬러 등을 변화시켜 데이터의 신뢰성을 높이기 위한 MFC 모듈을 실행하기 위한 창이며, D의 디스플레이 창은 OpenGL를 이용한 그래픽 창으로 구성하였다.

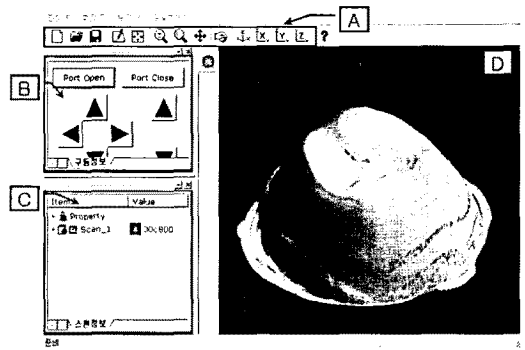


Fig. 7 Display template of measuring process

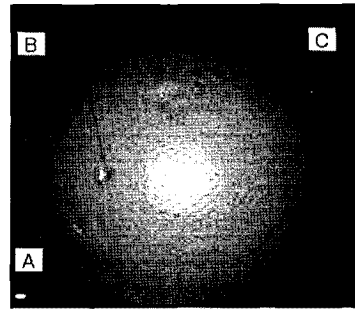


Fig. 8 Measurement of master ball testpiece

4. 적용 실험 및 고찰

본 연구에서는 시스템 신뢰성을 평가하는 방법의 하나로 마스터 볼(진구도 0.002mm)을 측정된 데이터를 CAD로 형상화시키고, 편차 특성을 분석하면서 측정 상태, 측정 환경, 측정 기구의 적합성을 검사하였다.

그 결과 Fig. 8과 같이 측정 데이터는 여러 곳에서 버그 부분이 발생되고 있지만, 이러한 부위를 제외시키면 형상공차는 아주 우수하게 증진되고 있음을 알 수 있었다. 우선 A에서 보는 바와 같이 측면 데이터는 약간의 튀는 현상이 발생한 것 같으나, B와 같이 마스터 볼 표면 매질을 입하는 과정에서 생긴 압입 자국까지 선명한 것을 보면 측정 데이터 값은 아주 정교하게 측정되고 있음을 알 수 있다. C 부분은 원주 방향으로 약간의 띠 같은 현상이 발생하고 있는데, 이 부분은 구면좌표계를 변환하는 과정에서 같은 위상 라인에 많은 데이터가 밀집되어 발생된 것으로 판단된다.

포인트 레이저 센서의 특성상, 난반사 또는 매질의 불균질성으로 인하여 데이터가 튀게 되는 버그 현상은 완전히 없앨

수 없다. 그 때문에 본 시스템에서는 측정 데이터의 산포도를 이용하여 이를 필터링 할 수 있도록 소프트웨어로 이를 제거하는 알고리즘을 적용하였다. Fig. 9는 이와 같은 필터링 알고리즘을 적용하면서 하향 스캐닝 모드에 대해 측정된 데이터(샘플수 56,000)의 최대값(+0.011mm)과 최소값(-0.007mm)과의 차이를 통하여 진구도 오차를 평가한 것으로 마스터 볼의 진구도 오차는 그 절대값이 0.018mm를 넘지 않는 우수한 결과를 보였다. 그리고 이때 최대값은 시작부의 과도상태에서 발생하였으며, 최소값은 출발후 스캐닝 길이가 220mm 정도 지난 지점에서 생긴 버그 부위에서 발생하였다.

두 번째 평가 방법으로는 실제의 어금니 인공치아 모델에 대해서 적용하는 평가 실험을 실시하였는데, Fig. 10은 측정 데이터를 수집하고 필터링, 트리밍 등의 안정화 변환 과정을 거친 다음 잇몸 부위와의 경계 영역(margin)을 연결하여 최종적으로 모델링을 마친 결과를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 11은 이때 발생되는 형상오차를 나타낸 것으로, 어금니 인공치아 모델에 대하여 적절한 보간 알고리즘을 적용하여

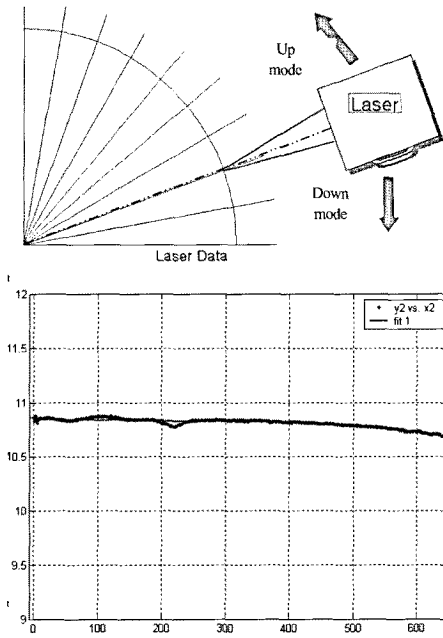


Fig. 9 Evaluation of measuring error for a master ball testpiece

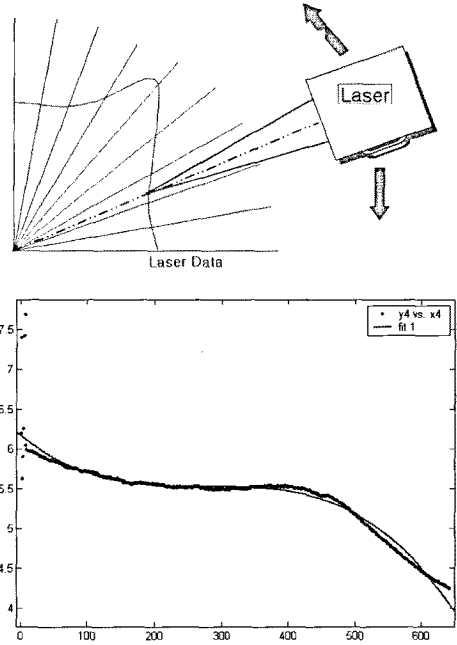


Fig. 11 Evaluation of measuring error for a molar pontic testpiece



Fig. 10 Surface model of molar pontic

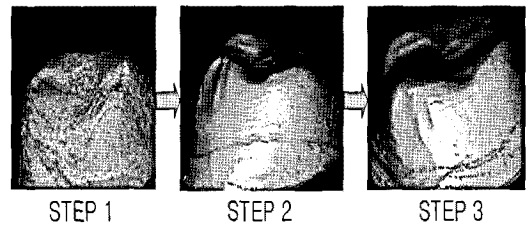


Fig. 12 Advancing steps of form accuracy

하향 스캐닝시 발생하는 형상오차를 구면좌표계식에서 직교좌표계식으로 변환하여 나타낸 것이다.

이들 오차는 Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 스캐닝의 출발시 중앙에서 맴돌이 현상을 일으키는 부위와 잇몸에 가까운 마진 부위(스캐닝이 거의 끝나는 지점)에서 비교적 큰 오차를 발생하고 있지만, 일반적으로 인공치아의 측정에 사용되고 있는 0.05mm급의 홀로그램(hologram)식 P사 제품

이나 모아레(Moire)식의 S사 제품보다는 0.01~0.02mm 정도 더 정교한 값을 보이는 것으로 평가할 수 있었다. 이 결과는 본 측정 기구가 난반사에 의해 데이터가 튀는 현상을 잘 억제하고 있으며, 레이저의 조사 방향이 곡면의 법선 방향에 근사하도록 유도한 구면좌표계 기구의 적용 효과가 반영된 결과라 생각된다.

또한 시스템의 세팅 조건과 주변 환경 등에 따라 동일 치아 모델의 측정 결과가 개선되는 과정을 검토하였는데, 그 결과는 Fig. 12와 같다. 여기서 step 1은 주변의 빛을 차단하지 않고 동일 테이블에 진동 모터로 외부 펄스를 주면서 측정 시험한 결과이며, step 2는 주변의 빛을 차단하고 외부

진동 없이 측정 시험한 결과이다. 이 두 가지를 비교하여 보면 주변 환경에 따라 난반사에 따른 노이즈 현상이 현격하게 없어지고 있는 것을 볼 수 있다.

또한 step 3은 step 2의 조건과 더불어 레이저 빔의 스캐닝 순서를 개선하여 측정 시작점을 측면이 아닌 중앙에서 시작하고 측면에서 끝나는 순서로 수정한 결과인데, step 2 모델의 측면에서 발생되었던 주름 현상과 부스럼 모양의 노이즈가 더욱 더 안정화 되어서 형상 정밀도가 대폭 개선되고 있는 결과를 보이고 있다.

한편 중앙의 뾰족이 현상은 step 2에 비해 step 3에서 오히려 잘 발생하는 결과를 보이고 있는데, 이는 상면의 중앙 부에서 측정을 시작할 때 피측정물의 회전축과 빔의 주사 방향이 거의 같은 라인에서 흔들리는 일종의 런아웃 효과라 생각된다. 이 뾰족이 현상에 의해 발생하는 형상 오차값을 추정하기 위하여 step 2와 step 3의 곡면 모델을 중첩시켜 그 간극의 최대값을 구하였는데, 0.013mm 로 비교적 작을 값을 나타냈다. 그래픽 화면으로는 눈에 띄기는 하지만, 치아 상면의 평면 중심 부위에 생기는 것이어서 z 방향으로로는 실질적으로 작은 값인 것으로 생각된다.

따라서 인공 치아가 향후 코어의 내면으로 가공되어 삭제 치아와 끼워맞춤될 것을 고려한다면, step 3 모델과 같이 치아의 상면에서 뾰족이 현상이 다소 생기더라도 치아의 측면에서의 형상 공차가 더욱 개선되는 조건이 더 바람직하다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 포인트 레이저 센서와 구면좌표계식 측정 기구를 사용하여 레이저 센서의 광학적 단점을 효과적으로 해결할 수 있었으며, 치기공용 삭제 치아와 같이 표면에서 난반사가 심하고 레이저 빔의 조사 방향에 따라 측정 오차가 많이 발생하는 피측정물을 효율적으로 측정할 수 있음을 검토하였다.

시스템을 개발하는 과정에서 피측정물의 회전 중심축과 레이저 회전축을 일치시키기 위한 조립 방법, 수집된 데이터를 변환하고 보간하는 방법, 측정상의 불안정성으로 인해 발생하는 버그를 필터링과 트리밍을 통해 소프트웨어적으로

안정화시키는 방법 등을 개발하여 표면 상태가 악조건인 피측정면에 대해서도 0.05mm 이하의 형상 정밀도를 보증할 수 있는 측정 시스템으로 개발할 수 있었다.

마스터 볼을 측정 실험한 결과에 있어서는 0.02mm 이내의 우수한 형상 정밀도를 만족시킬 수 있었으며, 인공치아 모델에 대한 측정 실험에 있어서도 기존의 0.05mm급의 정밀도를 갖는 레이저 응용 장비보다 0.01~0.02mm 정도의 형상 정밀도를 향상시킬 수 있었다. 특히, 본 시스템은 인공치아 모델의 경우, 측면에서의 형상 정밀도를 개선하는 데 더욱 효과적이기 때문에 끼워맞춤용 곡면을 측정하는 데에 더욱 적합함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Riegl, 2004, *RiSCAN PRO Manual, Version 1.1.1*, Riegl Laser Measurement Systems, Berlin.
- (2) AICON, 2005, viewed 7 Jan. 2005, "Production Information by AICON 3D Systems GmbH," AICOM, <<http://www.aicon.de/ger/start.htm>>.
- (3) Son S., Park H., and Lee K., 2000, "Development of an automated measuring system for freeform surfaces using a laser scanner," *KSPE Conf. at Spring 2000*, Vol. 1, pp. 175~181.
- (4) Cloud, G., 1999, *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge Univ. Press, London.
- (5) Umeyama, S., 2001, "Least-squares estimation of transformation parameters between two point," *IEEE Trans. of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 4, pp. 376~380.
- (6) Stamos, I. and Allen, P. K., 2000, "3-D Model Construction Using Range and Image Data," *IEEE International Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 531~536.
- (7) Zeng, X., Wicks, A., and Mitchell, L., 1996, "Geometrical method for the determination of the position and orientation of a scanning laser," *Optics and Laser in Engineering*, Vol. 40, No. 5-6, pp. 459~485.