

2대의 CCD 카메라를 이용한 새로운 3차원 형상 측정법

광양보건대학 치기공과, 동강대학 컴퓨터 정보과*
김 장 주, 정 국 영*

=Abstract=

A New 3D Shape Measurement Method using 2 CCD Cameras

Jang-Ju Kim, Gook-Young Jung*

*Dept. of Dental Lab. Teck., Kwangyang Health College.
Dept. of Computer Science., Dongkang College.**

Accurate acquisition of surface geometries such as machined surfaces, biological surfaces, and deformed parts have been very important technique in scientific study and engineering, especially for system design, manufacturing and inspection. Two camera method is relatively simple with an acceptable accuracy. In this paper, a new method is studied to acquire 3D geometric data of the small object such as a die in stone model. When the devices, cameras, laser beam and object are in a perfect plane, the calculation becomes very simple with less error. But this paper shows that arbitrarily positioned system can also be used to obtain 3D data.

* Key words : Image Processing, Dental Engineering, Correlation Method.

교신 · 성 명 : 김 장 주 · 전 화 : 061)760-1440 · E-mail : tangtu@hanmail.net
저자 · 주 소 : 전남 광양시 · 읍 덕례리 223-1 광양보건대학 치기공과

I. 서 론

소형 물체의 3차원 형상측정은 측정 대상에 대한 측정 점의 위치, 즉 대상물의 표면을 검출기가 3차원 공간으로 운동하면서 각 측정점의 공간좌표를 검출하고 그 데이터를 컴퓨터가 처리함으로써 3차원적인 위치나 크기, 방향 등을 측정하는 것이다. 특히 수식으로 표현할 수 없는 복잡한 대상물의 형상을 측정하는데 유용하며 대상물의 한 점을 기준으로 하여 설정한 좌표계로 표면좌표를 결정한다(Wen-Jean & Erik, 1997; Roger, 1987).

3차원 형상측정은 주로 접촉식과 비접촉식 방법을 이용하고 있는데, 접촉식 방법은 데이터 획득용 측정 침(probe)을 이용하는 방법으로서 수동형(floating or manual type), 조종간형(joystick type), 자동형(CNC type) 등으로 분류할 수 있고, 수동형 방법은 측정 침을 수동으로 이동시켜 측정하는 방법으로 정확도가 낮으나 구조가 간단하기 때문에 가격이 저렴하고, 유지 보수가 용이하여 산업체에 많이 이용되고 있다(Nacjum et al, 1995; Edward & John, 1994; Jurgen et al, 1998).

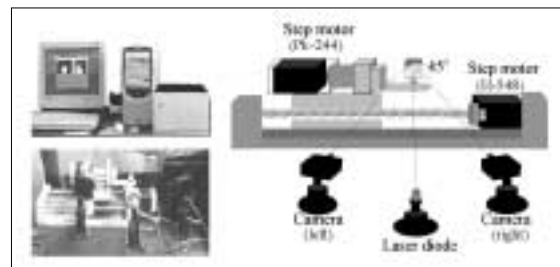
조종간형 방법은 모터를 부착하여 조종간을 이용해 측정하는 방법으로 이동속도가 정확하게 조절되어 반복정밀도가 좋으며 측정자에 따른 오차를 줄일 수 있다. 자동형 방법은 측정경로 및 순서가 입력된 프로그램에 따라 컴퓨터에 의해 제어되는 자동측정 방법으로 기계의 가동효율을 극대화시킬 수 있고 측정자의 육체적, 정신적 피로를 경감시킬 수 있지만 가격이 고가이고 유지관리가 어렵다.

비접촉식 방법은 주로 카메라를 이용하는 방법으로 자연광과 레이저광을 이용한다. 물체의 정확한 표면좌표를 획득하기 위해서는 단색광인 레이저빔의 스포트를 이용하는데 현대의 카메라로도

측정이 가능하지만 대상물의 그늘진 부위는 측정을 할 수 없어 이러한 점을 보완하기 위하여 두대의 카메라를 이용하는 복안식을 주로 사용한다. 이 방법은 측정대상의 위치를 자동적으로 추적할 수 있기 때문에 빠른 측정이 가능하고 자동초점 기능이 부가되어 있는 경우에는 깨끗한 화상의 획득이 가능하여 보다 정확한 측정을 할 수 있다.

이러한 3차원 측정방법은 기계, 전기, 전자, 토목, 건축, 의류, 신발, 지적도제작 등 복잡한 형상의 정밀 측정 및 가공을 위하여 컴퓨터시스템을 응용하고 있어 제품 개발의 기간 단축, 정확도 향상 및 기술 수준 고도화 등에서 큰 효과를 나타내고 있다. 또한 의료산업분야에서도 컴퓨터 정보기술의 적용은 날로 증가되고 있고 특히 치과의료분야에서 컴퓨터 시스템의 응용은 수복물 제작을 위한 측정 및 가공기술이 현실화되어가고 있다.

제한한 시스템을 적용하여 유용성을 검증하고자 치과 수복물을 측정하는데 적용하였다. 이제까지의 치과 수복물을 제작하는 전형적인 방법은 인상을 채득하여 경석고 모형을 제작한 후, 모형에 왁스를 추가하여 납형 제작, 매몰, 소환, 주조 그리고 다듬질 및 연마하여 완성을 하였지만, 제한된 방법을 통하여 치형(die)의 정확한 데이터를 획득하여 최적의 수복물을 제작하는 방법인 치과용 CAD/CAM 시스템(Dental CAD/ CAM System)의 기술로 확장시키고자 한다(Jurgen et al, 1998).



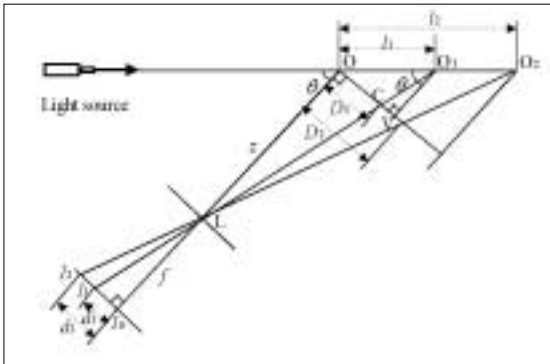
〈그림 1〉 측정시스템의 사진

그림 1에 본 논문에서 제안한 시스템의 사진을 보인다. 카메라를 이용하여 치아의 기하학적인 정보 즉 치아표면의 좌표 값을 획득하는 방법과 이를 가공하여 수복물을 위한 설계를 자동화 할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다. 시스템을 구현하기 위하여 레이저의 빔을 치형의 표면에 주사하여 스폿트를 형성하고 그 위치를 카메라 영상으로 취하여 3차원 좌표 값을 계산하여 형상을 만들어내는 방법을 연구하였다(Nacjum et al, 1995).

II. 연구재료 및 방법

1. 카메라를 이용한 위치 측정.

1) 기본적인 거리측정방법



〈그림 2〉 실제거리 l과 영상거리 d와의 관계

〈그림 2〉에서와 같이 실세계에 있는 직선의 레이저빔 상의 3점 좌표 O, O_1, O_2 를 알고 있다면 그에 해당하는 영상 I, I_1, I_2 로부터 물체의 거리 z 와 초점거리 f 를 구할 수 있다. 선행연구에서처럼 물체의 거리 z 를 구하면 식(1)과 같다(Wen-Jean & Erik, 1997; Roger, 1987).

$$z = \frac{(d_2 - d_1) l_1 k \cos \theta}{d_1 l_2 - d_2 l_1} \quad (1)$$

따라서 초점거리 f 를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{d_1 - d_2 (l_2 - l_1)}{d_1 l_2 - d_2 l_1} \cos \theta \quad (2)$$

(2)

따라서 θ, f 가 결정되면 영상에서의 거리 d 에 따라 실측거리 l 을 식 (3)으로 구할 수 있게 된다.

$$l = \frac{zd}{f \sin \theta - d \sin \theta} \quad (3)$$

따라서 $\theta = 45^\circ$ 로 취한 본 기구에서는 다음 식 (4)와 같은 관계식을 사용할 수 있다.

$$l = \frac{\sqrt{2}zd}{f - d} \quad (4)$$

2) 상관관계를 이용한 거리 측정

요철이 있는 대상물은 한 대의 카메라로 측정을 할 때 주사 점이 가려져 영상이 나타나지 않을 경우가 있기 때문에 반대측에 또 하나의 카메라를 설치하여 측정이 가능하도록 하는 방법을 이용한다. 하지만 외부의 충격이나 진동등에 의하여 그림 2의 설정값들이 변하면 정밀도가 감소하게된다. 따라서 카메라의 위치나 각 기구부의 거리가 정확한 값을 도출하기 어렵거나 변동이 되더라도 정확성을 유지하는 연구가 필요하다 이를 위해서 상관관계를 이용한 측정방법을 도입하였다.

3차원의 실세계 좌표와 2차원의 영상좌표와의 관계는 재차 좌표계를 이용하여 표현하면 식(5)과 같다.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (RT_r) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

식(5)에서 $u=xt$, $v=yt$ 이고, x , y 는 영상좌표, f 는 초점거리, X , Y , Z 는 실세계 좌표, R , T 는 회전 및 평행이동에 의한 변환 행렬이다. 실세계 좌표 (X, Y, Z) 에 대한 카메라 1의 영상좌표 값을 (x_1, y_1) 이라 하고 카메라 2의 영상 좌표 값을 (x_2, y_2) 라 하면 다음 관계식(6), (7)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1 t_1 \\ y_1 t_1 \\ t_1 \end{bmatrix} = [T_1] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 t_2 \\ y_2 t_2 \\ t_2 \end{bmatrix} = [T_2] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (6), (7)에서 T_1 , T_2 는 카메라의 평행이동 T_r 와 회전 R , 그리고 투영 변환에 의해 결정되는 3×4 크기의 변환 행렬이다. 두 식(6), (7)을 합하여 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1 t_1 + x_2 t_2 \\ x_1 t_1 + x_2 t_2 \\ t_1 + t_2 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)에서 A 는 T 에서 제 4열을 뺀 3×3 크기의 행렬이고 a_{i4} 는 T 의 제 4열 원소들이다. 식 (8)에서 X, Y, Z 를 구하면 식(9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} x_1 t_1 + x_2 t_2 - a_{14} \\ x_1 t_1 + x_2 t_2 - a_{24} \\ t_1 + t_2 - a_{34} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)에서 A^{-1} 을 B 라하고 그 원소를 b_{ij} 라 하여 전개하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} X &= b_{11}(x_1 t_1 + x_2 t_2 - a_{14}) + b_{12}(y_1 + y_2 t_2 - a_{24}) \\ &\quad + b_{13}(t_1 + t_2 - a_{34}) \\ &= b_{11} t_1 x_1 + b_{11} t_2 x_2 + b_{12} t_1 y_1 + b_{12} t_2 y_2 + b_{13} t_1 + b_{13} t_2 \\ &\quad - b_{11} a_{14} - b_{12} a_{24} = b_{13} a_{34} \\ &= C_{11} x_1 + C_{12} x_2 + C_{13} y_1 + C_{14} y_2 + C_{15} \end{aligned} \quad (10)$$

같은 방법으로 Y, Z 에 대하여 정리하면 식(11)와 같다.

$$\begin{aligned} Y &= C_{21} x_1 + C_{22} x_2 + C_{23} y_1 + C_{24} y_2 + C_{25} \\ Z &= C_{31} x_1 + C_{32} x_2 + C_{33} y_1 + C_{34} y_2 + C_{35} \end{aligned} \quad (11)$$

위 식들을 종합하여 행렬로 표시하면 식(12)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y_1 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)에서 알 수 있는 바와 같이 실세계의 좌표는 두 쌍의 영상 좌표와 선형관계가 있다. 따라서 C 를 변환파라미터라 정의하고, 기지데이터를 이용하여 C 파라미터를 구한다. 다섯 쌍의 정확한 점만 있으면 C 파라미터가 결정되나 각 좌표 값에는 오차가 포함되어 있으므로 본 연구에서는 다수의 기지데이터를 취하여 최소자승법으로 C 파라미터를 결정하였다. 식 (12)에 의해 실세계의 좌표 값이 결정되면 원점 O 로 부터의 거리를 구할 수 있게 된다.

3) 변환 파라미터 C 결정

3차원 좌표로 변환하기 위하여 기지데이터를 사전에 정의하고 이것을 각각의 카메라에서 측정된 2차원 좌표계를 이용하여 2차원 대 3차원의 관계식을 얻고 변환 파라미터 행렬을 만들어 3차원 좌

표변환에 이용한다. 본 연구에서는 3차원 좌표 변환을 위하여 기지데이터 12개를 사전에 정의하고 카메라 두 대에서 측정된 영상을 처리하여 얻은 2차원 좌표 값의 결과는 <표 1>에 나타나 있다(임동천, 2002).

<표 1> 3차원대 2차원 매핑 데이터

	Real			Left 2D		Right 2D	
	X	Y	Z	Xl	Yl	Xr	Yr
P1	-5.7	5.1	-5.5	89.68	59.45	171.04	57.38
P2	0	5.1	-5.5	132.96	60.54	210.72	57.60
P3	5.7	5.1	-5.5	170.19	61.09	259.70	57.81
P4	-5.7	0	0	123.86	119.78	124.08	116.72
P5	0	0	0	168.87	119.23	172.51	117.38
P6	5.7	0	0	213.11	118.69	221.49	118.14
P7	-5.7	-2.6	3.6	150.02	161.12	99.48	155.45
P8	0	-2.6	3.6	196.02	160.14	147.80	156.87
P9	5.7	-2.6	3.6	238.91	159.60	192.78	158.29
P10	-5.7	-6.2	8.6	186.77	217.00	63.12	214.15
P11	0	-6.2	8.6	234.88	220.00	109.27	218.40
P12	5.7	-6.2	8.6	290.39	224.00	149.95	222.87

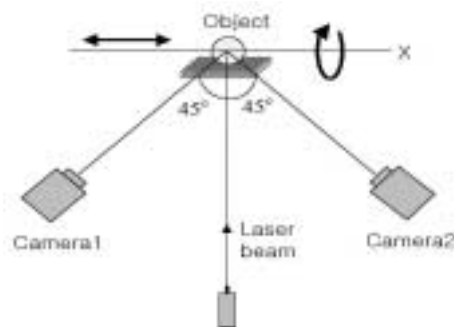
식 (13)은 2차원 영상 좌표 값을 이용하여 최소자승법에 의해 얻은 변환파라미터 행렬이다.

$$C = \begin{pmatrix} -0.0349 & 0.1148 & 0.0907 & 0.0776 & -26.3223 \\ 0.0271 & -0.0357 & -0.0235 & -0.0678 & 12.2053 \\ -0.0290 & 0.0718 & 0.0255 & 0.0524 & -14.3569 \end{pmatrix} \quad (13)$$

4) 3차원 좌표 계산

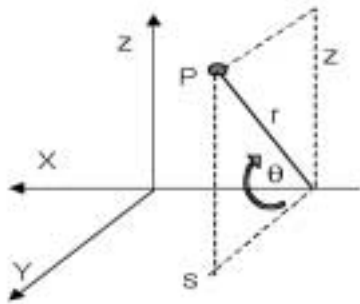
식 (12)를 이용하여 대상물 표면의 모든 좌표 값을 구하기 위해서 광원과 카메라를 고정시키고, 대상물은 일정한 규칙에 따라 회전과 평행 이동시키는 방법을 택하였다. <그림 3>과 같이 레이저빔에 수직방향으로 대상물을 통과하는 수평이동을 X축으로 하고, X축을 일정한 각도로 회전시켜 대상물의 모든 표면에 일정한 간격으로 레이저빔이 조사되게 하였다.

회전은 분해능이 18°인 스텝모터를 이용하므로 1회전 200 step이 필요하다. 측정하고자 한 치형의 최초 주사 점으로부터 최후 주사 점까지의 각을 θ 라 하면 $360-\theta$ 는 데이터를 무시한다. X축으로 1회전이 완료되면 0.025[mm]만큼 평행 이동시킨다.



<그림 3> 시스템 배치

〈그림 4〉의 r 은 식(12)에서 계산된 z 값이므로 식(14)와 같이 실세계의 3차원 좌표를 구할 수 있다. 그러나 z 축에 대한 회전이 없으므로 옆면에 대한 측정이 부정확하므로 z 축을 90° 회전시켜 재 측정 후 영상처리프로그램에서 매칭시켜 해결하였다.



〈그림 4〉 3차원 좌표로 매핑

$$\begin{aligned}
 x &= \text{pitch size} \times n / 200 [\text{mm}] \\
 y &= r \cdot \sin\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) [\text{mm}] \\
 z &= r \cdot \cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) [\text{mm}]
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

단, pitch size=5[mm]이다.

2. 시스템의 구성

시스템은 마이크로프로세서로 스텝모터를 구동하여 카메라에 잡힌 영상을 처리하여 3차원 좌표를 얻도록 설계된 시스템이다. 시스템은 크게 마이크로프로세서부와 이를 제어하고 3차원 좌표를 얻는 프로그램, 얻어진 2개의 영상 데이터를 처리하여 코핑을 수행하고, 그래픽 처리하는 후처리 프로그램으로 나뉜다. 시스템 구성은 〈표 2〉와 같다.

〈표 2〉 시스템의 구성

장 치	모델명	수 량
제어용 PC	P-IV-1GHz	1
마이크로프로세서	AT89C52	1
스텝모터드라이버	SLA7024AM	2
영상캡처보드	MyVision99	2
CCD 카메라	HS1004	2

PC에 장착된 캡처보드를 통해 영상을 획득하여 처리하고, 다음으로 처리할 영상을 입력받기 위해 마이크로프로세서가 모터의 위치를 이동시키도록 영상처리 프로그램에서 통합 처리를 한다. 처리된 3차원 영상은 위치오차 0.025[mm]까지 측정이 가능하며, 영상의 해상도는 소프트웨어적으로 조절이 가능하도록 시스템을 설계하였다.

1) 마이크로프로세서

본 연구에서는 높은 분해능으로 치형을 스캔하기 위해 전용 디바이스를 제작하였다. 디바이스 구성은 모터 드라이버, 위치 검출부, 통신부 등으로 구성되고 이를 관리하는 마이크로프로세서가 탑재된 구조이다(강원찬,2001). 마이크로프로세서는 원 칩 마이크로프로세서인 AT89C52를 사용하였고, 스텝모터(PK-244, H-548)를 구동하기 위해 스텝모터 전용드라이버인 SLA7024AM과 L297을 사용하였고, PC의 응용 프로그램의 명령을 고속으로 처리하기 위해 고속 시리얼 통신을 사용하였다.

2) 영상처리 프로그램

영상처리 프로그램의 플로우차트는 그림 6에 나타내었다. 이것은 3차원 측정프로그램의 메인 프로세스로서 영상캡처 보드와 디바이스에 탑재된 마이크로프로세서를 구동하여 측정한 후, 측정된 데이터를 저장하고, 차후 후처리프로그램에서 측정된 데이터를 처리하여 그래픽으로 보여지게 된다. 주

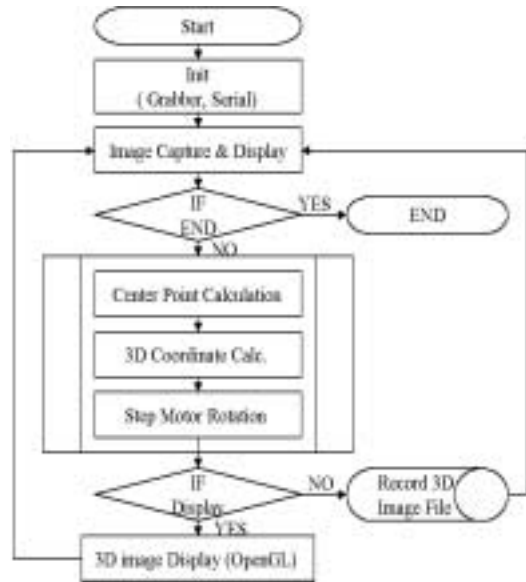
프로그램은 세 개의 쓰레드 즉 캡처보드 관리 프로세서, 시리얼 통신을 통한 마이컴 제어 프로세서, 3차원 좌표추출 프로세서로 구성되었다.

프로그램 수행이 시작되면 캡처보드와 시리얼 통신의 초기화가 진행되는데 캡처 보드는 좌측과 우측의 영상을 각각 빠르게 처리하기 위하여 두 개를 사용하였다. 처리되는 영상은 8bit 그레이 스케일로 NTSC 방식의 영상을 캡처하여 캡처보드의 프레임 버퍼에 30[Hz]마다 계속 영상을 갱신시키고, 프레임 버퍼 한쪽에선 입력 그리고 다른 한쪽에서는 가공이 가능하도록 더블 버퍼링을 통해 처리하는데, 이는 영상을 쓰레졸드(threshold) 처리시에 편리하기 때문이다.

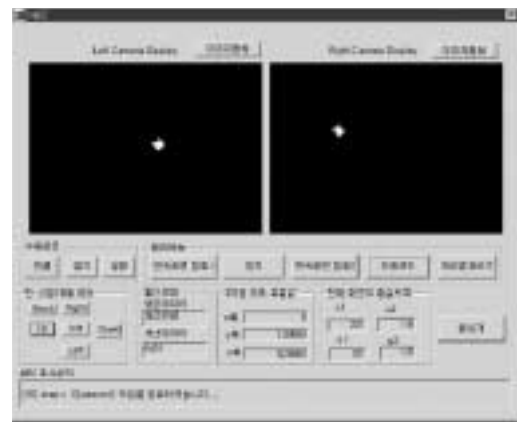
가공의 첫 단계는 쓰레졸드 필터링으로 0~255의 깊이를 갖는 영상 중 200보다 큰 레벨은 255로 200보다 낮은 레벨은 0으로 필터링을 한다.

필터링 된 영상은 타원의 모양을 나타내는데 이는 레이저빔이 가리키는 위치이고, 빔의 스포트 크기가 크게 나타나므로 이 스포트의 중심점을 구한다. 중심점이 결정되면 식 (14)에 의해 3차원 좌표로 변환되고, 다음 측정을 위해 모터를 이동시킨다. <그림 7>에 영상처리 프로그램을 보인다.

<그림 7>에서 중심점을 찾아 “+”자로 표시하고 3차원으로 변환된 좌표를 보여주고 있다. 좌측 카메라의 중심좌표가 221, 121이고 우측 카메라의 중심좌표가 116, 115일 때의 3차원으로 변환된 좌표는 6, 1.89693, 5.26893으로 변환된 결과를 보여주고 있다.



<그림 6> 프로그램의 플로우차트



<그림 7> 영상처리 프로그램

III. 결과 및 고찰

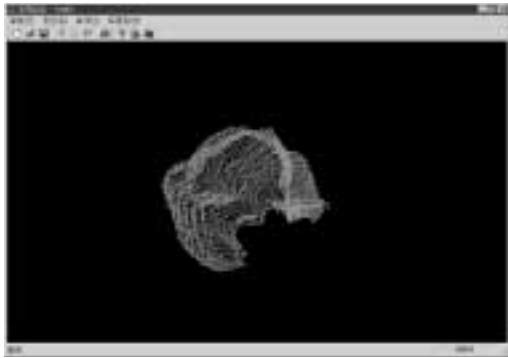
1. 영상 후처리

1) 폴리곤 모델

<그림 8>은 OpenGL 렌더링 명령에 따라 영상

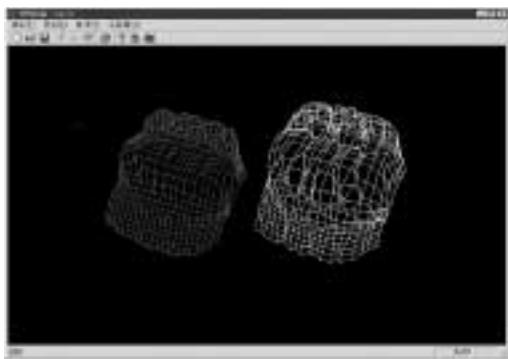
처리 프로그램에서 획득된 1개의 영상 데이터 (4800개의 데이터)를 폴리곤 모델로 보여준다.

〈그림 9〉는 2개의 폴리곤 데이터(기본 데이터와 90°회전시켜 얻은 데이터)를 매칭 처리 후 하나의 완전한 치형 데이터를 획득하여 다이와 코핑 모델로 변환한 결과를 보인다. 좌측 그림은 치형 데이터의 필요한 부분만을 추출하여 die model로 변환한 결과이고, 우측 그림은 치형 데이터에 일정한 두께를 부여한 coping model을 보여주고 있다.



〈그림 8〉 폴리곤 모델

2) Die와 coping model



〈그림 9〉 다이(왼쪽)와 코핑모델(오른쪽)

IV. 결 론

본 논문에서는 치형 표면의 3차원 형상데이터를 획득하기 위하여 치형의 영상을 두 대의 카메라로 캡처하여 거리를 측정하는 새로운 방법을 제안하였다. 두 영상의 2차원 좌표 값으로부터 실세계의 3차원 좌표 값을 얻는 변환 파라미터를 최소자승법으로 구하여 두 카메라의 영상좌표 값이 실세계의 좌표 값과 선형 관계가 있음을 증명하였다. 여기에 필요한 변환 파라미터를 구하기 위해서는 정확하게 측정된 다섯 개 이상의 규칙성을 갖지 않는 데이터를 사용할 때 오차가 작았다.

치과용 수복물의 설계시스템에 본 연구결과를 적용하기 위해 매칭 처리후 스캔된 치형에 금속물 모형을 입히는 코핑 과정을 통해 치과용 CAD/CAM 시스템을 구현 가능하도록 시뮬레이션 프로그램을 작성하였다.

본 논문에서 제안된 시스템은 분해능 0.025[mm]로 소형 물체를 측정할 수 있으나 분해능 높은 스텝모터나, 기어를 부착한 모터를 사용함으로 분해능을 자유롭게 조절이 가능하며, 소형에서 중·대형의 3차원 측정 및 변형에 응용이 쉽고 제작가격이 매우 경제적이므로 높은 활용이 기대된다. 또한 제안한 상관관계 기법을 통한 위치측정법은 간단한 행렬연산을 통해 계산되므로 기존의 방법보다 훨씬 빠른 결과를 나타내었고, 특히 부하의 변동이나 다른 시스템으로의 적용에 이식성이 높다.

향후 연구 과제는 더욱 향상된 3차원 측정 이론의 연구와 치형 데이터의 형상을 가공할 수 있는 가공시스템을 구축한다면 수작업에만 의존하던 치기공분야에 자동화 생산을 통한 고속화, 정밀화, 대량생산화, 저 비용화가 기대된다.

참고 문헌

- 강원찬, 신석두, 김영동. 실의 장력을 이용한 역감 장치. 대한전기학회 논문지 Vol 50P, No. 4, 192-198, 2001.
- 강원찬, 신석두, 김동욱, 김원배, 김영동. PC 기반의 6자유도 측각장치의 개발. 대한전기학회 논문지 Vol 50D, No 5, 211-217, 2001.
- 임동천. 수복물 설계를 위한 3차원 치형데이터의 획득 및 처리. 조선대학교 박사학위논문, 2002.
- Edward A. McLaren, John A. Sorensen, Fabrication of conservative ceramic restorations using copy-milling technology. QDT, 19-25, 1994.
- Jurgen Willer, Albrecht Rossbach, Hans-Peter Weber. Computer assisted milling of dental restorations using a new CAD/CAM data aquisition system, J Prosthet Dent, No 80, 346-353, 1998.
- Nacjum Samet, Benjamin Resheff, Shaul Gelbard, Noah Stern, A CAD/CAM system for the production of metal copings for porcelain-fused-to-metal restorations, J Prosthet Dent, No 73, 457-463, 1995.
- Roger y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. IEEE journal of robotics and automation, Vol RA3, No 4, 323-344, 1987.
- Wen-Jean Hsueh, Erik K. Antonsson. Automatic high-resolution optoelectronic photogrammetric 3D surface geometry acquisition system. Intl journal of Machine Vision and Applications, Vol 10, No 3, 98-113, 1997.