

레이저 스캐너를 이용한 측정 및 레지스트레이션시 오차감소에 관한 연구

홍성균*, 김연술*, 이희관**, 김형찬***, 양균의#

A Study on Reducing Errors in Scanning Object and Registration using a Laser Scanner

Sung Kyun Hong*, Yeun Sul Kim*, Hi Koan Lee**, Hyung Chan Kim*** and Gyun Eui Yang#

ABSTRACT

This study proposes a method to reduce errors in scanning object and registration using a laser scanner. The method consists of 3 stages. First, there is an error induced by the difference of the distance between the probe and the object. It is possible to reduce the error by planning a scanning strategy: object setting, scan path. Second, the scan data of the tooling ball affects calculating the tooling ball center. A z-direction compensation is given to calculate more accurate registration points. Third, three points are used to determine a coordinate transformation on each frame. The maximum error usually lies on the third tooling ball in the conventional merging method. LSM (Least Square Method) is applied to a coordinate transformation to reduce the registration error.

Key Words : Laser scanner (레이저스캐너), Tooling ball (툴링볼), Registration (레지스트레이션), Reverse engineering (역공학)

1. 서론

역공학이란 실제 형상을 측정하여 공학적 개념이나 형상 모델을 추출하는 것을 말한다. 역공학에서 현재 레이저 스캐너의 활용분야는 레이저 기술의 발달과 더불어 정밀도가 향상되어 시작품 개발뿐 아니라 임펠러, 금형 등 정밀한 제품에도 적용되고 있다. 특히 제품의 검사는 정밀한 측정을 요

하기 때문에 지금까지 접촉식 측정기가 많이 사용되었다. 그러나 접촉식 측정기는 정밀한 반면 측정 속도가 느리기 때문에 현재 접촉식 측정기와 비접촉 측정기의 장점만을 이용하는 통합시스템 개발에 대한 연구가 진행되고 있다.

Shen¹ 등은 기존의 CMM측정기, 자동 프로브, 3 차원 비전 시스템을 통합하여 고정밀도 데이터를 빠른 시간에 얻을 수 있는 시스템을 제안하였다.

* 접수일: 2003년 2월 1일; 개재승인일: 2003년 7월 11일

** 전북대학교 대학원

*** 전북대학교 자동차부품금형기술혁신센터

**** 한국생산기술연구원

교신저자: 전북대학교 기계항공시스템공학부

E-mail: geyang@moak.chonbuk.ac.kr, Tel: (063) 270-2322

그러나 이러한 시스템의 단점으로는 비전 센서의 정밀도가 접촉식 프로브 보다 현저하게 낮기 때문에 물체의 Localization의 정밀도가 떨어지고, 여러 방향에서 물체를 측정하지 않고서는 가림현상으로 인하여 모든 특정형상을 찾기가 힘들다. Nashman² 등은 비전 시스템과 CMM을 통합하여 측정 효율을 높이고자 하였다. 우선 비전 시스템을 이용하여 물체를 측정한 다음 특정형상 정보를 추출하고, 이를 통해 CMM의 측정계획을 수립하였다. Son³ 등은 CMM과 레이저 스캐너의 장점만을 동시에 사용하는 통합시스템 구축에 관하여 연구하였다. 이 방식은 자유곡면과 primitives를 동시에 포함하고 있을 때 유리한 방식으로, 먼저 물체의 자유곡면과 primitives를 판별하고, 자유곡면의 경우 레이저 스캐너를 이용하여 측정하고, primitives는 접촉식 측정기를 사용하여 빠르고 정밀하게 측정하는 방식으로, 목적에 적합한 장비를 사용함으로써 최종적인 곡면생성 및 error map의 생성을 좀더 효율적으로 할 수 있었다. Lee⁴ 등은 폐속 제품 개발의 요소 기술들 가운데에서 자유형상 제품의 신속한 설계 기술로서 큰 관심을 모으고 있는 전산 역설계 기술과 함께 이와 관련된 제품 측정 기술을 중심으로 소개하였다. 또한 이러한 측정 작업들을 자동화하기 위해서 필요한 요소들을 소프트웨어와 하드웨어의 관점에서 살펴보았고, 각각의 측정 장비의 장점들을 취합하여 측정 효율성을 극대화 할 수 있는 통합측정 시스템에 대해 소개하였다. 그러나 앞의 방법은 각 장비를 모두 보유하고 있어야 가능하고, 최종적으로 하나의 좌표계상에 존재하는 데이터를 얻기 위해서는 각 장비의 좌표계를 일치시켜주는 (registration) 과정이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 비접촉식 측정기만을 사용하여 역설계 및 검사시 정밀도 향상을 위하여 측정 및 레지스트레이션시 발생하는 오차의 원인을 분석하고 이 오차를 줄이는 방법에 대해 연구하였다.

2. 비접촉 측정기

2.1 측정 원리

광학식 측정법은 크게 점, 선 그리고 면적 측정 방식 등으로 분류할 수 있다. 점 측정방식은 광삼각법 또는 자동초점(auto-focusing)기능을 응용한 1차원 변위센서를 3차원 좌표측정기와 같은 기계적인 구동시스템에 장착하여 3차원 형상을 측정하는

방식이고, 선 측정방식은 슬릿광 형상측정법과 같이 한 단면씩 측정하여 형상을 재현하는 방식이며, 면적 측정방식은 모아레측정법(moire topography)이나 스테레오비젼과 같이 일정한 범위의 형상을 한번에 재현하는 방식이다.

본 연구에서 사용한 방식은 슬릿광 형상측정법으로 빠른 측정속도와 비교적 높은 정밀도를 얻을 수 있으면서 자동화가 용이한 장점이 있다. 사용된 장비는 LDI사의 3차원 레이저 스캐너로써 Surveyor DS-4060 System 이다. 사용된 프로브는 RPS-450으로 광원은 파장이 670nm인 다이오드레이저(diode laser)를 사용하였다. Laser stripe length는 40mm이고, Standoff distance는 86mm~200mm이고, Depth of field는 110mm으로 측정정밀도는 0.0254mm이다.

슬릿빔을 이용한 측정방법은 공간상에 평면으로 형성된 슬릿광과 컴퓨터비전을 이용한 광삼각법에 의한 삼차원 측정기술이다⁵. 이를 구현하기 위한 측정시스템은 Fig. 1과 같이 하나의 슬릿광원과 두 대의 카메라 그리고 프로브를 직선 방향으로 이송하기 위한 구동시스템으로 구성된다.

측정되는 좌표값 중 x, y좌표의 경우에는 레이저 프로브가 위치했을 때의 장비 축 좌표값으로부터 결정되어 비교적 정확하다. 그러나 z좌표값의 경우는 장비 축 위치 좌표값과 더불어 CCD카메라에서 얻어진 값으로부터 프로브와 물체간의 거리가 계산되어 결정되어지므로 x, y좌표값에 비해 정밀도가 상대적으로 낮다.

또한, 레이저 스캐너로부터 얻어진 데이터는 많은 양의 점들을 포함하고 있으며 레이저 광원의 산

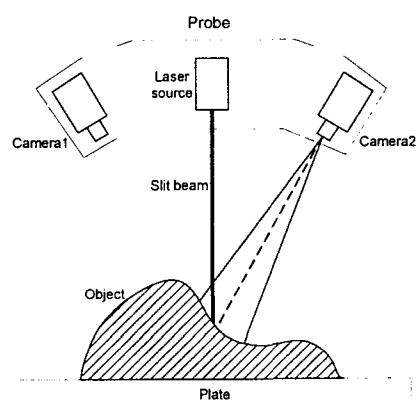


Fig. 1 Configuration of the laser measurement system

란, 혹은 측정물의 표면정도에 의해 발생하는 노이즈도 포함하고 있다. 따라서 spike, smoothing, filtering 등의 전처리 작업이 필요하다.

2.2 측정 및 레지스트레이션시 발생하는 오차

레이저 스캐너를 이용한 측정 및 레지스트레이션시 발생하는 오차는 다음과 같다. 첫째, 측정시 획득되는 오차로서 측정시 프로브와 측정물의 거리에 따른 오차. 둘째, 툴링볼의 중심을 구할 때 발생하는 오차. 셋째, 레지스트레이션시 발생하는 오차가 있다. 그밖에도 빛에 의한 측정은 주위의 온도 습도 등에 따라서 측정 오차가 달라지고, 측정기 자체의 오차, 작업자의 실수 등 많은 요인들이 있지만 본 논문에서는 주요한 세 가지 요인에 대해서 논한다.

3장에서는 측정시 발생하는 오차와 해결 방법을 제시하였다. 4장에서는 툴링볼의 중심위치 오차와 보정 방법을 제시하였고, 또 레지스트레이션시 발생하는 오차와 그 오차를 줄이는 방법을 제시하였다.

3. 측정시 발생하는 오차

3.1 프로브와 측정물 사이의 거리에 따른 오차

Fig. 2에서와 같이 카메라의 시야 각도에 따라서 z축 측정 영역이 결정되는데, 높이에 따른 측정 분해능이 달라져서 z축 높이에 따라 오차가 발생한다.

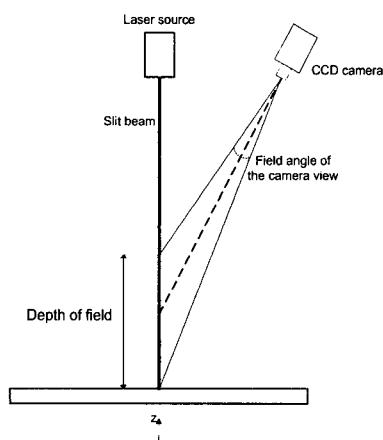


Fig. 2 Depth of field

이처럼 측정시 z축의 높이에 따른 오차를 분석하기 위해 Fig. 3과 같이 계단식 시편을 제작하고 접촉식 측정기(정밀도:3 μ m)로 측정한 후, 레이저스캐너로 측정하여 두 값을 비교, 분석하였다. 레이저스캐너에 의한 측정은 여러 가지 오차요인이 있기 때문에 총 15회를 측정하여 표준편차가 큰 값은 제외하고 총 10회의 측정값의 평균값을 이용하였다.

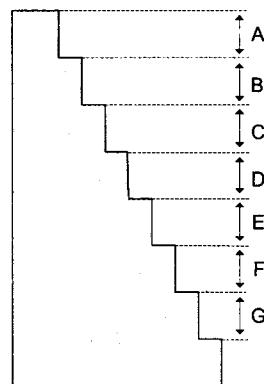


Fig. 3 Measuring with various z-height

Table. 1에서 알 수 있듯이 A, B, C, D, E, F에서는 오차가 적지만 G에서는 약 32 μ m정도의 오차가 발생함을 알 수 있다. 즉, z축으로 84mm 이상에서는 오차가 급격히 증가함을 알 수 있다. 본 논문에서 사용된 프로브는 RPS-450으로 z축으로 측정 범위가 110mm이지만 84mm 이상에서는 오차가 커짐을 알 수 있다.

Table1 Errors according to the z-height

unit:mm	CMM	L · S	Error	S · D
A	13.9968	14.00364	0.00684	0.00306
B	14.0027	14.00501	0.00231	0.00417
C	14.0006	14.00010	-0.00050	0.00564
D	14.0023	14.00017	-0.00213	0.00597
E	14.0070	13.99451	-0.01249	0.00638
F	14.0021	13.99853	-0.00357	0.00582
G	14.0002	14.03200	0.03180	0.00454
Sum	98.0117	98.03396	0.02226	0.00418

L · S - Laser scanner

S · D - The standard deviation

3.2 측정계획

프로브와 측정물의 거리에 따른 오차는 측정물의 세팅 및 측정 방향을 통해서 해결할 수 있다. 먼저 측정물의 세팅시에는 측정시 기울기가 커지지 않게 하고, 만약 측정시 기울기가 커지는 곳이 발생하게 되면 Fig. 4와 같이 스캔경로를 결정하여 오차를 줄일 수 있다.

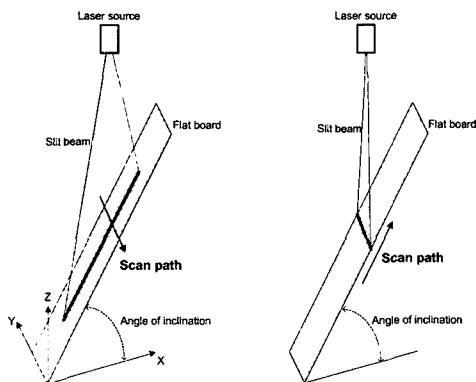


Fig. 4 Determine scan path at the slope

4. 레지스트레이션

레이저 스캐너의 경우 레이저 주사 방향은 한 방향으로 고정되어 있기 때문에 물체를 한 번에 측정하지 못하고 측정물을 여러 방향에서 측정해야만 한다. 이 때 여러 방향에서 측정된 점데이터군을 좌표변환 하여 하나의 좌표축으로 일치시키는 레지스트레이션 과정이 필요하다.

레지스트레이션 방법에는 점 데이터군들을 직접 비교하여 레지스트레이션하는 방법과 구, 원기둥, 평면 등과 같은 특징 형상을 이용한 레지스트레이션(feature based registration) 방법이 있다. 점 데이터군을 직접 비교하는 방법은 특징 형상을 사용하는 방법에 비해서 정밀도가 떨어지므로 일반적으로 특징형상을 이용한 레지스트레이션 방법이 많이 사용되고 있다⁶. 이러한 특징형상이 측정 대상물에 존재하지 않는 경우에는 인위적인 특징형상을 측정 대상물의 표면에 부착시켜 측정한 후, 이 특징형상을 레지스트레이션에 이용한다. 특징형상으로는 구(球)형의 툴링볼을 많이 사용하며, 레지스트레이션에 사용되는 점은 툴링볼의 중심점을 이용하게 된다.

서로 다른 좌표계를 일치시키기 위해서는 최소한 3점 이상의 데이터가 필요하기 때문에 각 방향에서 측정된 데이터에는 적어도 3개 이상의 툴링볼이 포함되도록 측정대상물의 측정 자세가 결정되어야 한다.

4.1 툴링볼의 중심위치 오차와 보정 방법

레이저에 의한 측정에서는 노이즈가 발생하여 정확한 툴링볼의 중심위치를 구하기 힘들고 측정시 툴링볼 데이터의 손실이 발생하면 툴링볼 중심위치에 영향을 미친다.

툴링볼을 이용한 측정시 먼저 고려할 사항은 몇 개의 툴링볼을 사용하여 몇 번의 측정을 할 것인가를 먼저 결정한다. 이 때 최소의 툴링볼의 개수로 최소의 측정회수를 구하는 것이 좋다⁷. 이렇게 최소의 툴링볼의 개수와 최소의 측정횟수로 측정할 때, 측정물의 세팅 자세에 따라서 툴링볼 측정시 전체의 일부분만 측정되는 경우가 발생하고, 또 측정물에 툴링볼이 부착될 때 툴링볼의 부착부위는 더 이상 구 형상을 갖지 않기 때문에 데이터의 손실이 발생한다.

데이터 손실로 인한 툴링볼 중심위치의 오차를 분석하기 위해 Fig. 5와 같이 하나의 툴링볼을 측정하고, 측정된 툴링볼의 측정 데이터의 양이 다를 때 각각 툴링볼의 중심 위치를 계산하였다. 툴링볼의 중심 위치는 LSM(Least Square Method)을 이용하여 구를 생성(fit sphere)하여 생성된 구의 중심점을 구하였다. 사용된 툴링볼의 반경은 12.7mm이다.

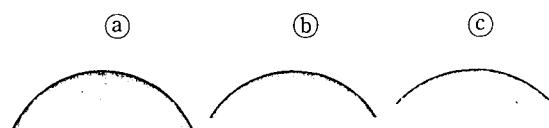


Fig. 5 Variable quantity of the scan data

Table 2 Center coordinates of each data

unit : mm	(a)	(b)	(c)
radius	12.7019	12.7139	12.7272
x	-593.0812	-593.0803	-593.0786
y	1149.6671	1149.6657	1149.6618
z	-457.7791	-457.7936	-457.8087

Table 3 Difference of errors

unit : mm	(a)-@	(b)-@	(c)-@
Difference of radius	0	0.0120	0.0253
Difference of x	0	0.0008	0.0025
Difference of y	0	0.0013	0.0052
Difference of z	0	0.0145	0.0296

Note : @ is reference

Table 2는 측정데이터의 양이 다를 때 계산되는 구의 반지름과 구의 중심위치를 보여준다. ①는 데이터 손실이 적으므로 반지름의 오차는 0.0019로 근사한 툴링볼의 중심 위치를 구할 수 있는 반면 ②, ③에서는 반지름 오차가 발생하기 때문에 구하고자 하는 중심위치 또한 오차가 발생한다.

Table 3은 ①를 기준으로 하여 ②, ③의 오차의 변화량을 보여준다. 여기서 측정 데이터의 양에 따라 툴링볼 중심의 x, y좌표값의 변화량은 적지만 z좌표값의 변화량은 15 ~ 30 μm 정도임을 알 수 있다. 이 수치는 무시하기에는 큰 수치이므로 보정이 필요하다.

Table 3에서 반지름 오차는 z좌표값의 변화량에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 생성되는 툴링볼의 반지름 값의 오차만큼 z축으로 보정하면 데이터의 손실로 인한 오차를 감소시킬 수 있다.

4.2 레지스트레이션시 발생하는 오차

툴링볼을 이용한 레지스트레이션 시 좌표변환은 세 점을 기준으로 한다⁸. 툴링볼의 각 중심점을 연결하면 삼각형으로 표현된다. 기준의 방법은 Fig. 6과 같이 각 프레임의 임의의 첫 번째 툴링볼의 중심을 원점으로 일치시키고 두 번째 툴링볼의 중심을 x축에 일치시키고 세 번째 툴링볼의 중심을 xy 평면에 일치시킨다. 그런 다음 두 프레임을 머지(merge)시킨다. 그런데 여기서 발생하는 문제점은 Fig. 6에서 알 수 있듯이 레지스트레이션 후 각 부분에서 툴링볼의 중심위치의 오차를 분석해 보면 첫 번째 볼에서는 항상 0이나 두 번째 볼에서는 x 축 방향으로 오차가 발생하고 세 번째 볼에서는 xy 평면으로 오차가 발생한다. 그래서 최대오차는 두 번째 볼에서 발생하기도 하지만 일반적으로 세 번째 볼에서 발생한다. 그리고 매칭 시 첫 번째 툴링볼을 어떤 것으로 선택하느냐에 따라 세 가지로 나누어지고 또 두 번째 볼을 어떤 것으로 하느냐에 따라 달라지기 때문에 방법은 총 6가지 방법으로 나누어질 수 있다. 그리고 각 방법에 따라 발생하는 오차도 달라진다. 그 이유는 각 삼각형의 변의 길이(툴링볼간의 거리)와 그에 따른 각의 크기가 다르기 때문이다. 또 임펠러와 같이 복잡한 형상으로 툴링볼 세개를 이용하여 여러 방향에서 여러 번 측정해야 하는 경우에는 세 번째 볼에서 오차가 누

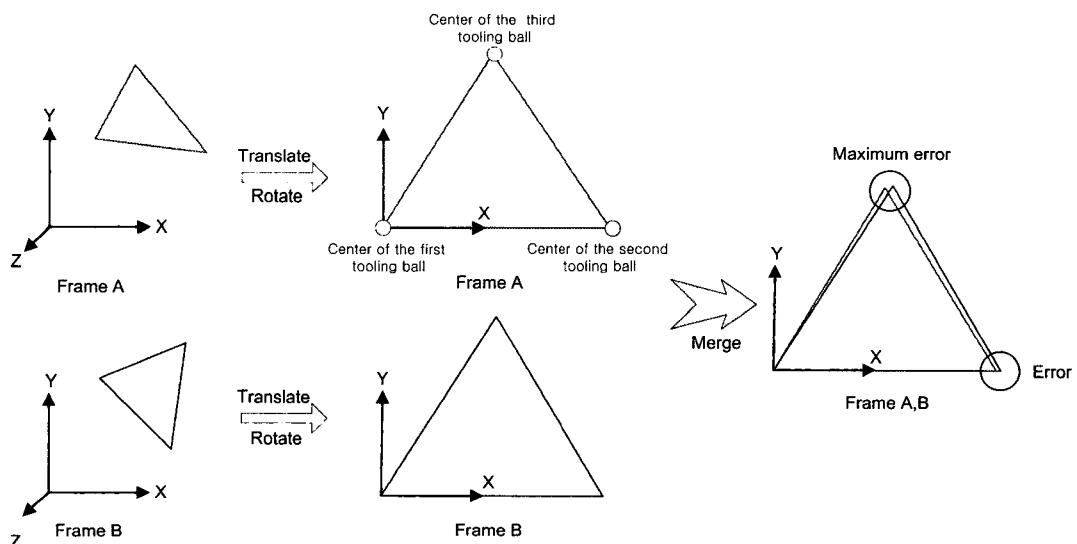


Fig. 6 The registration errors in conventional method

적되어 최대 오차는 더욱 증가하게 된다. 툴링볼간의 오차가 증가하면 이에 따라 레지스트레이션 오차도 증가한다. 그렇기 때문에 툴링볼간의 중심 위치 오차를 감소시켜 주는 방법이 필요하다.

4.3 최소자승법을 이용한 레지스트레이션

본 논문에서는 앞에서 발생한 문제점을 보완하기 위해서 레지스트레이션 시 최소자승법(LSM)을 이용한 레지스트레이션 방법을 제시하였다.

단위벡터와 월드좌표계에 대한 프레임{A},{B}의 원점은 주어져 있고, 프레임{B}는 고정되어 있고 프레임{A}는 움직인다. 이 때 프레임{A}와 프레임{B}를 LSM을 이용하여 일치시키는 4x4변환 행렬[TR]은 다음과 같다.

$$P_B = [TR]P_A \quad (1)$$

$$[TR] = T_D \times {}^G_A R^T \times T_{Z_a} \times T_{Z_r} \times {}^R_G T \quad (2)$$

여기서 P_A 는 프레임{A}에 있는 데이터의 월드좌표계에 대한 위치벡터를 나타내고, P_B 는 P_A 가 변환행렬에 의해서 변환된 월드좌표계에 대한 위치벡터를 나타낸다. 각각의 변환행렬은 다음과 같다.

1) ${}^R_G T$: 프레임{A}를 기준프레임{R}={Xr, Yr, Zr}에 대하여 변환한다. 이때 Fig. 7에 나타나 있듯이 $Xr=Za$, $Zr=Za \times Zb$, $Yr=Zr \times Za$ 이고, {R}의 원점은 {A}의 원점과 같다.

$${}^R_G T = \begin{bmatrix} {}^G_R R^T & -{}^G_R R^T P_{Aorg} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^G_R R^T = [\widehat{Z}_a \ \widehat{Y}_r \ \widehat{Z}_r] \quad (4)$$

식(3),(4)에서 G는 월드좌표계를 나타내고, R은 기준프레임, 기호 \wedge 는 단위벡터를, \times 는 벡터의 외적을 나타낸다. P_{Aorg} 는 월드좌표계에 대한 {A}의 원점을 나타낸다.

2) T_{Z_r} : 두 프레임의 Z축을 일치시키기 위해 {A}를 Zr에 대하여 θ °만큼 회전시킨다. 생성되는 프레임{A'}은 Fig. 7-(b)와 같이 나타난다.

$$T_{Z_r} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\widehat{Z}_a \cdot \widehat{Z}_b}{|\widehat{Z}_a| |\widehat{Z}_b|} \quad (6)$$

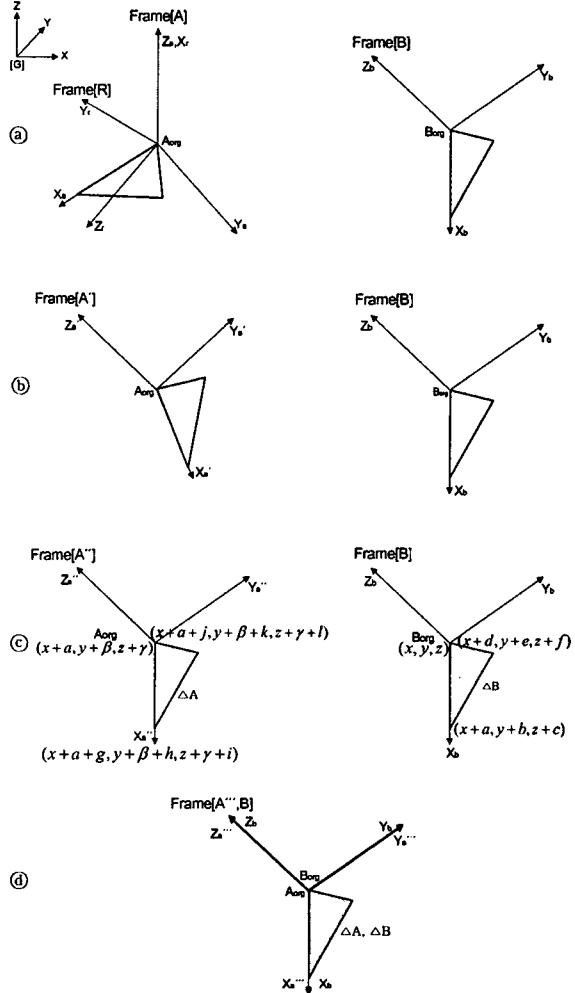


Fig. 7 Coordinate transformation between two frames.

- ② Generate a reference frame{R}
- ③ Rotate {A} about Z_r to obtain {A'}
- ④ Rotate {A'} about $Z_{a'}$ to obtain {A''}
- ⑤ Translate {A''} to obtain {A'''}

- 3) T_{Z_a} : 두 프레임의 X축을 일치시키기 위해 {A'}를 Z_a 에 대하여 ϕ °만큼 회전시킨다. 생성되는 프레임{A''}은 Fig. 7-(c)와 같이 나타난다.

$$T_{Z_\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

4) ${}^G_{A'} R$: 프레임 $\{A'\}$ 를 다시 월드좌표계로 변환한다.

$${}^G_{A''} T = \begin{bmatrix} {}^G_{A'} R & P_{A'org} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

5) T_D : 각 삼각형의 꼭지점간의 거리의 합이 최소가 되는 변환행렬이다.

$$T_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha \\ 0 & 1 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 1 & \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Borg의 월드좌표계에 대한 좌표를 (x,y,z) 라 하면 두 삼각형의 각 꼭지점의 좌표는 Fig. 7-④와 같이 상대좌표로 나타낼 수 있고, 각 삼각형의 꼭지점의 거리의 합이 최소가 되는 α, β, γ 는 식(10)에 의해 구해진다.

$$L = \sum (\Delta A - \Delta B)^2 \quad (10)$$

$$\therefore \alpha = \frac{g+j-a-d}{6}, \quad \beta = \frac{h+k-b-e}{6}, \quad \gamma = \frac{i+l-c-f}{6} \quad (11)$$

$a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l$: 상수

5. 적용사례

Fig. 8은 오차 감소를 고려한 역설계 및 검사의 전체적인 프로세스를 보여주고 있다.

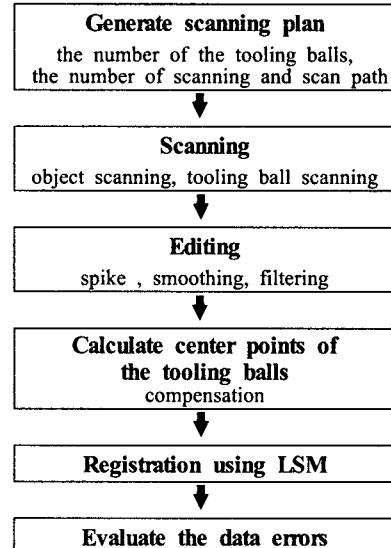


Fig. 8 Flow chart

Fig. 9는 프로브와 측정물의 거리에 따른 오차를 줄이기 위한 최적의 스캔경로를 보여준다.

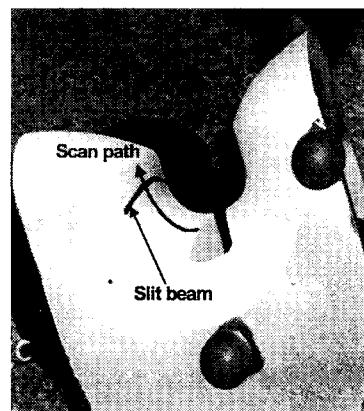


Fig. 9 Optimised scan path

Table 4는 기존의 방법과 툴링볼의 중심위치를 z방향으로 보정 할 때와 LSM을 이용하여 레지스트레이션 할 때 각각의 툴링볼간의 오차를 보여준다. Table. 4에서 알 수 있듯이 기존의 방법(A)을 사용한 경우 최대오차는 두 번째 볼에서 0.0343mm이고, 각 오차의 총 합은 0.0628mm로 나타났다. 그리고 z값을 보정 한 후에 기존의 방법으로 레지스트레이션 한 경우(B), 최대오차는 세 번째 볼에서 0.0268

mm로 기존의 방법(A)에 비해 최대오차가 감소하였고, 총 합도 0.047mm로 줄었다. 그리고 다시 z값을 보정한 후 LSM을 이용하여 레지스트레이션 한 경우(C), 최대오차는 첫 번째 볼에서 0.0157mm로 나타났고 이 값은 앞의 두 방법에 비해 감소하였고, 오차의 총 합도 0.0316mm로 줄었다. 결과적으로 측정물의 오차가 두 번째 및 세 번째 볼 부분으로 편중되는 것을 방지하여 최대오차를 줄일 수 있었고, 볼 중심들간의 오차의 총 합을 줄일 수 있었다.

Table 4 Each error of the registration methods

Unit : mm	A	B	C
Error of the first tooling ball	0	0	0.0157
Error of the second tooling ball	0.0343	0.0202	0.0047
Error of the third tooling ball	0.0285	0.0268	0.0112
Sum of each errors	0.0628	0.0470	0.0316

A - Conventional method

B - Registration method z-compensation of tooling ball center

C - Registration method using LSM

6. 결론

레이저 스캐너에 의한 측정 및 레지스트레이션 시 오차가 발생하는 원인을 분석하고 그 개선방법을 제시하였다.

첫째, 프로브와 측정물의 거리에 따른 오차이다. 이 경우, 측정물의 셋업 및 경사부위에서의 최적의 스캔경로를 결정하여 오차를 줄일 수 있었다.

둘째, 툴링볼의 중심위치를 구할 때 데이터의 손실이 발생하면 그 손실로 인해 툴링볼의 중심위치에 오차가 발생한다. 이때 발생하는 오차는 z축 방향 보정으로 오차를 줄일 수 있었다.

셋째, 기존의 레지스트레이션 방법은 레지스트레이션 시 오차가 두 번째 볼과 세 번째 볼로 편중되었다. 이를 보완하기 위해 레지스트레이션 시 LSM을 이용하여 툴링볼들간의 최대오차 및 전체 오차를 줄일 수 있었다.

참고문헌

- Shen, J., Huang and Menq, C., "Multiple-Sensor Integration for Rapid and High-Precision Coordinate Metrology," Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 908-915, 1999.
- Nashman, M., Rippy, W., Hong, T. H. and Herman, M., "An Integrated Vision Touch-Probe System for Dimensional Inspection Tasks," NIST Report, 1995.
- Son, S. B., Park, H. P. and Lee, K. H., "A Framework for the Integrated Measuring System," Fall Conference Proceeding of the Korean Society of Precision Engineering, pp. 436-439, 1999.
- Lee, K. H., Son, S. B. and Park, H. P., "Measurement Systems for Rapid Product Development," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 10, October 2000.
- Park, H. G., Kim, M. C. and Kim, S. W., "System Design and Camera Calibration of Slit Beam Projection for Measuring Accuracy," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 18, No. 5, pp. 1182-1191, 1994.
- Besl, P. J. and McKay, N. D., "A Method for Registration of 3-D Shapes," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, 1992.
- Kim, Y. W., Yoon, J. H. and Lee, K. H., "Development of Scanning and Registration Methods Using Tooling Balls," Journal of the Society of CAD/CAM Engineers, Vol. 4, No. 1, pp. 60-68, 1999.
- Lai, J.-Y., Ueng, W.-D. and Yao, C.-Y., "Registration and Data Merging for Multiple Sets of Scan Data," Int J Adv Manuf Techno 15:54-63, 1999.