

## 멀티센서 시스템을 이용한 3차원 형상의 기상측정에 관한 연구

권양훈\*, 윤길상\*(인하대 대학원 기계공학과), 조명우\*\*(인하대 기계공학부)

### A Study on the 3-dimensional feature measurement system for OMM using multiple-sensors

Y.H. Kwon\*, G. S. Yoon\*(Grad. School, Inha University), M. W. Cho\*\*(Dept. of Mechanical Eng., Inha University)

#### ABSTRACT

This paper presents a multiple sensor system for rapid and high-precision coordinate data acquisition in the OMM (On-machine measurement) process. In this research, three sensors (touch probe, laser, and vision sensor) are integrated to obtain more accurate measuring results. The touch-type probe has high accuracy, but is time-consuming. Vision sensor can acquire many point data rapidly over a spatial range but its accuracy is less than other sensors. Also, it is not possible to acquire data for invisible areas. Laser sensor has medium accuracy and measuring speed among the sensors, and can acquire data for sharp or rounded edge and the features with very small holes and/or grooves. However, it has range-constraints to use because of its system structure. In this research, a new optimum sensor integration method for OMM is proposed by integrating the multiple-sensor to accomplish more effective inspection planning. To verify the effectiveness of the proposed method, simulation and experimental works are performed, and the results are analyzed.

#### Key Words

OMM (기상측정, On-Machine Measurement), Touch Probe (터치프로브), Laser sensor (레이저센서), Vision System (비전시스템), Multiple-Sensor Integration (멀티센서융합), Inspection Planning (측정계획)

#### 1. 서론

본 연구에서는 기상측정(OMM)에서 일반적인 3차원 형상측정에 사용되는 접촉식 및 비접촉식 센서를 융합하여 각각의 장점을 결합하고, 이를 통하여 보다 정밀한 형상정보를 신속하게 획득할 수 있는 방법을 다루었다.

기상측정에서는 CMM 장비의 경우와 같이 접촉식 프로브(touch-type probe), 레이저 센서 (laser

sensor), 비전시스템(vision system) 등과 같은 측정센서가 주로 채택되어 사용되고 있으며, 이는 접촉식 센서와 비접촉식 센서의 두 가지로 크게 분류할 수 있고, 각 센서들은 분해, 측정속도, 측정범위 등에 따라 서로 다른 특성을 나타낸다.

접촉식 센서인 터치 프로브는 상대적으로 정밀한 측정데이터를 얻을 수 있으나 많은 측정시간이 소요되어 대상 면적이 넓은 경우에 비효율적이고, 접촉에 의해 형상이 변형될 수 있는 표면을 갖는 물체의 경우 측정이 곤란한 어려움을 갖고 있다. 비접촉식 센서로는 비전시스템과 레이저센서 두 가지의 센서가 사용된다. 비전시스템의 경우 광학적 측정방법으로 점, 선, 면적 측정방식으로 나눌 수 있는데, 레이저 슬릿빔 또는 빔프로젝터(DLP)의 슬릿빔을 이용한 선 측정방식과 모아레 측정법(moiré topography)이나 스테레오 비전(stereo-vision)과 같은 면적 측정방식의 경우 빠른 측정속도와 비교적 높은 정밀도를 얻을 수 있다. 그러나 카메라가 고정되어 있는 경우 단일 뷰(single view)로부터 발생하는 보이지 않는(invisible) 영역이 생기게 되어 측정데이터를 얻을 수 없는 영역이 존재하게 된다. 레이저센서의 경우 선 측정방식으로 비전시스템과 마찬가지로 빠른 측정속도와 높은 정밀도를 얻을 수 있으며, 날카롭거나 둥근 모서리 부분과 터치 프로브로 측정할 수 없는 매우 작은 구멍이나 홈 등에 대한 측정이 가능하지만, 스캐닝할 수 있는 깊이 범위(range)에 대한 제약과 레이저 센서의 구조적 문제로 인하여 사용이 제한적이다.

따라서, 본 연구에서는 위의 세가지 센서를 융합하여 기상에서의 신속하고 정밀한 측정이 이루어 지도록 가장 효율적인 측정계획을 수립하기 위한 알고리즘을 제안하였으며, 이를 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 효용성을 검증하였다.

#### 2. 멀티센서 측정시스템

## 2.1 시스템 구성

멀티센서 측정시스템은 Fig.1 에 도시한 바와 같이 터치프로브, 레이저센서, 비전시스템 3 가지 센서로 구성된다. 터치프로브는 평면데이터(plane surface) 및 일반적인 가공특징형상(Geometric feature)에 대한 측정을 수행하고, 비전시스템은 측정대상물의 위치, 동향에 대한 데이터와 자유곡면(sculptured surface)에 대한 측정을 수행하며, 레이저센서는 프로파일, 날카롭거나 둥근 모서리(edge)와 터치 프로브가 접근할 수 없는 작은 구멍 및 홈에 대한 측정을 수행하도록 분류하였다. Fig.1 에 본 연구에서 제안된 측정계획을 도식화 하였다.

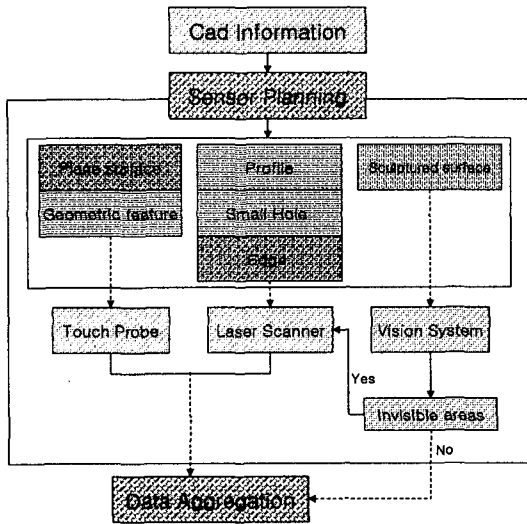


Fig.1 Multiple-Sensor Inspection Planning

CAD 정보로부터 Fig.1 의 측정계획 (Sensor Planning)에 따라 각각 측정 영역에 대한 측정이 이루어진다. 크게 두 가지 방식으로 나뉘는데, 하나는 터치 프로브와 레이저센서에 의한 측정이고, 다른 하나는 자유곡면에 대한 비전시스템과 레이저센서의 결합이다. 비전시스템의 경우 보이지 않는 영역에 대해서는 카메라 위치 및 동향의 변경을 통해 해결할 수 있으나, 그렇지 못한 경우에 있어서는 보이지 않는 영역에 대해 레이저센서를 이용하여 측정한다. 각 측정센서에 의한 데이터는 데이터 통합 모듈을 통해 저장된다. 터치 프로브에 의해 측정되는 공작물의 특징형상 분류는 2.2 절의 Fig.2 와 같다.

## 2.2 터치프로브에 의한 측정

터치 프로브에 의한 측정형상은 일반적으로 CAD 데이터나 가공단계에서 분류할 수 있는 기하학적 특징형상으로 Fig.2 와 같이 분류할 수 있다.

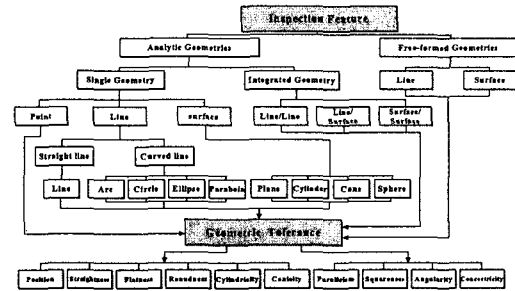


Fig.2 Geometric feature classification for inspection

본 연구에서 터치 프로브에 의한 측정절차는 Fig.3 과 같이 측정정밀도와 형상을 고려하여 퍼지이론을 적용하여 최소 측정점의 수를 결정하고, 이 측정점들을 Hammersley method 에 의하여 적절하게 분포시킨 후 여기에 충돌회피 알고리즘 및 최소거리 알고리즘을 적용하여 측정경로를 생성하였다.

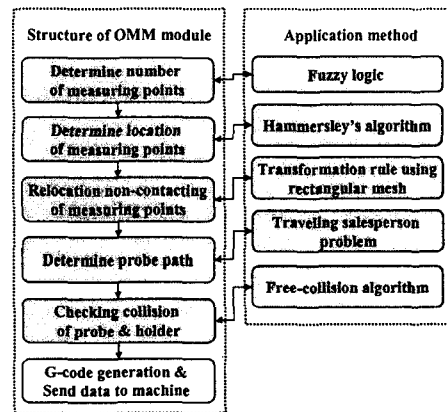


Fig.3 Structure of OMM

### 2.2.1. 터치프로브 측정경로 생성

위의 퍼지이론, Hammersley 방법, TSP 알고리즘을 적용하여 생성된 측정대상물의 윗면에 대한 측정경로와 실행모습은 Fig.4, 5 와 같다. Fig.5 의 시편의 경우 프로브의 최소 측정반경보다 작은 구멍은 터치 프로브에 의한 측정이 불가능하므로 레이저센서를 이용하여

측정이 이루어지며, 두 측정 데이터는 통합되게 된다.

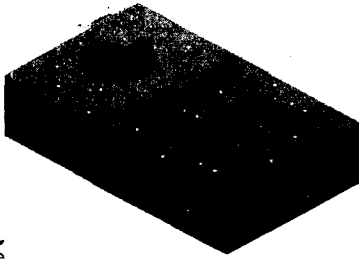


Fig.4 The inspection path generated

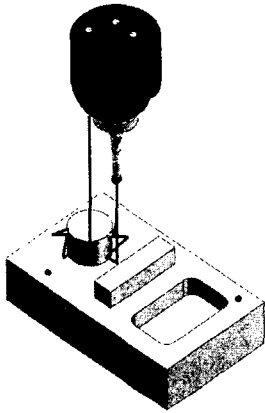


Fig.5 OMM Inspection process

기호를 나타낸다. 실험결과 터치 프로브에 의한 측정방법은 Fig.2 에서 분류한 특징형상에 대해 가장 효율적인 측정방법임이 입증되었다.

### 2.3 레이저센서에 의한 측정

레이저 센서는 측정속도가 빠르고 정도가 우수할 뿐만 아니라 스캐너의 측정방식에 따라서 점 데이터가 라인 형식으로 측정되어지므로, 단면곡선을 이용한 곡면생성의 경우에 유리하다. 또한 날카롭거나 둥근 모서리 부분 및 프로파일 측정과 터치 프로브의 접근이 불가능한 매우 작은 구멍 및 홈의 측정이 가능하다. 그러나 특정 데이터에 노이즈를 포함하는 경우가 많아 획득한 데이터의 샘플링을 거쳐야 하는 추가 작업이 필요하다. 실험에 사용된 레이저 센서는 Fig.6 과 같다.



Fig.6 Data acquisition using a laser Sensor.

Table.1 Geometric error of each feature (mm.rad)

	B <sub>1</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	B <sub>1</sub> , F <sub>1</sub>	B <sub>1</sub> , F <sub>2</sub>	B <sub>1</sub> , F <sub>3</sub>
position	.015	.007	.018	.043			
Straightness	.023		.136	.037			
Flatness	.056	.003	.083	.015			
Roundness		.043		.017			
Cylindricity		.044		.016			
Conicity							
Paralleism					.075	.072	.073
Squareness					.029	.031	
Angularity							
Concetricity							

본 연구에 사용된 총 측정점의 수는 74 개로 전체 측정시간은 약 15 분 정도 소요되었으며, 측정 결과는 Table.1 과 같다. 여기서 가로축은 Fig.2 의 분류방법에 의해 분류된 각 측정면의

#### 2.3.1. 프로파일의 측정

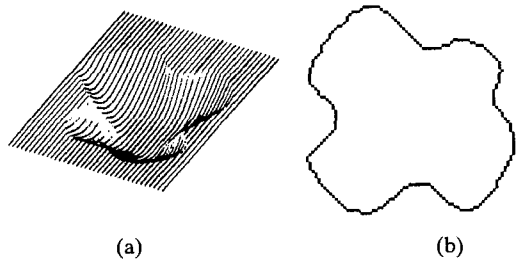


Fig.6 Laser scanning data (a) and the profile (b)

레이저 센서를 이용한 스캔 데이터의 경우, 이송방향의 거리에 따라 Fig.6 과 같이 라인 형태의 연속적인 데이터를 얻을 수 있었으며, 에지 부분에 대한 데이터를 선명하게 얻을 수 있다. 그러나 레이저센서의 측정깊이범위에 따른

조절이 필요하며, 한 방향에 대한 스캔라인으로는 데이터를 얻을 수 없는 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 가로 및 세로 등 여러 방향으로의 스캐닝을 통해 데이터를 획득할 필요가 있다.

### 2.3.2. 작은 구멍의 측정

Fig.5 과 같이 터치 프로브에 의한 측정이 불가능한 작은 홀의 지름을 레이저 센서를 이용하여 측정한 결과를 Fig.7에 나타내었다.

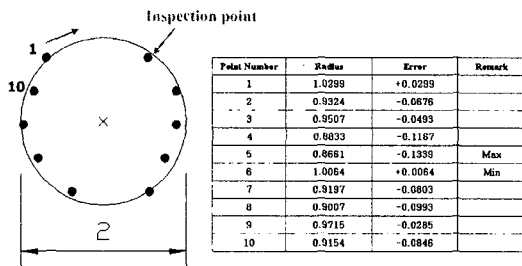


Fig.7 The inspection result of small hole (mm)

### 2.4. 비전시스템에 의한 측정

Fig.8 은 실험에 사용된 비전시스템의 구성도를 보여준다. 비전시스템을 이용한 3 차원 형상의 측정에는 일반적으로, 레이저 슬릿빔을 이용한 측정이 많이 이루어지고 있으나, 여기서는 빔 프로젝터 (DLP)를 통해 프로그램이 가능한 슬릿빔을 사용하여 측정을 수행하였다. 레이저 슬릿빔의 경우 단일 형태의 빔 만을 생성할 수 있으나, 빔 프로젝터의 경우 프로그램에 의하여 다양한 형태의 빔을 생성할 수 있어 효과적인 응용이 가능하다.

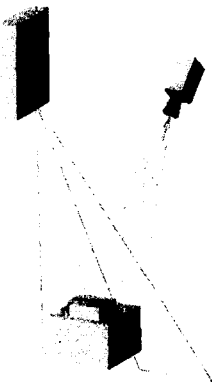


Fig.8 3D inspection process using vision system.

비전시스템은 측정공간 내에서 측정대상물의 수많은 측정 데이터를 단시간 내에 얻을 수 있다는 장점이 있다. 슬릿광 형상 측정법은 공간상에 평면으로 형성된 슬릿광과 CCD 카메라 사이의 기하광학을 이용한 측정기술로, 측정 대상물의 공간상의 실제 측정 데이터는 빔 프로젝터의 슬릿빔과 CCD 카메라의 투영선이 만나는 교점을 구함으로써 얻을 수 있는데, 여기서는 두 개의 보정평면을 이용한 카메라 보정기법을 적용하여 측정하였다.

#### 2.4.1 카메라 보정

두개의 보정평면을 이용한 보정에서는 식(2)와 식(3)을 적용하여 Fig.9 의 보정면 1, 2 상의 보정점과 CCD 카메라 영상점들 간의 변환행렬을 최소자승법을 이용하여 구할 수 있다.

$$Q_i \approx A_i P_i \quad (2)$$

$$A_i = Q_i P_i^T [P_i P_i^T]^{-1} \quad (3)$$

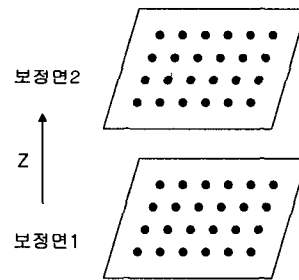


Fig.9 Calibration Plate 1, 2

이때 얻어진 변환행렬은 카메라의 왜곡현상을 반영하지 못하므로, 이러한 카메라 왜곡에 대한 보정이 필요하다. 본 실험에서는 400 개의 보정점을 제작하여 실험을 수행하였고, Fig.10 은 카메라의 왜곡에 대한 보정이 없는 오차를 나타낸 결과이다. 카메라 왜곡현상에는 주로 반경 방향의 왜곡현상이 주된 요인으로 작용하는데, 여기서는 변환행렬에 의해 매핑되는 에러맵을 2 변수의 2 차 곡면으로 근사화 시킴으로써 오차를 보정하였다. x, y 방향에 대한 오차의 보정 결과는 Fig.11 과 같다. 위치오차는 대략 200 μm 이내에서 나타나며 x 방향의 오차가 더 적게 나타났다. RMS error 는 약 90 μm였는데, 측정에 있어 다소 큰 오차를 나타내었다. 다소 보정평면의 제작 및 카메라 영상점의 보정에서의 오차가 크게 작용한 것으로 보인다. 비전 시스템을 사용하는 측정작업에서의

일반적인 오차는 10 μm 정도까지 보정이 가능한 것으로 알려져 있다.

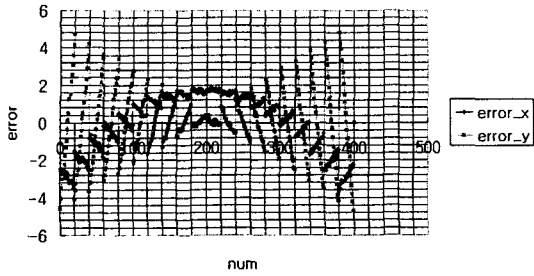


Fig.10 The errors of uncalibrated CCD camera (mm)

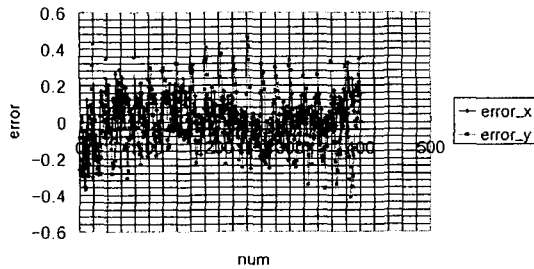


Fig.11 The errors of calibrated CCD camera (mm)

#### 2.4.2 슬릿빔 평면방정식

슬릿빔의 평면방정식은 공간상에서 식(4)와 같이 표현될 수 있다. 카메라 보정이 끝나고 식(3)에서 계산된 두개의 변환행렬 A1, A2의 역행렬을 이용하여 보정면 1과 2에 각각 방사된 슬릿빔의 영상점 궤적을 이미지 프로세싱을 통해 서브픽셀 단위로 추출하고, 식(5)의 최소자승법을 이용하여 근사적인 슬릿빔의 평면방정식을 계산할 수 있다.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4)$$

$$C = [M^T M]^{-1} M^T X \quad (5)$$

여기서

$$C = \begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ \dots \\ xl \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} y1 & z1 & 1 \\ y2 & z2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ yl & zl & 1 \end{bmatrix}$$

#### 2.4.3 CCD 카메라의 투영선

카메라의 투영선은 Fig.9에 나타난 바와 같이

보정면 1과 2 사이에 측정 물체가 존재할 경우 식(6)과 같이, 카메라 영상점(Q)들의 보정면 1, 2에 대한 변환행렬을 이용하여 실제 좌표 P1, P2로 계산할 수 있고 이때 공간상의 두 점은 직선을 이루며, 그 직선의 방정식은 식(7)로 표현할 수 있다.

$$P_i = A_i^{-1} Q \quad (6)$$

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (7)$$

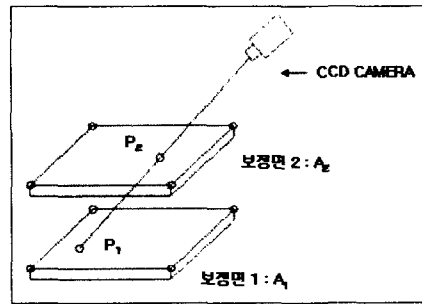


Fig 12. Perspective line of CCD camera

#### 2.4.3 슬릿빔과 카메라투영선의 교점

측정 물체의 3차원 공간좌표는 측정대상물에 평면방정식을 알고 있는 슬릿빔을 투영하고, 카메라 영상에 잡힌 이미지를 영상처리를 통해 서브픽셀 단위로 추출하여 생성된 궤적을 따라 슬릿빔 평면 방정식과 카메라 투영선의 교점을 반복하여 계산함으로써 모든 3차원 공간좌표를 얻을 수 있게 된다. 식(8)은 슬릿빔 평면방정식과 카메라 영상선과의 교점을 구하는 관계를 정리한 것이다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{(bm + cn)x_1 - (by_1 + cz_1 + d)l}{al + bm + cn} \\ y &= \frac{(al + cn)y_1 - (ax_1 + cz_1 + d)m}{al + bm + cn} \\ z &= \frac{(al + bm)z_1 - (ax_1 + by_1 + d)n}{al + bm + cn} \end{aligned} \quad (8)$$

#### 2.4.4 비전시스템 측정결과

비전시스템에 의한 자유곡면의 측정 결과는 Fig.13과 같다. 빔 프로젝터의 슬릿빔의 경우 레이저 슬릿빔 보다 상대적으로 빔의 두께가 커서 영상처리를 통해 얻게 되는 슬릿빔 궤적의 정확함

중심점을 찾는 것이 어려웠다. 그에 따른 오차와 함께 카메라 보정에서 남아있는 잔류오차로 인하여 측정결과는 다른 측정시스템에 비하여 오차가 큰 편이나 전체적인 측정물의 형상을 표현하기에는 부족함이 없는 것으로 보인다. 또한 카메라의 설치 위치에 따라 측정물의 보이지 않는 영역이 남아있어 완전한 측정 데이터를 얻을 수는 없다.

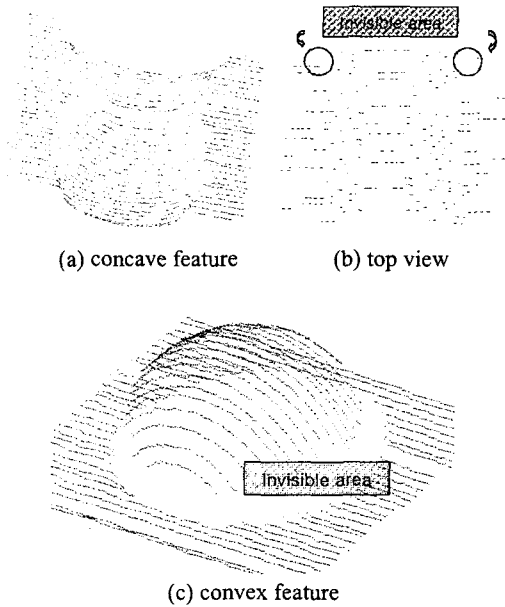


Fig.13 비전시스템 측정결과

Fig.13 에서의 보이지 않는 영역에 대해서는 레이저센서를 이용하여 측정을 수행하며, 추후 모든 측정데이터는 통합 분석된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 기상측정에서 널리 사용되는 터치 프로브, 레이저센서, 비전시스템의 3 가지 측정 센서의 장, 단점을 분석하여 이들 센서를 통합함으로써 빠르고 정밀한 측정을 수행할 수 있도록 측정대상물의 형상 특성에 따라 측정계획을 달리하는 시스템을 제안하였다.

터치프로브는 일반적인 가공형상에 대해 빠르고 효율적인 데이터 획득에 유리하며, 레이저스캐너를 이용한 예지영역 및 프로파일, 터치프로브의 접근이 어려운 작은 홀에 대한 측정이 가능하다.

또한 비전시스템의 경우 기존의 레이저 슬릿빔을 사용하는 대신 빔 프로젝터를

이용함으로써 다양한 형태의 슬릿빔을 이용한다 보다 신속한 측정이 가능하였으나, 정밀도 면에서는 떨어지는 것으로 분석되었다. 이에 대한 이유로는 첫째 카메라 보정에 사용되었던 보정평판의 정밀도, 카메라 자체의 왜곡현상에 대한 오차 보정이 상대적으로 정밀하지 못했기 때문이며, 빔 프로젝터의 슬릿빔 자체의 보정이 기존의 레이저 슬릿광 보다 떨어졌기 때문으로 분석된다. 향후 오차보정에 대한 보다 정확한 알고리즘의 개발 및 정밀한 보정면의 제작이 이루어진다면 보다 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고문헌

[1] T.S. Shen, J.H. uang, C.H. Meng. "Multiple-Sensor Planning and Information Integration for Automatic Coordinate Metrology", Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol.1, 2001.  
 [2] Tzng-Sz Shen, Chia-Hsiang Meng, "Automatic Camera Calibration for a Multiple-Sensor Integrated Coordinate Measurement System", IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 4, 2001  
 [3] Tzng-Sz Shen, Chia-Hsiang Meng, "Digital Projector Calibration for 3-D Active Vision Systems", Transactions of the ASME, Vol.124, Feb,2002  
 [4] Tzng-Sz Shen, Jianbing Huang, Chia-Hsiang Meng, "Multiple-Sensor Integration for Rapid and High-Precision Coordinate Metrology", IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol.5, No.2, June,2000.  
 [5] Cho M.W. and Kim, K., "New Inspection Planning Strategy for Sculptured Surfaces Using Coordinate Measuring Machine.", International Journal of Production Research, Vol. 33, No. 2, pp. 427-444, 1995  
 [9] 박영근, 고태조, 김희술, "역공학에서 센서융합에 의한 효율적인 데이터 획득", 한국정밀공학회지 제 18 권 제 9 호, pp 61~70,  
 [10] 조명우, 김진섭, 서태일, 조재형, "CAD/CAM /CAI 통합에 기초한 자유곡면의 On-Machine Measurement : II. 측정계획 수립", 한국정밀공학회지 제 16 권 제 12 호, pp 109-118. 1999.12