

## 두장의 사진을 이용한 광삼각법 삼차원 측정

양주웅\*, 이호재(고등기술연구원 생산기술연구실)

### Coordinate Measuring Technique based on Optical Triangulation using the Two Images

J. W. Yang, H. J. Lee(Manufacturing Technology Lab., IAE)

#### ABSTRACT

This paper describes a coordinate measuring technique based on optical triangulation using the two images. To overcome the defect of structured light system which measures coordinate point by point, light source is replaced by CCD camera. Pixels in CCD camera were considered as virtual light source. The overall geometry including two camera images is modeled. Using this geometry, the formula for calculating 3D coordinate of specified point is derived. In a word, the ray from a virtual light source was reflected on measuring point and the corresponding image point was made on the other image. Through the simulation result, validation of formula is verified. This method enables to acquire multiple points detection by photographing.

**Key Words :** Optical Triangulation(광삼각법), Coordinate Measurement(좌표 측정), Multiple Points Detection(다점 검출)

#### 1. 서 론

물체의 삼차원 좌표를 측정하는 방법으로 물체상에 측정점을 형성하는 광원과 측정점을 인식하는 센서의 기하학적 관계를 이용한 삼각측량법이 많이 이용되고 있으며, 이러한 방법들은 크게 스테레오비전(stereo vision), 모아레(moire), 구조광(structured light) 방법으로 구분된다[1].

스테레오비전은 평행하게 설치된 2대의 카메라로부터 획득된 1쌍의 영상을 이용하여 3차원 좌표를 측정하는 방법으로 기초선(baseline)의 길이가 증가할수록 중첩되는 영상의 범위가 작아지기 때문에 넓은 측정영역을 확보하기 어렵다는 단점이 있다. 구조광 방법은 주로 레이저(laser)를 광원으로 사용하여 물체상에 측정점을 형성하고, 이 때 영상면에 맺힌 영상점의 영상좌표(image coordinate) 및 광원과 CCD 카메라의 위치 관계로부터 측정점의 삼차원 좌표를 구한다. 이러한 경우에는 점단위의 측정이 이루어지기 때문에 물체를 주사(scanning)하는 과정이 반드시 포함되어야만 한다. 이로 인하여 많은 측정시간이 소요되고, 측정결과에도 나쁜 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 구조광방법과 같은 기하학적인 구성을 가지고 스테레오 비전과 같이 동시에 여러 점이 측정될 수 있는 비접촉 삼차원 측정방법을 제안하고자 한다. 즉 구조광방법에서 광원에 의하여 형성되는 측정점과 CCD 카메라에 맺히는 영상점을 동시에 여러 위치에 형성시키는 방법으로서 레이저와 같은 실제광원(real source) 대신에 CCD 카메라를 구성하고 있는 임의의 화소(pixel)를 가상광원(virtual source)로 간주한다. 결국 CCD 화소에 의하여 물체상에 측정점들이 동시에 형성되고, 각각의 측정점에 대응되는 CCD 카메라의 영상점들을 확인함으로써 물체의 삼차원 좌표를 측정할 수 있다.

이와 같은 목적을 달성하기 위하여 본 연구에서는 구조광방법의 시스템구성에서 레이저 광원 대신에 CCD 카메라를 위치시키고, 광선의 기하관계로부터 물체의 삼차원 좌표를 계산하는 수학적 모델을 제안하였다. 제안된 수학적 모델은 가상의 측정점에 대하여 얻어진 영상점의 영상좌표를 이용한 시뮬레이션 과정을 거쳐서 검증되었고, 간단한 실험을 수행하여 결과를 제시하였다. 본 연구에서 제시한 삼차원 좌표측정 방법은 수 m의 크기를 가지는 대형구

조물의 특징점들에 대한 빠르고 정확한 측정을 요구하는 경우에 적합한 방법이다.

## 2. 이론

### 2.1 기존의 구조광방법

구조광방법은 기하학적 패턴을 가진 광원을 사용하여 측정 대상물을 조명하고, 조명된 물체의 영상을 획득하여 측정점의 삼차원 좌표를 측정하는 방법이다. 이 중에서 레이저 투사기와 카메라를 이용한 단점 투사 방식은 Fig. 1과 같이 레이저 광선을 이용하여 물체상에 측정점을 형성시킨 후, 투사각도( $\theta$ )와 카메라의 영상면에 맺힌 영상점의 위치( $x',y'$ ) 및 레이저와 카메라 사이의 거리( $b$ )를 이용하여 측정점의 좌표( $x,y,z$ )를 측정하는 방법이다.

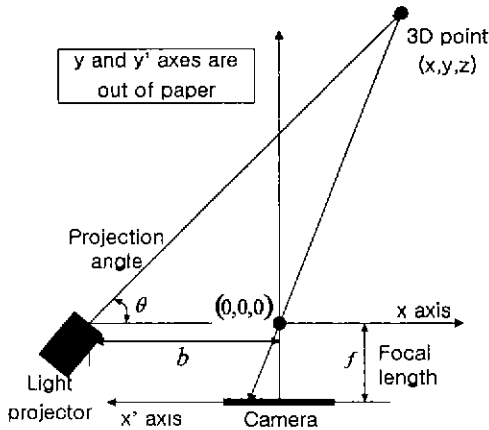


Fig. 1 Camera-centered triangulation geometry [2].

Fig. 1의 기하를 이용하면 측정점의 3차원 좌표는 식(1)로부터 계산된다[3].

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{b}{f \cot \theta - x'} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$(x,y,z)^T$  : 측정점의 3차원 좌표

$(x',y')^T$  : 영상좌표

### 2.2 두장의 사진을 이용한 측정방법

2.1 절에서 설명한 구조광방법은 점단위의 순차적인 측정을 하기 때문에 많은 측정시간이 요구되며, 측정값의 정확도에 나쁜 영향을 준다. 따라서 본 장에서는 실제광원인 레이저를 대신하여 가상광원인 CCD 카메라를 사용하고, 여기에서 측정점의 삼차원 좌표를 계산하는 방법을 설명하고자 한다. 즉 CCD

카메라를 구성하고 있는 각각의 화소를 하나의 점광원으로 간주하고, 이에 대응되는 영상점의 영상좌표를 구함으로써 측정점의 삼차원 좌표를 얻을 수 있다.

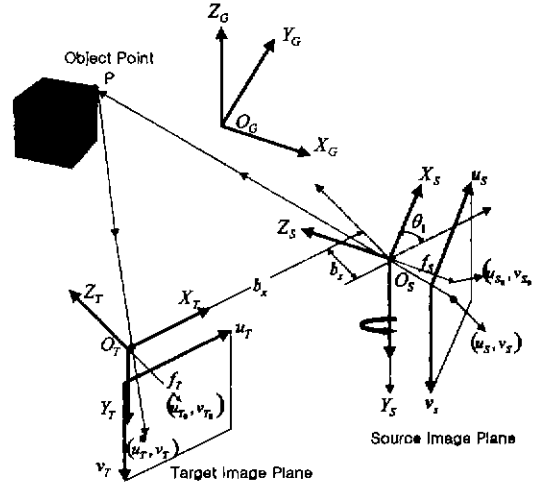


Fig. 2 Simple camera geometry including coordinate system for optical triangulation

Fig.2는 가상광원을 제공하는 소스카메라(source camera)와 영상점을 제공하는 타겟카메라(target camera)의 기하학적 관계 및 사용된 좌표계를 나타낸다. 타겟카메라를 중심으로 소스카메라가 일정각( $\theta$ )을 가지고 위치하게 된다.

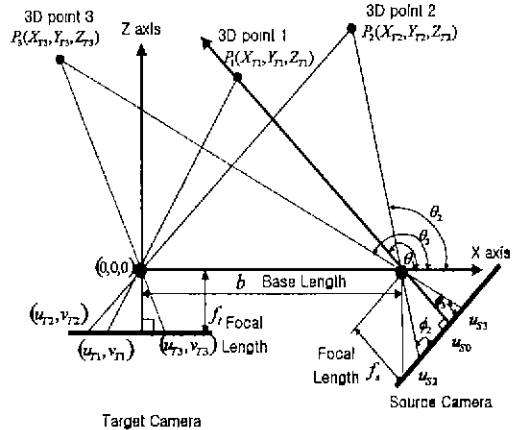


Fig. 3 Camera centered triangulation geometry using camera source

Fig. 2에서 측정점(P)은 각각의 카메라 투영중심( $O_T, O_S$ )을 지나 영상면에 영상점을 형성한다. 소스카메라의 투영중심( $O_s$ )을 Fig. 1의 레이저 광축으로

고려하면 투영 중심을 출발하여 타겟의 투영 중심으로 들어가는 광선의 기하관계를 Fig. 3과 같이 모델링할 수 있다.

Fig. 3에서 보면 여러 개의 레이저 광원이 동시에 광선을 투사하는 형태로서 소스카메라의 영상 1장이 다중 광원의 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 따라서 각각의 광선에 대하여 광선의 투사각도( $\theta_i$ )를 구하여 식(1)을 적용하면 측정점들의 3차원 좌표를 구할 수 있다.

타겟카메라에 대한 소스카메라의 회전각( $\theta_i$ )은 구조광방법에서와 마찬가지로 측정시스템의 구성조건으로 정확히 알고 있으며, 각각의 광선이 갖게 되는 투사각도는 투영 중심에서 영상 평면까지의 거리 및 영상 좌표를 이용하여 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_i = \begin{cases} \theta_1 - (90 - \phi_i) & (u_{S_i} > u_{S_0}) \\ \theta_1 + (90 - \phi_i) & (u_{S_i} < u_{S_0}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \left( \frac{f_S}{|u_{S_i} - u_{S_0}|} \right) \quad (3)$$

여기서  $\theta_i$ 는 물체점  $i$ 에 대한 투사각을 나타내며  $u_{S_0}$ 는 소스에 맺힌  $i$ 번째 점의 영상좌표 중에서  $u$ 성분을,  $u_{S_0}$ 는 소스의 영상중심 좌표 중에서  $u$ 성분을 나타낸다. 또한  $\theta_i$ 은  $Y_T$ 축에 대한 소스카메라의 회전각으로서 시스템 구성조건으로부터 알 수 있다.

Fig. 3의 기하를 이용하면 다음과 같이 물체의 3차원 좌표를 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{T_i} \\ Y_{T_i} \\ Z_{T_i} \end{bmatrix} = \frac{b_i}{f_T \cot \theta_i - (u_{T_i} - u_{T_0})} \times \begin{bmatrix} u_{T_i} - u_{T_0} \\ v_{T_i} - v_{T_0} \\ f_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

( $i = 1, 2, 3 \dots$ )

여기서  $b_i$ 는  $X_T$ 축 방향으로의 카메라간 중심거리를 나타내며  $(u_{T_i}, v_{T_i})$ 는 타겟 영상에 있어  $i$ 번째 물체점의 좌표를,  $(u_{T_0}, v_{T_0})$ 는 영상중심 좌표를 나타낸다.

실질적으로 카메라를 구성하고 있는 렌즈의 투영 중심은 식(4)에서와 같이 소스와 타겟의 카메라 중심이  $X_T$ 축 선 상에 놓이지 않고  $Z_T$  방향으로 일정거리 ( $b_i$ ) 만큼 떨어져 있다. 이러한 경우에 광선의 기하를 Fig. 4와 같이 구성되며 이 때의 좌표 계산식은 식(5), (6)을 이용하여 구할 수 있다.

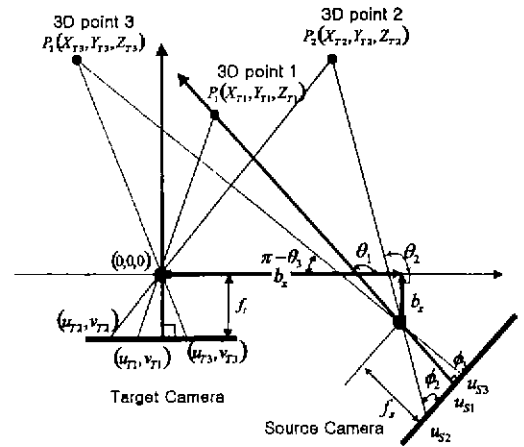


Fig. 4 Camera centered triangulation using offsetted camera source

$$\begin{bmatrix} X_{T_i} \\ Y_{T_i} \\ Z_{T_i} \end{bmatrix} = \frac{b_i}{f_T \cot \theta_i - (u_{T_i} - u_{T_0})} \times \begin{bmatrix} u_{T_i} - u_{T_0} \\ v_{T_i} - v_{T_0} \\ f_T \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b_i = \begin{cases} b_x - b_y \tan(\theta_1 + \phi_i) & (u_{S_i} < u_{S_0}) \\ b_x - b_y \tan(\theta_1 - \phi_i) & (u_{S_i} > u_{S_0}) \end{cases} \quad (6)$$

### 3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 광원영상(source image)이 타겟영상(target image)에 대해서  $b_x=2679.5\text{mm}$ ,  $b_y=0\text{mm}$ ,  $\theta_1=15^\circ$ 에 위치하였다고 가정했을 때  $5000 \times 5000 \times 1000\text{mm}$ 의 작업공간에 존재하는 20개 측정점의 영상좌표를 구하여 수행하였다.

Table 1은 시뮬레이션에 사용된 20개의 측정점에 대한 지역좌표 및 영상좌표를 나타내고 있다. 여기서 카메라의 초점거리는 각각 20mm로 설정하였으며 CCD 카메라의 화소수는  $2000 \times 2000$  pixel, 픽셀 크기는  $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}$ 로 가정하였다.

Fig. 5는 계산된 3차원 좌표의 오차를 도시한 것으로 측정점에 대한 영상좌표를 화소 단위로 변환함에 따라 발생된 오차이다. 오차의 경향은 Z방향으로 크게 나타나는데 이것은 영상좌표가 가질 수 있는 값의 범위에 대해 초점길이가 상대적으로 크기 때문에 오차가 증폭되는 것으로 해석할 수 있다. 각 방향으로의 표준편차는  $2\sigma_x=3.94$ ,  $2\sigma_y=4.00$ ,  $2\sigma_z=8.62$ 로서 측정범위에 비교하여 각 방향으로

1% 미만의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Simulation data

Point number	Position(mm)			Image coordinate (pixel)			
	$X_T$	$Y_T$	$Z_T$	$u_T$	$v_T$	$u_S$	$v_S$
1	2000	2250	9950	1600	1675	1536	1620
2	1750	2000	9900	1527	1603	1478	1557
3	1500	1750	9850	1454	1530	1419	1493
4	1250	1500	9800	1380	1456	1358	1427
5	1000	1250	9750	1306	1382	1296	1359
6	750	1000	9700	1230	1307	1233	1291
7	500	750	9650	1154	1232	1168	1220
8	250	500	9600	1077	1155	1102	1148
9	0	250	9550	1000	1078	1035	1075
10	-250	0	9500	921	999	965	999
11	-500	-250	9450	842	921	895	923
12	-750	-500	9400	761	841	822	844
13	-1000	-750	9350	680	760	748	763
14	-1250	-1000	9300	598	679	672	680
15	-1500	-1250	9250	515	596	594	596
16	-1750	-1500	9200	432	513	514	509
17	-2000	-1750	9150	347	429	433	420
18	-2250	-2000	9100	261	343	349	329
19	-2500	-2250	9050	175	257	263	235
20	-2750	-2500	9000	87	170	175	139

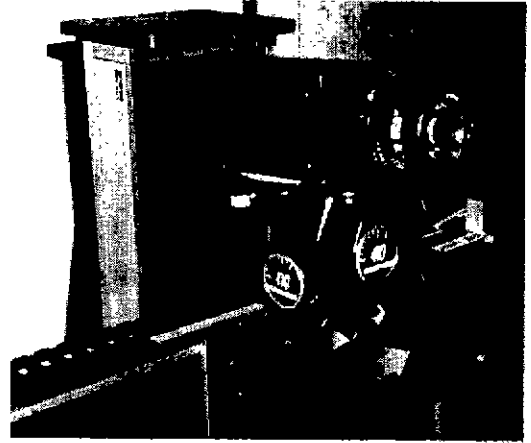


Fig. 6 Experimental setup

#### 4.2 실험 1

실험1은 Fig. 7과 같이 특정점간의 위치 관계가 파악된 측정대상을 가지고 3차원 좌표를 측정하였다. 일정한 높이의 봉(bar)의 중심 P1과 P2의 좌표값에 대해서 측정값과 실측값을 비교하였다. 좌표계의 설정은 0점을 지역 좌표계(local coordinate)의 원점으로 고려하고 각 좌표축은 타겟카메라의 좌표계와 평행하면서 동일한 방향을 갖도록 설정하였다. 입력 파라미터는  $\theta_1=95.2^\circ$ ,  $b_x=200\text{mm}$ ,  $f_s=f_T=50\text{mm}$ ,  $b_z=0$ 으로 설정하였다.

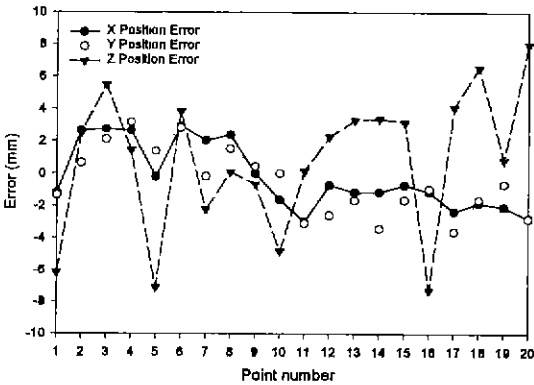
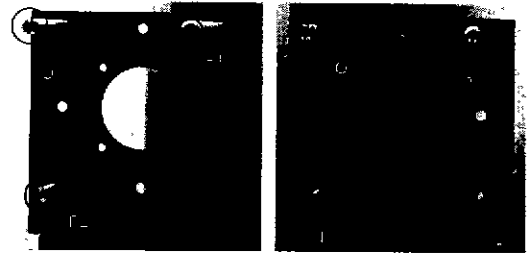


Fig. 5 Position errors of simulation result

### 4. 실험 및 결과

#### 4.1 실험장치

Fig. 5는 3차원 좌표측정을 위한 실험장치의 일부를 나타낸다.  $1300 \times 1030$  pixel의 화소수를 가진 단일 CCD 카메라를 사용하였으며 병진 운동과 회전 운동을 발생시켜 Fig. 2와 같은 카메라 구성을 구현하여 영상을 획득하였다.



(a) Source image (b) Target image

Fig. 7 Test object images

O, P1, P2점은 각각 봉의 단면에 해당되는 원의 중심을 구하여 사용했으며 측정결과는 Table 2에 나타냈다.

Table 2 Result data of experiment 1

Point Number	Local Coordinate(mm)			Error(mm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
P1	100.0	0.0	-50.0	-2.5	1.6	0.5
P2	0.0	100.0	50.0	2.4	1.3	-1.4

Table 2에서 보면 최대 오차는 X축 방향으로 2.5mm가 발생하였는데 이러한 오차의 원인으로는 입력 파라미터 중에서  $b_x$ 값을 무시하였고, O점을 중심으로 설정한 지역 좌표계와 타겟카메라의 좌표계가 서로 평행하게 설정되지 못해서 발생한 것으로 고려된다. 향후 이러한 부분의 보완이 이루어질 예정이다.

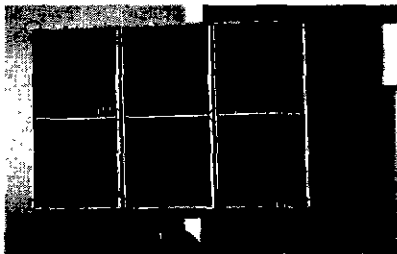
### 4.3 실험 2

실험2는 Fig. 8에서 보는 것과 같은 일반적인 측정 대상물에 존재하는 특징점에 대하여 3차원 좌표를 측정하였다.

Fig. 8은 측정 물체를 포함하고 있는 2장의 영상을 나타낸다. 그림에 표시된 6개의 측정점을 대상으로 3차원 좌표를 측정하였으며 측정 결과는 Table 2에 나타나 있다.

입력 파라미터는  $\theta_1=94.8^\circ$ ,  $b_x=200\text{mm}$ ,  $f_s = f_T = 50\text{mm}$ ,  $b_z=0$ 으로 ( $u_{T0}$ ,  $v_{T0}$ )와 ( $u_{S0}$ ,  $v_{S0}$ )는 CCD 센서의 중심인 (650, 515)으로 각각 설정하였는데 이 중에서 소스 카메라의 회전각  $\theta_1$ 은 측정 대상물에서 2개의 기준점을 정하고 본 연구에서 제시한 방법을 통해 계산된 측정점 간의 거리와 실제로 측정한 길이가 일치할 때의 값으로 설정하였다.

또한 CCD 소자 픽셀의 크기는 제조 업체의 제품 사양인  $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}$ 을 사용하였으며 측정 대상점의 확인은 작업자의 관측을 통해 이루어졌다.



(a) Source image



(b) Target image

Fig. 8 Object images

Table 3 Result data of experiment 2

Point number	Position(mm)			Image coordinate (pixel)			
	$X_T$	$Y_T$	$Z_T$	$u_T$	$v_T$	$u_S$	$v_S$
1	-181.7	-132.6	2383.5	81	100	89	101
2	107.9	-138.7	2341.0	994	73	982	68
3	-89.6	-18.4	2370.8	368	457	368	455
4	20.2	-21.4	2353.1	714	447	706	445
5	-178.9	101.3	2384.2	90	832	98	829
6	112.9	96.6	2333.7	1011	824	997	822

### 5. 결론

광삼각법을 이용하여 2장의 사진으로부터 물체의 3차원 좌표를 측정할 수 있는 방법을 제안하였다.

기존의 구조광을 이용한 단점 측정법이 갖는 문제점을 해결하기 위하여 레이저 광원 대신 CCD 카메라를 스스로 모델링하고 광선의 기하관계로부터 물체의 거리를 계산하는 식을 유도하였으며 시물레이션을 통해 식의 타당성을 검증하였다. 또한 실제 측정대상물을 설정하고 이로부터 얻어진 2장의 사진을 통해 물체의 3차원 좌표를 측정하였다.

향후 연구과제로 본 시스템이 갖는 정밀도를 검증하고 시스템의 성능을 향상시키기 위한 작업이 수행되어야 한다.

측정한 좌표의 정확도를 검증하기 위해서는 측정 대상물의 좌표를 테오도라이트(theodolite)와 같은 측정 장비를 사용하여 구한 후 좌표 변환을 통해 동일 좌표계 상에서 점들간의 값을 비교해야 한다. 또한 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 초점거리, 영상중심의 위치 등과 같은 카메라 파라미터들을 캘리브레이션을 통해 보정해야 하며 반복능의 향상을 위하여 특징점 추출의 자동화가 이루어져야 하겠다.

본 연구에서 제안된 방법을 대형구조물의 3차원 측정에 이용한다면 측정 대상물의 크기나 표면상태로 인한 제약을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 박강, "원격지 물체의 삼차원 위치 측정시스템의 개발," 한국정밀공학회지, 제17권, 제8호, pp. 60-70, 2000.
2. P. J. Besl, "Active, optical range imaging sensors," Machine Vision and Applications, Vol. 1, pp. 127-152, 1988.
3. R. Jain et al., "Machine Vision," McGraw-Hill, 1995.