

CCD/LSB 방식의 형상측정시스템의 정밀도 향상 방법

Precision enhancement for a CCD/LSB type shape measuring system

*유주상(서울레이저발행(주)), 정규원(충북대학교 기계공학부)

Joo Sang Yoo(Seoul Laser Dieboard & Trade Co.),

Kyuwon Jeong(CBNU, School of Mech. Eng.)

Abstract

Since recent production system becomes that of the small quantity, large volume with high quality production, accurate and high speed inspection system is required. In such situation, noncontact 3D measurement system which utilized CCD cameras is useful technique in terms of system cost, speed of data acquisition, measuring accuracy and application. However, it has low accuracy compared with contact 3D measurement system because of the camera distortion, non uniformity of laser distribution and so on. For those reasons, in this paper precision enhancement method is studied considering radial camera distortion, and laser distribution. A distortion correction method is applied even to the standard lens. The laser slit beam trajectory is determined by 3 method: based of the Gaussian function signal approximation, the median method, the center of gravity method and the peak point of the Gaussian function method.

1. 서 론

비접촉 3차원 측정기는 경제성이 높고 빠른 측정 속도로 인해, 여러 사업 분야에서 널리 쓰이고 있다. 하지만, 접촉식 3차원 측정기에 비하여 정밀도가 현저히 떨어진다. 그 이유로는 3차원 좌표를 2차원 이미지 좌표로 변환하는데서 오는 데이터의 손실, 카메라의 왜곡현상에서 오는 데이터 오차, 측정물 표면에서의 레이저 빛의 난반사 문제, 레이

저와 측정물 표면 각도에 따른 레이저 분포도의 변화 등 여러 요소들에 의하여 오차가 발생하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 비접촉 3차원 정밀 측정을 위하여, CCD 카메라의 왜곡 보정으로 카메라 외곽에서의 오차를 줄이는 방법을 연구하였다. 또한, 레이저의 광축과 측정물의 법선 벡터가 이루는 각도에 따라서 레이저의 분포도가 변하므로, 레이저의 정확한 위치를 측정하기 어렵기 때문에 측정오차가 발생하게 된다. 따라서, 레이저 분포도의 중간 값을 취하여 레이저의 위치를 획득하는 방법, 레이저 분포도의 무게중심을 이용하여 레이저의 위치를 획득하는 방법, 그리고, 레이저 분포도 중 그레이 레벨 값이 가장 큰 부분을 취하여 레이저의 위치를 획득하는 방법을 이용하여 레이저의 위치를 측정하였으며, 이 3가지 방법 중 측정하려는 물체의 기술키변화에 대하여 가장 안정적으로 레이저의 위치를 획득하는 방법에 대하여 연구하였다.

2. 3차원 거리 데이터의 획득

CCD 카메라를 이용하여 3차원 공간에 존재하는 물체에 대한 영상을 2차원의 CCD 카메라를 이용하여 포착하면 차원의 감소에 의하여 정보의 손실이 발생한다. 따라서 1개의 카메라 영상만으로는 3차원 좌표를 측정할 수 없게 되며, 손실된 정보를 보완하기 위한 방법이 요구된다. 여러 가지 방법이 제안될 수 있는데 본 연구에서는 슬릿빔 레이저를 이용한 측정 방법을 이용하였다. Fig.1 에서 보는 바와 같이 1 개의 CCD 카메라와 1개의 슬릿빔 레이저를 측정 대상물로부터 일

정한 거리에 투사하면, 카메라를 통해 얻어진 레이저 궤적에 대한 영상의 한 픽셀 번호는 캘리브레이션을 통하여 물체의 3차원 좌표로 변환된다. 본 논문은 선형변환 알고리즘^[2]을 이용하여 거리 데이터 획득시 요구되는 캘리브레이션을 수행하였으므로, 카메라의 왜곡현상을 반영하지 못한다. 따라서, 카메라의 기하학에 따른 왜곡 보정식^[4]을 선형변환 식에 추가하여 왜곡현상을 보정하였다. 카메라 모델식을 이용하여 카메라 캘리브레이션을 수행하면 카메라 파라미터를 얻는다. 레이저 슬릿빔에 대하여 레이저 슬릿빔 모델식을 이용하여 레이저 슬릿빔 캘리브레이션을 수행하여 그들의 파라미터를 얻는다. 최종적으로 영상면의 픽셀번호를 3차원 좌표로 변환하기 위해 카메라 모델식과 레이저 슬릿빔 모델식을 조합한 센서 모델식에 카메라 파라미터와 레이저 슬릿빔 파라미터를 대입하여 센서 파라미터를 얻는다. 이들 센서 파라미터를 이용해 3차원 거리 데이터를 획득하기 위한 계산을 수행하였다.

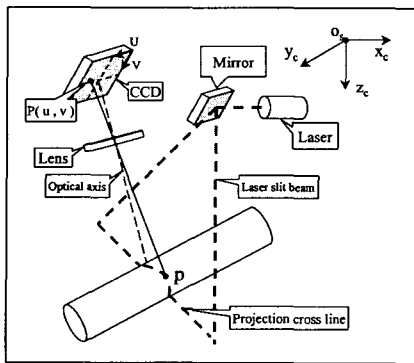


Fig.1 Schematic diagram of a CCD/LSB range sensor

2.1) 카메라의 수학적 모델

카메라 캘리브레이션은 물체상의 임의의 다수 점들과 그 점들이 CCD 카메라 렌즈를 통과하여 영상면상에 맺히는 픽셀 값들과의 상관 행렬을 구하는데 그 목적이 있다. 획득된 카메라의 영상좌표 $P(u, v)$ 와 물체의 실제 좌표 $P(x, y, z)$ 를 동차좌표 변환행렬을 이용하여 식(1)과 같이 표현한다. 행렬의 각 요소는 카메라에 얻어진

영상 점들간의 관계를 결정하는 상수이다. 여기서 s 는 스케일 벡터이다.

$$\begin{bmatrix} s*u \\ s*v \\ s*w \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1*x_1 & -u_1*y_1 & -u_1*z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1*x_1 & -v_1*y_1 & -v_1*z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & z_m & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_m*x_m & -u_m*y_m & -u_m*z_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_m & y_m & z_m & 1 & -v_m*x_m & -v_m*y_m & -v_m*z_m \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{14} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ a_{24} \\ a_{31} \\ a_{32} \\ a_{33} \\ a_{34} \\ a_{41} \\ a_{42} \\ a_{43} \\ a_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1*u_1 \\ s_1*v_1 \\ \vdots \\ s_m*u_m \\ s_m*v_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2) 레이저 슬릿빔의 수학적 모델

레이저가 물체에 비스듬히 투사되었을 때, 물체에 투사된 레이저 슬릿빔 상에 있는 임의의 점들은 높이에 따라 다른 x, y, z 값을 가진다. 이는 평면의 방정식으로 도식화 할 수 있으며 x, y 에 따른 높이 z 와의 상관 행렬을 구한다.

$$B_1*x + B_2*y + B_4 + z = 0 \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3) 센서 시스템 캘리브레이션

카메라 행렬과 레이저 슬릿빔 행렬을 조합하면 식 (5)와 같이되고 이를 다시 정리하여 식(6)과 같은 시스템 행렬을 얻을 수 있다. 이 센서 행렬을 이용하여 물체상의 영상면상에 투영되는 레이저 슬릿빔상에 있는 임의의 픽셀에 관한 실제 거리 데이터를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} B_1 & B_2 & 1 \\ a_{11}-u^*a_{41} & a_{12}-u^*a_{42} & a_{13}-u^*a_{43} \\ a_{21}-v^*a_{41} & a_{22}-v^*a_{42} & a_{23}-v^*a_{43} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_4 \\ u^*a_{44}-a_{14} \\ v^*a_{44}-a_{24} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} s*x \\ s*y \\ s*z \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.4) Camera Calibration

3차원 거리 데이터를 획득하기 위해서, CCD 카메라에 의한 정확한 2차원 거리 데이터의 획득 방법이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 카메라 캘리브레이션에 필요한 2차원 거리 데이터 획득 방법으로 Hough Transform을 이용하여 직선 맞춤을 수행한 후 사각 표식들의 꼭지점들을 찾는 방법과 사각 표식들의 이미지의 그레이 레벨을 이용하여 그의 중심점을 찾는 방법으로 실험을 하였다. 카메라 캘리브레이션을 위한 실제 좌표와 이미지 좌표를 계산하기 위하여

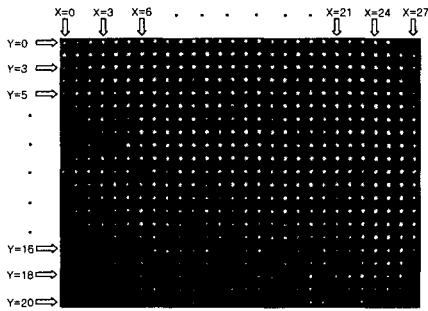


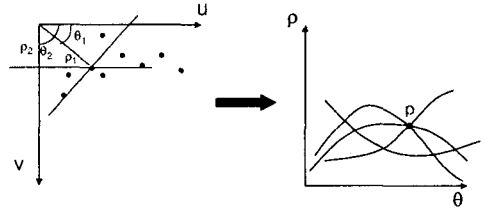
Fig.2 Image of the calibration plate

Fig.2 와 같이 3mm×3mm 의 사각 표식들을 10mm 간격으로 구성한 캘리브레이션 판을 준비하고 높이에 따라서 이미지 좌표와 실제 좌표와의 맵핑을 실시하였다.

2.5) Hough Transform

Fig.3 에서 보이는 바와 같이 이미지 좌표계의 좌표들은 식(7) 같이 극좌표계로 표현할 수 있다. 따라서, 이미지 프로세싱으로 획득된 각각의 픽셀들의 좌표 (u, v)를 알고 있으므로, 식(7)에 대입하여 θ 를 변화시키면서 가장 많이 나온 ρ 값을 취하여 직선식을 획득할 수 있다.

$$\rho = u \cdot \cos \theta + v \cdot \sin \theta \quad (7)$$



(a)Image coordinate (b) Polar coordinate

Fig.3 Principle of the Hough transform

2.6) 무게 중심점 획득

CCD 카메라로부터 획득된 캘리브레이션 판의 사각 표식들의 이미지는 그레이 레벨을 가진다. 사각 이미지의 가장 밝은 부분인, 중간부분이 그레이 레벨 값 255에 근접하고 외곽으로 갈수록 그레이 레벨 값은 점점 줄어들게 된다. 본 연구에서는 그레이 레벨 값이 30이상인 이미지 픽셀만을 가지고 식(8)에 대입하여 사각 표식의 중심 좌표를 구하였다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_i G_i \times i}{\sum_i G_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_j G_j \times j}{\sum_j G_j} \quad (8)$$

2.7) 카메라 왜곡 보정

카메라의 왜곡 현상은 크게 세가지 (radial, decentering, thin prism) 왜곡 현상으로 분류된다.^[8] 하지만, 일반적인 비전 시스템에서는 반경 방향의 왜곡현상만을 고려하고 있으며, 다음과 같이 반경 방향의 왜곡계수를 고려한다.^[4] 이상적인 pin-hole 카메라의 기하학적 정사영을 가정한 3차원 카메라 좌표계에서 이상적인 2차원 무 왜곡 영상 좌표계 (X_u, Y_u)로의 변환은 식(9)와 같이 표현할 수 있고, 카메라의 왜곡 보정을 위한 좌표계 설정은 Fig.4에 도시하였다.

$$X_u = f \frac{x}{z}, \quad Y_u = f \frac{y}{z} \quad (9)$$

여기서 f 렌즈의 초점거리이고, x, y, z 는 실 좌표이다. 반경방향의 렌즈 왜곡을 고려한 2차원 무

왜곡 영상 좌표계에서 왜곡된 영상 좌표계 (X_d , Y_d)로의 변환하면 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_d + D_x &= X_u \\ Y_d + D_y &= Y_u \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} D_x &= X_d (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \\ D_y &= Y_d (k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \end{aligned} \quad (11)$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}$$

여기서, k_1 과 k_2 는 반경방향의 렌즈 왜곡계수이다. (D_x , D_y)는 왜곡된 영상좌표와 무 왜곡 영상좌표와의 차이이다. 본 연구에서는 이상적인 pin-hole 카메라와 왜곡된 카메라의 기하학적인 분석에 의한 카메라 캘리브레이션을 이용한 것이 아니라 선형변환에 의한 카메라 캘리브레이션 방법을 채택했으므로 식(10)을 직접 대입 할 수 없다. 하지만, 실 좌표계인 (x , y)좌표를 알고 있고, 카메라 캘리브레이션에 의한 카메라 행렬을 알고 있으므로 (x , y)좌표를 카메라 행렬에 대입하여 이미지 좌표인 (u , v)좌표를 획득할 수 있다. 카메라 행렬은 선형 변환이므로 선형적으로 표현이 되고, CCD 카메라에 의하여 획득된 사각 표식들의 중심좌표는 카메라의 왜곡현상을 반영하게 된다. 따라서, 카메라 행렬에 의해서 구해진 (u' , v') 좌표를 무 왜곡된 영상좌표로 보고, CCD 카메라에 의해서 획득된 사각 set의 중심좌표 (u , v)를 왜곡된 영상좌표로 간주하여 식(10)을 식 (12)와 같이 변환 할 수 있다. 또한, 선형 캘리브레이션 식이 u 또는 v 방향으로 비례관계를 가지고 있으므로, (u , v)방향으로의 거리 계수(c)를 생각할 수 있다. 따라서, 식(11)은 식(13)과 같이 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_I + D_x' &= X_c \\ Y_I + D_y' &= Y_c \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} D_x' &= X_I (k r^2 + c s_x) \\ D_y' &= Y_I (k r^2 + c) \\ r &= \sqrt{X_I^2 + Y_I^2} \\ s_x &= \frac{d_y}{d_x} \end{aligned} \quad (13)$$

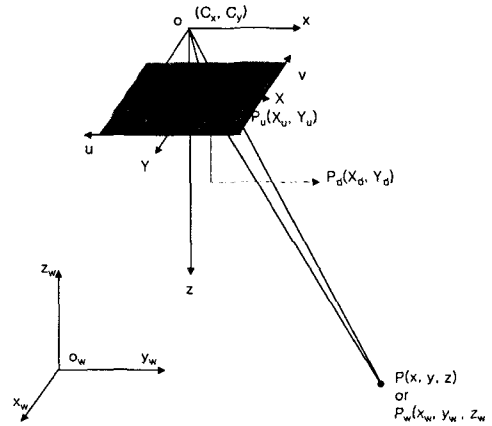


Fig.4 Camera geometry with perspective projection and radial lens distortion

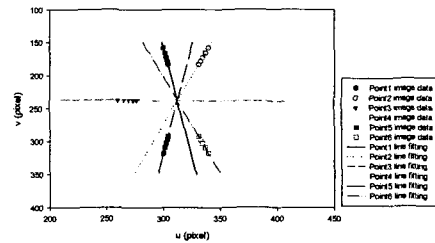


Fig.5 Measurement result of the 4 points and line fitting

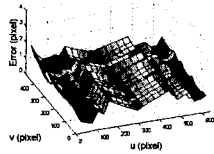
2.8) 카메라의 광축 획득

카메라의 왜곡현상을 보정하기 위한 보정계수 k 는 카메라의 광축으로 부터 거리 제곱에 관계되므로 카메라의 왜곡현상을 보정하기 위해서는 카메라 광축의 이미지 좌표를 알고 있어야 한다. 측정 물체와 카메라의 거리가 멀어질수록 측정물체의 좌표는 카메라의 광축으로 모이게 되므로 이 방법을 이용하여 카메라의 광축을 획득할 수 있다.^[7] 측정 물체의 n 개의 점들을 취하여 높이에 따라서 이미지 좌표를 획득하고, 각각의 점들의 좌표를 직선 맞춤을 하면 식(14)와 같이 표현할 수 있으며, Fig.5와 같이 한점으로 모이는 것을 확인할 수 있다.

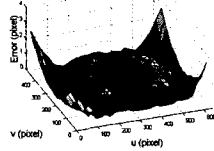
$$\begin{aligned}
 v_{point\ 1} &= a_1 - b_1 u \\
 v_{point\ 2} &= a_2 - b_2 u \\
 &\vdots \\
 v_{point\ n} &= a_n - b_n u
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

3. 실험결과

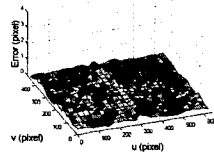
Fig.6은 Hough Transform 과 무게중심점을 취하여 카메라 캘리브레이션을 한 것과 카메라의 왜곡현상을 보정한 것의 2차원 거리 데이터의 오차를 비교하였다. Fig.7은 레이저의 위치를 3가지 방법(cen- ter, median, peak)을 이용하여 측정된 결과를 나타냈으며, Fig.8에 카메라의 왜곡보정과 레이저의 무게중심점을 이용하여 3차원형상을 측정된 결과이다.



(a) Method of Hough Transform



(b) Method of Center of gravity

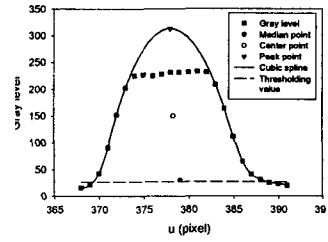


(c) Modification of camera distortion

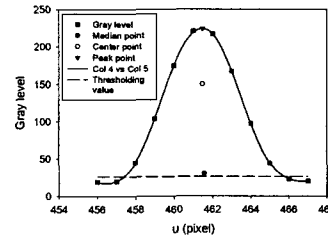
Fig.6 Camera calibration error

4. 결 론

(1) 카메라 캘리브레이션을 수행하는데 있어서 표식 set의 무게 중심점을 구하는 방법이 캘리브

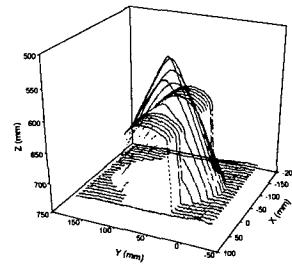


(a) $z_w=400\text{mm}$, Inclined angle= 0°

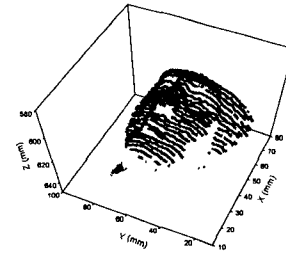


(b) $z_w=388\text{mm}$, Inclined angle= -70°

Fig.7 Cubic spline curve of laser distribution($v=240\text{pixel}$)



(a) Range data of cone and cylinder



(b) Range data of Venus face

Fig.8 Measurement result for the objects with free formed surface

레이션 오차가 적게 나온다.

(2) 카메라의 왜곡 현상을 보정하기 위해서 카메라의 기하학을 고려한 왜곡 보정식을 약간의 변화를 거쳐서 선형 변환식에 적용할 수 있음을 확인하였다.

(3) 3차원 물체의 측정시에는 레이저 이미지의 그레이 레벨 분포도를 고려한 처리를 하여 강건한 처리를 하였다.

Herniou, "Camera Calibration with Distortion Medels and Accuracy Evaluation", IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol 14, No. 10, October 1992.

참 고 문 헌

- [1] 신홍식, 거리 영상으로부터 표면 모델링 방법에 관한 연구, 충북대학교대학원 기계공학과 정밀기계전공 석사학위 논문, 1999.
- [2] 서창명, CCD 카메라와 레이저를 이용한 3차원 좌표 측정에 관한 연구, 충북대학교 대학원 기계공학과 석사학위 논문, 1996.
- [3] 차영엽, 권대갑, "레이저 슬릿을 사용하는 능동 거리 센서의 정확한 3D 데이터 추출 알고리즘", 한국정밀공학회지, 제 12권, 8호, 1995, 8, pp.73-85.
- [4] Roger Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lens", IEEE, Journal of Robotics and Automation, Vol.3, No.4, pp.323-344, 1987.
- [5] Ramesh Jain, Rangachar Kasturi, Brian G. Schunck, *Machine Vision*, McGRA HILL International editions, 1995.
- [6] Kyu Won Jeong and Chang woo Reeu, "Distortion correction of fish-eye lens for wide angle range finder", '95 Second asian conference on computer vision, pp. II-200~ II-204.
- [7] R. K. Lenz and R. Y. Tsai, "Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metrology", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Raleigh. NC. March 31-April 3, 1987.
- [8] Juyang Weng, Paul Cohen, and Marc