

원격지 물체의 삼차원 위치 측정시스템의 개발

박강*

Development of a Remote Object's 3D Position Measuring System

Kang Park*

ABSTRACT

In this paper, a 3D position measuring device that finds the 3D position of an arbitrarily placed object using a camera system is introduced. The camera system consists of three stepping motors and a CCD camera and a laser. The viewing direction of the camera is controlled by two stepping motors (pan and tilt motors) and the direction of a laser is also controlled by a stepping motors (laser motor). If an object in a remote place is selected from a live video image, the x, y, z coordinates of the object with respect to the reference coordinate system can be obtained by calculating the distance from the camera to the object using a structured light scheme and by obtaining the orientation of the camera that is controlled by two stepping motors. The angles of stepping motors are controlled by a SGI O2 workstation through a parallel port. The mathematical model of the camera and the distance measuring system are calibrated to calculate an accurate position of the object. This 3D position measuring device can be used to acquire information that is necessary to monitor a remote place.

Key Words : 3D Position Measurement(삼차원 위치 측정), Calibration (보정), Camera model(카메라 모델)

1. 서 론

최근에 통신속도의 향상과 멀티미디어에 관한 관심의 증가로 인하여 화상회의나 원격감시시스템이 발달하고 있다.^{1,2)} 하지만 화면 앞에 앉은 사용자는 원격지에서 오는 비디오 화면을 수동적으로 받아들이기만 할 뿐 원격지에 작업지시와 같은 적극적인 행동을 취할 수가 없다. 이는 하나의 이차원 비디오 화상만으로는 임의의 위치에 놓여 있는 물체의 거리 정보를 얻을 수 없기 때문이다. 만일 사용자가 원격지에 있는 물체의 거리 정보를 얻을 수 있다면 비디오 화상의 이차원 정보와 거리 정보

를 이용하여 물체의 삼차원 위치를 알 수 있게 된다. 이로써 원격지에 있는 로봇에게 삼차원 위치를 교시하여 작업지시를 수행하는 등의 다양한 작업을 수행할 수 있게 된다. 이러한 작업을 수행하기 위해서는 물체와 카메라 사이의 거리를 찾아내는 것이 중요하다.

임의의 위치에 있는 물체의 거리를 측정하는 방식에는 레이저 광선이나 초음파와 같은 파형의 비행시간을 계산하는 방식과 센서와 센서, 또는 센서와 광원과의 기하학적 관계를 이용한 삼각측량 방식으로 나눌 수 있다.³⁾ 삼각측량방식에는 스테레오 비전, Moiré 방법, 구조광 방식⁴⁾ 등이 있다.

* 명지대학교 기계공학과

구조광방식은 레이저광선을 주어진 각도로 조사하여, 카메라의 화면에 맺힌 레이저 빛의 위치에 따라서 거리를 측정하는 방식이다. 본 연구에서는 개선된 구조광 방식을 이용하여 물체의 거리를 측정하여 물체의 삼차원 위치를 찾아내는 시스템을 제안한다. Fig.1은 위치측정시스템의 실물을 보여준다. 이 시스템은 두 개의 스테핑모터를 이용하여 카메라의 시선 방향을 조종하고 또 다른 스테핑모터를 조종하여 레이저광선을 측정하고자하는 물체에 조사하여 물체의 거리를 계산함으로써 물체의 삼차원 위치를 알아낼 수 있다. 이 방식은 카메라를 하나만 사용하고 저렴한 레이저광원과 스테핑모터를 사용하여 제작비를 낮출 수 있다. 그런데 위치측정시스템이 올바르게 작동되기 위해서는 카메라와 구동장치와 거리측정장치의 수학적 모델링이 필요하며 그 모델의 변수들을 실제 시스템의 값과 정확히 일치시키는 보정과정^(5,6,7)이 필요하다. 따라서 본 연구는 위치측정시스템의 수학적 모델과 그 보정과정을 통하여 측정정밀도를 높이는 과정을 제시한다.

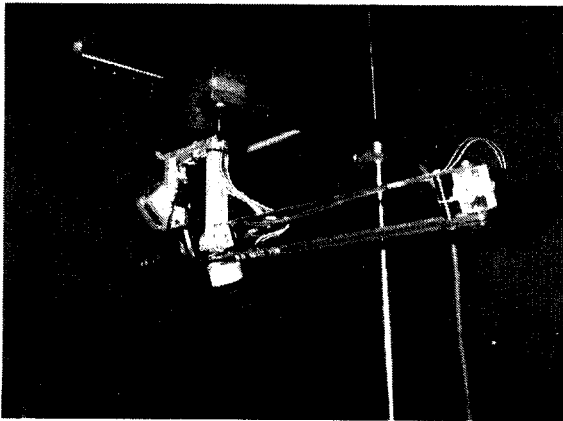


Fig. 1 View of the 3D position measuring system

2. 이 론

2.1 카메라 구동부 모델

Fig.2은 카메라 구동부의 좌표계를 나타낸다. 모터좌표계{MOT}는 카메라의 수평회전축(Z_m)과 수직회전축(X_m)이 만나는 점에 설정이 되어있고 카메라 좌표계{CAM}는 카메라의 원근투영변환의 초점에 설정되어 있다. 카메라가 좌표측정장치에 장착되면 모터좌표계와 카메라 좌표계와의 관계를 나타내는

4×4 동차변환행렬 T_c^m 이 정해지고, 이 좌표측정장치가 임의의 위치에 고정되면 기준좌표계{GLB}에서 모터좌표계와의 관계를 설명하는 T_m^g 이 정해진다. 각 변환행렬들은 3개의 이동변수(t_x, t_y, t_z)와 3개의 각도변수($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)들을 가지고 있는데 이들을 총 12개 변수들은 보정과정을 통하여 정확한 값이 정해진다.

수평회전모터를 θ_p , 수직회전 모터를 θ_t 만큼 회전시켰을 때 카메라 좌표계로 표현된 점 P_c 는 기준좌표계로 표현된 점 P_g 로 식(1)을 이용하여 변환되고 점 P_g 는 P_c 로 식(2)를 이용하여 변환된다⁸⁾.

$$P_g = T_m^g Rot(z, \theta_p) Rot(x, \theta_t) T_c^m P_c = T_g^g P_c \quad (1)$$

$$P_c = [T_c^g]^{-1} P_g = T_c^c P_g \quad (2)$$

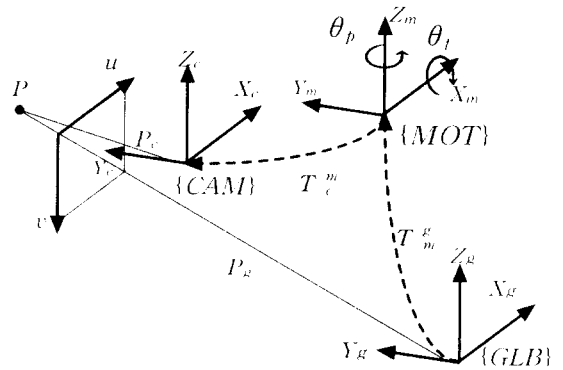


Fig. 2 Camera motor frames

2.2 카메라 모델

실제 카메라는 각 카메라마다 초점거리와 화상면의 중심 위치가 이론적인 값과 차이가 있다. 또한 렌즈는 왜곡을 일으키므로 실제 카메라와 이상적 카메라 모델과는 많은 차이가 난다. 본 논문에서는 초점거리와 화상의 중심 및 렌즈의 왜곡 등을 고려한 카메라모델을 사용한다. Fig.3은 카메라 모델에 사용된 좌표계를 설명하고 있다. 여기서 화상면을 편의상 카메라 좌표계보다 초점 거리 만큼 앞에 놓아서 화상면에 맺힌 이미지가 모니터상의 이미지와 서로 일치하도록 한다.

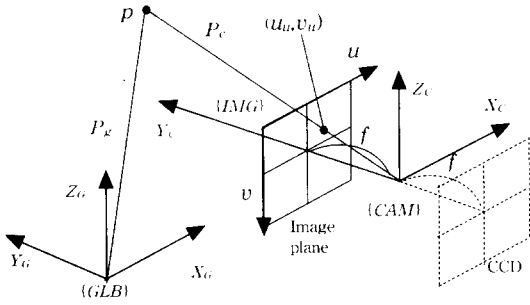


Fig. 3 Mathematical camera model

식(2)를 통하여 카메라 좌표계{CAM}에 대한 값으로 변환된 한 점 $P_c = \{x, y, z\}_c$ 은 식(3)(4)의 원근투영변환을 통하여 $m \times n$ 의 크기를 갖는 화상면의 한 점 (u_u, v_u) 으로 변환된다.

$$u_u - u_0 = f_u \frac{x}{y} \quad (3)$$

$$v_u - v_0 = -f_v \frac{z}{y} \quad (4)$$

여기서 u_u, v_u 는 왜곡이 일어나기 전의 이론적인 이미지의 좌표이고 u_0, v_0 는 화상면의 중심점의 좌표인데 이들은 모두 화소 단위로 표시된다. f_u, f_v 는 u, v 각 방향으로의 초점거리이고 화소단위로 표시된다. 실제 카메라 렌즈는 렌즈의 중심에서 거리가 멀어질수록 왜곡이 심해지는데 왜곡이 일어난 후의 점의 좌표 (u_d, v_d) 는 다음 식으로 구해진다.

$$u_d - u_0 = (u_u - u_0)(1 - k_u \rho^2) \quad (5)$$

$$v_d - v_0 = (v_u - v_0)(1 - k_v \rho^2) \quad (6)$$

여기서 k_u, k_v 는 u, v 방향으로의 왜곡계수이고 ρ 는 화면중심에서 (u_u, v_u) 까지 거리를 나타내는데 다음 식으로 주어진다.

$$\rho^2 = \frac{(u_d - u_0)^2 + (v_d - v_0)^2}{(u_{dmax} - u_0)^2 + (v_{dmax} - v_0)^2} \quad (7)$$

여기서 화면의 크기가 $m \times n$ 일 때 $u_{dmax} = m, v_{dmax} = n$ 이다. 카메라 모델에서는 초점거리(f_u, f_v), 렌즈의 왜곡(k_u, k_v), 이미지의 중심(u_0, v_0)의 6개 변수가 보정과정을 통하여 정확한 값이 구해진다.

2.3 거리측정시스템 모델

카메라로 한 점의 영상을 얻었을 경우에 화면상의 영상의 (u, v) 좌표와 모터의 수직회전 각도와 수평회전 각도에 의해서 그 점이 위치한 방향을 알 수 있다. 그러나 그 점과 카메라 사이의 거리 정보는 이차원 화면 정보만으로는 얻을 수 없으므로 위치를 측정하고자 하는 물체에 레이저 광선을 주사하고 그 때의 레이저의 각도를 측정하여 물체와 카메라 사이의 거리를 구한다. Fig.4는 거리 측정의 원리를 설명한다.

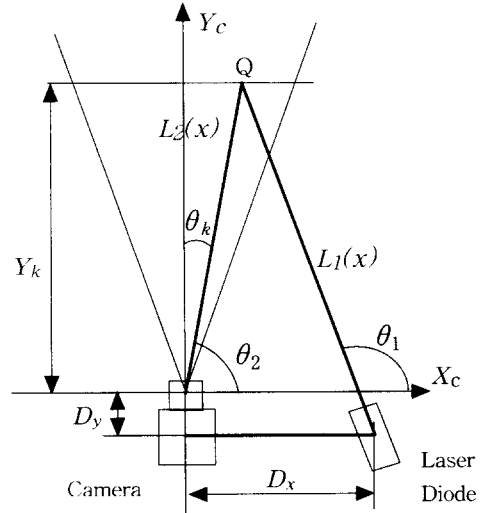


Fig. 4 Distance measuring scheme

카메라의 좌표계를 Fig.3과 4에서 설정된 $\{X_c, Y_c, Z_c\}$ 로 잡았을 때, 레이저 다이오드는 카메라 좌표계에서 X_c 축으로 D_x , Y_c 축으로 D_y 만큼 떨어진 위치에서 광선(L_1)을 θ_1 의 각도로 Q 점에 있는 물체에 주사한다. 여기서 D_x 와 D_y 는 거리측정시스템의 보정을 통하여 얻어지는 값이다. 레이저 광선이 화면의 k 번째 열에 이미지가 맺혀 있을 때, 즉 $u_u = k$, 식(5)을 이용하여 왜곡이 일어나지 않은 이미지의 위치를 계산하여 u_u^k 를 얻는다. 카메라의 Y_c 축 방향과 Q 점 사이의 각도 θ_k 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\theta_k = \tan^{-1}\left(\frac{u_u^k - u_0}{f_u}\right) \quad (8)$$

여기서 u_0 는 u 방향에 관한 화면의 중심의 위치이고 f_u 는 화소단위로 정의된 카메라 초점거리이다. 여기서 주의할 점은 식(3)에서 보는 바와 같이 mm 단위로 기술된 x, y 좌표가 서로 나뉘어져 무차원화되었기 때문에 양쪽 차원을 살펴보면 f_u 가 화소단위로 주어짐을 알 수 있다. 이 초점거리는 나중에 기술될 보정과정을 통하여 화소단위로 얻어진다. 따라서 식(8)에서 화소단위를 화소단위로 나눔으로써 무차원 값인 각도가 나오게 된다.

θ_1 값은 레이저 모터의 위치값을 읽어서 얻을 수 있고 θ_2 값은 $\pi/2 - \theta_k$ 로 얻을 수 있다. θ_1 과 θ_2 값을 얻었을 때 레이저 광선의 직선식 (L_1)은 식(9)과 같이 주어지고, 물체에 맺힌 레이저의 이미지가 투영되는 직선식 (L_2)는 식(10)과 같이 주어진다.

$$L_1(x) = \tan \theta_1(x - D_x) - D_y \quad (9)$$

$$L_2(x) = \tan \theta_2 x \quad (10)$$

식(9), (10)을 연립하여 풀면 물체의 X_c 방향의 위치(x)와 Y_c 방향의 거리(Y_k)를 식(11)와 (12)과 같이 얻을 수 있다.

$$x = \frac{\tan \theta_1 D_x + D_y}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (11)$$

$$Y_k = \tan \theta_2 \left(\frac{\tan \theta_1 D_x + D_y}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \right) \quad (12)$$

거리가 구해지면 식(5)(6)을 통하여 구해진 (u_u, v_u)를 식(3),(4)에 대입하고 Y_k 를 y 에 대입하면 x_c, z_c 값이 구해진다.

$$x_c = \frac{(u_u - u_0)Y_k}{f_u} \quad (13)$$

$$y_c = Y_k \quad (14)$$

$$z_c = - \frac{(v_u - v_0)Y_k}{f_v} \quad (15)$$

이 좌표값은 카메라 좌표계에 대한 것이므로 다시 식(1)에 의해서 기준좌표계로 변환되어 최종좌표를 구하게 된다. 식(12)에서 보정되어야 할 변수는 D_x, D_y 와 θ_1, θ_2 각도의 초기값인 θ_1^0, θ_2^0 의 4개이다. 여기서 θ_1^0, θ_2^0 는 레이저와 카메라

를 위치측정시스템에 조립할 때 발생할 수 있는 오차의 보정을 위한 값이다.

2.4 삼차원 좌표 측정시스템의 보정

좌표측정시스템의 목표는 주어진 물체에 대하여 거리측정시스템에서 얻어진 거리정보와 모터의 각도로부터 얻어진 방향정보를 이용하여 기준 좌표계 $\{GLB\}$ 에 대한 물체의 삼차원 위치를 구하는 것이다. 이 때 정확한 측정이 되기 위해서는 앞에서 설명한 카메라 모델과 변환행렬 T_c^m 와 T_m^g 이 실제 시스템과 정확히 일치해야 한다. 따라서 이들 수학적 모델에 사용된 변수들을 보정하는 과정이 필요하다.

보정되어야 할 변수는 앞에서 설명된 바와 같이 카메라 모델 변수 6개, 카메라 구동부 변수 12개, 거리측정시스템 변수 4개 등 총 22개이다. 전체 보정과정을 카메라와 카메라 구동부를 포함하는 카메라 시스템의 보정과 거리측정시스템의 보정으로 나누어서 보정을 실시한다.

이 논문에서는 측정 시스템의 보정문제를 화소단위로 표현된 측정점의 이미지 좌표(u^*, v^*)와 수학적 모델에 의해 계산된 화소단위 이미지 좌표(u, v) 사이의 오차들을 제곱합을 목적함수로 잡고, 그 목적함수를 최소화하는 비선형 최적화 문제로 만들었다. 해를 구하기 위해서 변수들의 초기치를 실제값의 근사치로 설정한 후 변수 값들을 뉴턴-랩슨 방법으로 반복적으로 찾아가는 마퀴드(Marquardt)방법⁷⁾을 썼다.

2.4.1 마퀴드(Marquardt) 최적화 방법

카메라변수의 보정문제는 비선형 최적화 문제(non-linear optimization problem)로 볼 수 있으며 목적함수를 측정데이터와 계산된 데이터간의 차이를 최소화하는 것으로 결정하면 다음과 같이 표현된다.

$$Obj(p) = \sum_{i=1}^{nout} R_i(p)^2 = \sum_{i=1}^{nout} \{ f_i^* - f_i(p) \}^2 \quad (16)$$

- $Obj(p)$: squared sum of residual function
- p : calibration parameter vector
- $R_i(p)$: residual function
- f_i^* : measured image coordinate of target point
- $f_i(p)$: calculated image coordinate of target point
- $nout$: number of measured target point

여기서 p 는 카메라의 보정변수를 나타내며 $R_i(p)$ 는 i 번째 측정점의 계산된 이미지좌표와 측정된 이미지좌표 사이의 잔류오차(residual error)를 나타낸다. f_i^* 는 측정된 (u^*, v^*) 이미지좌표의 값이며 $f_i(p)$ 는 수학적 모델에 의해 계산된 이미지좌표값 (u, v) 이다.

비선형 최적화문제를 푸는 대표적인 방법으로는 최속강하법(Steepest descent method(SD))과 뉴턴-랩슨방법(Newton-Raphson method(NR))이 있는데 마쿼드 방법은 이 두 가지 방법의 장점인 수렴보장성과 수렴속도를 동시에 만족하도록 하는 방법이다.

1) 뉴턴-랩슨방법

앞에서 언급한 잔류오차 함수에서 보정변수가 미소량 변했을 때 이를 테일러 급수로 전개하면 식(17)을 얻을 수 있다.

$$R(p+\Delta p) = R(p) + R'(p)\Delta p + \frac{R''(p)\Delta p^2}{2} + \dots \quad (17)$$

여기서 이차 이상의 미분항을 무시하면 식(18)이 얻어지는데 이 식을 0으로 놓음으로써 $R(p+\Delta p)$ 을 0으로 만드는 값 Δp 를 구하는 식(19)를 얻는다. 이 식을 풀기 위하여 양변에 Jacobian 행렬의 전치행렬을 곱한 후 그 역행렬을 구함으로써 식(21)과 같이 Δp 를 구할 수 있다.

$$R(p+\Delta p) = R(p) + J\Delta p = 0 \quad (18)$$

$$J\Delta p = -R(p) \quad (19)$$

$$J^T J \Delta p = -J^T R(p) \quad (20)$$

$$\Delta p = -(J^T J)^{-1} J^T R(p) \quad (21)$$

- 여기서 $R(p)$: residual function
- J : $(n_{out} \times n_{par})$ Jacobian matrix
- n_{out} : 측정점의 개수
- n_{par} : 보정변수의 갯수

이렇게 구한 Δp 를 이용하여 새로운 보정변수를 식(22)과 같이 구해나간다.

$$p_{new} = p + \Delta p \quad (22)$$

2) 최속강하법

최속강하법은 일계미분의 기울기가 최대인 방

향으로 변수를 보정해 나간다.

$$\Delta p = -\nabla R(p) = -J^T R(p) \quad (23)$$

3) 마쿼드 변형

마쿼드는 최속강하법과 뉴턴법의 장점을 동시에 가지도록 방향탐색과정에 수정안을 제시하였다.

$$\Delta p = -(J^T J + \lambda I)^{-1} J^T R(p) \quad (24)$$

λ 가 큰 수이면 근본적으로 $(J^T J)$ 의 효과가 작아지게되고 이것은 이동거리 $(1/\lambda)$ 인 최속강하법의 형태이다. λ 가 작아지면 λI 의 효과가 작아지게되어 뉴턴-랩슨방법이 된다. 따라서 마쿼드 방법에서는 수렴이 잘되고 있으면 λ 를 줄여나가고 수렴이 잘 되지 않으면 λ 를 증가시켜서 수렴성을 좋게 한다.

2.4.2 카메라 시스템 보정

Fig.5는 카메라 시스템의 보정과정을 나타낸다. 목적함수는 식(16)을 사용하였으며 보정변수는 카메라 구동부변수 기준좌표계에서 모터좌표계로의 변환을 나타내는 변수 6개 $\{t_x, t_y, t_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z\}$ 와 모터좌표계에서 카메라좌표계로의 변환을 나타내는 변수 6개 $\{t_x, t_y, t_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z\}$, 그리고 카메라 내부변수인 초점거리(f_u, f_v), 렌즈의 왜곡(k_u, k_v), 이미지의 중심(u_0, v_0)로 총18개이다. 여기서 보정변수의 초기값들은 실측에 의해 근사값으로 정해지는데 보정과정의 수렴성이 좋기 때문에 근사값으로 정해도 안정된 결과를 얻을 수 있었다.

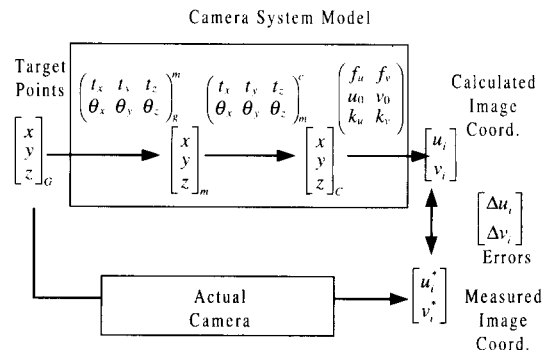


Fig. 5 Camera system calibration procedure

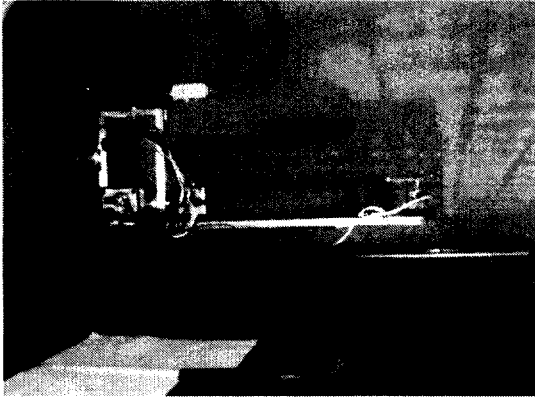


Fig. 6 Target point sampling for calibration

Fig.6은 보정과정에서 입력데이터를 얻는 과정을 보여준다. 먼저 카메라를 구동부에 고정시킨 후, 임의의 수평회전(θ_p)과 수직회전(θ_v)을 한 상태에서 카메라를 정지시킨다. 모눈종이 위에 목표점들이 표시되어 있는 측정판을 눈금이 그어져 있는 테이블의 알려진 위치에 고정함으로써 각 목표점의 기준좌표계{GLB}에 대한 삼차원 좌표를 얻는다. 좌표가 알려진 목표점에 대응하는 영상의 화면상의 위치를 마우스로 선택하면 그 때의 화소 좌표가 프로그램에 의해 읽혀져서 (u_i^*, v_i^*)를 얻는다. mm 단위로 표현된 목표점의 삼차원 좌표를 얻은 후, 이 값들은 화소단위의 화면 좌표, 그리고 θ_p 와 θ_v 값들과 함께 입력데이터 파일에 저장된다. 이러한 과정을 반복함으로써 입력데이터 파일이 완성된다.

보정변수의 초기값들을 읽어들이고 후 카메라 시스템의 수학적 모델(식 (2)~(7))을 이용하여 입력된 삼차원 좌표값을 카메라좌표계로 변환한 후 원근투영변환과 렌즈 왜곡식을 통하여 이차원 이미지 좌표 (u_i, v_i)로 만든다. 이렇게 계산된 이차원 이미지의 좌표는 카메라 시스템의 수학적 모델이 실제 카메라의 거동과 오차가 있기 때문에 실제 측정된 이미지의 좌표와 오차가 발생한다. 따라서 보정 과정은 마퀴드 방법을 이용하여 이들 오차를 최소화하는 보정변수들을 찾아 나가는 것이다.

2.4.3 거리 측정시스템의 보정

거리측정시스템의 보정은 목적함수는 측정된 목표점의 x, y, z 좌표와 수학적 모델(식(8)~(15))에 의해 계산된 목표점의 x, y, z 좌표 사이의 오차

의 제곱합이며 식(25)로 주어진다.

$$Obj(p) = \sum_{i=1}^{n_{out}} R_i(p)^2 = \sum_{i=1}^{n_{out}} (g_i^* - g_i(p))^2 \quad (25)$$

여기서

g_i^* : measured coordinate of target points

g_i : calculated coordinate of target points

보정변수는 Fig.4에 표시된 변수들 중에서 거리 측정에 필요한 레이저와 카메라의 초점과의 거리 (D_x, D_y)와 각도의 초기값(θ_1^0, θ_2^0)으로 총4개이다. 이 때 카메라 시스템 보정과정에서 사용된 마퀴드 최적화 방법이 목적함수를 최소화시키는 보정변수를 찾아내는 과정에 사용되었다.

거리측정 시스템의 보정과정은 다음과 같다. 카메라를 고정시키고 레이저 각도를 변화시킨 후 Fig.6에서와 같이 측정판을 테이블 상에서 이동시켜 측정판에 레이저 이미지가 맺히게 한다. 레이저 이미지의 x, y, z 좌표를 실측하여 측정좌표를 얻고, 그 때 화면상에 맺힌 레이저의 이미지를 마우스로 선택하여 (u, v)좌표를 읽은 후 수학적 모델을 이용하여 x, y, z 좌표를 계산한다. 이렇게 입력데이터 파일을 완성한 후 보정변수의 초기값들을 실측에 의한 근사값으로 정하여 입력한다. 거리측정 시스템의 보정은 카메라보정과 같은 방법으로 변수 4개 ($D_x, D_y, \theta_1^0, \theta_2^0$)를 보정한다.

여기서 카메라 좌표계와 레이저의 방향을 정렬해야 한다. 즉, 레이저의 v 방향 위치는 레이저 빔 이미지가 화면의 v 방향 중심(v_0)에 오도록 레이저의 방향과 위치를 미세 조정하여 고정하고, 또한 레이저가 회전하였을 때도 같은 v 방향 중심에 레이저가 오도록 하기 위하여 레이저 회전축의 방향을 카메라의 v 방향과 정확히 평행하도록 실험을 통하여 축의 방향을 미세 조정한다. 레이저의 각도가 0° 에서 24° 로 변화하고 거리가 800mm에서 1400mm가 변화할 때 레이저의 이미지의 v 방향좌표의 변화량이 1픽셀 이내가 되도록 레이저 축의 방향을 미세조정 하였다. 이렇게 v 방향이 고정된 레이저는 카메라가 상하방향으로 회전할 때 카메라와 일체가 되어 움직이게 되므로 레이저 빔 이미지는 항상 화면의 v 방향 중심에 오게 된다. 레이저 빔 이미지의 u 방향위치에 영향을 미치는 레이저의 초기 각도 (θ_1^0)는 최대한 카메라와 평행하게 정한 다음 보정 과정을 통하여 계산된다.

3. 실험 장치

3.1 실험장치의 구성

Fig.1에서 소개된 장치가 제작되어 실험에 사용되었다. 위치측정시스템은 병렬포트를 통하여 실리콘 그래픽스 O2 워크스테이션에 연결되어서 제어된다. 이 시스템에서는 초점거리가 비교적 짧은 8 mm 렌즈를 장착한 카메라가 사용되기 때문에 화면의 중심에서 멀어 질수록 이미지가 중심 쪽으로 휘어지는 왜곡이 일어난다. 이 왜곡의 영향은 보정과정을 통하여 제거된다. 이 시스템의 구동모터는 2상 스테핑 모터를 반 스텝으로 구동시키고 이 모터에 2.5:1 비율의 감속장치를 연결하여 한 스텝 당 0.36°의 분해능을 얻었다. 컴퓨터와 스테핑 모터의 인터페이스는 병렬포트를 사용하였는데 5804 스테핑 모터 구동칩을 이용하여 드라이버를 구성한 후 방향과 펄스신호를 병렬포트를 이용하여 주고받음으로써 프로그램이 간단하고 인터페이스 카드 없이 간단한 C 언어로 모터를 제어 할 수 있다.

3.2 위치 측정 순서

Fig.7은 거리측정시스템의 작업화면이다. 탁자 위의 물체에 레이저 광선을 주사하여 삼차원 위치를 계산한 상태이다. 수직회전, 수평회전, 레이저 모터들의 방향은 사용자가 각도나 스텝 수를 키보드 입력하거나 마우스로 그래픽 다이얼을 돌려서

제어할 수 있다. 사용자가 원격지에서 수평회전모터와 수직회전모터를 구동시켜서 비디오 화면에 위치를 측정하고자 하는 물체가 보이도록 만든다. 물체는 비디오 화면상에 임의의 위치에 있을 수 있는데, 사용자가 물체를 마우스로 선택하면 수직회전 모터의 각도가 보정이 되어 그 물체가 화면의 중간 높이에 오게 된다. 사용자는 비디오 화면을 보면서 레이저 광선이 물체에 닿는 위치까지 레이저모터를 돌린다. 레이저 광선이 물체에 닿았을 때의 마우스로 그 점을 선택하면 수직회전 모터와 수평회전 모터의 각도를 읽어 들이고 이 때의 화면상에 맺힌 레이저 모터의 각도를 읽어들이면 물체상의 레이저 광선이 맺힌 점의 삼차원 위치를 알 수 있다.

4. 실험 및 결과

4.1 카메라 시스템 보정 결과

1) 구동부를 고려하지 않은 카메라 시스템 보정

카메라의 보정을 위해 먼저 카메라를 고정시킨 후 800, 1000, 1200mm 떨어진 곳에 있는 측정판상의 복표점의 삼차원 좌표값 (x,y,z)와 그에 해당하는 이미지좌표(u,v)를 한 쌍으로 하는 입력데이터를 75세트 얻어서 보정과정을 수행하였다. Table 1은 카메라 보정에 사용된 보정변수의 초기값과 최종값을 보여주고 있다.

Table 1 Initial and final values of the calibration parameters in camera calibration

Calibration parameters		Initial values	Final values
Related to T_c^s	T_x (mm)	0.	5.4468
	T_y (mm)	20.	24.3796
	T_z (mm)	425.	421.9370
	θ_x (deg.)	-0.01	0.4813
	θ_y (deg.)	0.01	-0.7529
	θ_z (deg.)	-0.01	0.9442
Related to Camera Model	f_u (pixels)	1190.	1178.26
	f_v (pixels)	1100.	1072.29
	k_x (mm)	0.1	0.0742
	k_y (mm)	0.1	0.0819
	u_0 (pixels)	359.5	326.78
	v_0 (pixels)	242.5	209.71

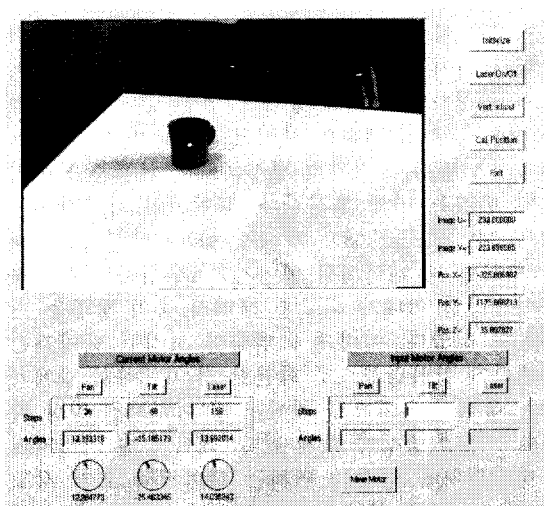


Fig. 7 Graphic user interface

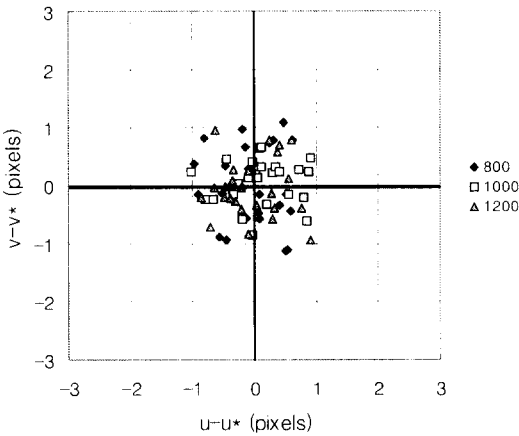


Fig. 8 Residual errors between measured (u^*, v^*) and calculated (u, v) after camera calibration with a fixed viewing angle.

보정변수 초기값의 배정은 T_x, T_y, T_z 의 경우 실측을 통한 근사값을 배정하였고, 화면의 중심좌표 (u_0, v_0)는 전체 이미지의 중심값을 할당했으며, 그 외의 값들은 이전에 수행되었던 보정과정에서 얻었던 근사값을 할당하였다.

Fig.8은 보정된 수학적 모델에 의한 계산된 (u, v) 좌표값과 측정된 좌표값(u^*, v^*)간의 오차를 나타내는데 최대오차가 ± 1 화소 이내에 나타났다.

2) 구동부를 고려한 카메라 시스템 보정

위에서 구한 카메라의 내부보정변수(초점거리, 렌즈왜곡, 이미지의 중심)들을 이용하여 카메라 구동부를 고려한 카메라시스템 보정을 수행하였다. 이 때 카메라의 수평회전각 ($-90, 0, 90$)과 수직회전각 ($0, -15, -25$)과 거리 (500, 700, 800, 1200 mm)의 변화를 조합하여 얻은 183개의 데이터 세트를 사용하였다. Table 2는 카메라 구동부를 고려한 보정에 사용된 보정변수의 초기값과 최종값을 보여주고 있다. 카메라 내부변수는 앞의 카메라 보정의 결과를 초기값으로 사용하였고, 그 외의 변수는 실측값을 초기값으로 사용하였다. Fig.9은 보정된 수학적 모델에 의한 계산된 (u, v) 좌표값과 측정된 좌표값 (u^*, v^*)간의 오차를 나타낸다. 이 오차값들은 약 ± 3 화소범위 안에 있는 것으로 카메라를 고정하였을 때 얻은 Fig.8의 오차보다 더 큰 오차가 발생하였다. Fig.10은 Fig.9의 오차값들 중 Pan이 0° 이고 tilt가 $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ 일 때의 오차 분포를 나타내는

Table 2 Initial and final values of the calibration parameters in camera system calibration including driving system.

Calibration parameters		Initial values	Final values
Related to T_m^g	$T_x(\text{mm})$	5.	5.0744
	$T_y(\text{mm})$	10.	10.1733
	$T_z(\text{mm})$	422.	421.4222
	$\theta_x(\text{deg.})$	0.01	0.4984
	$\theta_y(\text{deg.})$	0.01	-0.1264
Related to T_c^m	$T_x(\text{mm})$	0.	-4.0393
	$T_y(\text{mm})$	24.	23.7465
	$T_z(\text{mm})$	0.01	-0.0135
	$\theta_x(\text{deg.})$	0.01	-0.0063
	$\theta_z(\text{deg.})$	0.01	0.8903
Related to Camera Model	$f_u(\text{pixels})$	1178.	1175.51
	$f_v(\text{pixels})$	1072.	1065.54
	$k_u(\text{mm})$	0.1	0.0806
	$k_v(\text{mm})$	0.1	0.0796
	$u_0(\text{pixels})$	326.8	327.05
	$v_0(\text{pixels})$	209.7	209.60

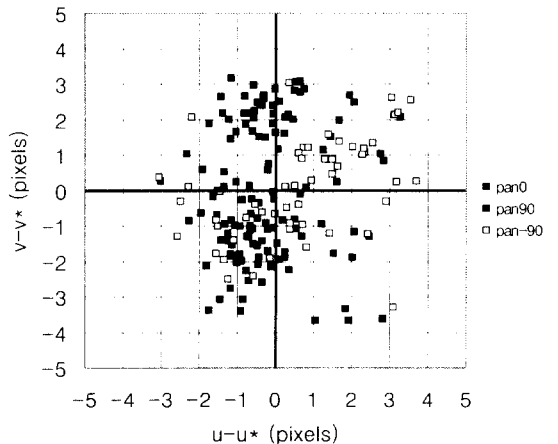


Fig. 9 Residual errors between measured (u^*, v^*) and calculated (u, v) after camera calibration at various viewing angles

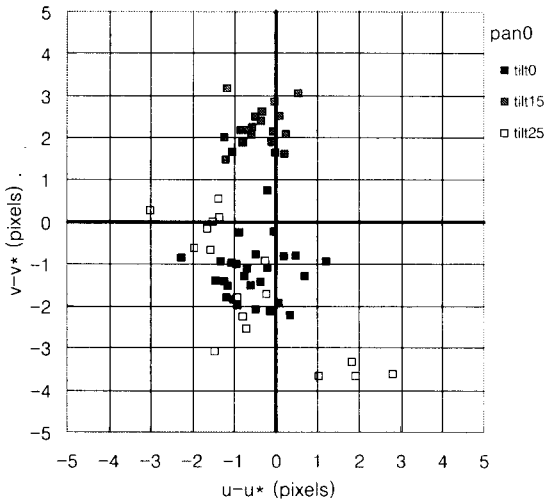


Fig.10 Residual errors between measured (u^*, v^*) and calculated (u, v) after camera calibration at pan angle= 0° and tilt angle= $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$.

그림인데, tilt 값에 따라서 오차의 분포가 변하는 것을 볼 수 있다.

이는 카메라를 구동할 때 발생하는 기구학적인 오차에 기인하는 것으로서 구동축의 조립오차, 스테핑모터의 반복정확도, 타이밍벨트의 백래쉬, 구동축 간의 직각도 등이 원인이다. 이들은 타이밍벨트를 사용하지 않고, 유성치차나 하모닉드라이브를 사용하여 스테핑모터 구동의 정확도를 높이고, 더욱 정밀한 가공을 통하여 가공오차나 조립오차를 줄임으로써 더욱 정밀한 장치를 만들 수 있을 것이다.

4.2 거리측정시스템의 보정 결과

거리측정시스템의 보정실험을 하기 위하여 카메라 시스템을 고정시키고 원점으로부터 각각 800, 1000, 1200, 1400 mm에 측정판을 위치시킨 후, 레이저를 회전시켜서 레이저광선이 측정판에 멧히게 한다. 그 때 레이저 광의 이미지데이터와 절대위치를 27개 측정하여 $D_x, D_y, \theta_1^0, \theta_2^0$ 에 대한 보정을 실시하였다. Table 3은 보정에 사용된 초기 보정변수값과 최종 변수값을 나타낸다.

보정된 변수를 이용하여 거리를 계산한 결과의 오차분포는 Fig.11과 같이 X축으로 $\pm 2mm$, Y축으로 $\pm 8mm$ 안에서 긴 타원형의 분포를 나타내었다.

Table 3 Initial and final values of the calibration parameters in the distance measuring system calibration.

Calibration parameters	Initial values	Final values
D_x (mm)	291.	289.3
D_y (mm)	26.4	27.37
θ_1^0 (deg.)	-1.5	-0.63
θ_2^0 (deg.)	0.8	-0.03

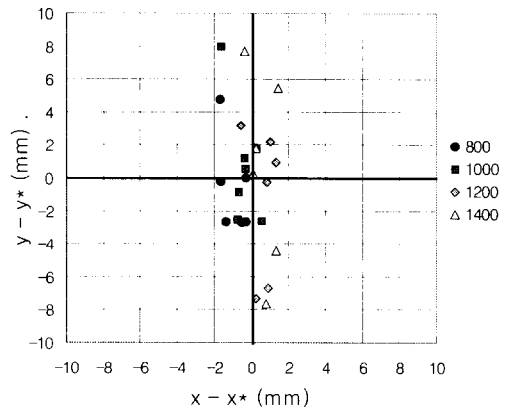


Fig. 11 Errors between measured (x^*, y^*) coordinate and calculated (x, y) coordinate after distance measuring system calibration

이런 결과는 식(11)에서 θ_1 과 θ_2 의 오차에 의해 발생한 x 방향의 오차가 식(12)의 y 방향오차에 그대로 영향을 미칠 뿐만 아니라, θ_2 에 의한 오차가 한번 더 영향을 미치기 때문에 x 방향의 오차보다 y 방향의 오차가 크게 나타났다. 이를 줄이기 위해서는 더욱 정밀한 모터각도를 얻는 것이 요구되므로 고정밀도의 모터의 사용과 타이밍벨트의 슬립이나 백래쉬 등이 제거된 메카니즘의 적용이 필요하고, 시스템의 초기화 때 모터의 초기 위치를 결정하는 리미트 스위치의 정밀도와 반복 정확도 또한 개선되어야 한다. 또한 θ_1 과 θ_2 의 값의 차가 작아지면 즉, 식(11)과 식(12)의 분모($\tan \theta_1 - \tan \theta_2$)가 0에 근접하게 되면, 측정정밀도는 급격히 나빠지게 된다. 따라서 카메라와 레이저 사이의 거리

(D_c)를 크게 함으로써 θ_1 과 θ_2 의 값 차를 크게 만들어 측정 정밀도를 높일 수 있다.

4.3 삼차원 위치 측정 결과

앞에서 보정한 카메라 시스템과 거리측정 시스템을 이용하여 알려진 삼차원 위치에 있는 목표점들을 실측하였다. 먼저 카메라 구동부를 임의의 각도로 움직인 후 레이저를 임의의 각도로 움직여서 측정판에 레이저 빔이 맺히게 한다. 그 때 측정판에 맺힌 레이저 빔의 삼차원 좌표를 읽어서 측정좌표(x^*, y^*, z^*)를 구하고 이 때 화면상의 레이저 빔 이미지의 이차원 좌표를 읽어서 레이저 빔의 삼차원 위치(x_c, y_c, z_c)를 계산하였다. Table 4는 측정된 좌표(x^*, y^*, z^*)와 계산된 좌표(x_c, y_c, z_c)와의 RMS 오차값을 보여준다. 물체의 위치를 오차범위 11.9mm 이내에서 찾아내고 있다.

Table 4 Results of 3D position measurement

	x^*	y^*	z^*	x_c	y_c	z_c	rms
1	41	1400	420	40.4	1403.7	422.0	3.5
2	-491	1400	415	-491.1	1408.2	417.9	8.0
3	545	1400	419	553.0	1403.6	421.4	8.6
4	698	1100	422	698.0	1098.0	423.8	1.5
5	58	1100	422	63.8	1107.8	422.3	9.7
6	-331	1100	420	-326.2	1107.2	419.8	8.7
7	-355	800	420	-354.7	811.0	420.0	11.0
8	-11	800	422	-7.1	807.3	421.0	8.3
9	-517	800	421	-520.5	802.7	421.0	4.4
10	498	800	151	503.9	803.9	149.2	7.2
11	8	800	178	14.0	808.0	177.2	10.0
12	-484	800	134	-481.0	806.2	133.3	6.9
13	-474	1100	223	-469.2	1103.4	224.3	5.8
14	28	1100	242	33.7	1100.4	244.0	5.5
15	592	1100	217	597.2	1098.9	218.8	5.1
16	670	1400	167	680.0	1397.5	168.2	10.2
17	-34	1400	80	-24.3	1401.5	80.4	9.8
18	-451	1400	62	-445.3	1410.4	61.0	11.9

x^*, y^*, z^* : measured coordinate
 x_c, y_c, z_c : calculated coordinate

이는 Fig.8에 나타난 카메라 보정의 오차와 Fig.9에서 나타난 구동부의 기구학적인 오차와 Fig.11에서 나타난 거리 측정 시스템의 오차가 더해져서 나타난 오차이다. 이 오차를 줄이려면 앞에서 언급한 구동부 제작 상의 오차를 줄여하고 카메라

와 레이저 사이의 거리를 늘여야 할 것이다.

5. 결론

임의의 위치에 놓여있는 물체의 삼차원 위치정보를 원격지에서 알아 낼 수 있는 측정장치를 개발하였다. 이 과정에서 카메라와 구동부 그리고 거리 측정시스템의 모델링과 시스템 보정을 수행하였으며 800에서 1400 mm이내에 위치한 물체의 좌표를 12mm 이내의 오차범위에서 찾아내었다. 이 측정오차는 좀더 정밀한 기구학 설계를 통하여 향상될 수 있는 것으로서 임의의 위치에 놓여있는 물체를 지시하는데 충분한 정밀도이다.

또한 사용될 거리의 범위에 따라 카메라와 레이저 사이의 거리 (D_c)를 증가시킴으로써 측정정밀도를 높일 수 있다.

현재 시스템은 레이저를 측정하고자 하는 물체까지 이동을 시킨 후 그 점을 다시 선택하여 삼차원 좌표를 찾아내는 방식을 사용하고 있다. 앞으로의 연구과제로서 물체를 선택하면 선택된 물체까지 레이저가 자동으로 움직여서 삼차원 좌표를 측정해주는 시스템을 개발하는 것이 필요하다.

이 시스템을 사용하면 원격지에서 비디오 화면을 보면서 현장에 있는 물건들을 지목할 수가 있으므로 현장에 있는 로봇에게 작업지시를 하는 시스템이나 각 물건들의 실시간 데이터가 저장되어있는 데이터베이스에 그 좌표정보를 이용하여 접근하여 실시간 데이터를 원격지에서 모니터링 하는 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

데이터 교신의 수단으로서 인터넷을 사용하면 임의의 위치에 있는 작업장을 임의의 위치에서 제어할 수 있는 시스템을 구축할 수 있을 것이다. 인터넷을 이용한 원격좌표 측정 시스템을 구동하기 위해서는 정보량이 많은 비디오 이미지를 실시간으로 전송하는 것이 가능해야 하는데 현재의 인터넷 속도로는 원활한 작동이 어려운 실정이다. 그러나 인터넷 속도의 빠른 증가로 인하여 이 시스템을 실시간으로 작동시키는 것이 머지않아 실현될 것으로 생각한다.

참고문헌

1. Cannon D.J., Leifer L.J., "Point-and-Direct Robotics," International Conference on Intelligent

- Telerobotics, Greensboro NC, Nov., pp. 95-106, 1991.
2. Sheridan T.B, "Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control," The MIT Press, Cambridge, MA, 1992.
 3. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G., "Robotics: control, sensing, vision, and intelligence," McGraw Hill, 1987.
 4. 손영탁, 김재선, 조형석, 고광일, "로봇 아크용접 공정을 위한 용접접합부의 시각인식 및 추종," 대한기계학회 논문집 제19권 제12호, pp. 3216-3229, 1995.
 5. Tsai R.Y., "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Camera and Lenses," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-334, 1988.
 6. Tsai R.Y., Lenz R.K., "Overview of a Unified Calibration Trio for Robot Eye, Eye-to-Hand, and Hand Calibration using 3D Machine Vision," SPIE Vol.1003, Sensor Fusion: Spatial Reasoning and Scene Interpretation, pp. 202-213, 1988.
 7. Shiang T.Y., Sommer H.J., Eckhardt R.B., "Quantification of cranial surface asymmetry using superquadrics," Biomed Eng. Appl. Basis Comm, Feb., Vol. 5, pp. 20-37, 1993.
 8. Craig J.J., "Introduction to Robotics," Addison-Wesley, 1989.