

스테레오비전을 이용한 3 차원 물체 측정 시스템

조진연*, 김기범**

3D measuring system by using the stereo vision

Cho jin youn*, Kim Gibom **

ABSTRACT

Computer vision system become more important as the researches on inspection systems, intelligent robots, diagnostic medical systems is performed actively. In this paper, 3D measuring system is developed by using stereo vision. The relation between left image and right image is obtained by using 8 point algorithm, and fundamental matrix, epipole and 3D reconstruction algorithm are used to measure 3D dimensions. 3D measuring system was developed by Visual Basic, in which 3D coordinates would be obtained by simple mouse clicks. This software would be applied to construction area, home interior system, rapid measuring system.

Key Words : Stereo vision (스테레오비전), measurement(측정), epipolar geometry, 3D reconstruction(3 차원복원)

기호설명

e_l, e_r : Left, right epipole

R : Rotation matrix, T : Transformation matrix

O_l, O_r : Left, right projection center

M : Projection Matrix

1. 서론

컴퓨터의 처리속도와 함께 영상처리의 기술이 발전함에 따라, 카메라를 이용하여 인간의 눈을 대신하기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔고, 점차 영상처리 및 인식분야의 연구가 확대되고 있다. 그 중에 가장 많이 알려져 있고 광범위하게 사용되는 기술이 스테레오 비전(Stereo vision)이다. 이는 실제 사람이 눈을 통해 3 차원 공간을 인식하는 기능을 두 대의 카메라를 사용하여 구현한 기술이다. 스테레오 비전의 원리는 서로 다른 뷰 포인트(View point)를 가지는 둘 혹은 그 이상의 이미지를 이용하여, 각 이미지의 point 들의 정합

(Correspondence)을 통하여 3 차원 상의 구조와 거리에 대한 정보를 추론하는 능력을 제공한다. 본 논문에서는 이러한 스테레오 비전의 특징을 이용하여 3 차원 측정 시스템을 개발하였다.

기존의 3 차원 측정장비는 사람이 직접 포인팅 장치를 이용해 물체의 표면은 직접 포인팅 함으로서 측정하거나, 레이저를 물체 표면에 주사한 후 이를 영상으로 획득하여 분석함으로써 3 차원 정보를 얻어냈다. 그러나, 이러한 장비들은 다루기가 난해하고, 또한 레이저 같은 고가의 장비가 사용되므로 특별한 경우를 제외하고는 범용적으로 사용이 제한되고 있다. 본 논문에서는 포인팅 장치나, 레이저 장치의 사용 없이 두 대의 카메라를 이용하여 3 차원 정보를 얻고, 측정할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 실험을 통해 검증하였다. 본 논문에서 제시한 3 차원 측정 시스템은 필요한 몇 가지 정보를 이미 알고있는 물체를 이용하여 카메라들에 대한 정보 및 3 차원 기하학적 특성을 계산한 후, 그 값을 기준으로 실제 물체에 대한 3 차원 좌표 값을 측정하여 값을 얻었다. 본 논문에서

* 서울산업대학교 메카트로닉스공학과
 ** 서울산업대학교 자동화공학과

제시하고 있는 3 차원 측정시스템의 다음과 같은 단계를 통하여 구현되었다.

- (1) 영상 획득
- (2) Camera Calibration
- (3) 3 차원 좌표 추출
- (4) 이미지상 측정포인트 입력
- (5) 실제 물체에 대한 측정

두 대의 카메라를 통해 얻어진 이미지만을 이용해 3 차원 물체를 측정하기 위하여 각 단계를 차례로 거쳐 이루어지며, 각 단계는 다음과 같다.

2. 3 차원 측정 시스템

3 차원 물체의 측정을 위해 2 대의 CCD 카메라가 필요하다. 본 연구에서 사용한 CCD 카메라는 NTSC 로 방송하며, 줌(Zoom), 초점(Focus)의 수동 조작이 가능하다. 두 대의 CCD 카메라는 평평한 판 위에 한 축을 중심으로 설치되고, 상하 좌우로 조정이 가능조정이 가능하고, Zoom 과 Focus 를 조절하기 위해 별도의 컨트롤러(Controller)를 만들어 컴퓨터의 RS232C 를 통하여 조절할 수 있다. 측정물체는 적당한 곳에 놓고, 적절히 카메라를 조정하여 캡처(Capture) 된 영상은 프레임그래버(Frame grabber)로 이산화 되어 저장된다. Fig.1 은 본 연구에서 사용한 시스템을 도식화 하여 보여준다.

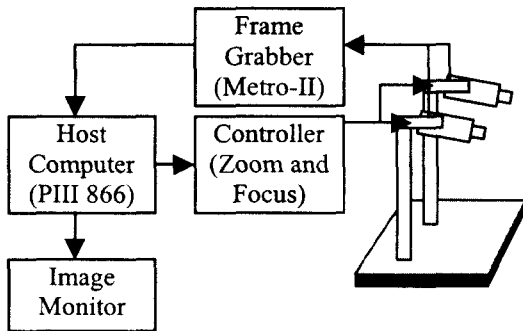


Fig. 1 Schematic diagram of the system

3. Camera Calibration

3.1 Epipolar Geometry

스테레오 비전의 기하학적인 구조는 잘 알려진 epipolar geometry 로 표현할 수 있다. Fig.2는 두 대의 핀 홀(Pinhole) 카메라의 Projection center O_r, O_l 과 이미지 평면 π_r, π_l 를 보여주고 있다.

3 차원상에 임의의 한 점 P 가 주어지고, Projection center O_r, O_l 과 P 를 이미지 평면상에 한 점을 통하여 연결했을 때, 생기는 평면을 Epipolar 평면이라 하고, O_r 를 O_l 연결 할 때 이미지 평면을 지나는 점 e_r, e_l 을 epipole 그리고, 이미지상의 점 p 와 epipole e 를 연결하는 선을 epipolar line 이라고 한다.

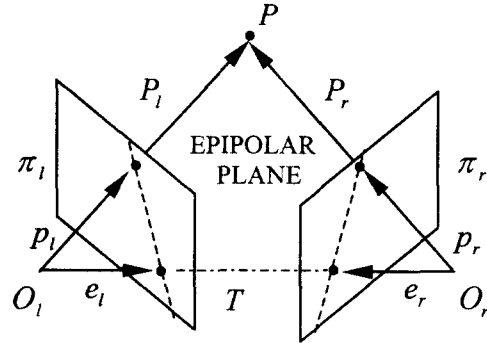


Fig. 2 The epipolar geometry

한 카메라에서의 Epipolar line 는 카메라의 Epipole 과 이미지상에 임의의 한 점을 지나고, 다른 카메라의 대응되는 점(Corresponding point)은 이와 짝을 이루는 카메라의 epipolar line 위에 존재해야 한다는 구속(epipole constraint) 조건을 가지고 있다. 이러한 속성 때문에 두 이미지의 대응(Correspondence)되는 점을 찾을 때 2 차원의 문제를 1 차원의 문제로 줄일 수 있다. Fig.2에 관계를 보면 고정된 축에 대한 이동벡터(Translation vector)가 $T = O_r - O_l$ 이고, 회전 행렬이 R 이라고 할 때, 주어진 공간상의 점 P 에 대해 P_r 과 P_l 의 관계는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_r = R(P_l - T) \quad (3.1.1)$$

그리고, 3 차원상의 포인트와 투시된 포인트 사이의 관계식을 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$p_l = \frac{f_l}{Z_l} P_l \quad (3.1.2)$$

$$p_r = \frac{f_r}{Z_r} P_r \quad (3.1.3)$$

3.2 The Essential Matrix, E

Essential Matrix 는 카메라 좌표계(camera coordinator)에서 한 카메라의 epipolar line 과 한 쌍이 되는 다른 카메라의 포인트 사이를 mapping 시키기 위한 행렬로서, Fig.2 에서 P 를 자나는 epipolar plane 의 평면상의 상태식은 P_l, T 그리고 $P_l - T$ 혹은,

$$(P_l - T)^T T \times P_l = 0 \quad (3.2.1)$$

으로 표현 할 수 있다. 여기에 식 (3.1.1)을 식 (3.2.1)에 대입하여 다음과 같다.

$$(R^T P_r) T \times P_l = 0 \quad (3.2.2)$$

$$T \times P_l = S P_l \quad (3.2.3)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -T_z & T_y \\ T_z & 0 & -T_x \\ -T_y & T_x & 0 \end{bmatrix}$$

이렇게 얻어진 식(3.2.2)에 식(3.2.3), (3.1.2), (3.1.3)을 대입해서 풀면 다음과 같이 카메라 좌표계에 대한 식을 만들 수 있다.

$$p_r^T E p_l = 0 \quad (E = RS.) \quad (3.2.4)$$

Essential matrix E 는 카메라 좌표계에서 한 점과 그에 대응되는 epipolar line 를 mapping 한다.

3.3 The Fundamental Matrix, F

Fundamental Matrix 는 픽셀 좌표계 안에서의 한 점과 그와 대응되는 epipolar line 과 mapping 을 하기위한 행렬로서, 좌우 카메라의 내부 파라미터 (Intrinsic para-meter)가 M_r, M_l 이고, 카메라 좌표계 안에 p_r, p_l 이 픽셀 좌표계의 \bar{p}_r, \bar{p}_l 이라면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$p_l = M^{-1} \bar{p}_l \quad (3.3.1)$$

$$p_r = M^{-1} \bar{p}_r \quad (3.3.2)$$

이 두식을 식(3.2.5)에 대입하면

$$\bar{p}_r^T F \bar{p}_l = 0 \quad (3.3.3)$$

$$F = M^{-T} E M^{-1} \quad (3.3.4)$$

와 같이 표현 할 수 있는데 여기서 F 가 Fundamental Matrix 이다.

3.4 The Eight-point Algorithm

Fundamental Matrix 를 구하기 위해서는 두 이미지에서 서로 대응되는 점이 최소 8 점 이상 필요하다. Fundamental Matrix 의 9 개의 요소를 구하려면 8 차 연립방정식을 계산함으로써 그 값을 구할 수 있다. 본 논문에서는 Eight-point Algorithm 을 이용하였으며, 이는 다음과 같다. Fundamental Matrix $F = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9]$ 로 표현하고, 각 이미지상의 대응되는 두 포인트가 $\bar{p}_r = [x_r, y_r, z_r]$, $\bar{p}_l = [x_l, y_l, z_l]$ 라 한다면 식(3.3.3)은 아래와 같이 선형 방정식으로 바꿀 수 있다.

$$A F^T = 0 \quad (3.4.1)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_{ri} x_{li}, y_{ri} x_{li}, z_{ri} x_{li}, x_{ri} y_{li}, y_{ri} y_{li}, z_{ri} y_{li}, \\ x_{ri} z_{li}, y_{ri} z_{li}, z_{ri} z_{li} \end{bmatrix} (i \geq 8)$$

본 논문에서는 위의 선형 연립 방정식을 풀기위해 SVD(Singular Value Decomposition)를 사용하여 방정식의 해를 구하였다. A 를 SVD 하여, $A = U D V^T$ 라고 하고 D 의 마지막 값이 최소 고유값(Singular Value)를 가진다고 하면 F 는 V 의 마지막 열의 값이 된다. F 는 rank 가 2 가 되어야 함으로 F 를 다시 SVD 하여 $F = U D V^T$ 를 구하고, 최소 고유값을 0 으로 하고, $F' = U D' V^T$ 로 새로운 F' 를 구하면 더 정확한 F 를 얻을 수 있다.

3.5 Epipole 의 계산

Epipole 은 3.4 에 의해서 구해진 F 로부터 계산될 수 있다. 이미지 I_r 에서 epipole 은 아래와 같이 단위 벡터로 표현 할 수 있다.

$$F e_r = 0 \quad (3.5.1)$$

이를 만족하는 최소 자승해는 $\|F e_r\|^2$ 을 최소화하는 $\|e_r\|^2 = 1$ 인 벡터이므로 행렬 $F^T F$ 의 최소 고유치에 해당하는 단위벡터가 되고, 이미지

I_l 에서 e_l 은 FF^T 의 최소 고유치에 해당하는 단위벡터가 된다. 이를 정리하면 F를 SVD 하여 F의 UDV^T 가 구해졌을 때 epipole 은 아래와 같이 구할 수 있다.

- (1) epipole e_l 은 D의 최소 고유값에 대응하는 V의 열
- (2) epipole e_r 은 D의 최소 고유값에 대응하는 U의 열

4. 3차원 좌표 추출

4.1 Projection Matrix의 결정

두 이미지에서 일치하는 점들 중에 좌측 이미지의 한 점이 p_i 라고 하면, 일치하는 3차원상에 한 점 P_i 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$MP_i = \rho_i p_i \quad (4.1.1)$$

여기서 M 은 Projection Matrix 이고, ρ_i 은 0이 아닌 상수이다. 본 논문에서는 위의 식을 간단하게 변형하여 풀기 위하여 Projection standard basis를 사용하였다, 공간상에서 계산을 위해 임의로 정해놓은 좌표계를 기준으로 세 점 이상이 같은 선상이 아니고, 네 점 이상이 같은 평면에 위치하지 않는 점을 $P_1 = [1,0,0,0]$, $P_2 = [0,1,0,0]$, $P_3 = [0,0,1,0]$, $P_4 = [0,0,0,1]$, $P_5 = [1,1,1,1]$ 로 이동하고, 이에 대응하는 좌우 이미지상의 좌표 역시 동일하게 $p_1 = [1,0,0]$, $p_2 = [0,1,0]$, $p_3 = [0,0,1]$, $p_4 = [1,1,1]$, $p_5 = [\alpha, \beta, \gamma]$ 로 각각 이동하고, 이를 위한 Transformation matrix를 구한다. 이동한 네 점을 식 (4.1.1)에 대입하면

$$M = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & 0 & \rho_4 \\ 0 & \rho_2 & 0 & \rho_4 \\ 0 & 0 & \rho_3 & \rho_4 \end{bmatrix} \quad (4.1.2)$$

를 구할 수 있고, 식 (4.1.2)와 함께 P_5 와 p_5 를 다시 식 (4.1.1)에 대입하여 풀면 최종적으로 좌측 이미지에 대한 Projection Matrix M 은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$M_l = \begin{bmatrix} \alpha_l x_l - 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \beta_l x_l - 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \gamma_l x_l - 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1.3)$$

여기서 $(x_l = \rho_{l4}/\rho_{l5})$ 이고, 우측이미지에 대해서도 동일하게 적용한다.

4.2 Projection Center의 결정

4.1에서 결정한 Projection Matrix M 과 Projection Center O 의 관계는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$MO = 0 \quad (4.2.1)$$

이를 좌측이미지에 대하여 식 (4.2.1)에 식(4.1.3), (4.1.4)를 대입하면 Projection Center O_l 는 다음과 같이 표현되고, O_r 역시 같은 방법으로 계산할 수 있다.

$$O_r = \left[\frac{1}{1-\alpha_r x_r} \quad \frac{1}{1-\beta_r x_r} \quad \frac{1}{1-\gamma_r x_r} \right] \quad (4.2.2)$$

Projection Center O_l , O_r 는 위의 3.1에서 설명한 epipolar geometry에 의하여 다음과 같이 표현된다

$$M_l O_r = \sigma_l e_l \quad (\sigma_l \neq 0) \quad (4.2.3)$$

$$M_r O_l = \sigma_r e_r \quad (\sigma_r \neq 0) \quad (4.2.5)$$

식 (4.2.3)에 식 (4.1.3), 식 (4.2.2)를 대입하고, 계산하면 x_l , x_r 를 구할 수 있다.

$$x_l = \frac{e_r^T (p_{5r} \times p_{5l})}{v_r^T (p_{5r} \times p_{5l})} \quad (4.2.4)$$

$$(v_r = (\alpha_l e_{xr}, \beta_l e_{yr}, \gamma_l e_{zr}))$$

4.3.3 3차원 좌표 계산

좌우 이미지 평면에서 대응되는 두 점 $p_l = [p_{xl}, p_{yl}, p_{zl}]$, $p_r = [p_{xr}, p_{yr}, p_{zr}]$ 이 주어졌을 때, projection center O_l , O_r 에서 p_l , p_r 를 통하는 두개의 projective line(L_l , L_r)을 그

릴 수 있다. 이 두 직선의 교차하는 점을 구함으로써 standard projective basis P^3 안에서의 좌표를 구할 수 있다.

$$L_l = \lambda_l O_l + \mu_l [O_{xl} p_{xl}, O_{yl} p_{yl}, O_{zl} p_{zl}, 0]^T \quad (4.3.1)$$

$$L_r = \lambda_r O_r + \mu_r [O_{xr} p_{xr}, O_{yr} p_{yr}, O_{zr} p_{zr}, 0]^T \quad (4.3.2)$$

5. 실험 및 검증

본 논문에 실험을 위해 Fig 2와 같은 비주얼 베이직을 이용한 프로그램을 만들어 실제 측정 실험을 하였다.

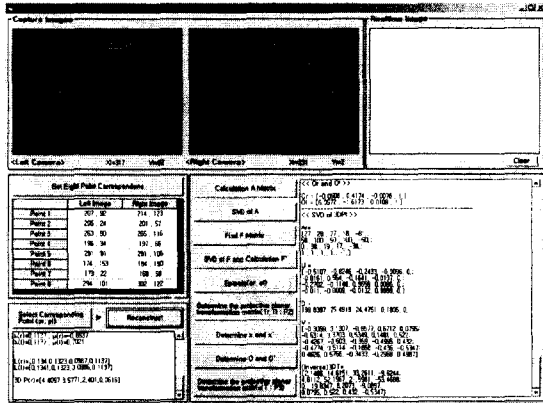


Fig 2. 측정 프로그램

본 프로그램은 사용자가 이미지 위를 마우스로 클릭할 수 있도록 만들어져서, 먼저 카메라 Calibration 을 위해서 두 이미지에서 대응되는 8 점을 마우스를 이용하여 선택한다. 카메라 및 좌표에 대한 Calibration 을 한 후, 알고싶은 위치를 마우스를 이용하여 클릭하면 선택한 부분의 3 차원 좌표가 출력된다. 여기서 출력되는 좌표는 실험을 위해 임의로 정한 좌표계를 기준으로 출력한다.

| | 실제좌표 | 측정좌표(좌) | 측정좌표(우) |
|---|---------------|--------------------|--------------------|
| 1 | [27, 58, 0] | [27.1, 58, 0] | [26.8, 58, 0] |
| 2 | [18, 100, 17] | [17.5, 99.8, 16.3] | [17.7, 99.8, 16.3] |
| 3 | [78, 18, 0] | [88.4, 28.9, 13.4] | [88.2, 31.9, 16.4] |
| 4 | [77, 50, 19] | [71.5, 51, 42] | [72.6, 50.8, 41.2] |

표. 1 좌표측정결과

표 1 은 이미지에 대응되는 좌우 좌표를 이용해서 계산한 좌표와 실제 좌표를 정리해 놓았다. 표에서 보듯이 측정된 좌우좌표는 거의 동일하다는 것을 보여준다. 그러나 3, 4 번의 결과와 같이 실제 좌표와 차이가 나는 경우도 있는데 이는 점의 대응문제, 계산상에 유효수치 혹은, 카메라 장치에 대한 문제 등에 의해서 발생할 수 있는 결과로서 앞으로 정확한 측정을 위해서 해결 해야 할 문제이다.

6. 결론

본 논문에서는 이미지만을 이용하여 3 차원 물체에 대한 측정을 위해 스테레오 비전 시스템을 사용하였으며, 이에 대한 기본적인 수식과 알고리즘을 제시하였다. 또한 3 차원 정보추출에 필요한 기본적인 계산의 반복을 줄이기 위하여 기준물체를 이용하여 한번만 Calibration 을 하고 이를 기준으로 한 이미지 상에 놓여진 다른 물체를 측정할 수 있는 프로그램을 개발하고 실험하였다. 하지만 초기에 Calibration 과정이 복잡하고, 두 이미지의 대응 등 해결해야 할 문제로 남아있다. 또한 자동으로 물체를 측정하기 위해서는 이런 한 문제들의 해결이 가장 중요하며, 앞으로 해결하여야 할 과제이다.

참고문헌

1. Emanuele Trucco, Alessandro Verri "INTRODUCTORY TECHNIQUES for 3-D COMPUTER VISION"
2. GONZALEZ & WOODS "Digital Image Processing"
3. R. I. Hartly, "In defense of the 8-point algorithm," in Proc. 5th ICCV, (Boston, MA), pp 1064-1070, June 1995.
4. R. Hartly, "Stereo from uncalibration camera," in European Conference on Computer Vision, 1992.
5. A. Heyden and K. Astom, "Eucliden reconstruction from image sequences with varying and unknow focal length and principal point," in Proc. Comput. Vis. Patt. Recog. (Puerto Rico), pp. 438-443, 1997.