

3차원 형상복원을 위한 새로운 시각장치

A Novel Image Sensing System for 3D Reconstruction

이 두 현, 권 인 소
(Doo-Hyun Lee and In-So Kweon)

Abstract : This paper presents a stereo camera system that provides a pair of stereo images using a Biprism. The equivalent of a stereo pair of images is formed as the left and right halves of a single CCD image. The system is therefore cheap and extremely easy to calibrate since it requires only one CCD camera. An additional advantage of the geometrical set-up is that corresponding features lie on the same scanline automatically. The single camera and Biprism have led to a simple stereo system for which correspondence is very easy and which is accurate for nearby objects in a small field of view. Since we use only a single lens, calibration of the system is greatly simplified. Given the parameters in the Biprism-stereo camera system, we can reconstruct the 3-D structure using only the disparity between the corresponding points.

Keywords : Biprism stereo, disparity, disparity map, calibration, depth accuracy, Euclidean structure

I. 서론

스테레오 영상에서 대응점간의 변위에 의한 거리 인지는 컴퓨터 비전에서 광범위하게 연구되어 왔다. 스테레오 변위는 거리정보를 측정하는 데 강력한 실마리를 제공한다[1,2]. 스테레오 비전의 프로세스는 서로 대응되는 점들을 찾기 위한 특징량을 추출하고 기하학적인 제약조건 하에서 스테레오 영상간의 대응점을 찾고 영상간의 기하학적인 변수 및 변위의 값으로부터 거리정보를 계산한다. 각 단계가 중요하지만 대응점으로 알고있는 특징치의 매칭이 가장 어려운 단계이며 시간도 가장 많이 소요된다[2]. 두 카메라로부터 스테레오 영상을 얻었을 때, 카메라의 초점거리, 줌 레벨 및 조리개의 열린 양이 조금 다르다. 따라서, 서로 다른 광학 특성의 차는 스테레오 영상에서 대응점간의 밝기의 차를 유발한다. 따라서, 이상적인 스테레오 카메라 시스템은 한대의 카메라를 이용하여 스테레오 영상을 얻는 것이다.

카메라 한대를 사용한 기존의 스테레오 시스템을 보면 다음과 같다. Nishimoto & Shirai[3]와 Teoh & Zhang[4]는 회전시키는 기구를 사용하여 한대의 카메라로 두번 촬영에 의해 스테레오 영상을 얻을 수 있는 카메라 시스템을 제안했다. Gosthasby & Gruver[5]는 한대의 카메라와 두개의 평면 거울을 사용하여 스테레오 영상을 얻을 수 있는 스테레오 카메라 시스템을 제안하였다. 이 스테레오 카메라 시스템으로부터 얻은 영상은 반사된 영상이다. 즉, 뒤집힌 영상이 얻어지기 때문에 광축이 평행한 카메라로부터 얻은 것처럼 하기 위해선 영상의 변환이 필요하다. Nene & Nayar[6]는 평면 거울뿐만 아니라 포물면을 갖는 거울, 쌍곡면을 갖는 거울 및 타원체의 거울을 각각 두개를 이용하여 스테레오 영상을 얻고 또한 FOV를 크게 하였다. 거울의 가장자리에서는 상대적으로 물체의 크기가 작아지기 때문에 3차원 형상의 정도를 보장하

기가 어렵다.

본 논문에서, Biprism를 사용하여 스테레오 영상을 얻을 수 있는 새로운 스테레오 카메라 시스템을 제안한다. 제안된 카메라 시스템은 한대의 카메라를 사용하여 한번 촬영으로 스테레오 영상을 얻을 수 있으며, 광학특성이 동일한 카메라로부터 얻은 스테레오 영상은 기하학 및 밝기의 차를 최소화하고 대응점은 같은 주사선에 존재한다. 따라서, 제안된 시스템으로부터 얻은 영상에서의 대응점을 찾는 데 용이하고 카메라의 보정도 간단하다. 대응점들의 변위를 알면 카메라의 표준 좌표계에 대한 거리 정보를 쉽게 얻을 수가 있는 장점을 가지고 있다.

II. Biprism 스테레오 카메라

1. Biprism의 원리

그림 1 및 그림 2에서 (C_p, X_p, Y_p, Z_p) 는 Biprism의 좌표계로서 월드 좌표계로 하고, (C, X, Y, Z) 는 카메라의 표준 좌표계이다. Y_p 축은 Biprism의 경사면이 만나는 선과 평행하고 Z_p 축은 X_p - Y_p 평면과 평행한 베이스 평면 Π 에 수직이다. 따라서, Biprism의 베이스 평면은 영상 평면과 평행하고 Biprism의 Z_p 축은 카메라의 광축과 일치한다. t_z 은 카메라의 광학중심과 Biprism의 원점간의 거리이다. 그림 2는 Biprism의 원리를 보여주고 있다. 즉, 3차원 공간상의 점 X_p 는 Biprism의 경사면에 대하여 가상의 점 X_r 와 X_l 으로 변환이 된다.

Biprism의 기본 관계식은 (1)과 같이 정의된다[7,8].

$$n = \sin\left(\frac{\delta + \alpha}{2}\right) / \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1)$$

여기서, δ 은 Biprism의 변환각도 (deviation), α 는 Biprism의 경사각, n 은 Biprism의 굴절률이며 Biprism의 재질 및 빛의 파장에 따라 결정된다.

그림 2와 같이 Biprism좌표계에서 3차원 공간상의 임의의 점 X_p 와 Biprism에 의해 변환된 가상의 점 X_r , X_l 의 기하학적인 관계는 다음과 같다.

접수일자 : 1999. 11. 8., 수정완료 : 2000. 2. 8.

이두현 : 한국과학기술원 자동차 및 설계공학과

권인소 : 한국과학기술원 전자 전산공학과

$$\mathbf{X}_r = \mathbf{T}_r \mathbf{X}_p, \quad \mathbf{X}_l = \mathbf{T}_l \mathbf{X}_p \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tan \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{T}_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\tan \delta \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

(2)에서 행렬 \mathbf{T}_r 와 \mathbf{T}_l 은 Biprism 좌표계에 대한 3차원 공간의 점들을 가상의 점으로 변환시키는 변환 행렬이다. 또한 Biprism에 의해 변환된 가상의 두점간의 거리는 $2Z_p \tan \delta$ 이다. 즉, Biprism에 의해 변환된 가상의 두점간의 거리는 Biprism으로부터의 거리와 프리즘의 경사각에 비례한다.

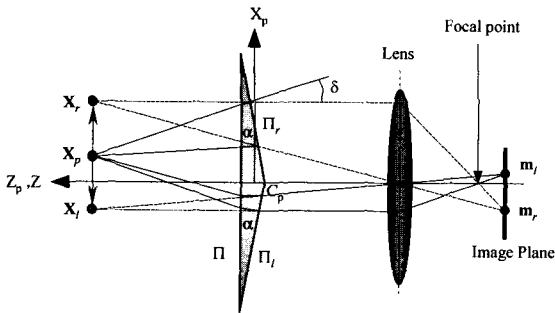


그림 1. Biprism의 기하학.
Fig. 1. The geometry of the Biprism.

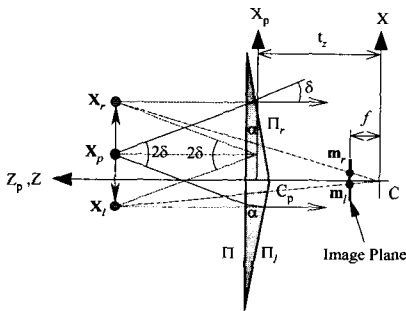


그림 2. Biprism의 원리.
Fig. 2. The principle of the Biprism.

2. Biprism 스테레오 카메라의 투영행렬

3차원 공간상의 점들은 Biprism에 의해 변환되어 카메라의 렌즈를 통해 영상 평면에 투영이 된다. 따라서, 동차 좌표계 (homogeneous coordinates)에서 Biprism 스테레오 카메라를 위한 원근법에 의한 투영 행렬을 구할 수가 있다[9,10]. Biprism 좌표계를 월드 좌표계라고 하면, 3차원 공간상의 임의의 점 \mathbf{X}_p 는 Biprism에 의해 가상의 점 \mathbf{X}_r 와 \mathbf{X}_l 으로 각각 변환되어 카메라에 투영된다. 이에 대응되는 픽셀간의 관계는 (3)과 같다.

$$\tilde{\mathbf{s}}_m = \mathbf{P}_l \tilde{\mathbf{X}}_p, \quad \tilde{\mathbf{s}}_r = \mathbf{P}_r \tilde{\mathbf{X}}_p \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{P}_l = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R} \mathbf{t} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_l & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{P}_r = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R} \mathbf{t} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_r & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{bmatrix}$.

(4)에서 첨자 l 과 r 는 오른쪽 및 왼쪽 영상에서의 투영행

렬을 의미한다. 행렬 \mathbf{R} 과 벡터 \mathbf{t} 는 월드 좌표계인 Biprism 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 회전 행렬 및 변위 벡터를 나타낸다. s 는 임의의 스케일 인자이고, (u_0, v_0) 는 영상평면에서의 영상 중심의 픽셀 좌표이고, α_u 와 α_v 는 픽셀 단위로 측정되어지는 카메라의 초점거리이다.

3. 변위와 거리의 관계

Biprism 스테레오 카메라 시스템에서 거리 (depth)와 변위 (disparity)간의 관계를 유도한다. 카메라 좌표계와 Biprism 좌표계가 정확하게 정렬되었다고 하면, 좌표계간의 회전행렬 \mathbf{R} 은 $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ 의 단위 행렬이고 변위 벡터 \mathbf{t} 는 $[0 \ 0 \ t_z]^T$ 가 된다. 따라서, (3)에서 3차원 공간상의 임의의 점과 이에 대응되는 픽셀 좌표와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} u_l \\ v_l \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_p + t_z} \begin{bmatrix} \alpha_u(X_p - Z_p \tan \delta) + u_0(Z_p + t_z) \\ \alpha_v Y_p + v_0(Z_p + t_z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} u_r \\ v_r \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_p + t_z} \begin{bmatrix} \alpha_u(X_p + Z_p \tan \delta) + u_0(Z_p + t_z) \\ \alpha_v Y_p + v_0(Z_p + t_z) \end{bmatrix} \quad (5)$$

(4)와 (5)의 관계식으로부터 대응점들의 v 픽셀 좌표값이 같으며 대응점들은 같은 열에 놓이게 됨을 쉽게 알 수가 있다. 이는 에피폴라 선이 수평 하다는 것을 의미한다. 따라서, 서로 대응되는 점간의 변위는 (6)과 같이 구할 수가 있다.

$$d = u_r - u_l = \frac{\alpha_u}{Z}(X_r - X_l) = \frac{2\alpha_u \tan \delta(Z - t_z)}{Z} = k_1 - \frac{k_2}{Z} \quad (6)$$

여기서, $k_1 = 2\alpha_u \tan \delta$, $k_2 = k_1 t_z$, $Z = Z_p + t_z$. (6)에서, 대응점간의 변위는 Biprism의 변환각도 δ 의 함수인 Biprism의 경사각 α 가 클수록 커지며 또한 카메라의 초점거리가 클수록 커진다. 그리고, 3차원 공간상의 무한대에 존재하는 점들은 일정한 변위 k_1 를 가지게 된다.

4. Biprism 스테레오 카메라의 기하학

(3)의 투영행렬로부터 Biprism 스테레오의 기하학적인 관계를 수학적으로 구할 수가 있다[9,10]. 즉, 카메라의 광학 중심 및 에피폴라 기하학 등을 구할 수가 있다. 먼저, 3×4 행렬 \mathbf{P} 를 3×3 행렬 \mathbf{B} 와 벡터 \mathbf{b} 로 분리한다. 즉, $\mathbf{P} = [\mathbf{B} \ \mathbf{b}]$. 여기서, \mathbf{B} 의 랭크(rank)는 3라고 가정하면 (7)과 같이 쓸 수가 있다.

$$\tilde{\mathbf{s}}_m = \mathbf{P}_l \tilde{\mathbf{X}}_p = [\mathbf{B}_l \ \mathbf{b}_l] \tilde{\mathbf{X}}_p, \quad \tilde{\mathbf{s}}_r = \mathbf{P}_r \tilde{\mathbf{X}}_p = [\mathbf{B}_r \ \mathbf{b}_r] \tilde{\mathbf{X}}_p \quad (7)$$

여기서, $\mathbf{B}_l = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 - \alpha_u \tan \delta \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_r = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 + \alpha_u \tan \delta \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{b}_l = \mathbf{b}_r = [u_0 t_z \quad v_0 t_z \quad t_z]^T.$$

위의 관계식으로부터 카메라의 광학중심, 에피폴라 및 에피폴라 선을 계산할 수가 있다. 따라서, 카메라의 투영 행렬로부터의 카메라의 광학중심은 (8)과 같이 정의 된다.

$$\mathbf{C}_L = -\mathbf{B}_l^{-1} \mathbf{b}_l, \quad \mathbf{C}_R = -\mathbf{B}_r^{-1} \mathbf{b}_r \quad (8)$$

여기서, \mathbf{C}_L 와 \mathbf{C}_R 는 왼쪽 및 오른쪽 카메라의 광학 중심

의 좌표이다. 또한 카메라의 광학중심을 이용하여 에피폴을 계산할 수가 있다. 왼쪽 영상에서의 에피폴 e_l 과 오른쪽 영상에서의 에피폴 e_r 는 (9)과 같이 정의 된다.

$$s\tilde{e}_l = P_l \begin{bmatrix} C_R \\ 1 \end{bmatrix} = b_l - B_l B_l^{-1} b_r, s\tilde{e}_r = P_r \begin{bmatrix} C_L \\ 1 \end{bmatrix} = b_r - B_r B_r^{-1} b_l \quad (9)$$

여기서, s 는 스케일 인자이다. 또한 에피폴라 선은 에피폴을 지나가야 한다. 오른쪽 영상에서 $m_r(u_r, v_r)$ 의 픽셀이 주어졌다면, 왼쪽 영상에서의 에피폴라 선 l_r 은

$$l_r = (b_l - B_l B_l^{-1} b_r) \times (B_l B_l^{-1} \tilde{m}_r) \text{ or } l_r = F \tilde{m}_r \quad (10)$$

이 된다. 여기서, F 는 기본 행렬 (fundamental matrix)이다. 같은 방법으로, 오른쪽 영상에서의 에피폴라 선 l_r 은

$$l_r = (b_r - B_r B_r^{-1} b_l) \times (B_r B_r^{-1} \tilde{m}_l) \text{ or } l_r = F^T \tilde{m}_l \quad (11)$$

이 된다.

또한 직선의 방정식을 $l_1 u + l_2 v + l_3 = 0$ 의 형태로 정의될 때 행렬-벡터 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\tilde{m}^T l = 0 \quad (12)$$

여기서, $l = [l_1, l_2, l_3]^T$, $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$.

위의 기하학적인 관계로부터 Biprism 스테레오의 광학 중심, 에피폴 및 에피폴라 선을 구할 수가 있다. 그림 3(a)에서 보듯이 왼쪽 카메라의 광학 중심의 위치는 $C_L = [-t_z \tan \delta \ 0 \ -t_z]^T$ 이고, 오른쪽 카메라의 광학 중심의 위치는 $C_R = [t_z \tan \delta \ 0 \ -t_z]^T$ 이다. 실제 카메라의 광축상에 있는 점 P_1 과 P_2 는 Biprism에 의해 가상의 점 P_{11} 과 P_{12} 및 P_{21} 과 P_{22} 으로 각각 변환이 된다. 따라서, C_p 와 P_{21} 을 지나는 선은 왼쪽 카메라의 광축이고, C_p 와 P_{12} 을 지나는 선이 오른쪽 카메라의 광축에 해당된다. 또한 Biprism 스테레오 영상의 에피폴은 $e_l = [+ \infty \ 0]^T$, $e_r = [- \infty \ 0]^T$, 과 같으며 왼쪽 영상에서의 에피폴라 선은 $v = v_l$ 이고 오른쪽 영상에서의 에피폴라 선은 $v = v_r$ 이 된다. 위의 결과를 보면 각 영상에서의 에피폴은 무한대에 존재하며 에피폴라 선은 영상에서의 열과 평행하다. 이것은 대응점들은 같은 열에 존재한다는 것을 의미한다. 또한 왼쪽 및 오른쪽의 영상 평면은 같은 평면상에 존재하고 두 카메라의 광학 중심을 지나는 베이스라인과 평행하다. 다른 말로하면 그림 3(a)의 가상의 카메라로부터 얻은 영상을 그림 3(b)와 같이 교정된 영상 (rectified image)을 얻는 결과와 동일하며 가상의 카메라간의 베이스라인의 거리 L_B 는

$$L_B = 2t_z \tan \delta = \frac{t_z}{k_2 \alpha_u} = \frac{k_1}{k_2^2 \alpha_u} \quad (13)$$

이 된다. 여기서, t_z 는 카메라와 Biprism의 중심간의 거리이며, δ 는 Biprism의 변환 각도이다.

그림 3(b)와 같이 Biprism의 FOV (Field of View)는 3차원 공간상의 점들을 Biprism에 의해 변환되어 대응점들을 가지는 3차원 공간상의 영역을 의미한다. 오른쪽 및 왼쪽의 가상의 카메라의 영상은 오른쪽 및 왼쪽의 1/2 평

면에 각각 형성된다. 영역 ①과 ②는 왼쪽의 카메라의 FOV에 해당하고, 영역 ①과 ③은 오른쪽 카메라의 FOV에 해당한다. 즉, 가상의 카메라간의 FOV가 겹치는 영역 ①이 Biprism의 FOV에 해당된다. 이 영역에 있는 3차원 공간상의 점들은 서로 대응되는 점들을 가지게 된다. 따라서, Biprism에 의해 변환되어 서로 대응되는 점들을 가지는 영역은

$$-\delta \leq \text{FOV} \leq \delta \quad (14)$$

이다. 여기서, $\delta = 2 \sin^{-1}(n \sin \frac{\alpha}{2}) - \alpha$.

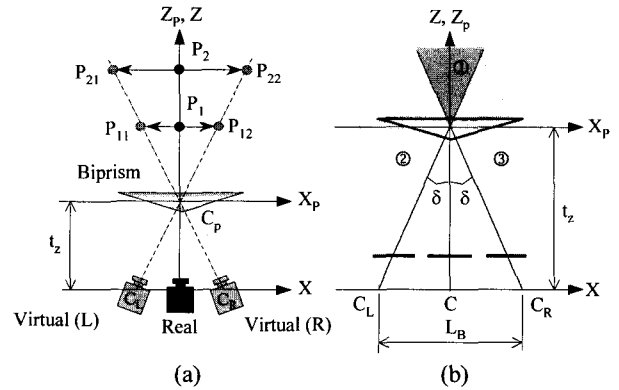


그림 3. (a) 가상의 카메라의 위치 및 광축, (b) 가상의 카메라의 교정영상.

Fig. 3. (a) The position and the optical axis in the virtual cameras, (b) The rectified images of the virtual cameras.

III. Biprism 스테레오 카메라의 특징

1. Biprism 스테레오의 FOV

Biprism 스테레오의 FOV는 카메라의 FOV와 Biprism의 경사각의 함수이다. 그림 3(b)에서 영역 ①이 Biprism의 FOV이며 Biprism에 의해 변환된 영역이 그림 4에서의 영역 ①'과 영역 ①''이다. 이 영역은 기하학적인 관계로부터 구할 수가 있다. Biprism의 FOV의 경계상에 존재하는 임의의 한점을 고려하자. 이 점은 Biprism에 의해 두점으로 변환이 된다. 임의의 한점과 변환된 두점간의 관계는

$$D_1 = Z_p \tan \delta, D_2 = Z_p \tan \varphi_p = 2D_1$$

가 되며 위의 관계로부터 Biprism에 의해 변환된 영역 ①'과 ①''은 (15)과 같이 구할 수가 있다.

$$\varphi_p = \tan^{-1}(2 \tan \delta) \quad (15)$$

(15)에서 Biprism에 의해 변환된 영역이 카메라에 투영되는 정도는 카메라의 FOV에 영향을 받는다. 카메라의 FOV에 따라 변환된 영역이 전부 투영될 수도 있으며 그렇지 않는 경우도 존재한다. 따라서, 카메라의 FOV의 영향을 보자. 카메라의 FOV는 Biprism에 의해 영상이 좌우로 분할되기 때문에 수평 FOV만 고려한다. 따라서, 카메라의 FOV는 (16)과 같이 정의된다.

$$\theta_w = \tan^{-1} \frac{w}{2f} \quad (16)$$

여기서, w 는 카메라 CCD 어레이의 폭이고 f 는 카메라 렌즈의 초점거리이다. 카메라의 FOV가 Biprism에 의해 변환된 영역보다 크면 Biprism에 의해 변환된 영역은 모두 카메라에 투영된다. 그러나, 카메라의 FOV가 작으면 일부만 투영이 된다. 이때 Biprism에 의해 변환된 영역이 전부 투영되는 최대거리 a_z 은 그림 4에서의 기하학적인 관계로부터 (17)과 같이 구할 수가 있다.

$$a_z = \frac{t_z \tan \theta_w}{\tan \phi_p - \tan \theta_w} \quad (17)$$

위의 결과로부터 Biprism 스테레오의 FOV는 카메라의 FOV가 Biprism에 의해 변환된 영역보다 큰 경우는 (14)과 같이 정의되며 카메라의 FOV가 작은 경우는 (18)과 같이 정의된다.

$$FOV = \begin{cases} -\delta < FOV < \delta & \text{if } 0 < Z_p < a_z \\ |X_p| < Z_p \tan \delta - \Delta & \text{if } a_z < Z_p \end{cases} \quad (18)$$

여기서, $\Delta = Z_p \tan \phi_p - (Z_p + t_z) \tan \theta_w$.

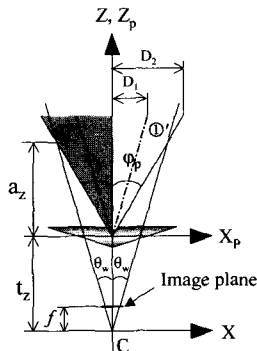


그림 4. Biprism에 의해 변환된 영역.
Fig. 4. The transformed region by a Biprism.

2. 거리 정밀도

이 절에서는 Biprism 스테레오의 변수에 따른 거리의 정밀도 (accuracy)에 대하여 서술한다. (6)에서, 변위는 α , f 및 t_z 의 함수이다. d_z 과 $d_{z+\Delta z}$ 은 각각 Z 과 $Z+\Delta Z$ 에서의 변위라고 하자. Z 과 $Z+\Delta Z$ 간의 변위의 차 Δd 는 $d_{z+\Delta z} - d_z$ 이 된다. 따라서, 거리 정밀도를 위한 관계식은

$$\Delta Z = \frac{Z^2 \Delta d}{k_2 - Z \Delta d} \quad (19)$$

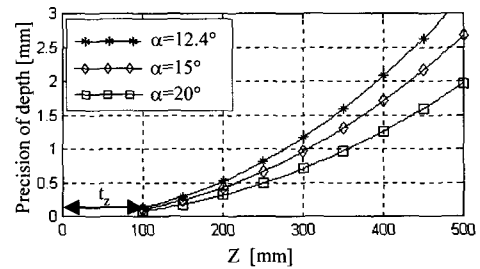
과 같이 유도할 수가 있다. 여기서, Δd 은 카메라의 CCD 셀의 크기, 서브픽셀의 매칭 정도에 따라 결정되어지는 일정한 상수이다. 그리고 Z 는 t_z 보다 큰 경우이다. 그림 5(a)는 프리즘 경사각에 대한 거리 정밀도를 보여주고 있다. 여기서 사용된 데이터는 카메라 렌즈의 초점거리는 16mm이고 $t_z=100$ mm이며 $\Delta d=0.5$ 이다. 그림 5(b)는 $\alpha=12.4^\circ$, $t_z=100$ mm, $\Delta d=0.5$ 인 경우의 초점거리에 따른 거

리 정밀도를 보여주며 그림 5(c)는 $\alpha=12.4^\circ$, $f=16$ mm, $\Delta d=0.5$ 인 경우의 t_z 에 따른 거리 정밀도를 보여주고 있다. 여기서 사용된 영상의 크기는 (640x480)이고, CCD 어레이의 크기는 6.5mm (width) x 4.85mm (height)이다. 표 1은 그림 5에서 카메라로부터의 거리 200mm에서의 거리 정밀도를 보여주고 있다. 표 1에서 보듯이 Biprism의 경사각, 카메라의 초점거리, t_z 이 클수록 거리 정밀도가 좋아짐을 알 수가 있다. 또한 그림 5(c)의 결과로부터 물체는 Biprism으로 가까울수록 거리의 정밀도는 좋아진다. Biprism으로부터 거리가 클수록 거리의 정밀도는 나빠진다. 이것은 (6)에서 보는 바와 같이 거리가 클수록 변위의 차가 작아지기 때문이다.

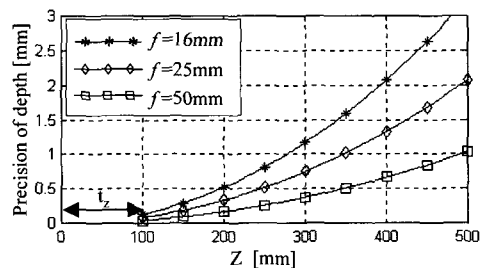
표 1. 거리 200mm에서의 거리 정밀도.
Table 1. Depth accuracy at a distance of 200mm.

그림 5(a)	그림 5(b)	그림 5(c)
$\alpha=12.4^\circ$	$f=16$	$t_z=50$
0.518	0.518	1.039
$\alpha=15^\circ$	$f=25$	$t_z=100$
0.426	0.332	0.518
$\alpha=20^\circ$	$f=50$	$t_z=150$
0.314	0.166	0.345

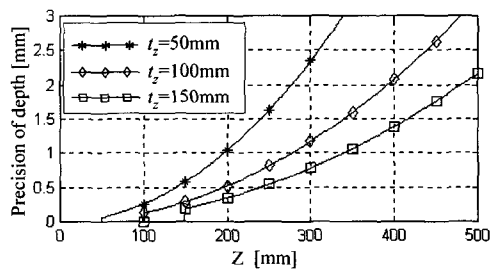
[unit:mm]



(a) α 에 따른 거리 정밀도



(b) f 에 따른 거리 정밀도



(c) t_z 에 따른 거리 정밀도

그림 5. 거리 정밀도.

Fig. 5. Depth accuracy.

3. 스테레오 영상간의 밝기 분포

아퍼처(aperture)는 렌즈에 이어서 카메라에 장착되어 있는 조리개의 열린 구경을 표시한다. 영상면의 입사 광량은 영상의 면적에 비례하고 초점거리의 제곱에 반비례하게 된다. 따라서, 카메라의 렌즈를 통하여 영상면에 입사되는 광량은 (20)과 같이 정의된다.

$$I \propto \frac{A^2}{f^2} \quad (20)$$

여기서, I 는 입사 광량(irradiance), A 는 조리개 지름, f 은 카메라의 초점거리이다. (20)에서 기존의 스테레오인 두 카메라의 초점거리 및 조리개의 열린 상태가 서로 다르다. 이로 인해 두대의 카메라를 사용한 경우는 스테레오 영상간의 밝기의 차를 유발한다. 그러나, Biprism 스테레오는 한대의 카메라를 사용하기 때문에 초점거리 및 조리개의 열린 상태가 같다. 따라서, 스테레오 영상간의 밝기의 차가 상대적으로 작다.

그림 6(a)은 Biprism에 의해 얻은 영상이고 그림 6(b)는 기존의 두 카메라를 사용한 경우의 영상이다. 그림 7과 같이 대응점간의 밝기의 차를 구하기 위해 대응점은 SSD (Sum of Squared Difference)의 알고리즘을 사용하여 찾았다. 여기서, 사용한 윈도우의 크기는 25x25이다. 각 대응점간의 밝기의 차는 기준 픽셀에 대하여 5x5의 윈도우에 대한 평균값을 구하여 대응점간의 밝기의 차를 구하였다. Biprism 스테레오와 기존의 스테레오에서의 대응점간의 밝기차에 대한 평균값은 각각 -0.26, 2.57이다. 위의 결과로부터 Biprism 스테레오 영상에서의 밝기 값의 차가 적음을 볼 수가 있다. 이는 Biprism 스테레오 영상간의 대응점을 찾는 신뢰성을 증가 시킬 수가 있는 장점을 가지고 있다.

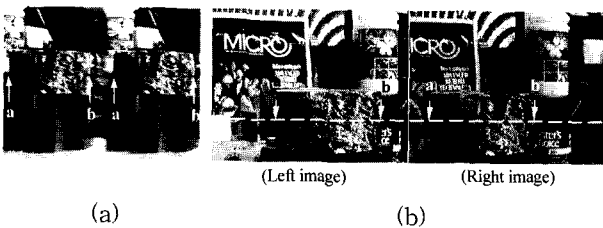
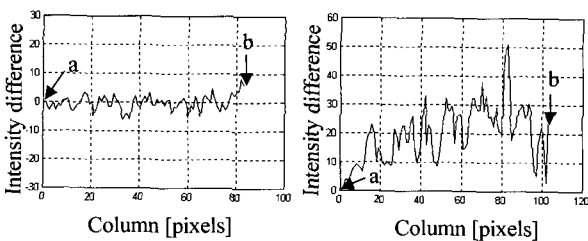


그림 6. (a) Biprism 스테레오 영상, (b) 기존의 스테레오 영상.

Fig. 6. (a) Stereo image in the Biprism stereo, (b) Stereo images in the conventional stereo.



(a) Biprism 스테레오 (b) 기존의 스테레오
그림 7. 대응점간의 밝기값의 차.

Fig. 7. Intensity differences.

IV. Biprism 스테레오 카메라의 보정

제2장에서 서술했듯이, (6)과 같이 변위와 거리의 관계는 Biprism으로부터의 거리가 클수록 대응점간의 변위는 커짐을 알 수가 있다. 본 논문에서 제안된 Biprism 스테레오 카메라 시스템은 두 단계를 걸쳐 시스템을 보정한다. 첫 단계로 카메라의 내부변수를 구하는 과정으로 많은 연구 결과들이 있다[11,12]. 본 논문에서의 카메라의 보정은 Faugeras & Toscani[11]에 의해 잘 알려진 카메라 보정 알고리즘을 이용하여 카메라의 내부변수를 구한다. 다음으로 (6)에서 변수 k_1 과 k_2 를 구하는 과정으로 카메라의 보정한 결과와 3차원 공간상의 두점간의 거리 정보를 이용하여 구한다. 여기서 3차원 공간상의 두점간의 유클리디안 거리를 알고 있다면 k_1 과 k_2 는 다음 조건을 최소화함으로써 구할 수가 있다.

$$\min \sum_{i=1}^N \|d_i^c(k_1, k_2) - d_i^r\|^2 \quad (21)$$

여기서, $d_i^c(k_1, k_2)$ 는 (4), (5) 및 (6)의 관계식으로부터 쉽게 구할 수가 있으며, N 은 시스템 보정에 사용된 대응점의 수를 나타낸다. (21)을 구하기 위한 초기값은 카메라의 내부변수와 Biprism의 경사각 및 대략적인 t_2 으로부터 예측할 수가 있다.

V. 실험 결과

1. 영상변위지도

그림 8과 같이 Biprism은 CCD 카메라 앞에 설치되어 있다. 카메라의 광학중심과 Biprism간의 거리 t_2 은 대략 150 mm이며 거리 조절이 가능하도록 설치되어 있다. 사용된 Biprism의 경사각은 12.4°이며 재질은 BK7 (Borosilicate crown glass)이다. 또한 렌즈의 초점거리는 16mm이며 영상의 크기는 (640, 480)이다.

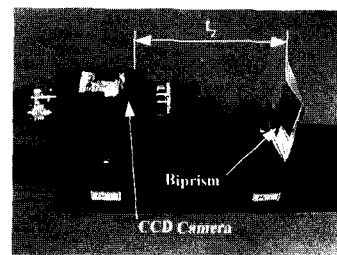


그림 8. Biprism 스테레오 카메라 시스템.
Fig. 8. A Biprism stereo camera system.

앞 절에서 서술한 바와 같이 그림 8과 같이 Biprism 스테레오 카메라 시스템으로부터 얻은 스테레오 영상에서 대응점간의 변위는 Biprism에 의해 변환된 가상의 두점간의 거리가 클수록 커짐을 알 수가 있다. 그림 9(a)는 펜 영상에 대한 것으로 대응점은 SSD (Sum of Squared Difference) 알고리즘을 사용하여 대응점을 찾았고, 사용한 윈도우 크기는 25x25이다. 왼쪽 영상의 픽셀에 대해 오른쪽 영상에서는 서브픽셀 단위로 대응점을 찾았다. 그림 9(b)는 각 대응점에 대한 변위를 구한 영상 변위지도

를 나타낸 것이며 그림 9(c)는 그림 9(b)의 영상 변위지도도를 밝기의 값으로 환산한 그레이 레벨의 영상이다. 여기서 변위가 작은 값일수록 밝게 표시한 것이다. 그림 10은 블록 영상을 얻은 것이며 대응점은 각 블록의 코너점을 추출하여 영상 변위지도도를 구한 결과이다.

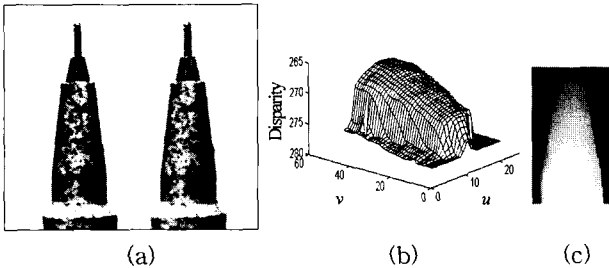


그림 9. (a) 입력영상, (b) 영상변위지도도, (c) 변위의 그레이 영상.

Fig. 9. (a) Input image, (b) Disparity map, (c) A gray-coded disparity image.

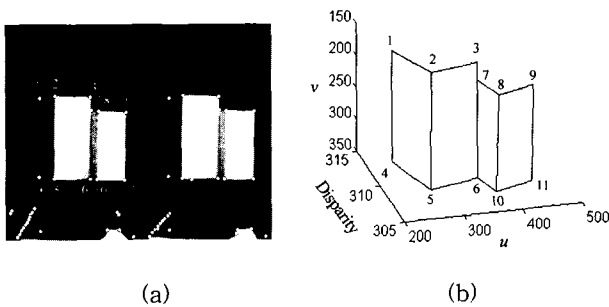


그림 10. (a) 추출된 코너점, (b) 영상변위지도도.

Fig. 10. (a) Extracted corner points, (b) Disparity map.

2. 3차원 형상 복원

Biprism 스테레오의 보정을 통하여 3차원 형상복원을 수행하였다. 그림 11(a)은 보정 상자를 이용하여 카메라의 내부변수를 구하기 위한 영상이며 그림 11(b)는 Biprism의 변수를 보정하기 위해 얻은 영상이다. 보정 상자상의 점들간의 거리는 20mm이다. 위의 영상을 이용하여 카메라의 내부변수와 (21)의 k_1 과 k_2 을 보정한 결과는 표 2과 같다.

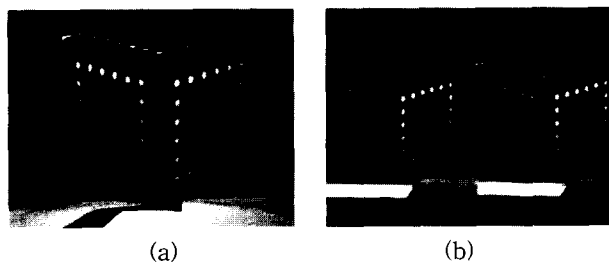


그림 11. 보정을 위한 영상. (a) 카메라로부터의 입력영상, (b) Biprism 스테레오 영상.

Fig. 11. Images for calibration. (a) Input image without a Biprism, (b) Input image with a Biprism.

다음은 시스템 보정의 결과를 토대로 하여 임의의 형상을 갖는 물체에 대하여 3차원 형상을 복원 하였다. 그림 12(a)의 전구 영상에 대해 3차원 형상을 복원하였다. 전구의 최대 반지름은 29.9mm이며 전구에서 최대의 지름을 갖는 부위의 변위, 대응점간의 밝기 값의 차 및 형상을 복원하였다. 그림 12(b)는 시스템의 보정의 결과와 대응점간의 변위를 구한 것이고, 그림 12(c)는 변위와 표2의 결과를 이용하여 형상을 복원한 결과이다. 또한 반경방향에 대한 오차를 구한 것이 그림 12(d)이며 최대 오차는 1.85mm이다. 이것은 그림 5에서 예측한 결과와 동일하다. 그림 12(e)는 대응되는 점간의 밝기의 차를 구한 것으로 평균값은 0.0897이고 표준편차는 2.1618이다. 그림 12(f)는 전구의 형상을 복원한 후 3차원 좌표값과 이에 해당하는 영상의 밝기 값을 매핑한 결과이다.

표 2. 보정결과.

Table 2. Calibration results.

Intrinsic Parameters		Biprism Parameters	
(α_u, α_v)	(1663.3, 1674.9)	k_1	398.4064
(u_0, v_0)	(330.1, 259.3)	k_2	38226.3774

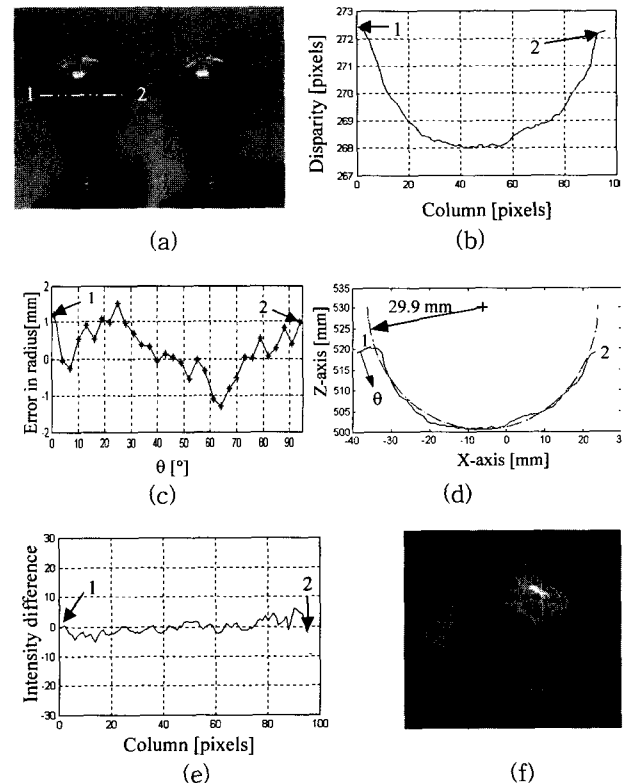


그림 12. 3차원 형상복원. (a) 입력영상, (b) 변위, (c) 복원된 형상, (d) 반경방향의 오차, (e) 대응점간의 밝기차, (f) 복원된 형상에 영상의 밝기 값 매핑.

Fig. 12. 3-D reconstruction. (a) Input image, (b) Disparities with one scanline, (c) Reconstructed shape, (d) Error in radius, (e) Intensity difference, (f) Image texture mapped onto the reconstruction.

VI. 결론

본 논문에서 Biprism을 사용하여 현대의 CCD 카메라로 스테레오 영상을 얻을 수 있는 스테레오 카메라 시스템을 제안했다. Biprism 스테레오 카메라 시스템의 원리와 이 시스템이 가지는 특성들을 수학적으로 정립하고, 시스템의 보정을 통해 이를 실험으로 검증하였다.

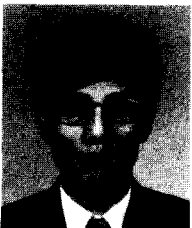
영상에서 같은 주사선에 존재하기 때문에 대응점을 찾기가 용이하며 시스템의 보정도 용이하다. Biprism의 변수인 서로 대응되는 점들간의 변위와 거리의 관계를 알고 있다면 Biprism 스테레오 영상에서의 대응점들의 변위 정보로부터 쉽게 3차원 형상을 복원 할 수가 있음을 실험을 통해 보여 주었다. 또한 가까운 물체에 대해서 더 좋은 거리 정밀도를 가지는 것이 특징이다. 현대의 CCD 카메라로부터 스테레오 영상을 얻기 때문에 동적 환경(dynamic scene)과 같은 많은 비전 응용분야에 적용 가능하다.

참고문헌

- [1] S. T. Barnard and M. A. Fischler, "Computational stereo," *Computing Surveys*, vol. 14, no. 4, pp. 553-572, 1982.
- [2] U. R. Dhond and J. K. Aggarwal, "Structure from stereo: a review," *IEEE Trans. on PAMI*, vol. 19, no. 6, pp. 1489-1510, 1989.
- [3] Y. Nishimoto and Y. Shirai, "A feature-based stereo

model using small disparities," *CVPR'87*, pp. 192-196, 1987.

- [4] W. Teoh and X. D. Zhang, "An inexpensive stereoscopic vision system for robots," *Proc. Int. Conf. Robotics*, pp. 186-189, 1984.
- [5] A. Goshtasby and W. A. Gruver, "Design of a single-lens stereo camera system," *Pattern Recognition*, vol. 26, pp. 923-936, 1993.
- [6] S. A. Nene and S. K. Nayar, "Stereo with mirrors," *ICCV'98*, pp. 1087-1094, 1998.
- [7] M. Bass and W. V. Stryland, *HandBook of Optics I, II*, McGraw-Hill, Inc. 1995.
- [8] F. A. Henkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, Inc. 1976.
- [9] O. D. Faugeras, *Three-Dimensional Computer Vision*, MIT Press, 1993.
- [10] G. Xu and Z. Zhang, *Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition: A Unified Approach*, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [11] O. D. Faugeras and G. Toscani, "The calibration problem or stereo," *CVPR'86*, pp. 15-20, 1986.
- [12] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses," *IEEE J. Robotics and Automation*, vol. RA-3, no. 4, 1987.



이 두 현

1987년 한양대학교 기계설계학과 졸업(학사), 1989년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사), 1995년~현재 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 컴

퓨터비전 및 머신비전.

권인소

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제4권, 제3호, 참조.