

# 동적 스테레오 카메라 모델링

## An Active Stereo Camera Modeling

도 경 민, 이 쾌 희

(Kyoung Mihn Do and Kwae Hi Lee)

**Abstract** : In stereo vision, camera modeling is very important because the accuracy of the three dimensional locations depends considerably on it. In the existing stereo camera models, two camera planes are located in the same plane or on the optical axis. These camera models cannot be used in the active vision system where it is necessary to obtain two stereo images simultaneously. In this paper, we propose four kinds of stereo camera models for active stereo vision system where focal lengths of the two cameras are different and each camera is able to rotate independently. A single closed form solution is obtained for all models. The influence of the stereo camera model to the field of view, occlusion, and search area used for matching is shown in this paper. And errors due to inaccurate focal length are analyzed and simulation results are shown. It is expected that the three dimensional locations of objects are determined in real time by applying proposed stereo camera models to the active stereo vision system, such as a mobile robot.

**Keywords** : camera modeling, active vision, image acquisition, autonomous mobile robot, stereo analysis

### I. 서론

머신 비전에서 스테레오 영상 처리는 대상체의 3차원 정보를 획득하는데 주요한 기법 중의 하나로 사용되고 있다. 스테레오 영상 처리는 카메라 모델링, 카메라 보정, 특징 추출, 영상 정합, 3차원 깊이 추출의 5단계로 구성된다. 카메라 모델링에서는 대상체의 영상을 취득할 카메라의 위치 및 자세를 결정하며 특징 추출, 영상 정합, 3차원 깊이 추출 단계로 매우 중요한 정보를 제공한다. 일반적으로 스테레오 영상은 두 개의 카메라를 이용하여 취득하고 카메라 보정을 통하여 기준 좌표계와 카메라 좌표계, 영상과의 기하학적인 관계와 카메라의 특징 등을 획득하여 3차원 정보를 얻는데 사용하는데, 행렬 계산 등 복잡한 계산 과정이 포함되며 많은 처리 시간이 필요하다. 반면에 카메라의 위치와 자세를 제한함으로써 단순화하여 빠른 계산 시간을 가지는 여러 카메라 모델이 연구되었는데 카메라 모델은 두 카메라의 위치와 자세에 의하여 분류되며 각 카메라 모델에 대해 공선, 정합에 대한 영향 등의 특성이 연구되어 왔다. 기존의 발표된 카메라 모델 중, H. Itoh, A. Miyauchi와 S. Ozawa에 의해 제안된 모델에서는 하나의 카메라를 카메라의 광학 축을 따라 이동하면서 스테레오 영상을 획득하는 방법을 사용하였으며 T.D. Williams, R. Jain 등은 motion-in-depth stereo camera model 또는 axial motion stereo 카메라 모델을 연구하였다[1-4]. 또한 N. Alvertos, D. Brzakovic과 R.C. Gonzalez는 axial stereo model과 lateral stereo model을 연구하였으며 axial camera model이 다른 카메라 모델보다 영상 정합시 오정합시킬 확률이 적음을 확인하였다[5]. 기존의 대부분의 카메라 모델에서는 두 카메라의 초점 거리를 동일하게 사용하였으므로 구현시 하나의 카메라를 이동시켜 스테레오 영상을 획득하거나 두 개의 동일한 카메라를 초점 거리의 오차를 무시하고 사용한다. 이러한 카메라 모델은 항공 영상, 위성 영상과 정적인 대상체의 영상을 취득하는데는 사용할 수 있으나 두 카메라의 영상 평면을 일치시켜 단순화하였기 때문에 자율 이동 로봇과 같이 두 카메

라를 독립적으로 회전시키며 스테레오 영상을 취득할 필요가 있는 응용에는 사용할 수 없다는 단점을 가진다.

기존의 카메라 모델은 두 카메라의 영상 평면을 평행하게 일치시키고 두 광학 축을 평행하게 하거나 일치시키는 제약 조건을 가지므로 두 카메라를 각각 독립적으로 회전시키면서 스테레오 영상을 취득하는 동적 스테레오 비전 시스템(active stereo vision system)에 사용하기가 불가능하다. 또한 이러한 동적 비전 시스템에서는 실시간으로 영상을 처리하여야 하므로 카메라를 움직일 때 마다 카메라 보정을 하기 불가능하다. 본 논문에서는 서로 다른 초점 거리를 가지는 두 카메라를 서로 독립적으로 회전시키며 스테레오 영상을 취득하는 카메라 모델을 제안하였다. 본 논문의 카메라 모델은 두 영상 평면의 z 축을 평행하게 하고 두 카메라의 영상 평면의 중심을 잇는 선분에 대한 각 카메라의 광학 축의 방향을 기준으로 수직 카메라 모델, 이향(異向) 카메라 모델, 동향(同向) 카메라 모델과 평행 카메라 모델의 4개 모델로 구분하였는데, 수직 모델과 평행 모델로 명명된 모델은 각각 기존에 발표된 lateral 모델과 axial 모델과 동일한 모델이다. 본 논문에서는 4가지 카메라 모델에 대해 공통적으로 적용할 수 있는, 복잡한 계산 과정이 필요한 행렬식이 아닌 closed form 형태의 하나의 산술식으로 해를 구하였다. 또한 4가지 모델에 대해 차폐, 시야(field of view), 탐색 영역의 3가지 관점에서 비교, 분석하였으며 두 카메라의 초점 거리의 오차에 의한 3차원 위치의 오차를 분석하였다. 본 논문의 결과를 자율 이동 주행 로봇 등의 동적 비전 시스템에 적용하여 대상체의 3차원 정보를 실시간으로 구하는데 활용될 수 있을 것이다.

### II. 카메라 모델링

본 논문에서는 왼쪽 카메라 좌표계를  $(x^L, y^L, z^L)$ 로, 오른쪽 카메라 좌표계를  $(x^R, y^R, z^R)$ 이라 표시하며 두 카메라의 광학 축을 각각 z 축과 일치시킨다. 3차원 공간상의 임의의 좌표의 왼쪽 카메라 좌표계를 기준으로 한 좌표를  $P(x_o^L, y_o^L, z_o^L)$ 로 표시하고 오른쪽 카메라 좌표계를 기준으로 한 좌표를  $P(x_o^R, y_o^R, z_o^R)$ 라 표시한다. 3차원 공간상의 임의의 점  $P(x_o^L, y_o^L, z_o^L)$ 의 왼쪽 영상 평면상으로 투영되는

점의 좌표를  $(X_L, Y_L)$ , 오른쪽 영상의 대응되는 상의 좌표를  $(X_R, Y_R)$ 이라 표시한다. 또한 왼쪽 카메라와 오른쪽 카메라의 초점 거리를 각각  $f_L, f_R$ 이라 하고 두 영상 중심 사이를 잇는 선분을 기준선이라 하고 기준선의 길이를  $\Delta x$ 라 정의한다. 기준선에 대해 왼쪽 영상 평면의 기울어진 양의 각도를  $\theta_L$ , 오른쪽 영상 평면의 기울어진 양의 각도를  $\theta_R$ 로 표시하며 왼쪽 영상 중심에서 두 카메라의 광학 축의 교점까지의 길이를  $L$ , 오른쪽 영상 중심에서부터의 길이를  $R$ 로 나타낸다. 점  $P$ 를 지나고 기준선과 평행하며 두 카메라의 광학 축과의 교점을 잇는 선분을 기초선이라 정의하고 두 카메라의 광학 축의 교점을 광학 교점이라 하며 모델링에 사용되는 파라미터를 표 1과 같이 정의한다(그림 1 참조).

표 1. 모델링에 사용되는 파라미터 정의.

Table 1. Parameters definition.

기호	정의
$a_L$	기초선과 왼쪽 카메라의 광학 축과의 교점에서 광학 축상의 $z_o^L$ 점까지의 길이
$b_L$	기초선과 왼쪽 카메라의 광학 축과의 교점에서 점 $P$ 까지의 길이
$\Delta b$	기초선의 길이
$b_R$	기초선과 오른쪽 카메라의 광학 축과의 교점에서 점 $P$ 까지의 길이
$a_R$	기초선과 오른쪽 카메라의 광학 축과의 교점에서 광학 축상의 $z_o^R$ 점까지의 길이
$d_L$	기초선과 왼쪽 카메라의 광학 축과의 교점에서 광학 교점까지의 길이
$d_R$	기초선과 오른쪽 카메라의 광학 축과의 교점에서 광학 교점까지의 길이

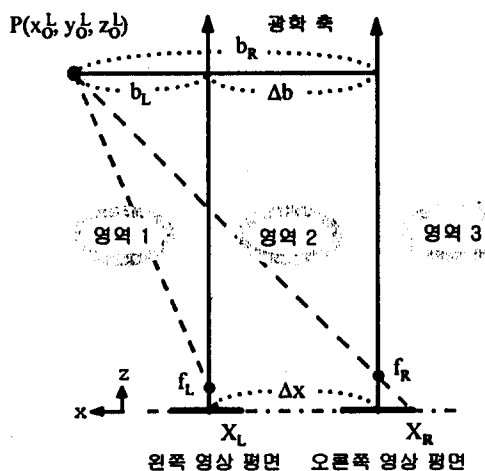


그림 1. 수직 모델의 xz 평면의 기하학.  
Fig. 1. xz plane geometry of the orthogonal model.

1. 수직 모델

수직(垂直) 모델(orthogonal model)은 카메라 모델의 가장 기본적인 형태로 두 카메라의 광학 축과 기준선이 서로 직교하는 형태의 모델로 3차원 공간상의 점  $P$ 가 존재하는 위치에 따라 그림 1과 같이 3가지 영역으로 구분한다. 왼쪽

카메라 좌표계의  $xz$  평면에서  $z^L$  축을 기준으로 왼쪽의 평면을 영역 1로 정의하고 오른쪽 카메라 좌표계의  $xz$  평면에서  $z^R$  축을 기준으로 오른쪽의 평면을 영역 3으로 정의하며 왼쪽 카메라 좌표계의  $z^L$  축과 오른쪽 카메라 좌표계의  $z^R$  축 사이를 영역 2로 정의한다. 영역 1에서 다음 식이 성립함을 그림 1로부터 쉽게 알 수 있다.

$$b_L = |x_o^L| = x_o^L$$

$$\Delta b = |\Delta x|$$

$$b_R = b_L + \Delta b = x_o^L + |\Delta x|$$

오른쪽 카메라 좌표계에 대한 점  $P$ 의 좌표는 기하학적 관계로부터 다음과 같이 구해진다.

$$x_o^R = b_R = x_o^L + |\Delta x|$$

$$z_o^R = z_o^L$$

마찬가지 방법으로 영역 2와 영역 3에 대해 오른쪽 카메라 좌표계에 대한 점  $P$ 의 좌표를 구하고 수직 모델의 모든 영역에서의 점  $P$ 의 오른쪽 카메라 좌표계에 대한 좌표를 정리하면 다음과 같다.

$$x_o^R = x_o^L + |\Delta x| \tag{2.1}$$

$$y_o^R = y_o^L \tag{2.2}$$

$$z_o^R = z_o^L \tag{2.3}$$

2. 이향 모델

이향(異向) 모델(anti-directional model)은 그림 2와 같이 기준선에 대하여 두 카메라의 광학 축이 서로 다른 방향을 향하는 형태이며 3차원 공간상의 점  $P$ 가 존재하는 위치에 따라 4가지 영역으로 구분한다.

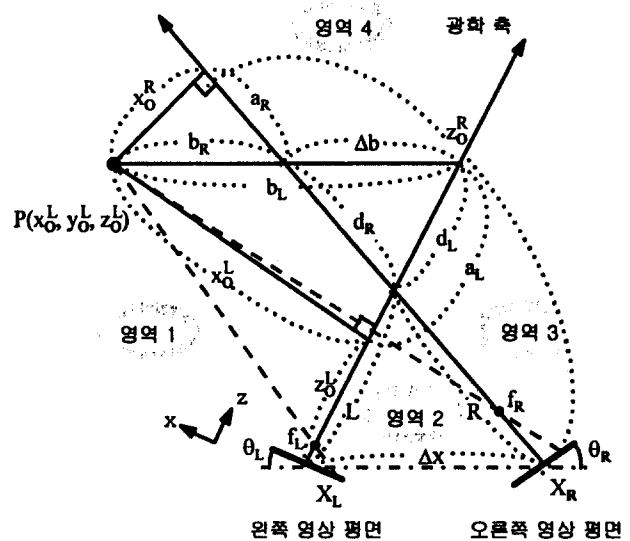


그림 2. 이향 모델의 xz 평면의 기하학.  
Fig. 2. xz plane geometry of the anti-directional model.

왼쪽 카메라 좌표계의  $xz$  평면에서  $z^L$  축을 기준으로 왼쪽의 평면에서 오른쪽 카메라 좌표계의  $z^R$  축의 왼쪽에 위치하는 영역을 영역 1로, 오른쪽에 위치하는 영역을 영역 4로 정의하며 왼쪽 카메라 좌표계의  $z^L$  축을 기준으로 오른쪽의 평면에서 오른쪽 카메라 좌표계의  $z^R$  축의 왼쪽에 위치하는 영역을 영역 2로, 오른쪽에 위치하는 영역을 영역 3

으로 정의한다. 이항 모델의 영역 1~4에 대해  $xz$  평면의 기하학 구조로부터 사인 법칙에 의해 다음과 같이  $L$ 과  $R$ 이 구해진다.

$$L = \frac{\cos \theta_R}{\sin(\theta_L + \theta_R)} |\Delta x|, \quad R = \frac{\cos \theta_L}{\sin(\theta_L + \theta_R)} |\Delta x|$$

영역 1에서 삼각형의 비례 관계로부터 다음과 같이 구해진다.

$$a_L = |x_o^L| \tan \theta_L = x_o^L \tan \theta_L$$

$$b_L = |x_o^L| \sec \theta_L = x_o^L \sec \theta_L$$

$$\Delta b = \frac{|\Delta x|}{L} d_L$$

$$b_R = \begin{cases} b_L + \Delta b & \text{if } L \geq z_o^L + a_L \\ b_L - \Delta b & \text{if } L < z_o^L + a_L \end{cases}$$

$$a_R = b_R \sin \theta_R$$

$$d_L = \begin{cases} L - z_o^L - a_L & \text{if } L \geq z_o^L + a_L \\ -L + z_o^L + a_L & \text{if } L < z_o^L + a_L \end{cases}$$

$$d_R = \frac{\cos \theta_L}{\cos \theta_R} d_L$$

위 식들을 정리하여  $b_R$ 를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} b_R &= b_L + \frac{|\Delta x|}{L} (L - a_L - z_o^L) \\ &= x_o^L \sec \theta_L + \frac{|\Delta x|}{L} (L - z_o^L - x_o^L \tan \theta_L) \end{aligned}$$

위 식들을 이용하여  $x_o^R, z_o^R$ 을 구한다.

$$\begin{aligned} x_o^R &= b_R \cos \theta_R \\ &= |\Delta x| \cos \theta_R + x_o^L \cos(\theta_L + \theta_R) - z_o^L \sin(\theta_L + \theta_R) \end{aligned}$$

$$z_o^R = \begin{cases} R - d_R + a_R & \text{if } L \geq z_o^L + a_L \\ R + d_R + a_R & \text{if } L < z_o^L + a_L \end{cases}$$

$$\begin{aligned} &= R - \frac{\cos \theta_L}{\cos \theta_R} (L - a_L - z_o^L) + a_R \\ &= |\Delta x| \sin \theta_R + x_o^L \sin(\theta_L + \theta_R) + z_o^L \cos(\theta_L + \theta_R) \end{aligned}$$

영역 2, 영역 3과 영역 4에 대해 마찬가지로 방법으로  $x_o^R, z_o^R$ 을 구하고 이항 모델의 모든 영역에 대해  $P(x_o^R, y_o^R, z_o^R)$ 를 정리하면 다음과 같이 하나의 식으로 표현된다.

$$x_o^R = |\Delta x| \cos \theta_R + x_o^L \cos(\theta_L + \theta_R) - z_o^L \sin(\theta_L + \theta_R) \quad (2.4)$$

$$y_o^R = y_o^L \quad (2.5)$$

$$z_o^R = |\Delta x| \sin \theta_R + x_o^L \sin(\theta_L + \theta_R) + z_o^L \cos(\theta_L + \theta_R) \quad (2.6)$$

### 3. 동향 모델

동향(同向) 모델(a-directional model)은 기준선에 대하여 두 카메라의 광학 축이 같은 방향을 향하는 형태이며 3차원 공간상의 점  $P$ 가 존재하는 위치에 따라 그림 3과 같이 8가지 영역으로 구분된다.

기준선에 대하여 두 카메라가 오른쪽으로 회전한 경우, 왼쪽 카메라 좌표계의  $xz$  평면에서  $z^L$  축을 기준으로 왼쪽의 평면에서 오른쪽 카메라 좌표계의  $z^R$  축의 왼쪽에 위치하는 영역을 영역 1로, 오른쪽에 위치하는 영역을 영역 4로 정의하며 왼쪽 카메라 좌표계의  $z^L$  축을 기준으로 오른쪽

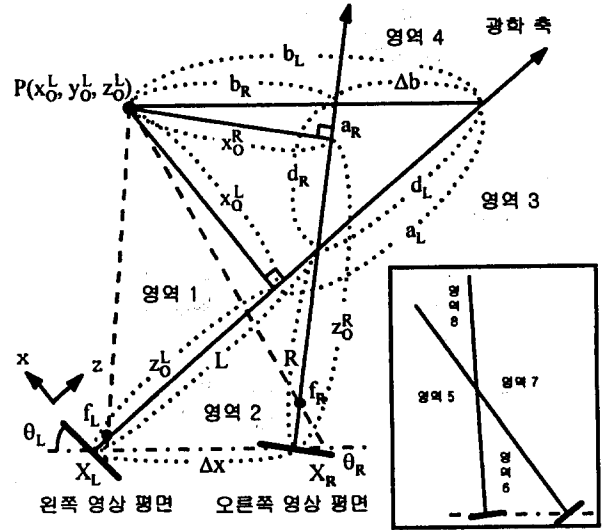


그림 3. 동향 모델의  $xz$  평면의 기하학.

Fig. 3.  $xz$  plane geometry of the a-directional model.

의 평면에서 오른쪽 카메라 좌표계의  $z^R$  축의 왼쪽에 위치하는 영역을 영역 2로, 오른쪽에 위치하는 영역을 영역 3으로 정의한다. 또한 기준선에 대하여 두 카메라가 왼쪽으로 회전한 경우도 마찬가지로 방법으로 영역 5~8을 정의한다. 영역 1~4에 대해 그림 3의  $xz$  평면의 기하학 구조로부터 사인 법칙에 의해  $L$ 과  $R$ 을 구하면 다음과 같다.

$$L = \frac{\cos \theta_R}{\sin(\theta_L - \theta_R)} |\Delta x|, \quad R = \frac{\cos \theta_L}{\sin(\theta_L - \theta_R)} |\Delta x|$$

영역 1에서 삼각형의 비례 관계로부터 다음과 같이 구해진다.

$$a_L = |x_o^L| \tan \theta_L = x_o^L \tan \theta_L$$

$$b_L = |x_o^L| \sec \theta_L = x_o^L \sec \theta_L$$

$$\Delta b = \frac{|\Delta x|}{L} d_L$$

$$b_R = \begin{cases} b_L + \Delta b & \text{if } L \geq z_o^L + a_L \\ b_L - \Delta b & \text{if } L < z_o^L + a_L \end{cases}$$

$$a_R = b_R \sin \theta_R$$

$$d_L = \begin{cases} L - z_o^L - a_L & \text{if } L \geq z_o^L + a_L \\ -L + z_o^L + a_L & \text{if } L < z_o^L + a_L \end{cases}$$

$$d_R = \frac{\cos \theta_L}{\cos \theta_R} d_L$$

위 식들을 정리하여  $b_R$ 를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} b_R &= b_L + \frac{|\Delta x|}{L} (L - z_o^L - a_L) \\ &= x_o^L \sec \theta_L + \frac{|\Delta x|}{L} (L - z_o^L - x_o^L \tan \theta_L) \end{aligned}$$

위 식들을 이용하여  $x_o^R, z_o^R$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_o^R &= b_R \cos \theta_R \\ &= |\Delta x| \cos \theta_R + x_o^L \cos(\theta_L - \theta_R) - z_o^L \sin(\theta_L - \theta_R) \end{aligned}$$

$$z_o^R = \begin{cases} R - d_R - a_R & \text{if } L \geq z_o^L - a_L \\ R + d_R - a_R & \text{if } L < z_o^L - a_L \end{cases}$$

$$= R - \frac{\cos \theta_L}{\cos \theta_R} (L - z_o^L + a_L) + a_R$$

$$= -|\Delta x| \sin \theta_R + x_o^L \sin(\theta_L - \theta_R) + z_o^L \cos(\theta_L - \theta_R)$$

영역 2, 영역 3과 영역 4에 대해 마찬가지로 방법으로  $x_o^R, z_o^R$ 을 구하면 동향 모델에서의 영역 1~4에 대하여  $P(x_o^R, y_o^R, z_o^R)$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$x_o^R = |\Delta x| \cos \theta_R + x_o^L \cos(\theta_L - \theta_R) - z_o^L \sin(\theta_L - \theta_R) \quad (2.7)$$

$$y_o^R = y_o^L \quad (2.8)$$

$$z_o^R = -|\Delta x| \sin \theta_R + x_o^L \sin(\theta_L - \theta_R) + z_o^L \cos(\theta_L - \theta_R) \quad (2.9)$$

또한 영역 5~8에 대해서 마찬가지로 방법으로 구하면 다음과 같다.

$$x_o^R = |\Delta x| \cos \theta_R + x_o^L \cos(\theta_R - \theta_L) - z_o^L \sin(\theta_R - \theta_L) \quad (2.10)$$

$$y_o^R = y_o^L \quad (2.11)$$

$$z_o^R = |\Delta x| \sin \theta_R + x_o^L \sin(\theta_R - \theta_L) + z_o^L \cos(\theta_R - \theta_L) \quad (2.12)$$

4. 평행 모델

평행(平行) 모델(parallel model)은 두 카메라의 광학 축이 같은 방향으로 기준선 위에 존재하는 형태의 모델로 차원 공간상의 점  $P$ 가 존재하는 위치에 따라 그림 4와 같이 4 가지 영역으로 구분된다.

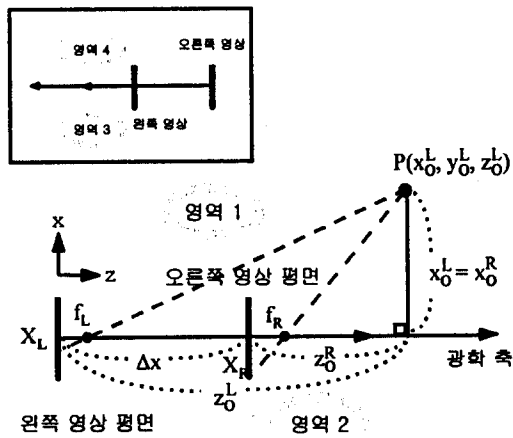


그림 4. 평행 모델의 xz 평면의 기하학.  
Fig. 4. xz plane geometry of the parallel model.

두 카메라의 광학 축이 기준선을 따라 오른쪽으로 향한 경우, xz 평면에서 두 카메라의 z 축을 기준으로 왼쪽의 평면을 영역 1로, 오른쪽의 평면을 영역 2로 정의하고 두 카메라의 광학 축이 기준선을 따라 왼쪽으로 향한 경우, xz 평면에서 두 카메라의 z 축을 기준으로 왼쪽의 평면을 영역 3, 오른쪽의 평면을 영역 4로 정의한다. 영역 1에서의  $x_o^R, z_o^R$ 은 그림 4로부터 다음과 같이 구해지며

$$x_o^R = x_o^L$$

$$z_o^R = z_o^L - |\Delta x|$$

영역 2, 영역 3과 영역 4에 대해서 마찬가지로 방법으로 구한다. 평행 모델에서 점  $P$ 의 오른쪽 카메라 좌표계에 대한 좌표  $P(x_o^R, y_o^R, z_o^R)$ 은 다음과 같이 정리된다.

$$x_o^R = x_o^L \quad (2.13)$$

$$y_o^R = y_o^L \quad (2.14)$$

$$z_o^R = z_o^L \pm |\Delta x| \quad (2.15)$$

5. 모델 방정식

기준선에 대해 음의  $x$  좌표값을 가지는 영상 평면이 반시계 방향으로 이루는 각을 절대 방향각( $\phi$ )으로 정의할 때, 각 모델에서의 영상 평면의 양의 방향각을 나타내는  $\theta$ 와 절대 방향각  $\phi$  사이에는 표 2와 같은 관계가 성립한다.

표 2.  $\theta$ 와  $\phi$ 의 관계.

Table 2. Relationship between  $\theta$  and  $\phi$ .

모델		절대 방향각
수직		$\phi_L = \theta_L = 0$ $\phi_R = \theta_R = 0$
이향		$\phi_L = -\theta_L$ $\phi_R = \theta_R$
동향	$\theta_L > \theta_R$	$\phi_L = -\theta_L$ $\phi_R = -\theta_R$
	$\theta_L < \theta_R$	$\phi_L = \theta_L$ $\phi_R = \theta_R$
평행		$\phi_L =  \theta_L  = \pm \frac{\pi}{2}$ $\phi_R =  \theta_R  = \pm \frac{\pi}{2}$

이제 점  $P$ 의 오른쪽 카메라 좌표계에 대한 좌표  $P(x_o^R, y_o^R, z_o^R)$ 를 절대 방향각으로 표시하여 정리하면 4 가지 모델에 대해 다음과 같은 하나의 식으로 표현된다.

$$x_o^R = |\Delta x| \cos \phi_R + x_o^L \cos(\phi_R - \phi_L) - z_o^L \sin(\phi_R - \phi_L) \quad (2.16)$$

$$y_o^R = y_o^L \quad (2.17)$$

$$z_o^R = |\Delta x| \sin \phi_R + x_o^L \sin(\phi_R - \phi_L) + z_o^L \cos(\phi_R - \phi_L) \quad (2.18)$$

4가지 모델에 대해 yz 평면의 기하학적인 관계는 그림 5와 같이 표현된다. 그림 1, 2, 3, 4의 4 가지 모델의 xz 평면의 기하학적 관계와 그림 5의 yz 평면의 기하학적 관계에서 삼각형의 비례 관계를 고려하면 다음과 같은 식이 성립함을 알 수 있다.

$$\frac{x_o^L}{X_L} = \frac{y_o^L}{Y_L} = \frac{f_L - z_o^L}{f_L} \quad (2.19)$$

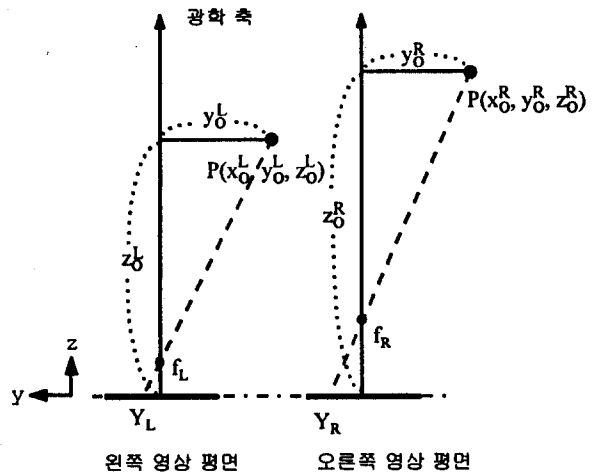


그림 5. yz 평면의 기하학.  
Fig. 5. yz plane geometry.

$$\frac{x_o^R}{X_R} = \frac{y_o^R}{Y_R} = \frac{f_R - z_o^R}{f_R} \quad (2.20)$$

(2.16)~(2.18)과 (2.19), (2.20)을 연립하여  $x_o^L, y_o^L, z_o^L$ 에 대하여 정리하면 다음과 같이 3차원 공간상의 점 P의 위치를 얻는다.

$$x_o^L = X_L \frac{-f_R X_R + \Delta x (X_R \sin \phi_R + f_R \cos \phi_R)}{(f_L X_R - f_R X_L) \cos \phi_D - (f_L f_R + X_L X_R) \sin \phi_D} + X_L \frac{f_L (X_R \cos \phi_D - f_R \sin \phi_D)}{(f_L X_R - f_R X_L) \cos \phi_D - (f_L f_R + X_L X_R) \sin \phi_D} \quad (2.21)$$

$$y_o^L = Y_L \frac{-f_R X_R + \Delta x (X_R \sin \phi_R + f_R \cos \phi_R)}{(f_L X_R - f_R X_L) \cos \phi_D - (f_L f_R + X_L X_R) \sin \phi_D} + Y_L \frac{f_L (X_R \cos \phi_D - f_R \sin \phi_D)}{(f_L X_R - f_R X_L) \cos \phi_D - (f_L f_R + X_L X_R) \sin \phi_D} \quad (2.22)$$

$$z_o^L = f_L \frac{f_R X_R - \Delta x (X_R \sin \phi_R + f_R \cos \phi_R)}{(f_L X_R - f_R X_L) \cos \phi_D - (f_L f_R + X_L X_R) \sin \phi_D} - f_L \frac{X_L (X_R \sin \phi_D + f_R \cos \phi_D)}{(f_L X_R - f_R X_L) \cos \phi_D - (f_L f_R + X_L X_R) \sin \phi_D} \quad (2.23)$$

여기서,  $\phi_D = \phi_R - \phi_L$ .

위 식에서  $\phi_L = \phi_R = 0, \phi_L = \phi_R = \pm \frac{\pi}{2}$  로 놓으면 기존의 lateral model, axial model과 동일함을 알 수 있다.

III. 모델 특성

카메라 모델은 영상 획득 단계에서 스테레오 정합을 통한 3차원 정보 추출 단계까지 모든 처리 과정의 기초가 되며 각 단계에 영향을 준다. 사용하는 카메라 모델의 종류에 따라 각 카메라의 자세와 위치가 결정되며 영상으로 얻어지는 대상체의 범위가 달라진다. 또한 차폐 현상이나 탐색 영역 등 영상 정합에 영향을 준다.

1. 시야(field of view)

두 카메라에 의해 얻어지는 영상에 모두 나타나는 영역(공통 시야로 정의)은 스테레오 정합시 정합 대상이 되는 부분으로 두 카메라의 위치와 자세에 의하여 그 크기가 결정된다. 두 카메라 사이의 거리(기준선의 길이)가 짧아지면 공통 시야는 넓어지고 4가지 카메라 모델마다 서로 다른 공통 시야를 제공하는데 이항 모델과 동향 모델에서는 좌우 카메라의 회전각에 따라 다른 공통 시야가 형성된다. 일반적으로 동일한 기준선의 길이에 대하여 수직 모델의 공통 시야가 가장 범위가 작으며 평행 모델의 공통 시야가 가장 크게 형성된다. 이항 모델과 동향 모델의 공통 시야는 서로 비슷한 크기로 중간의 크기이며 이항 모델의 공통 시야는 두 카메라의 기준선의 중심을 축으로 그 주위에 분포되나 동향 모델의 공통 시야는 두 카메라 중 어느 한쪽으로 치우쳐 분포된다. 공통 시야의 상대적인 크기는 한쪽 영상으로만 투영되는 영역의 크기와 반비례하고 한쪽 영상으로만 나타나는 영역은 차폐 또는 오정합과 깊은 관계를 가지므로 공통 시야의 크기는 곧 영상 정합과 3차원 깊이 정보의 정확성과 효율성에 영향을 준다. 즉, 공통 시야가 다른 모델의 것보다 비교하여 상대적으로 넓다는 것은 다른 모델을 사용하는 것보다 스테레오 정합 결과에 오정합의 결과가 포함될 확률이 작아지며 더 많은 3차원 정보를 얻는다는 의미이다. 따라서 이러한 맥락에서 평행 모델이 다른 모델보다 우수함을 알 수 있다.

2. 차폐 영역

차폐 영역이란 스테레오 영상 중 어느 한 영상에만 나타나는 영역을 의미하며 이는 각 카메라의 시야 범위에서 공통 시야 범위를 제외한 영역의 상이 한쪽 영상에만 나타남으로써 형성된다[6]. 또한 공통 영역 내의 대상체의 일부분이 자기 자신의 다른 부분을 가리우거나 다른 대상체의 일

부분을 가리워 형성된다. 차폐 영역에 위치하게 되는 대상체는 좌우 영상 중 한 영상에만 그 상이 나타나므로 영상 정합시 이 영역의 정합점의 후보점이 다른 영상에서 존재하지 않기 때문에 오정합될 확률이 높아지게 된다. 또한 차폐 영역 부분은 정합되지 않으므로 3차원 정보 추출이 불가능하다. 따라서 다른 카메라 모델에 비하여 차폐 영역의 크기가 상대적으로 크면 3차원 정보의 정확도가 떨어지며 다른 모델의 경우보다 3차원 정보가 부족하게 되어 효율성이 떨어진다. 차폐 영역은 평행 모델의 경우가 가장 작게 나타나며 나머지 모델에서는 비슷하게 나타난다. 차폐 영역은 대상체의 형태, 크기와 대상체 상호간의 배치 형태에 따라 같은 모델에서도 크게 차이가 난다. 차폐 현상이 발생하면 기준선의 길이를 변화시켜 카메라 사이의 거리를 넓히거나 두 카메라의 회전각을 변화시켜 부분적으로 차폐 영역을 제거할 수 있다.

3. 탐색 영역

스테레오 정합 과정은 3차원 공간상의 임의의 점에 대한 스테레오 영상으로 투영된 대응되는 상을 찾는 과정으로 화소나 특징을 정합 대상으로 사용한다[7][8]. 기존의 대부분 기법들은 스테레오 영상 중 어느 한 영상 상의 화소나 특징에 대한 다른 영상에서의 정합점을 찾을 때, 탐색 영역을 설정하여 이 영역 내에서 먼저 후보 화소나 특징을 찾고 이들 중 가장 유사도가 큰 것을 선택하여 정합쌍으로 결정하는 방법을 사용한다. 탐색 영역이 크면 정합 후보의 수가 증가하기 때문에 수행 시간이 길어지며 오정합의 확률이 높아지므로 가능한 탐색 영역을 좁히는 것이 좋다. 탐색 영역을 좁히는 방법 중의 하나가 공선 조건(epipolar constraint)을 이용하는 것이다[9]. 또한 카메라 모델에서의 기하학적 특징을 이용하여 탐색 영역을 줄일 수 있다(그림 6).

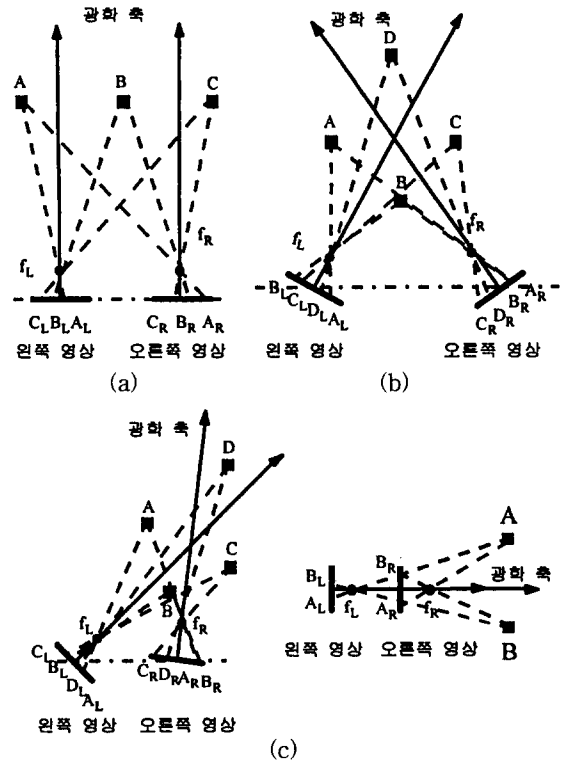


그림 6. 탐색 영역. Fig. 6. Search area.

그림 6에서 3차원 공간상의 점을 각각 A, B, C, D로 표기하였고 왼쪽 영상으로 투영된 상을  $A_L, B_L, C_L, D_L$ 로, 오른쪽 영상으로 투영된 상을  $A_R, B_R, C_R, D_R$ 로 표

기하였으며 영상 평면에서 양의  $x$  좌표값을 가지는 평면( $xz$  평면에서  $z$  축의 왼쪽 평면)을 양의  $x$  평면, 음의  $x$  좌표값을 가지는 나머지 평면을 음의  $x$  평면이라 정의한다. 수직 모델에서 왼쪽 영상 평면의 양의  $x$  평면상으로 영역 2와 영역 3의 대상체( $B, C$ )의 상( $C_L, B_L$ )이 투영되고 오른쪽 영상 평면의 음의  $x$  평면상으로 영역 1과 영역 2의 대상체( $A, B$ )의 상( $B_R, A_R$ )이 투영된다. 그러나 왼쪽 영상 평면의 음의  $x$  평면상으로 영역 1의 대상체( $A$ )의 상( $A_L$ )만이 투영되고 오른쪽 영상 평면의 양의  $x$  평면상으로 영역 3의 대상체( $C$ )의 상( $C_R$ )만이 투영된다. 따라서 스테레오 정합 과정에서 먼저 왼쪽 영상의 음의  $x$  평면상의 화소나 특징의 정합 대상을 오른쪽 영상의 음의  $x$  평면상에서 찾고( $A_L \rightarrow A_R$ ), 오른쪽 영상의 양의  $x$  평면상의 화소나 특징의 정합 대상을 왼쪽 영상의 양의  $x$  평면상에서 찾으며( $C_R \rightarrow C_L$ ), 왼쪽 영상의 양의  $x$  평면상의 정합되지 않은 화소나 특징의 정합 대상을 오른쪽 영상의 음의  $x$  평면상의 정합되지 않은 화소나 특징에서 찾으므로써( $B_L \rightarrow B_R$ ) 탐색 영역을 줄인다. 이항 모델과 동향 모델의 경우에는 왼쪽 영상의 양의  $x$  평면의 상( $B_L, C_L$ )에 대응하는 오른쪽 영상의 상이 양의  $x$  평면( $C_R$ )과 음의  $x$  평면( $B_R$ )에 모두 존재하고 왼쪽 영상의 음의  $x$  평면의 상( $A_L, D_L$ )에 대응하는 오른쪽 영상의 상이 양의  $x$  평면( $D_R$ )과 음의  $x$  평면( $A_R$ )에 모두 존재하기 때문에 탐색 영역을 줄일 수 없다. 평행 모델에서는 영역 2/영역 4의 대상체( $B$ )는 왼쪽과 오른쪽 영상 모두 양의  $x$  평면상으로 투영되고( $B_L$ ) 영역 1/영역 3의 대상체( $A$ )는 왼쪽과 오른쪽 영상 모두 음의  $x$  평면상으로 투영된다( $A_L$ ). 따라서 스테레오 정합 과정에서 먼저 왼쪽 영상의 양의  $x$  평면상의 화소나 특징의 정합 대상을 오른쪽 영상의 양의  $x$  평면상에서 찾고( $B_L \rightarrow B_R$ ), 왼쪽 영상의 음의  $x$  평면상의 화소나 특징의 정합 대상을 오른쪽 영상의 음의  $x$  평면상에서 찾는( $A_L \rightarrow A_R$ ) 방법으로 탐색 영역을 줄인다.

평행 모델과 수직 모델의 경우 탐색 영역을 제한하여 수행 시간을 줄이고 오정합 확률을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 공선 조건과 같이 병행하여 사용하여 공선 내에서도 위와 같이 탐색 영역을 줄임으로써 보다 좋은 효과를 얻을 수 있을 것이다.

**IV. 오차 분석**

두 대의 카메라를 사용하여 실제 비전 시스템을 구성하는 동적 비전 시스템의 경우에 일반적으로 동일한 재원의 것을 사용하나 두 카메라의 초점 거리등의 내부 변수들이 이상적으로 같다고 할 수 없다. 초점 거리는 모든 모델의 3차원 위치 추출시 공통적으로 사용되고 3차원 위치에 민감한 영향을 미치며 기존의 초점 거리를 같게 설정한 카메라 모델을 사용하여 얻어진 3차원 위치 오차와, 다르게 설정한 본 논문의 카메라 모델을 사용하여 얻어진 3차원 위치의 오차를 비교, 분석하기 위하여 사용할 오차 함수  $e$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$e = \sqrt{(x_d - x_s)^2 + (y_d - y_s)^2 + (z_d - z_s)^2} \quad (4.1)$$

여기서  $x_s, y_s, z_s$ 는 초점 거리를 같게 한 카메라 모델로부터 얻어진 3차원 공간상의 위치이며  $x_d, y_d, z_d$ 는 본 논문의 카메라 모델을 사용하여 얻어진 위치이다.

$f_L = f_R = f$ 를 (2.21)~(2.23)에 대입하여 얻은  $P$ 의 위치와 왼쪽 카메라를 기준으로  $f_L = f, f_R = f + \Delta f$ 로 하여 얻은  $P$ 의 위치로부터 다음과 같이  $e$ 를 구한다.

$$e(\Delta f, \Delta x, \phi_L, \phi_R) = |\Delta x(X_L \sin \phi_L + f \cos \phi_L) + f X_L + X_R(X_L \sin \phi_d - f \cos \phi_d)| \quad (4.2) \\ \times \frac{|\Delta f X_R| \sqrt{X_L^2 + Y_L^2 + f^2}}{A(\phi_L, \phi_R)[A(\phi_L, \phi_R) - \Delta f(X_L \cos \phi_d + f \sin \phi_d)]}$$

여기서,

$$A(\phi_L, \phi_R) = f(X_R - X_L) \cos \phi_d - (f^2 + X_L X_R) \sin \phi_d$$

**V. 실험 결과**

제안한 4가지 모델의 정확도를 검증하기 위하여 3차원 공간상의 임의의 점의 위치 추출을 PC를 사용하여 시뮬레이션으로 실험하였다. 초점 거리, 기준선의 길이, 두 카메라의 회전각과 임의의 점의 3차원 공간상의 위치( $x_o^L, y_o^L, z_o^L$ )를 모두 변화시키면서 이 점의 좌우 영상으로의 투영되는 상의 위치를 구하고 (2.21)~(2.23)을 이용하여 3차원 위치를 계산하였다. 시뮬레이션 결과 4 가지 모델에서 모든 점의 위치를 오차 없이 정확히 추출함을 확인하였다. 또한 IV장에서 언급한 3차원 위치에 대한 실험을 수행하였다. (4.8)에 나타나 있듯이 초점 거리 오차에 의한 3차원 깊이 오차는 초점 거리 오차( $\Delta f$ ), 기준선의 길이( $\Delta x$ ), 두 카메라의 회전각( $\phi_L, \phi_R$ )의 함수이다. 각 파라미터와 4가지 모델에 대한 오차를 분석하기 위하여 시뮬레이터를 제작하여 실험하였다. 제작된 시뮬레이터는 왼쪽 카메라의 초점 거리, 기준선의 길이, 두 카메라의 회전각과 3차원 공간상의 점 P의 위치를 각각 변화시키면서, 왼쪽 카메라의 초점 거리의  $\pm 100\%$ 의 범위로 변화되는 오른쪽 카메라의 초점 거리에 따른 3차원 위치 오차를 측정할 수 있다. 각 파라미터 및 4가지 모델에 대한 3차원 위치 오차의 변화를 보기 위하여 4가지의 실험을 수행하였는데 모든 실험에서 왼쪽 카메라의 초점 거리는 16 mm로 선택하였으며 좌우 카메라의 회전각( $\phi_L, \phi_R$ )은 수직 모델은 (0, 0), 동향 모델은 (5°, 15°), 이항 모델은 (-10°, 10°), 평행 모델은 (90°, 90°)을 사용하였다. 실험 1은 고정된 한 점에 대한 각 모델의 오차를 비교하기 위한 실험이며 3차원 공간상의 점의 위치와 기준선의 길이를 각각 (-50, 150, 1200) mm, 300 mm로 고정하고 4가지 모델에 대해 실험하였다. 실험 2는 각 모델에서의 기준선의 길이 변화에 대한 오차 비교 실험으로서 3차원 공간상의 점의 위치를 (50, 150, 1700) mm로 고정하고 각 모델에서 대해 기준선의 길이를 100~500 mm, 100 mm씩 변화시켰다. 실험 3은 동향 모델 및 이항 모델에서 두 카메라의 회전각의 변화에 따른 오차를 비교하기 위한 것이며 3차원 공간상의 점의 위치와 기준선의 길이를 각각 (-50, 150, 1200) mm, 300 mm로 고정하고  $\phi_R$ 을 5°, 10~50°, 10°씩 변화시켜 실험하였다. 실험 4는 점의 위치 변화에 따른 각 모델의 오차 변화를 살펴보기 위한 실험이며 기준선의 길이를 300 mm로 고정시키고 왼쪽 카메라 좌표계에 대해  $-1000 \text{ mm} \leq x \leq 1000 \text{ mm}, 300 \text{ mm} \leq z \leq 2000 \text{ mm}, -500 \text{ mm} \leq y \leq 500 \text{ mm}$ , 범위에서 공통 시야 영역 내의 점들에 대해 200 mm 간격으로 물체의 위치를 변화시켜 실험하였다. 비교를 위하여 모든 실험에서 오차의 최대 크기를 1000 mm로 제한하여 나타내었다.

그림 7은 실험 1의 결과이다.

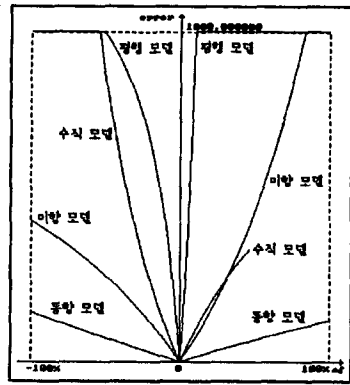


그림 7. 4 가지 모델의 오차 비교.  
Fig. 7. Comparison of errors for 4 models.

3차원 공간상의 위치에 따라 다소 차이는 있지만, 평행 모델의 오차가 가장 크며 동향 모델의 오차가 가장 적음을 알 수 있다. 즉, 동향 카메라 모델을 사용하는 것은 동일한 조건하에서 3차원 깊이 정보의 오차를 최소화할 수 있음을 알았다. 그림에서 그래프가 끊어진 것은 초점 거리의 변화로 물체의 상이 영상 평면에서 벗어나 3차원 위치를 추출할 수 없기 때문이다. 그림 8은 기준선의 길이 변화에 따른 각 모델에서의 위치 오차 변화를 나타내는 그래프이다. 수직 모델, 이항 모델과 평행 모델에서는 기준선의 길이가 클수록 위치 오차가 작아짐을 알 수 있다. 그러나 동향 모델에서는 두 카메라의 광학 축의 기울기와 기준선의 길이가 변화에 따라 대상체에 대한 공통 시야가 변하기 때문에 기준선의 길이가 너무 커지거나 작아지면 오차가 커짐을 알 수 있다.

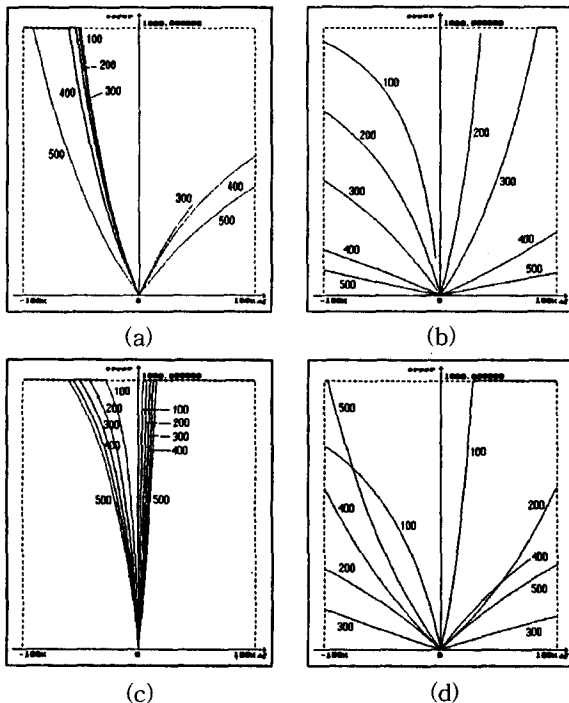


그림 8. 기준선의 길이에 따른 오차 비교. (a) 수직 모델, (b) 이항 모델, (c) 동향 모델, (d) 평행 모델.  
Fig. 8. Comparison of errors according to the length of baseline. (a) The orthogonal model, (b) the anti-directional model, (c) the a-directional model, (d) the parallel model.

실험 2의 결과로 스테레오 비전에서 수직 모델을 사용하는 경우에는 기준선의 길이를 작게 하는 것이 오차를 최소화할 수 있고 이항 모델이나 평행 모델을 사용하는 경우에는 기준선의 길이를 가능한 길게 하는 것이 유리하다. 동향 모델을 사용하는 경우에는 적절한 길이의 기준선을 사용하여야 하는데, 3차원 위치 오차가 가장 최소로 되는 기준선의 길이는 대상체와 카메라와의 거리에 따라 실험적으로 결정된다. 실험 3의 결과인 그림 9로부터 이항 모델과 동향 모델의 경우에 두 카메라의 회전각에 따라 동일한 조건하에서의 같은 물체의 위치 오차가 다르게 나타남을 볼 수 있다. 이항 모델이나 동향 모델을 사용하는 경우에 대상체에 대하여 차폐 현상을 고려하여 회전각을 적절히 선택하여야 하는데, 일반적으로 두 카메라의 두 회전각의 차이가 적은

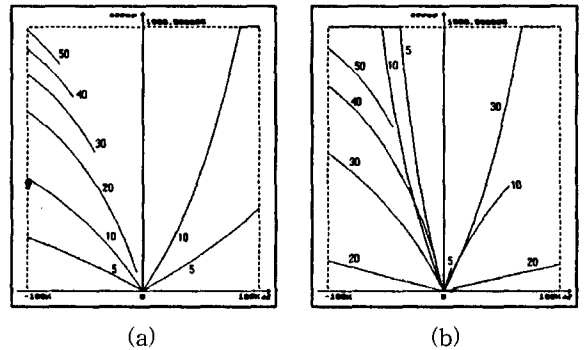


그림 9. 두 카메라의 회전각에 따른 오차 비교. (a) 이항 모델, (b) 동향 모델.  
Fig. 9. Comparison of errors according to the rotation angle of two cameras. (a) the anti-directional model, (b) the a-directional model.

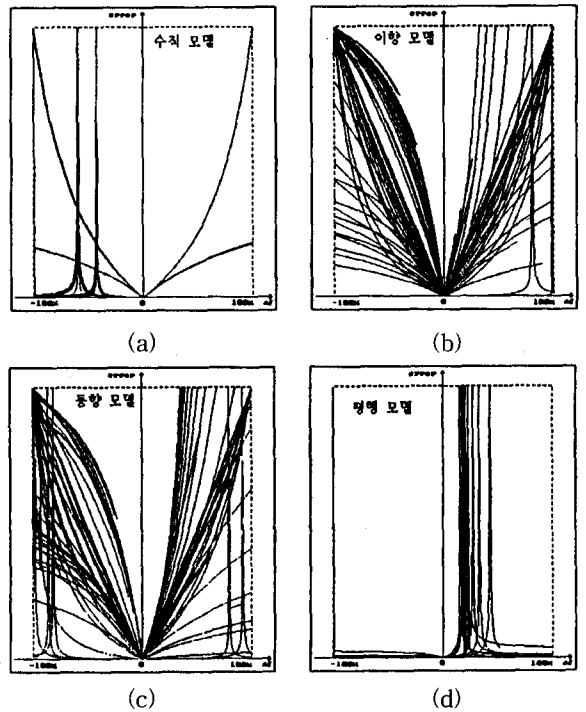


그림 10. 물체 위치에 따른 오차 비교. (a) 수직 모델, (b) 이항 모델, (c) 동향 모델, (d) 평행 모델.  
Fig. 10. Comparison of errors according to locations of object. (a) the orthogonal model, (b) the anti-directional model, (c) The a-directional model, (d) the parallel model.

회전각을 사용한다. 초점 거리의 오차를 주어진 초점 거리 값의  $\pm 100\%$ 의 범위로 변화시키고 3차원 공간상의 점의 위치를 변화시키면서 획득되는 3차원 위치 오차를 측정하는 실험 4의 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서  $x$  축은 초점 거리 오차이며  $y$  축은 3차원 위치 오차를 나타내는데, 각 오차곡선의 최대값 즉 최대 위치 오차의 크기는 오차 곡선(3차원 공간상의 점의 위치)마다 다르나 비교를 위하여 하나의 그래프에 같이 나타내었다. 그림에서 보듯이 평행 모델과 수직 모델의 경우, 위치의 오차가 무한대로 발산하는 점이 비교적 적은 초점 거리 오차에서 발생하고 동향 모델과 이향 모델의 경우에는 비교적 많은 차이의 초점 거리에서 발생함을 알 수 있다. 이는 평행 모델과 수직 모델에서 두 카메라의 초점 거리가 조금만 다르더라도 추출한 3차원 위치에 매우 큰 오차가 포함됨을 의미한다.

본 논문의 실험 결과로부터 본 논문에서 구한 4가지 스테레오 카메라 모델에 대한 하나의 해는 정확하게 3차원 위치를 추출함을 확인하였으며, 만일 사용한 두 카메라의 초점 거리에 오차가 있거나 두 카메라의 초점 거리를 동일하게 놓았을 경우, 평행 모델을 사용하여 구한 3차원 위치에 가장 많은 오차가 포함되며 다음으로 수직 모델, 이향 모델, 동향 모델 순으로 오차가 많이 포함됨을 알 수 있다. 또한 추출된 3차원 위치의 오차는 카메라 모델뿐만 아니라 기준선의 길이와 두 카메라의 회전각에 깊은 영향을 받음을 확인하였다.

**VI. 결론**

본 논문에서는 서로 다른 초점 거리를 가지는 두 카메라를 각각 자유롭게 회전 가능한 동적 비전 시스템에 적용하는 카메라 모델을 제안하였다. 두 카메라의 영상 평면의 중심을 잇는 기준선에 대한 각 카메라의 광학 축의 방향을 기준으로 수직 카메라 모델, 이향(異向) 카메라 모델, 동향(同向) 카메라 모델과 평행 카메라 모델의 4개 모델로 구분하여 4 가지 카메라 모델에 대해 하나의 closed form 형태의 산술식으로 해를 구하였다. 본 논문에서는 두 카메라의 초점 거리 오차에 따른 3차원 위치 오차에 대한 모의 실험을 수행하여, 3차원 위치 오차는 카메라 모델, 기준선의 길이와 두 카메라의 회전각에 깊은 영향을 받음을 밝혔다. 또한 본 논문에서는 4가지 모델에 대해 차폐, 시야, 탐색 영역의 3가지 관점에서 비교, 분석하였으며 평행 모델이 가장 넓은 시야를 제공하며 차폐 현상을 가장 적게 발생시키고 탐색 영역을 줄일 수 있어 수행 시간을 줄이고 오정합의 확률이 가장 낮다는 장점을 가지나 구현에 있어, 좌우 카메라 중 하나가 다른 카메라의 시야를 가리게 되어 실제로 동적 비전 시스템에 사용하기 어렵다는 문제점과 두 카메라의 초점 거리에 오차가 포함되는 경우에는 가장 큰 오차가 포함된 3차원 위치를 추출한다는 단점이 있음을 확인하였다. 추후, 실제 구현으로 나타나는 초점 거리 오차 이외의 여러 모델링 파라미터에 대한 오차 해석과 그에 따른 해결 방안

한 연구 및 동적 비전 시스템에서의 효과적인 카메라 보정 또는 카메라 설치에 대한 연구가 계속되어야 할 것이며 본 논문의 결과를 정적 비전 시스템뿐만 아니라 동적 비전 시스템에 적용하여 자율 이동 주행 로봇 등의 응용에서 대상체의 3차원 정보를 실시간으로 구하는데 활용할 수 있을 것이다.

**참고문헌**

- [1] H. Itoh, A. Miyauchi, and S. Ozawa, "Distance measuring method using only simple vision constructed for moving robots," *Proc. IEEE 7th Int. Conf. Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 192-195, 1984.
- [2] T. D. Williams, "Depth from camera motion in a real world scene," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-2, no. 6, pp. 511-516, Nov., 1980.
- [3] R. Jain, S. L. Bartlett, and N. O'Brien, "Motion stereo using egomotion complex logarithmic mapping," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-9, no. 3, pp. 356-369, May, 1987.
- [4] P. Mansbach, "Calibration of a camera and light source by fitting to a physical model," *Computer Vision, Graphic, and Image Processing*, vol. 35, pp. 200-219, 1986.
- [5] N. Alvertos, D. Brzakovic, and R. C. Gonzalez, "Camera geometries for image matching in 3-D machine vision," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-11, no. 9, pp. 897-915, Sep., 1989.
- [6] W. H. Thompson and R. P. Whillock, "Occlusion sensitive matching," *Second International Conference on Computer Vision*, pp. 285-289, 1988.
- [7] G. Medioni and R. Nevatia, "Segment-based stereo matching," *Computer Vision, Graphic, and Image Processing*, vol. 31, pp. 2-18, 1985.
- [8] M. A. Gennert, "Brightness-based stereo matching," *Second International Conference on Computer Vision*, pp. 134-143, 1988.
- [9] R. C. Bolles and H. H. Baker, "Epipolar plane image analysis : A technique for analyzing motion sequences," *Proc. IEEE Third Workshop on Computer Vision Representation and Control*, pp. 168-178, 1985.



도 경 민

1988년 서강대 전자공학과 졸업. 동대학원 석사(1990), 1990년 ~ 현재 한국전자통신연구원 연구원, 현재 동대학원 박사 과정. 관심분야는 컴퓨터 비전 및 응용, 신호 처리, 로봇틱스.



이 쾌 회

1971년 서울대학교 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1973). 1983년 미국 남가주대학교 전기공학 박사. 1983년 ~ 현재 서강대학교 전자공학과 교수. 관심 분야는 자동 제어, 신호 처리.