

핸드-아이 보정과 능동 스테레오 비전의 일반적 해석

김진대[#], 이재원^{*}, 신찬배^{**}

The General Analysis of an Active Stereo Vision with Hand-Eye Calibration

Jin-Dae Kim[#], Jeh-Woon Lee^{*}, Chan-Bai Shin^{**}

ABSTRACT

The analysis of relative pose(position and rotation) between stereo cameras is very important to determine the solution that provides three-dimensional information for an arbitrary moving target with respect to robot-end. In the space of free camera-model, the rotational parameters act on non-linear factors acquiring a kinematical solution. In this paper the general solution of active stereo that gives a three-dimensional pose of moving object is presented. The focus is to achieve a derivation of linear equation between a robot's end and active stereo cameras. The equation is consistently derived from the vector of quaternion space. The calibration of cameras is also derived in this space. Computer simulation and the results of error-sensitivity demonstrate the successful operation of the solution. The suggested solution can also be applied to the more complex real time tracking and quite general and are applicable in various stereo fields.

Key Words : Free-Camera Model(자유 카메라 모델), Non-Linear Factor(비선형 인자), Kinematical Solution(기구학적 해), Quaternion-Space(4원수 공간), Error-Sensitivity(오차 민감도).

1. 서론

능동 스테레오 카메라 시스템에 대한 연구는 공간 회전 및 병진 인자가 시스템 정밀도를 좌우하는 로봇 시각이나 비주얼 서보잉(visual servoing) 분야에서 활발히 진행되어 오고 있다.^{1,2}

위치에 기반을 둔 능동 스테레오 시스템에서 3 차원 정보를 얻어내기 위하여 많이 사용 되어왔던 방법은 평행이나 수직 카메라 모델들이었다. 이를

모델들은 초점 거리를 같고 광학축을 평행 또는 일치시키는 제약 조건으로 3차원 해를 구하였다.^{3,4} 하지만 초점거리가 다른 2대의 카메라를 사용하거나 동적 시각을 구현하기 위하여 카메라를 각각 제어하는 경우에는 스테레오 카메라간의 평행이나 일치조건을 부여하기는 어렵다.⁵ Kanade와 Han⁶은 여러 장면의 영상으로부터 프로젝티브 분해(projective factorization)방법으로 보정되지 않은 카메라로부터 3차원 복구를 하는 방법을 연구하기도

^{1,2} 접수일: 2003년 7월 1일, 게재 승인일: 2004년 3월 12일

[#] 교신저자, 영남대학교 대학원 기계공학과

Email p9950086@hanmail.net Tel. (053) 810-3568

^{*} 영남 대학교 기계공학과

^{**} 울산 과학대학 디지털 기계학부

하였으나 시각 서보잉과 같은 로봇 시스템과의 연동에 적용하지는 않았다. 위치 기반 로봇 시스템과의 연동을 위해서는 기구학적 관점에서 고려하는 것이 장점을 가진다. 김 등⁷은 위치 기반 서보잉에서 카메라의 보정 정밀도와 시각 서보잉 시스템의 안정성에 관한 연구를 수행하는데 2대의 카메라 간에 구속을 가하지 않은 스테레오 모델에 대하여 목표 영상과 현재 영상의 차(difference)를 이용하여 조립 작업을 완성하였다. 그러나 서보잉의 결과로 부터 로봇 파라미터와 2대 카메라 간의 관계들을 분해하여 3차원 복원의 일반식은 유도하지 않았다.

한편 3차원 공간상에서 기구학적 회전은 오일러(Euler)각에 의한 동차 변환 행렬로 표시된다. 동차 행렬에 근거한 임의 스테레오 모델 식들은 비선형 연립 방정식을 풀어야 하는 어려움이 있다.^{8,9} 따라서 임의 카메라에 대하여 비선형식을 대수적으로 쉽게 해결할 수 있는 방법에 대한 연구가 절실히 하다.

이 논문에서는 구속이 없는 능동 스테레오 모델에 대하여 카메라간의 상대적인 회전 인자와 로봇과의 기구학적 해석 및 물체 좌표계의 관계식들을 대수적으로 다룰 수 있는 4원수 공간에서 유도하고자 하며 이를 이용하여 위치 기반 시각 서보잉에도 적용 가능한 능동 스테레오에 대한 일반적 해를 구하고자 한다.

2. 능동 스테레오 비전

본 논문에서는 능동 스테레오 시각 시스템을 구성하기 위하여 6축 다관절 로봇의 끝단에 카메라를 장착하는 핸드-아이 형 모델을 선정하였다. 이에 대한 구성과 전체 변환은 Fig. 1과 같다.

여기서 $\{R\}$ 은 로봇 베이스 좌표계를 $\{W\}$ 는 물체 좌표계, $\{T\}$ 는 틀 좌표계, $\{C_1\}$ 과 $\{C_2\}$ 는 카메라 좌표계, $\{I_1\}$ 과 $\{I_2\}$ 는 영상 좌표계를 각각 나타낸다. 물체의 자세 추적이나 수령 제어 등에 많이 사용이온 핸드-아이 시각 시스템은 카메라 C_1 과 C_2 로부터 두개의 2차원 영상 I_1 과 I_2 를 얻고 물체 좌표계 $\{W\}$ 상에서 움직이는 대상을 $P(P_x, P_y, P_z)$ 의 3차원 정보를 $\{C_1\}$ 에 대하여 먼저 구한다. 이를 다시 로봇 베이스 좌표계로 재구성하여 대상 물체를 추적하면서 최적의 초점 거리와 원하는 영상을 제공하도록 카메라 C_1 과 C_2 의 회전 및 병진 운동을 제어하여야 한다.

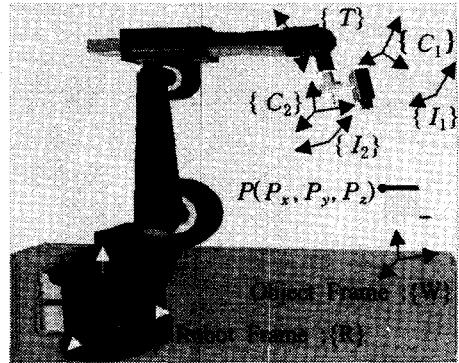


Fig. 1 Stereo configuration and transformation

이와 같은 시각 추적이나 자세 제어에서의 작업 정밀도나 응답 특성은 스테레오 모델에 대한 3차원 복원 해로부터 결정된다. 구속이 없는 카메라 모델에 대하여 3차원 해를 얻기 위해서는 두개의 2차원 영상과 카메라 C_1 과 C_2 간의 변환 관계인 ${}^1{}_2A$ 를 이용하여 직접 구하여야 한다. 따라서 카메라 간의 변환 ${}^1{}_2A$ 의 정확한 규명이 무엇보다 중요하며 이는 로봇 틀에서 카메라 C_1 까지의 변환 ${}^1{}_cA$ 과 카메라 C_1 까지의 변환 ${}^1{}_2A$ 로부터 풀 수 있게 된다. 또한 ${}^1{}_cA$ 과 ${}^1{}_2A$ 는 로봇 베이스에서 틀까지의 변환 ${}^1{}_wA$ 와 카메라 C_1 에서 물체 좌표계까지의 변환 ${}^1{}_wA$ 및 C_2 에서 물체 좌표계까지의 변환 ${}^2{}_wA$ 를 이용하여 구하게 된다. 본 논문에서는 위와 같은 좌표계간의 변환 식을 정의하기 위하여 회전과 관련된 4원수와 병진 변수를 다음과 같이 정의하였다.

$$A = [Q, T] = [q_0, q_1, q_2, q_3, t_x, t_y, t_z]^T \quad (1)$$

여기서, $Q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ 는 회전 인자를 나타내는 4원수로 $q_0 = \cos(\theta/2)$, $[q_1, q_2, q_3] = \sin(\theta/2) \times [s_x i, s_y j, s_z k]$ 로 정의 되며 $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ 의 성질을 갖는다. $S = (s_x, s_y, s_z)$ 는 나선 축(screw axis), θ 는 나선 축을 중심으로 한 회전각, $T = [t_x, t_y, t_z]^T$ 는 병진 벡터를 의미한다.

3. 4원수를 이용한 변환 관계

3.1 로봇의 순기구학

연구에서 사용된 로봇 모델은 스토이블리 6R로 각 조인트에 대한 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 1 Screw Parameters of the Stubli

joint	S	s_o (mm)
1	(0,0,1)	(0,0,0)
2	(1,0,0)	(0,0,0)
3	(1,0,0)	(0,0, a_2)
4	(0,1,0)	(0,0, a_2)
5	(1,0,0)	(0, d_4 , a_2)
6	(0,1,0)	(0,0, a_2)

여기서 S 는 나선 축을 나타내며 s_o 는 나선 축의 원점을 표시한 것이다. 로봇의 회전 및 병진 순 기구학은 식 (1)을 각각의 조인트에 적용하고 4원수에 대한 연결 체인으로 쓰면 식 (2)로 유도된다.

$$\begin{aligned} {}^iQ &= {}^1Q \circ {}^1_2Q \circ {}^2_3Q \circ {}^3_4Q \circ {}^4_5Q \circ {}^5_6Q \\ {}^iT &= {}^1T + {}^1_2Q \circ {}^1_2T \circ {}^2_3Q^* + {}^2_3Q \circ {}^2_3T \circ {}^3_4Q^* \\ &\cdots + {}^5_6Q \circ {}^5_6T \circ {}^5_6Q^* \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } {}^{i-1}Q = \cos(\theta_i/2) + \sin(\theta_i/2) S_i \\ i=1, 2, \dots, 5, t$$

식 (2)에서 \circ 는 4원수 연산자를 나타내며 θ_i 는 i 번째 로봇 조인트 각도를 나선 축을 중심으로 한 회전 각도로 표현한 것이고 그리고 ${}^{i-1}Q^*$ 는 공액 (conjugate) 4원수를 나타낸다. 4원수 연산에 대한 정의는 부록에 나타내었다.

3.2 카메라와 물체 좌표계간의 보정

카메라와 물체 좌표계간의 기구학적 보정 wA 는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 투사 기하로 생각하

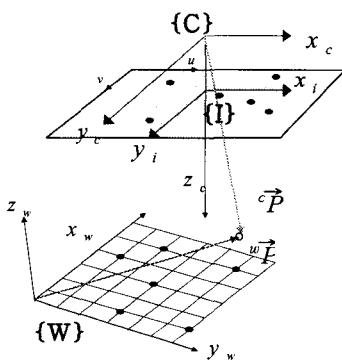


Fig. 2 Camera calibration.

면 카메라와 물체 좌표계간의 기구학적 보정 wA 는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 투사 기하로 생각하면 카메라 보정으로부터 외부 파라미터를 도출하는 과정이다. 여기서 cP 는 카메라 좌표계를 중심으로 한 물체의 점을 wP 는 물체 좌표계에서 본 점의 좌표 값을 나타낸다. 카메라 외부 파라미터는 이들 cP 와 wP 의 대응점들로부터 구할 수 있다. 이에 대한 4원수 관계식은 (3)으로 표현 적을 수 있고,

$$\begin{aligned} [0, {}^cP]^T &= {}^wQ \circ [0, {}^wP]^T \circ {}^wQ^* \\ &+ [0, {}^wt_x, {}^wt_y, {}^wt_z]^T \end{aligned} \quad (3)$$

카메라 좌표계에서의 값 $\{x_c, y_c, z_c\}$ 와 영상 좌표계 값 $\{x_i, y_i\}$ 사이의 투사 변환식에서 방사 방향의 왜곡을 고려하여 카메라를 선형화시키면 식 (4)와 식 (5)로 정리된다.

$$\frac{x_i}{1 - k(\mu^2 x_i^2 + y_i^2)} = f_x \frac{x_c}{z_c} \quad (4)$$

$$\frac{y_i}{1 - k(\mu^2 x_i^2 + y_i^2)} = f_y \frac{y_c}{z_c} \quad (5)$$

여기서, k : 방사 방향의 왜곡 상수
 $\mu = f_y/f_x$: 스케일 인자의 비

식 (4)를 식 (5)로 나누고, (3)을 대입하여 정리하면 식 (6)이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{x_i}{y_i} &= \frac{1}{\mu} \frac{({}^wq_0^2 + {}^wq_1^2 - {}^wq_2^2 - {}^wq_3^2)x_w}{2({}^wq_1 {}^wq_2 + {}^wq_0 {}^wq_3)x_w} \\ &+ 2(\frac{{}^wq_1 {}^wq_2 - {}^wq_0 {}^wq_3}{w})y_w \\ &+ (\frac{{}^wq_0^2 - {}^wq_1^2 + {}^wq_2^2 - {}^wq_3^2}{w})y_w \\ &+ 2(\frac{{}^wq_1 {}^wq_3 + {}^wq_0 {}^wq_2}{w})z_w + \frac{{}^w t_z}{w} \\ &+ 2(\frac{{}^wq_2 {}^wq_3 - {}^wq_0 {}^wq_1}{w})z_w + \frac{{}^w t_y}{w} \end{aligned} \quad (6)$$

양변을 다시 wt_y 로 나누면 아래 식 (7)로 표현 할 수 있다.

$$[A][B] = [\mu x_{i,j}] \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [A] &= [x_{w,j} y_{i,j}, y_{w,j} p_{i,j}, y_{i,j}, -x_{w,j} \mu x_{i,j}, -y_{w,j} \mu x_{i,j}] \\ [B] &= [\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5]^T \end{aligned}$$

$$\rho_1 = (\frac{c}{w}q_0^2 + \frac{c}{w}q_1^2 - \frac{c}{w}q_2^2 - \frac{c}{w}q_3^2) / \frac{c}{w}t_y$$

$$\rho_2 = 2(\frac{c}{w}q_1 \frac{c}{w}q_2 - \frac{c}{w}q_0 \frac{c}{w}q_3) / \frac{c}{w}t_y$$

$$\rho_3 = \frac{c}{w}t_x / \frac{c}{w}t_y$$

$$\rho_4 = 2(\frac{c}{w}q_1 \frac{c}{w}q_2 + \frac{c}{w}q_0 \frac{c}{w}q_3) / \frac{c}{w}t_y$$

$$\rho_5 = (\frac{c}{w}q_0^2 - \frac{c}{w}q_1^2 + \frac{c}{w}q_2^2 - \frac{c}{w}q_3^2) / \frac{c}{w}t_y$$

위의 식 (7)은 방정식 1개에 대해서 미지수가 5개인 상관 행렬을 나타내므로 m (측정 횟수) >5 이면 최소 제곱법으로 미지수를 구할 수 있다. 하지만 이 과정에서 구해지는 미지수는 임의 변수이므로 이로부터 다시 회전 및 병진 인자를 추출해 내는 작업이 필요하다. 회전 인자의 정규직교성(orthonormality)을 이용하여 정리하면 식 (8)이 전개된다.

$$(\rho_1^2 + \rho_2^2 + \rho_4^2 + \rho_5^2) \frac{c}{w}t_y^2 - (\rho_1\rho_5 - \rho_2\rho_4) \frac{c}{w}t_y^4 = 1 \quad (8)$$

위의 식 (8)로부터 $\frac{c}{w}t_y, \frac{c}{w}t_x, \frac{c}{w}q_0, \frac{c}{w}q_1, \frac{c}{w}q_2, \frac{c}{w}q_3$ 는 결정된다. $\frac{c}{w}A$ 중 나머지 변수 $\frac{c}{w}t_z$ 는 식 (4)를 식 (9)의 최소 제곱 형태로 재정리하여 f_x, k 와 함께 구해 낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -x_{i,j} \\ Cx_{w,j} + Dy_{w,j} + \frac{c}{w}t_x \\ -(Cx_{w,j} + Dy_{w,j} + \frac{c}{w}t_x)(\mu^2 x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{c}{w}t_z \\ f_x \\ kf_x \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= x_{i,j}(Ex_{w,j} + Fy_{w,j})$$

여기서, $j = 1, 2, \dots, n$.

$$C = \frac{c}{w}q_0^2 + \frac{c}{w}q_1^2 - \frac{c}{w}q_2^2 - \frac{c}{w}q_3^2$$

$$D = 2(\frac{c}{w}q_1 \frac{c}{w}q_2 - \frac{c}{w}q_0 \frac{c}{w}q_3)$$

$$E = 2(\frac{c}{w}q_1 \frac{c}{w}q_3 - \frac{c}{w}q_0 \frac{c}{w}q_2)$$

$$F = 2(\frac{c}{w}q_2 \frac{c}{w}q_3 + \frac{c}{w}q_0 \frac{c}{w}q_1)$$

마찬가지로 식 (9)는 방정식 1개에 대해서 미지수가 3개이므로 n (측정 횟수) >3 의 조건이 필요하다.

3.3 스테레오 핸드-아이 변환

로봇 끝점에 장착된 카메라의 병진과 회전 인자들은 스테레오 카메라 부착 지그의 설계 사양으로부터 대략적으로 구할 수도 있으나 장착 및 가공 오차 등의 원인으로 민감한 기구학적 오류를 유발시킨다. 그러므로 로봇이 이동 했을 경우의 영상 정보들로부터 정밀한 보정을 할 수 있는 방법을 유

도 하였다. Fig. 3은 한 대상 물체에 대하여 로봇을 움직이면서 카메라로 물체 좌표계상의 보정 점들을 촬영 하는 것을 나타낸 것이다.

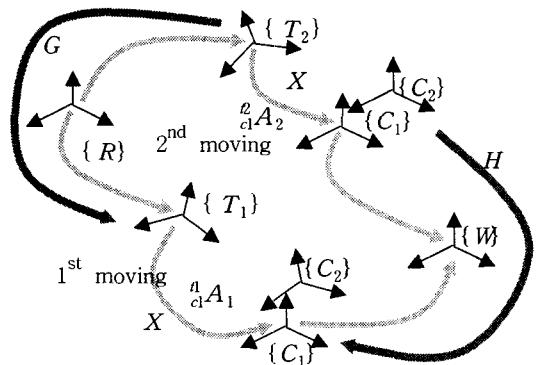


Fig. 3 Multi-view for Hand-eye calibration

변환 그래프에서 A_1, A_2, A_1, A_2 는 각각 첫 번째와 두 번째 로봇의 이동을 표현한 것인데 보이는 바와 같이 로봇이 이동하더라도 A_1 와 A_2 는 일정하다는 제약 조건을 가할 수 있다. 그러므로 전체 폐루프 방정식을 유도하면,

$${}^r_A A_2^{-1} \cdot {}^r_A A_1 \cdot {}^l_A A_1 = {}^r_A A_2 \cdot {}^l_A A_2 \cdot {}^l_A A_1^{-1} \quad (10)$$

위 식에서 ${}^r_A A_2^{-1} \cdot {}^r_A A_1$ 와 ${}^l_A A_2 \cdot {}^l_A A_1^{-1}$ 는 앞에서 구한 로봇의 순기구학식과 카메라 외부 파라미터로부터 결정되므로 ${}^l_A A_1$ 는 다음의 과정으로 구한다. 식 (10)에서 ${}^r_A A_2^{-1} \cdot {}^r_A A_1$ 와 ${}^l_A A_2 \cdot {}^l_A A_1^{-1}$ 를 각각 G, H 로 두고, ${}^l_A A_1 = {}^r_A A_2$ 을 X 로 둔 다음 이를 정리하면 (11)과 같이 회전 부분과 병진 부분으로 나누어 쓸 수 있다.

$$Q_G \cdot Q_X = Q_X \cdot Q_H \quad : \text{회전 부분} \quad (11)$$

$$Q_G T_X + T_G = Q_X T_H + T_X \quad : \text{병진 부분}$$

(11)의 회전 부분으로부터 $Q_H = Q_X^{-1} \cdot Q_G \cdot Q_X$ 가 만족되어야 하므로 두 회전 행렬 Q_H 와 Q_G 는 상사(similar) 행렬이 된다. 상사 행렬은 같은 고유치(eigenvalue)를 가지므로 같은 회전각을 가져야 함을 의미한다. 그러므로 식 (12)와 같은 4원수를 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_G &= G_0 + \vec{G} = \cos(\theta/2) + \sin(\theta/2) S_G \quad (12) \\ Q_H &= H_0 + \vec{H} = \cos(\theta/2) + \sin(\theta/2) S_H \\ Q_X &= X_0 + \vec{X} = \cos(\omega/2) + \sin(\omega/2) S_X \end{aligned}$$

여기서 S_G 와 S_H 는 각각 Fig. 3에서 G와 H로 표현된 변환에서 나선 축을 나타내고 θ 는 나선 축을 중심으로 한 회전각을 표시한 것인데 동일한 회전각을 의미한다. 그리고 S_X 는 구하고자 하는 핸드-아이 파라미터에 대한 나선 축을 ω 는 회전각을 의미한다. 식 (11)에 식 (12)을 대입하여 4원수 연산을 수행하면 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} [G_0 X_0 - \vec{G} \cdot \vec{X}, (G_0 \vec{X} + X_0 \vec{G} + \vec{G} \times \vec{X})] \\ = [X_0 H_0 - \vec{X} \cdot \vec{H}, (X_0 \vec{H} + D_0 \vec{X} + \vec{X} \times \vec{H})] \quad (13) \end{aligned}$$

식 (13)의 동치 조건으로부터 식 (14)를 유도할 수 있다. 자세한 유도는 부록에 정리하였다.

$$\tan(\omega/2)(S_G + S_H) \times S_X = S_H - S_G \quad (14)$$

식 (14)를 반 대칭(skew symmetric) 행렬 Q 형태로 바꾸면 미지수 3개에 방정식 2개인 형태의 식으로 전개된다. 따라서 최소 2번의 로봇 움직임과 그 영상 정보가 필요하며 (15)와 같이 행렬 형태로 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Q(S_{G1} + S_{H1}) \\ Q(S_{G2} + S_{H2}) \end{bmatrix} [Z] = \begin{bmatrix} S_{H1} - S_{G1} \\ S_{H2} - S_{G2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

이로부터 X 의 회전 인자 성분을 계산하는 식은 (16)과 같다.

$$S_X = Z / \|Z\|, \omega = 2 \tan^{-1}(\|Z\|) \quad (16)$$

여기서 계산되는 S_X 가 핸드-아이 파라미터에 대한 나선 축이고 ω 는 나선 축을 중심으로 한 회전각이므로 회전 부분은 구하여졌다. 나머지 병진 요소 $\{T_X\}$ 는 식 (17)에 대하여 최소 자승법으로 구 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Q_{G1} - I_3 \\ Q_{G2} - I_3 \end{bmatrix} [T_X] = \begin{bmatrix} Q_X T_{H1} - T_{G1} \\ Q_X T_{H2} - T_{G2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

${}^c_1 A$ 가 정의되고 나면, ${}^c_1 A \cdot {}^c_w A = {}^c_2 A \cdot {}^c_w A$ 관계식을 이용하여 ${}^c_2 A$ 는 식 (18)로 결정된다.

$${}^c_2 A = {}^c_1 A \cdot {}^c_w A \cdot {}^c_w A^{-1} \quad (18)$$

4. 능동 스테레오 카메라의 일반해

능동 스테레오의 일반해는 앞장에서 구한 각 변환들에서 정의된 관계식들을 이용하여 구할 수 있게 된다.

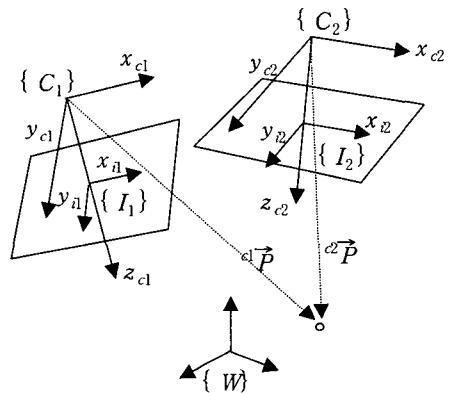


Fig. 4 Geometry of stereo camera

Fig. 4에서 카메라 C_2 에 대한 영상 좌표계와 카메라 좌표계의 관계식은 식 (19)가 되고, 카메라 C_1 과 C_2 간의 상대적인 변환식은 (20)과 같다.

$$x_{c2} = f_{x2} \frac{x_{cl}}{z_{cl}}, y_{c2} = f_{y2} \frac{y_{cl}}{z_{cl}} \quad (19)$$

$$[0, {}^c_2 \vec{P}]^T = {}^c_1 Q \circ [0, {}^c_1 \vec{P}] \circ {}^c_1 Q^* + {}^c_1 T^T \quad (20)$$

식 (19)에서 x_{c2}/y_{c2} 하고 식 (20)을 대입하고 정리하면 카메라 C_1 에서의 4원수 공간을 이용한 3차원 해를 구하는 식은 (21)로 유도할 수 있게 된다.

$$z_{cl} = a/(b - c), x_{cl} = \frac{x_{cl}}{f_{x1}} z_{cl}, y_{cl} = \frac{y_{cl}}{f_{y1}} z_{cl} \quad (21)$$

여기서,

$$a = f_{x2} y_{c2} {}^c_1 t_x - f_{y2} x_{c2} {}^c_1 t_y$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{f_{\varphi}}{f_{x_2}} x_{il} x_{l2} 2 \left(\frac{c}{cl} q_1 \frac{c}{cl} q_2 + \frac{c}{cl} q_0 \frac{c}{cl} q_3 \right) \\ &\quad + \frac{f_{\varphi}}{f_{y_1}} x_{l2} y_{il} \left(\frac{c}{cl} q_0^2 - \frac{c}{cl} q_1^2 + \frac{c}{cl} q_2^2 - \frac{c}{cl} q_3^2 \right) \\ &\quad + f_{y_2} x_{l2} 2 \left(\frac{c}{cl} q_2 \frac{c}{cl} q_3 - \frac{c}{cl} q_0 \frac{c}{cl} q_1 \right) \\ c &= \frac{f_{\varphi}}{f_{x_1}} y_{il} x_{l2} \left(\frac{c}{cl} q_0^2 + \frac{c}{cl} q_1^2 - \frac{c}{cl} q_2^2 - \frac{c}{cl} q_3^2 \right) \\ &\quad + \frac{f_{\varphi}}{f_{y_1}} y_{il} y_{l2} 2 \left(\frac{c}{cl} q_1 \frac{c}{cl} q_2 - \frac{c}{cl} q_0 \frac{c}{cl} q_3 \right) \\ &\quad + f_{x_2} y_{l2} 2 \left(\frac{c}{cl} q_1 \frac{c}{cl} q_3 + \frac{c}{cl} q_0 \frac{c}{cl} q_2 \right) \end{aligned}$$

5. 알고리즘 검증을 위한 모의실험

5.1 3차원 정보의 추출

모의실험에 사용한 로봇은 Table 1에서 a_2 와 d_4 변수를 각각 625mm으로 설정하였고 작업 대상물로는 반경 200mm를 가지는 반구(semi-sphere) 모델을 놓고 시뮬레이션을 수행하였다. 물체 좌표계는 로봇 좌표계에 대하여 x, y, z축 대하여 각각 0.14° , 0.32° , -0.45° 회전시켰고 x로 209.23mm, y로 208.37mm, z로 -664.32mm 병진 된 곳에 임의로 위치 시켰다. 핸드-아이 카메라 C_1 은 로봇 끝단 좌표계에서 $-3.2^\circ, 1.3^\circ, 2.7^\circ$ 회전과 $-10.3\text{mm}, 60.3\text{mm}, 135.7\text{mm}$ 병진 위치에 설치하였고, 카메라 C_2 는 $1.1^\circ, -2.4^\circ, 1.6^\circ$ 회전과 $9.2\text{mm}, -58.3\text{mm}, 131.6\text{mm}$ 병진 위치에 놓았다. 다음의 Fig. 5는 앞에서 유도된 모든 과정들을 거치면서 능동 스테레오 식 (21)을 적용하여 반구 형상을 복원하였고 이를 로봇 베이스 좌표계 $\{R\}$ 로 변환한 후의 결과를 보이고 있다.

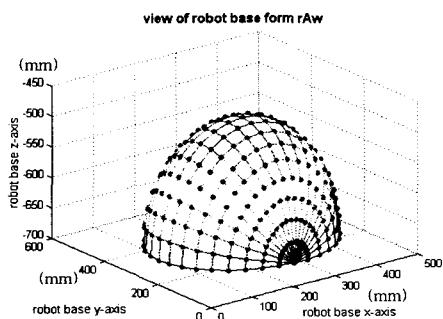


Fig. 5 Reconstruction in robot base frame

Fig. 6은 로봇 베이스 좌표계에서의 x, y, z오차를 나타낸 것인데 초기 주어진 물체 좌표계와 로봇

베이스간의 변환 $\{{}^wA\}$ 과 주어진 물체 좌표 값 $\{{}^wP\}$ 에 의한 $\{{}^wA{}^wP\}$ 와 로봇의 이동과 영상 정보로부터 구한 핸드-아이 파라미터 $\{{}^tA\}$, 로봇의 순기구학 $\{{}^tA\}$, 능동 스테레오 식으로 구한 $\{{}^tP\}$ 를 이용하여 $\{{}^wA{}^wP - {}^tA{}^tA{}^dP$ 로부터 구한 오차 값들이다.

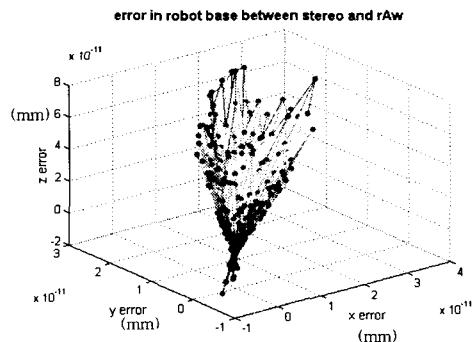


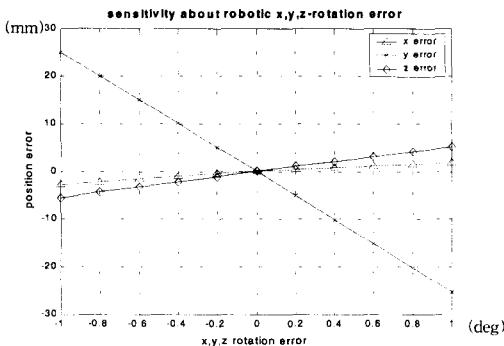
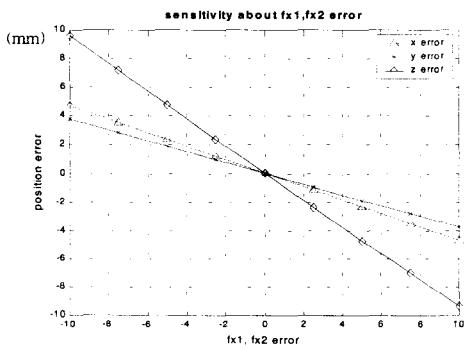
Fig. 6 Three dimensional reconstruction error

결과 그래프에서의 오차는 x, y, z 중 z값 오차가 최대를 보이지만 $-2 \times 10^{-11} \sim 8 \times 10^{-11} (\text{mm})$ 의 범위 내로 거의 0에 가깝다. 따라서 4원수 공간에서 구한 능동 스테레오 카메라의 해로부터 정확한 3차원 복원이 가능함을 확인 할 수 있다.

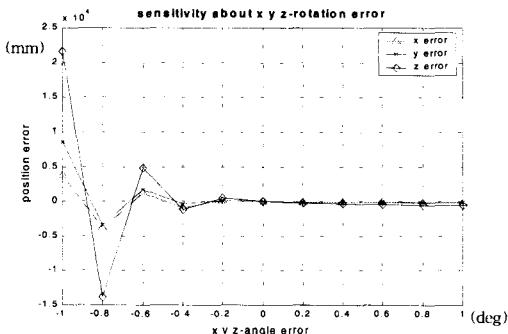
5.2 기구학적 파라미터와 3차원 정밀도 분석

로봇 기준 좌표계에 대한 3차원 정보의 재구성은 초점 거리, 로봇에서 카메라까지의 기구학적 관계 및 두 카메라간의 상대 변환 관계의 함수이다. 이를 주요 변수들에서 기인되는 오차의 경향을 분석하기 위하여 아래와 같은 실험을 수행하였다. 먼저 로봇에서 카메라까지의 회전량 오차로 인한 영향을 살펴보기 위하여 Q 회전량 오차를 -1° 에서 $+1^\circ$ 까지 0.2° 간격으로 변화 시켜 보았다.

아래의 Fig. 7은 그 결과를 보이고 있으며 오차 경향이 선형적으로 증가 또는 감소함을 확인 할 수 있다. 두 번째 중요 인자로서 카메라 초점 거리의 오차에 대하여 고찰하였다. 초점거리를 -10 에서 $+10$ 까지 $2.5(\text{pixel}/\text{mm})$ 씩 증가 시키면서 시뮬레이션을 수행 하였다. Fig. 8은 픽셀 오차의 민감도를 보이고 있다. 마찬가지로 선형적 오차 경향을 확인 할 수 있다.

Fig. 7 The sensitivity for rotate parameter β_Q Fig. 8 The sensitivity for focal length f_x, f_y

마지막으로 양안 시 간의 회전 변수로 인한 영향을 고려하는 실험을 수행하였는데 여기에서도 -1° 에서 $+1^\circ$ 까지 0.2° 간격으로 같은 실험을 수행하였고 결과는 Fig. 9와 같았다.

Fig. 9 The sensitivity for rotate parameter $\alpha_{cl}Q$

회전 오차가 -1° 에서 0.2° 를 가지는 범위에서는 오차가 진동하고 나머지 부분에서는 선형적인 특성을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 식 (21)의 스텝

레오 3차원 해의 분모 부분인 $b-c$ 가 0에 가까이 가는 특이 조건에서 발생하였음을 예측 할 수 있다. 그래서 이를 보다 자세히 살펴보기 위하여 식 (21)의 분자(a)와 분모(b-c)의 크기 변화를 그래프를 그려 보았다. Fig. 10의 (a)는 분모 부분의 크기 변화를 나타내며 (b)는 분자의 크기 변화, (c)는 3차원 위치 오차를 표시한 그래프이다.

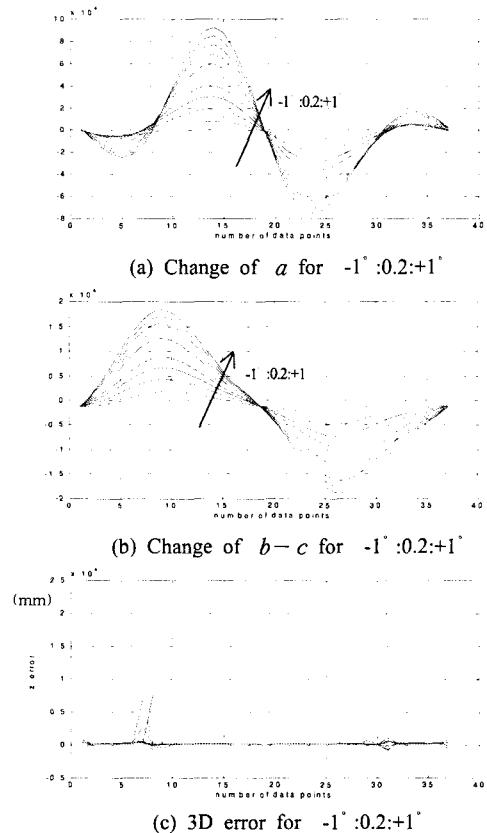


Fig. 10 Singular condition and 3D error

위의 결과로부터 특이 조건 및 분자 대 분모의 위상 변화가 일치하지 않는 분모의 위상 교차점 부근, 즉 $b-c \approx 0$ 지점에서 오차가 증폭됨을 확인 할 수 있다. 여러 번의 실험 결과로부터 도출된 또 한 가지의 검토 사항은 좁은 각도 범위 내에서도 이러한 특이 조건이 발생할 수 있다는 것이다. 따라서 정확한 능동 스테레오 시스템을 구성하기 위해서는 정확한 양안시의 변환 관계를 규명하여야 하며 이로 특이 조건을 피할 수 있을 것으로 생각된다.

6. 결론

본 논문에서는 서로 다른 초점 거리를 가지며 독립 회전 가능한 능동 스테레오 카메라를 장착한 로봇 시스템에서 대상물에 대한 3차원 정보를 정확하게 얻어낼 수 있는 일반적인 해를 4원수 공간에서 구하였다. 이를 통하여 공간상의 카메라 모델에 구속 되지 않으며 모든 자유도에 대응 할 수 있는 해를 제공하였다. 모의실험 결과로부터 제시된 4원수 공간에서 구한 능동 스테레오 모델에 대한 해가 적은 오차를 가지면서 3차원 방향 및 거리 정보를 추출 할 수 있음을 확인 하였다. 초점 거리 오차, 로봇의 기구학적 모델링 오차, 카메라간의 상대적인 변환 오차 등의 중요 인자들을 분석한 결과, 카메라 간의 상대적인 회전 오차에 의한 영향으로 인하여 3차원 해의 특이점이 발생하며 세심한 연구가 필요함을 밝혔다. 향후, 본 논문의 능동 스테레오 해를 이용한 3차원 위치 기반 시각 서보잉(Visual servoing)에서의 과도 응답 향상을 실험을 통하여 확인하고자 한다.

후기

본 논문은 2003년도 BK21사업으로 지원되었음.

참고문헌

- Allen, P. K., Yoshimi, B., Timucenko, A., "Real-time Visual Servoing," In IEEE int.Conf. Robotics and Automation, pp. 851-856, 1991.
- Espiau, B., Chaumette, F. and Rivers, P., "A New Approach to Visual Servoing in Robotics," IEEE Trans. On Robotics and Automaiton, Vol. 8, No. 6, pp. 313-326, 1992.
- Matins, H. A., Birk, J. R. and Kelly, R. B., "Camera models based on data from two calibration planes," Computer Graphics and Image Processing, Vol. 17, pp. 173-180, 1984.
- Besl, P. J. and Jain, R. C., "Three-Demensional Object Recognition," In: ACM Computing Surveys, Vol. 17, pp. 75-145, 1985.
- Do, K. M. and Lee, K. H., "An active stereo camera modeling," Journal of Control Automation and System Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 297-304, 1997.
- Kanade, T. and Han, M., "A perspective factorization method for euclidean reconstruction with uncalibrated cameras," Journal of Visualization Computer Animation, Vol. 13, No. 4, pp. 211-223, 2002.
- Kim, J. D., Cho, Y. S. and Lee, J.W., "A stability study on visual servoing using dynamic calibration," Korea Society of Prision Eengineering," Vol. 20, No. 10, pp. 82-88, 2003.
- Chou, J. K., "Quaternion Kinematics and Dynamic Differential Equations," IEEE Trans. Robotics & Automation, Vol. 8, No. 1, pp. 53-64, 1992.
- Chou, J. K. and Kamel, M., "Finding the position and Orientation of a Sensor on a Robot Manipulator Using Quaternions," Int. J. Robotics Research, Vol. 10, No. 3, pp. 240-254, 1991.

부록

4원수 연산의 정의 :

$$\mathbf{a} \circ \mathbf{b} = a_0 b_0 + b_0 \vec{a} + a_0 \vec{b} - \vec{a} \cdot \vec{b} + \vec{a} \times \vec{b} \quad (A1)$$

식 (14)의 유도 :

식 (11)에서 회전 행렬의 각 열벡터에 대하여 정리하면 아래와 같이 적을 수 있다.

$$Q_G Q_X u_i = Q_X b_i \quad (A2)$$

여기서, u_i : i'th column of I_3 (단위행렬), b_i : i'th column of Q_H , $i = 1, 2, 3$. 이다.

회전 행렬의 각 열에 대하여 재정리하면,

$$\begin{aligned} Q_G \circ Q_X \circ u_i \circ Q_X^* \circ Q_G^* &= Q_X \circ b_i \circ Q_X^* \\ (Q_X \circ Q_G \circ Q_X^*) \circ u_i \circ (Q_X^* \circ Q_G^* \circ Q_X) &= b \circ u_i \circ b^* \\ Q_G^* \circ Q_X = Q_X \circ b^* & \end{aligned} \quad (A3)$$

식 (A3)의 좌/우변에 4원수 연산을 적용하여 정리하면 식(13)이 유도되고 이를 간략화하면,

$$(\vec{H} + \vec{G}) \times \vec{X} = X_0 (\vec{H} - \vec{G}) \quad (A4)$$

식 (A4)에 식 (12)의 4원수를 대입하면,

$$\tan(\omega/2)(S_G + S_H) \times S_X = S_H - S_G \quad (A5)$$