

## 운동물체의 파라미터 추정에 필요한 대응점과 샘플링주기의 설정

### Establishment of Correspondent points and Sampling Period Needed to Estimate Object Motion Parameters

정 남 채\*, 문 용 선\*\*, 박 중 안\*\*\*  
(Nam-Chae Jung\*, Yong-Sun Moon\*\*, Jong-An Park\*\*\*)

※이 논문은 한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 조선대학교 수송기계부품  
공장자동화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음

#### 요 약

본 논문에서는 무중력하에서 자유운동하는 물체의 화상정보로부터 그 운동을 추정할 때의 특징점의 대응점을 선택과 샘플링 주기를 설정하는 방법을 제안하였다. 관성 좌표계를 우주 로봇에 내장된 카메라 좌표계로 치환하여 화상에서 구해진 정보로부터 대응점 문제를 해석하고, 대상 물체의 운동을 결정하는 각속도 vector  $\omega$ 를 구하는 것이 가능하다는 것을 시뮬레이션에 의하여 조사하였다.

또한, 특징점의 운동거리에 대한 상대오차가 양자화에 의해서 증가하기 때문에 샘플링 주기  $\Delta t$ 가 짧으면 각속도의 상대오차는 증가한다. 역으로 샘플링 주기  $\Delta t$ 가 너무 길어져도 각속도가 근사화될 때 샘플링 주기가 길기 때문에 오차가 증가한다. 한편, 정밀도는 해상도가 증가함에 따라 증가한다는 것을 확인하였다.

#### ABSTRACT

This paper deals with establishing correspondent points of feature points and sampling period when we estimate object motion parameters from image information of freely moving objects in space of gravity-free state. Replacing the inertial coordinate system with the camera coordinate system which is equipped within a space robot, it is investigated to be able to analyze a problem of correspond points from image information, and to obtain sequence of angular velocity  $\omega$  which determine a motion of object by means of computer simulation.

And if a sampling period  $\Delta t$  is shortened, the relative errors of angular velocity are increased because the relative errors against moving distance of feature points are increased by quantization. In reverse, if a sampling period  $\Delta t$  is lengthened too much, the relative errors are likewise increased because a sampling period is long for angular velocity to be approximated, and we confirmed the precision that grows according to ascending of resolution.

#### I. 서 론

최근까지의 우주개발은 유인 우주 활동이 중심을 이루었지만 우주 정거장의 구축이 자동화와 로봇화를 빼놓을 수 없게 되면서, 1985년 경부터 우주 로봇을 중심으로 한 무인 우주 개발이 가속화되고 있다(1-3).

지상의 로봇은 작업 대상이 여러 가지의 제한을 받아 정지하고 있는 것이 많지만, 무중력 상태인 우주 공간에

서 작업하는 로봇의 경우 base가 고정되어 있지 않아서 우주 로봇 자체를 제어하기가 어려울 뿐만 아니라 우주 공간에서는 고장 위성의 회수라든가 우주 궤도 상에 전개된 우주 구조물의 조립부품을 포착하면서 3차원의 자유 운동을 하는 물체를 대상으로 작업을 해야 하는 경우가 많다. 우주 로봇이 그와 같은 작업 대상을 자율적으로 다루기 위해서는 대상 물체의 3차원의 자세나 속도의 정보를 얻어야 한다.

전에는 우주 공간에서 운동 물체의 자세나 속도를 추정하는 방법으로는 센서 정보와 이미 알고 있는 특징을 matching시키거나 Kalman 필터에 의한 상태 추정법이 제안되었었다(4-6). 그러나 이러한 방법은 대상 물체의 주

\*초당산업대학교 정보통신공학과  
\*\*순천대학교 공과대학 전자공학과  
\*\*\*조선대학교 공과대학 전자공학과  
접수일자: 1997년 3월 5일

된 관성 모멘트의 값이나 형상 등의 파라미터를 알고 있는 기지 물체의 경우에는 적용할 수 있지만, 파손 변형 등에 의해서 파라미터가 기지 정보와 일치하지 않은 대상이나, 사전에 파라미터가 구해질 수 없는 미지 물체에는 적용할 수 없다. 즉 센서 정보를 획득하는 시각에 대상 물체의 상태를 이산적으로 추정하는 것이므로, 과거 및 현재의 상태로부터 미래의 상태를 예측하고 작업 전체를 계획한다는 것은 곤란하다. 여기서 우주 로봇의 자율화를 위해서는 미지 물체의 파라미터를 추정하고 그 운동을 예측해야 한다.

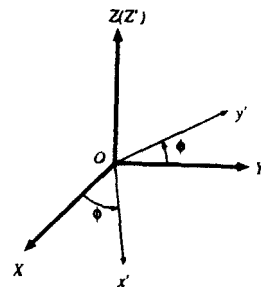
본 연구에서는 단안 카메라를 이용하여 무중력하에서 운동하는 미지 물체의 화상의 시계열로부터 대상 물체의 특징점을 추출할 수 있도록 하고, 그 화상 정보로부터 물체의 운동을 추정하는 것을 목적으로 하고 있다. 여기서는 화상의 시계열을 이용하여 화상간에 대응하는 특징점의 관계로부터 운동 파라미터를 구하여, 이것으로부터 물체의 각속도를 근사적으로 구한다. 그리고, 각속도의 시계열로부터 물체의 동력학적 파라미터를 추정한다. 지금까지의 연구에서는 화상으로부터 미지 물체의 특징점은 가려져 보이지 않는 점도 모두 얻어진 것으로 하여 운동의 추정이 이루어졌지만, 본 논문에서는 화상의 보이는 부분으로부터 보이지 않는 특징점을 추정해야 하므로, 카메라로 얻은 시계열로부터 실제로 특징점의 올바른 대응을 취하는 방법과 양자화 오차가 화상의 해상도에 미치는 영향에 대해서도 고찰한다(2, 7).

## II. 강체운동의 좌표변환

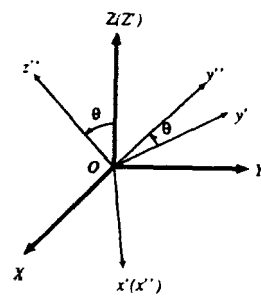
무중력하에서 강체 운동의 기본이 되는 좌표 변환은 3가지의 변수가 필요하므로 본 연구에서는 Euler 각을 이용하고자 한다. 단, 강체의 중심은 Newton의 방정식에 따라 등속 직선 운동을 하므로, 중심 회전 운동에 관하여 논술한다.

공간에 고정된 고정 좌표계  $O-XYZ$ 계의 기본 vector를  $e_x, e_y, e_z$ 라 하고, 강체에 고정된 물체 좌표계를  $o-xyz$ 라 한다. 여기서,  $Z$ 축을 중심으로 만큼 회전시킨  $\phi$ 만큼 회전시킨  $o-x'y'z'$ 계의 기본 vector를  $e'_x, e'_y, e'_z$ 라 하고,  $x'$ 축을 중심으로  $\theta$ 만큼 회전시킨  $o-x''y''z''$ 계의 기본 vector를  $e''_x, e''_y, e''_z$ 로 한다. 또한,  $z''$ 축을 중심으로  $\psi$ 만큼 회전시킨  $xyz$ 계의 기본 vector를  $e_x, e_y, e_z$ 라 할 때,  $\phi, \theta, \psi$ 만큼 각각 회전한 좌표계를 식 (2.1)과 그림 2.1에 나타낸다.

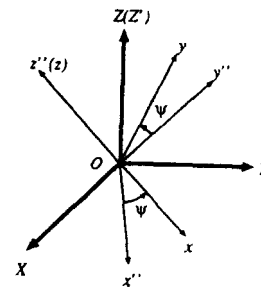
$$\begin{cases} e_x = (\cos \phi \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \sin \phi) e_x \\ \quad + (\cos \phi \sin \phi + \cos \theta \cos \phi \sin \phi) e_y \\ \quad + \sin \phi \sin \theta e_z \\ e_y = -(\sin \phi \cos \phi + \cos \theta \sin \phi \sin \phi) e_x \\ \quad - (\sin \phi \sin \phi - \cos \theta \cos \phi \sin \phi) e_y \\ \quad + \cos \phi \sin \theta e_z \\ e_z = \sin \theta \sin \phi e_x - \sin \theta \cos \phi e_y + \cos \theta e_z \end{cases} \quad (2.1)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.1 Euler angles

각속도  $\omega$ 의  $x, y, z$ 축 방향의 성분  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 를 Euler 각의 시간 미분으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ 는  $e_z, e_x$ 축을 중심으로 회전하는 각속도이므로 각속도 vector  $\omega$ 를 분해하면

$$\omega = \dot{\phi} e_z + \dot{\theta} e'_x + \dot{\psi} e''_z \quad (2.2)$$

로 표시된다. 여기서,  $e_z, e'_x, e''_z$ 를  $e_x, e_y, e_z$ 로 표시하면

$$\begin{cases} e_z = \sin \theta e'_y + \cos \theta e''_z \\ \quad = \sin \theta \sin \phi e_x + \sin \theta \cos \phi e_y \\ \quad + \cos \theta e_z \\ e'_x = \cos \phi e_x - \sin \phi e_y \\ e''_z = 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

로 쓸 수 있다.

Ⅲ. 화상에 근거한 대응점의 선택

본 논문에서는 물체의 운동을 화상으로부터 복원하는 방법으로 J. Weng 등의 2안 motion 알고리즘을 사용하여 운동을 추정한다(1, 7, 8). 대상 물체를 카메라로 들여다 볼 때, 모든 특징점 뿐만 아니라 그러한 모든 특징점의 대응도 구할 수 있는 것으로 하여 운동이 추정된다. 즉 물체가 운동할 경우 특징점이 보였다 안보였다 하는데 가능한 한 올바른 대응점을 찾아야 할 것이다.

3.1. 2안 motion의 알고리즘

카메라에 고정된 좌표계를 고정좌표계로 간주하여 X, Y, Z로 한다. 여기서 그림 3.1과 같이 O에 視點을 놓고 Z=1에 활상면이 있는 것으로 한다.

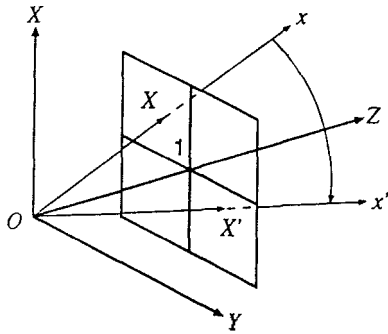


Fig. 3.1 Geometry and camera model of the setup

그리고 시각  $t_0$ 에서의 특징점  $x$ 와  $t_1$ 에서의  $x'$ 의 좌표를

$$\begin{cases} x = (x, y, z)^T \\ x' = (x', y', z')^T \end{cases}$$

로 하면,  $x, x'$ 을 화면에 투영한 점  $X, X'$ 의 좌표는

$$\begin{cases} X = (u, v, 1)^T = \left( \frac{x}{z}, \frac{y}{z}, 1 \right)^T \\ X' = (u', v', 1)^T = \left( \frac{x'}{z'}, \frac{y'}{z'}, 1 \right)^T \end{cases} \quad (3.2)$$

로 쓸 수 있다. 여기서  $(u, v)$ 와  $(u', v')$ 은 점의 화상좌표를 표시한다. 또한 점의 위치 vector와 화상 vector 사이에는

$$x = zX, x' = z'X' \quad (3.3)$$

의 관계가 있으므로

$$x' = R x + T \quad (3.4)$$

가 성립한다. 식 (3.3)을 식 (3.4)에 대입하면

$$z' X' = z R X + T \quad (3.5)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 물체의 중심은 카메라 좌표의 원점과 일치하는 것이 아니기 때문에  $T \neq 0$ 이다. 그러면 식 (3.5)에 의하여

$$\frac{z'}{\|T\|} X' = R \frac{z}{\|T\|} X + \hat{T} \quad (3.6)$$

로 쓸 수 있다.

단,

$$\hat{T} = \frac{T}{\|T\|} \quad (3.7)$$

이다. 여기서,  $T$ 와 같은 방향을 갖는 단위 vector  $T_s$ 를 식 (3.6)의 양변에 곱하면

$$\frac{z'}{\|T\|} T_s \times X' = \frac{z}{\|T\|} T_s \times R X \quad (3.8)$$

가 구해진다. 다음 식 (3.8)의 양변에 좌로부터  $X'^T$ 를 곱하면

$$X'^T T_s \times R X = 0 \quad (3.9)$$

이 된다. 여기서  $E = T_s \times R$ 이라고 하면  $X'^T E X = 0$ 이 성립한다. 이  $E$ 는 essential 파라미터라 부르며  $3 \times 3$  행렬이다. 또한  $E$ 는 8 자유도이기 때문에 이것을 단순히 구하기 위해서는 8점 이상의 대응점이 필요하다는 것을 알 수 있다.

화상으로부터 얻어진 대응점들  $X_i = (u_i, v_i, 1)^T, X'_i = (u'_i, v'_i, 1)^T, (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 로 한다. 단  $n$ 은 대응점의 수이다( $n \geq 8$ ).  $X_i$ 가 모두 1개의 강제 위의 점이라면, 모든 점에 대하여 식 (3.9)가 당연히 성립한다. 잡음이 있는 경우를 고려하여

$$A = \begin{bmatrix} u_1 u'_1 & u_2 u'_2 & \dots & u_n u'_n \\ u_1 v'_1 & u_2 v'_2 & \dots & u_n v'_n \\ v_1 u'_1 & v_2 u'_2 & \dots & v_n u'_n \\ v_1 v'_1 & v_2 v'_2 & \dots & v_n v'_n \\ v_1 & v_2 & \dots & v_n \\ u'_1 & u'_2 & \dots & u'_n \\ v'_1 & v'_2 & \dots & v'_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3.10)$$

$$h = [h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, h_8, h_9]^T \quad (3.11)$$

로 하고  $\|Ah\|$ 가 최소인  $h$ 를 구하게 되는데,  $h$ 는  $A^T A$ 의 최소 단위 고유 vector이다. 그러면  $E$ 는

$$E = [E_1 E_2 E_3] = \sqrt{2} \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

로 표시된다.

다음으로  $T = \pm T_s$ 인 단위 vector  $T_s$ 를 구하는데,  $\|E^T T_s\|$ 가 최소가 되는  $T_s$ 를 구하는 것이 좋다. 즉,  $T_s$ 는  $EE^T$ 의 최소 단위 고유 vector이다. 따라서, 구해진  $T_s$ 에 대하여

$$\sum_{i=1}^n (T_s \times X_i) \cdot (EX_i) < 0 \quad (3.13)$$

이면  $T_s = -T_s$ 로 된다.

$$W = [W_1, W_2, W_3] = \begin{bmatrix} E_1 \times T_s + E_2 \times E_3 \\ E_2 \times T_s + E_3 \times E_1 \\ E_3 \times T_s + E_1 \times E_2 \end{bmatrix}^T \quad (3.14)$$

를 구한다. 만약 오차가 없으면  $R=W$ 인데,  $\|R-W\|$ 가 최소가 되는  $R$ 을 구한다.

$$B = \sum_{i=1}^3 B_i^T B_i \quad (3.15)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & (I_i - W_i)^T \\ I_i - W_i & [W_i + I_i]_{\times} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

인  $4 \times 4$ 의 행렬  $B$ 를 구한다. 단  $I = [I_1, I_2, I_3]$ 는  $3 \times 3$ 의 단위행렬이다. 또한  $[\cdot]_{\times}$ 는

$$[(x_1, x_2, x_3)^T]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix}$$

로 한다. 이 행렬  $B$ 의 최소 단위 고유 vector  $q$ 는 화상간의 회전변환을 나타내는 4원의 수로서 회전 방향 vector  $n$ 과 회전각  $\theta$ 를 구하는데 사용한다. 이 4원의 수로는  $q = (q_0, q_1, q_2, q_3)^T$ 로 표시되며

$$\begin{cases} q_0 = \cos(\alpha/2) \\ q_1 = \sin(\alpha/2)n_x \\ q_2 = \sin(\alpha/2)n_y \\ q_3 = \sin(\alpha/2)n_z \end{cases} \quad (3.17)$$

의 관계가 있다. 따라서, 2안 motion의 알고리즘에 의하여 4원의 수가 얻어지면, 이 4원의 수로부터 회전축  $n$ 과 회전각  $\alpha$ 를 구할 수 있다.

### 3.2. 대응점의 선택

본 연구에서는 화상정보로부터 운동 파라미터를 구해야 하므로, 화상으로부터 얻어진 특징점의 대응을 취하는 것이 중요하게 된다. 만약에 물체 표면 전체의 특징점을 카메라로 찍을 수가 있고 올바른 대응점이 얻어진다고 하면, 2안 motion에 의하여 용이한 운동 파라미터를 구할 수 있다.

화상정보에서 시각  $t_0$ 와  $t_1$ 의 간격이 작으면 그 시간에 특징점이 이동한 거리도 짧아지게 된다. 우선 시각  $t_0$ 에서  $m$ 개의 특징점이 추출되었다고 하고 그 활상면상의 점

을  $X_1, X_2, \dots, X_m$ 으로 한다. 그리고, 시각  $t_1$ 에서  $n$ 개의 특징점이 추출되었다고 하고, 그 활상면상의 점을  $X'_1, X'_2, \dots, X'_n$ 으로 한다. 여기서 시각  $t_0$ 에서의 특징점  $X_1$ 에 대하여 시각  $t_1$ 에 관한 특징점 중에서 거리가 가장 가까운 점을 선택하는 것을  $X_m$ 까지 순차적으로 반복한다. 그러면, 시각  $t_0$ 의 모든 특징점이 대략 대응점을 나타내게 된다. 그러나, 여기서 문제가 되는 것은 시각  $t_0$ 에서는 보이고, 시각  $t_1$ 에서는 보이지 않게 된 점에서 대응점을 취할 수 있다든지, 시각  $t_0$ 에서 다른 특징점이  $t_1$ 에서와 동일한 특징점을 대응점으로 하여 선택하기도 한다. 역으로 시각  $t_1$ 에서 특징점  $X'_1, X'_2, \dots, X'_n$ 에 대응하여 시각  $t_0$ 에서 특징점 중 거리가 가장 가까운 점을 선택한다. 그리고 같은 방법으로 선택한 점들끼리 일치하면 그것을 대응점의 후보로 한다. 그러면 2 화상간에 있어서 1대 1의 대응이 이루어진다.

결국 이동거리에 대하여 특징점끼리의 거리가 짧으면 잘못된 대응점이므로 후보내에서 삭제하는 것을 생각해야 한다. 잘못된 대응점의 영향을 다루는 것은 식 (3.10), (3.11)에서와 같이  $\|Ah\|$ 가 최소인 단위 vector  $h$ 의 값을 구하고, 구해진  $h$ 를 사용하여  $Ah = a$ 를 계산한다.

오차를 보정하면 모든 대응이 올바르게  $\|a\| = 0$ 로 되지만, 잘못된 대응점이 포함되어 있으면  $h$ 의 값도 변하여  $a$ 의 요소는

$$a_k = u_k u'_k h_1 + u_k v'_k h_2 + u_k h_3 + v_k u'_k h_4 + v_k v'_k h_5 + v_k h_6 + u'_k h_7 + v'_k h_8 + h_9 \neq \quad (3.18)$$

로 된다. 여기서  $a_k$ 의 값에 대하여 범위를 정하여  $a_k$ 가 그 범위를 벗어날 경우 잘못된 대응점이므로 삭제한다.

우선 대응점 문제를 해석하기 위해서는 시각  $t_0, t_1$ 에서 구해진 화상간에 점의 이동 거리가 짧아야 하므로, 어떻게 해서든 대응점이 취해질 만큼의 짧은 시간 간격으로 하지 않으면 안된다.

그러나 시각  $t_0, t_1$ 에서 구해진 화상에서 점의 이동 거리가 어느 정도 길어지면 양자화에 의한 오차의 영향이 커진다. 우선은 2 화상간의 평균 각속도 vector가 구해지지 않은 곳에서는 운동을 추정할 수 없다. 결국 양자화 오차의 영향이 적게 되는 정도의 시간 간격을 취해야 한다. 올바른 대응점을 구하려고 하면 양자화 오차의 영향이 크게 되는 각속도 vector가 구해지고, 양자화 오차의 영향을 적게 하면 대응점이 구해지지 않게 된다.

## IV. 시뮬레이션

본 연구에서는 다음에 표시한 조건으로부터 전과 같은 물체의 특징점과 대응을 모두 구하고, 가려진 곳을 고려하고, 해상도도 충분히 높게 하고, 대응점 문제를 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다.

시뮬레이션 방법은 우선 무중력하에서의 Newton 및

Euler의 운동방정식에 의하여 운동하는 물체위의 특징점을 임의의 주기로 샘플링하고 화상 위의 점으로 변환한다. 그리고 화상으로부터 물체의 각속도 vector의 시계열을 구한다.

4.1. 실험조건

우선 시가계는 초점거리 16[mm], 촬상면의 크기를 10[mm]×10[mm]로 하고 해상도는 512×512나 1024×1024로 한다. 그리고 대상물체의 형상으로는 직경 800[mm]의 구체를 고려하여 구표면의 랜덤한 위치에 100개의 특징점을 정한다. 또한 대상물체의 중심은 카메라 좌표계의 Z축상의 1500[mm] 떨어진 위치에 정지하고 있는 것으로 한다.

추정하는 동물체를 모델로 다음과 같은 것을 취급한다. 우선 대상물체의 주된 관성 moment 값은

$$I_x = 50 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

$$I_y = 40 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

$$I_z = 10 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

로 하고, 각 운동량 L의 크기를

$$L^2 = 2200 \text{ [kg}^2\text{m}^4\text{rad}^2\text{/s}^2\text{]}$$

로 하였다. 각 운동량 vector L은 그림 4.1에서 카메라 좌표계의 Z축 방향을 향하여 있고, 또한 t=0에서 각속도 vector ω는 물체 좌표계로

$$\omega(t=0) = \begin{bmatrix} -0.9219544 \\ 0.0000000 \\ 0.8660254 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \text{rad/s} \\ \text{rad/s} \\ \text{rad/s} \end{bmatrix}$$

로 하고, 그 때 카메라 좌표계에 대한 물체좌표계의 자세를 Euler각으로

$$\phi = 90.00 \text{ [deg]}$$

$$\theta = 79.36 \text{ [deg]}$$

$$\psi = -90.00 \text{ [deg]}$$

로 설정하였다.

여기서 이 운동이 어떠한 형태인지를 표시한다. 그림 4.2에 고정좌표계에 나타난 각속도 성분, 그림 4.3에 물체의 자세의 변화를 나타낸다.

4.2. 샘플링 주기의 영향

가려진 곳을 고려하여 모든 특징점이 구해진 대응을 취한다고 할 때, 해상도를 512×512로 하고, 화상의 샘플링 주기 Δt를 0.1[s], 0.3[s], 0.5[s], 0.7[s], 1.0[s]의 경우로 했다. 그 결과를 각속도 vector로 표시하여 그림 4.4~4.7에 나타내었다. 이러한 결과가 어느 정도 실제의

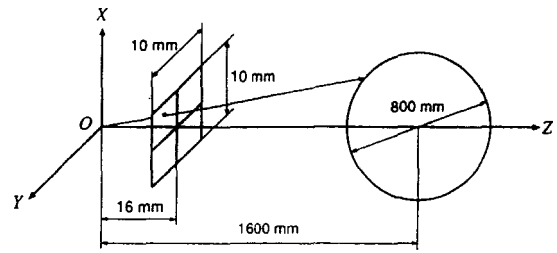


Fig. 4.1 Camera model

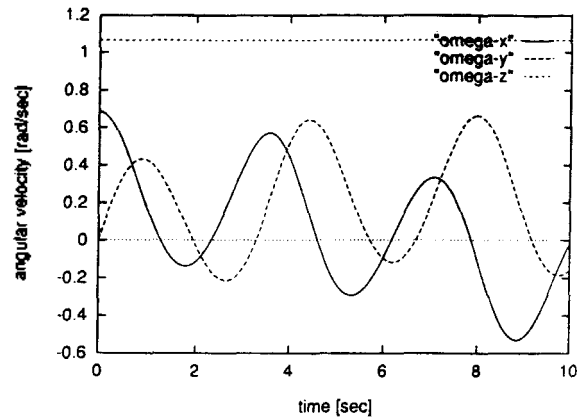


Fig. 4.2 Angular velocity of the body

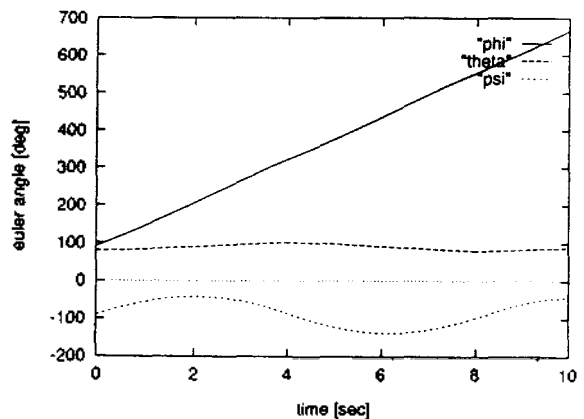


Fig. 4.3 Posture of the body(euler angle)

값에 가까운가를 평가하기 위해 상대 오차를 구한다. 시뮬레이션에 의하여 생성된 모델의 각속도 vector를 ω<sub>true</sub>로 하고 본 실험에서 구해진 각속도 vector를 ω로 한다.

이 때 평균오차 e를

$$e = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\|\omega_{true}(t_k) - \omega(t_k)\|}{\|\omega_{true}(t_k)\|} \tag{4.1}$$

로 정의한다.

그리고 각 샘플링 주기에 대하여 평균오차의 변화를 그림 4.8에 나타낸다. 이 결과로부터 샘플링 주기가 짧으

변 각속도의 오차가 크게 됨을 알 수 있다. 이것은 특징점의 이동거리에 대하여 양자화에 의한 상대 오차가 크게 되기 때문이다. 또한 역으로 샘플링 주기가 길게 될 때에도 오차가 커지게 된다. 이것은  $\omega$ 를 근사화할 때  $\Delta t$ 가 커지기 때문이다. 여기서 양쪽의 영향이 적은 최적의 샘플링 주기에서  $\omega$ 를 근사화해야 한다.

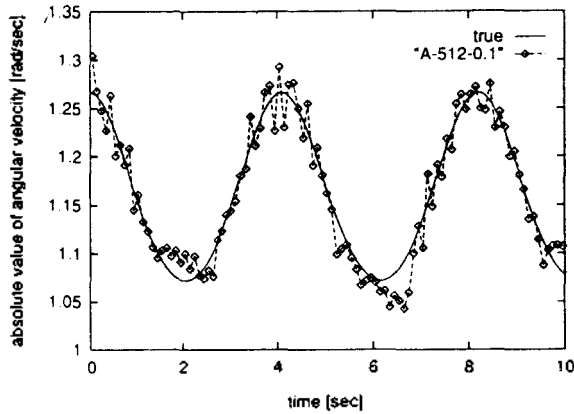


Fig. 4.4 Sequence of  $\omega$  in case of resolution  $512 \times 512 (\Delta t = 0.1 [s])$

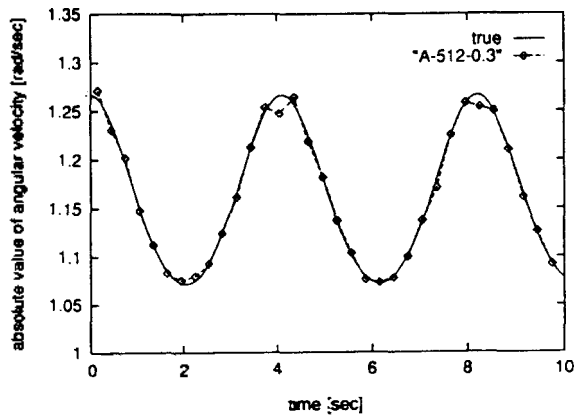


Fig. 4.5 Sequence of  $\omega$  in case of resolution  $512 \times 512 (\Delta t = 0.3 [s])$

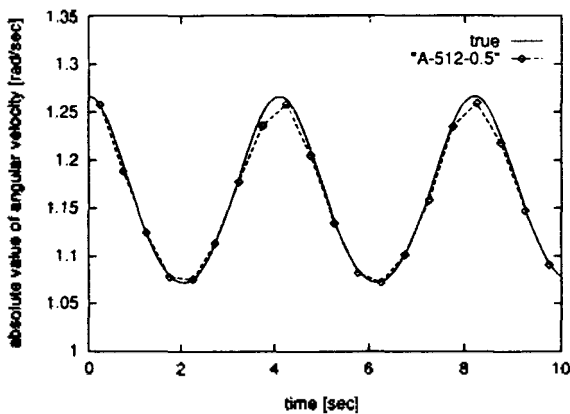


Fig. 4.6 Sequence of  $\omega$  in case of resolution  $512 \times 512 (\Delta t = 0.5 [s])$

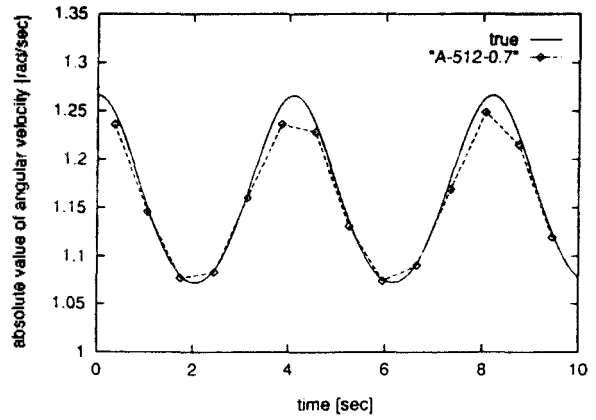


Fig. 4.7 Sequence of  $\omega$  in case of resolution  $512 \times 512 (\Delta t = 0.7 [s])$

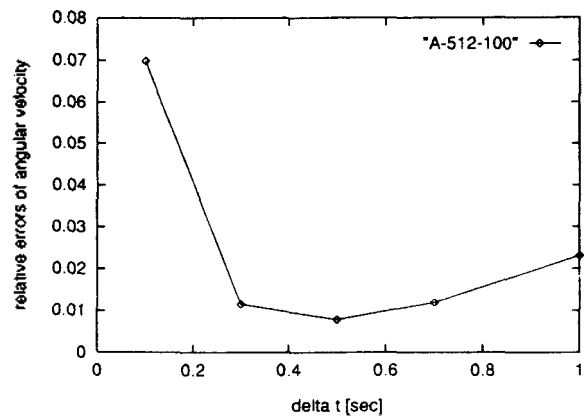


Fig. 4.8 Relative errors of angular velocity about  $\Delta t$

### 4.3. 가려진 곳의 영향

특정점의 대응은 취할 수 있다고 가정하여 가려진 곳이 미치는 영향에 관하여 논술한다. 우선 특정점의 가려진 부분과 보이는 부분을 판별하는 방법을 나타낸다.

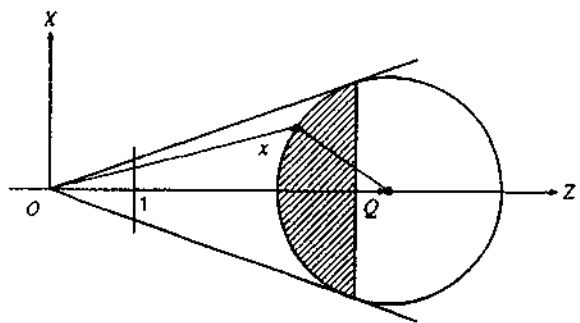


Fig. 4.9 Visible feature points

카메라 좌표계로부터 보이는 물체의 특징점의 위치 vector를  $x$ , 중심의 위치 vector를  $Q$ 로 하여

$$x^T(x-Q) \leq 0 \tag{4.2}$$

을 만족하는 점만을 추출하면, 가려진 부분은 제거되고 보이는 부분의 특징점만이 구해진다. 여기서 카메라에 비치는 부분의 표면적을 점검하기로 한다.  $OQ = d$ 로 하면 표면적  $S$ 는

$$\begin{aligned}
 S &= 2\pi \int_{r^2/d}^r \sqrt{r^2 - x^2} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}}\right)^2} dx \\
 &= 2\pi \int_{r^2/d}^r dx \\
 &= 2\pi r^2 \left(1 - \frac{r}{d}\right)
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

의 식으로 표시할 수 있다. 이 경우  $d = 1600$  [mm],  $r = 400$  [mm]이기 때문에 카메라로 보이는 부분의 표면적은 전 표면적의 37.5%로 되고, 구할 수 있는 특징점의 수도 37.5%로 감소된다. 여기서 가려진 곳을 고려할 경우를 샘플링 주기  $\Delta t = 0.3$  [s],  $0.5$  [s],  $0.7$  [s]로 하는데, 그 결과를 그림 4.10~4.12에 나타낸다. 단, 보이는 점에 관한 대응은 올바르게 취한 것으로 한다. 이러한 결과로부터 물체의 이면은 카메라로 취할 수 없기 때문에 精度가 떨어진다는 것은 당연하다. 이것은 구해진 특징점의 수가 감소될 뿐 아니라 그 특징점이 한 쪽으로 치우치게 되어 양

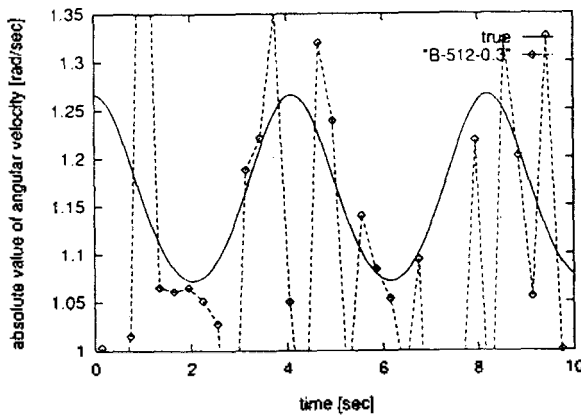


Fig. 4.10 Sequence of  $\omega$  from only visible feature points in case of resolution  $512 \times 512$  ( $\Delta t = 0.3$  [s])

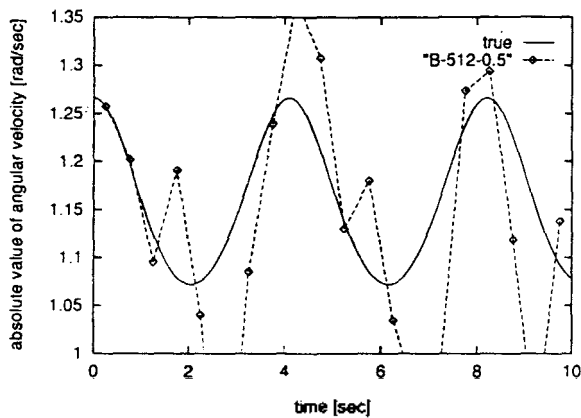


Fig. 4.11 Sequence of  $\omega$  from only visible feature points in case of resolution  $512 \times 512$  ( $\Delta t = 0.5$  [s])

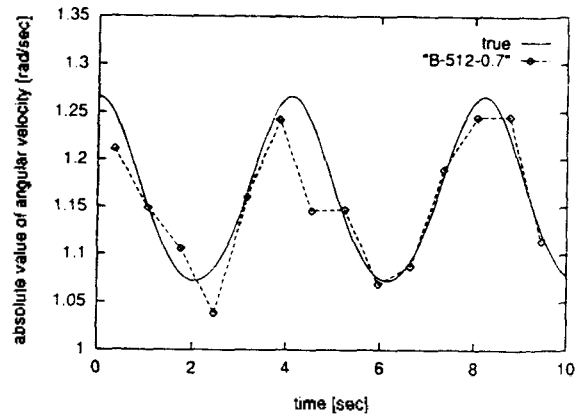


Fig. 4.12 Sequence of  $\omega$  from only visible feature points in case of resolution  $512 \times 512$  ( $\Delta t = 0.7$  [s])

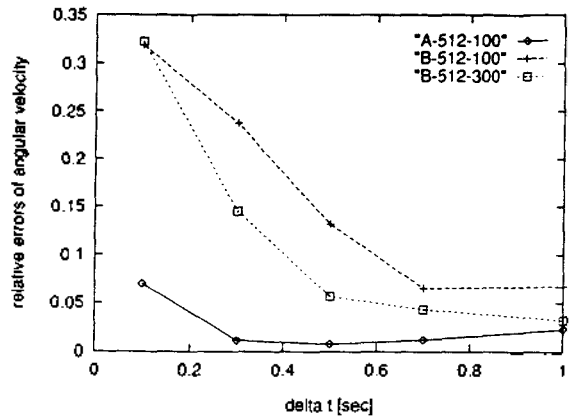


Fig. 4.13 Relative errors of angular velocity about  $\Delta t$

자화 오차에 의한 영향을 크게 받게 된다. 또한 같은 조건에서 특징점의 수를 300개로 증가시켜 시뮬레이션을 하고 평균오차를 조사하였다. 그 결과를 그림 4.13으로 나타내었는데, 단순히 특징점의 수를 증가시킨 것만으로는 정도가 상승하지 않는다는 것을 알 수 있다.

#### 4.4. 해상도의 영향

위에서 설명한 것처럼 가려진 것에 의해서 정도가 상당히 떨어진다는 것을 알았지만, 피할 수 없는 문제이므로 해결하지 않으면 안된다.

그것을 해결하는 2 가지 방법이 있는데, 하나는 특징점의 수를 증가시키는 것이고 또 하나는 해상도를 상승시키는 것이다. 그러나 특징점의 수를 증가시킨다는 것은 한도가 있으며, 또한 특징점을 증가시키면 점들의 간격이 짧게 되어 대응점 문제를 해결하는 것이 어렵게 된다. 여기서는 해상도를 상승시켜서 정도를 향상시키는 것에 관해서 조사한다. 해상도를 상승시키는 것에도 한계가 있으므로 실현가능한 범위로서  $1024 \times 1024$ 로 하여 실험을 하였다. 그 결과를 그림 4.14( $\Delta t = 0.5$  [s]), 그림 4.15( $\Delta t = 0.7$  [s])로 나타낸다. 또한 평균 오차를 구한 결과에 샘플링 주기와 가려진 곳의 영향을 고려하여 그림 4.16에

나타낸다.

이 결과로부터 해상도를 상승시키면 상당히 정도가 상승된다는 것을 알 수 있으며, 양자화 오차에 의한 영향이 어느 정도 큰가를 알 수 있다. 또한 그림 4.15, 그림 4.16 으로부터 회전이 작은 운동의 경우 각속도의 근사화가 어렵다는 것도 알았다. 그러나 이와 같이 해상도를 상승시킨 결과 실제값에 상당히 근사했다고 말할 수 있다.

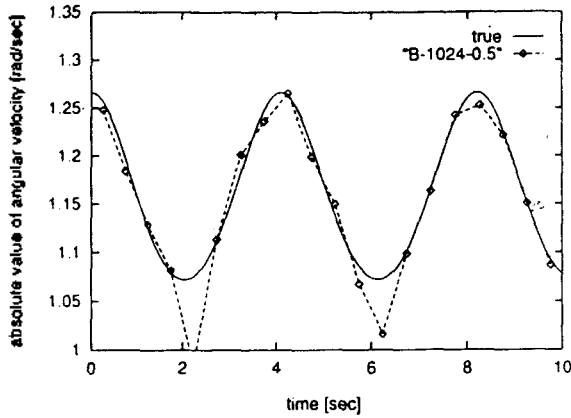


Fig. 4.14 Sequence of  $\omega$  from only visible feature points in case of resolution  $1024 \times 1024$  ( $\Delta t = 0.5$  [s])

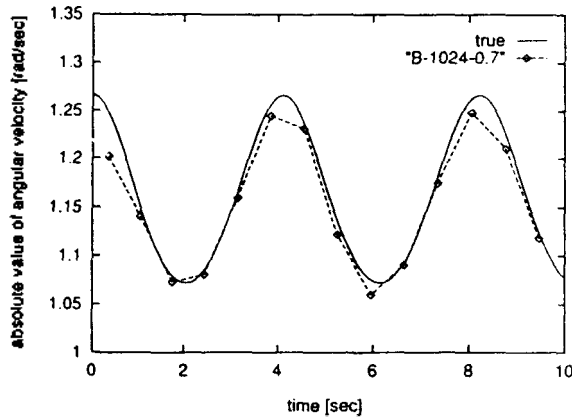


Fig. 4.15 Sequence of  $\omega$  from only visible feature points in case of resolution  $1024 \times 1024$  ( $\Delta t = 0.7$  [s])

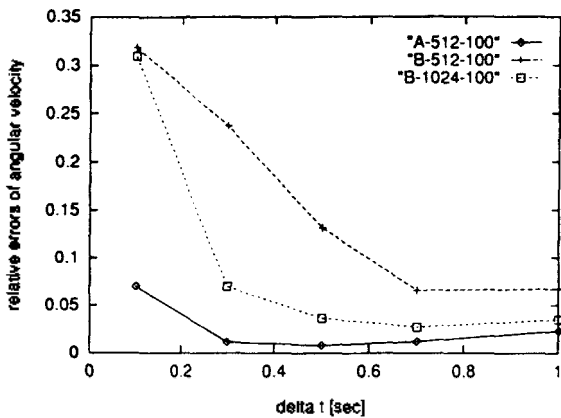


Fig. 4.16 Relative errors of angular velocity about  $\Delta t$

#### 4.5. 대응점 문제

본 논문에서 제안한 방법에 의하여 구해진 결과를 나타내는데  $a_k$ 의 범위를  $a_k^2 < 10^{-3}$ 으로 하였다. 본 실험에서는 대응점 후보를 찾는 단계에서 화상 획득의 시간 간격을 0.02[s]로 하고 운동추정에 필요한 샘플링 주기는 1[s], 0.3[s], 0.5[s], 0.7[s], 1.0[s]로 하여 시뮬레이션을 하였다.

우선 제안한 방법으로 구해진 대응점의 수와 실제로 보이는 모든 대응점의 수를 비교한 결과를  $\Delta t = 0.5$  [s], 7[s]에서만 그림 4.17, 4.18에 표시하였다. 이 결과로부터 실제의 대응점 수와 거의 같은 정도의 대응점을 구할 수 있으므로 본 방법이 타당하다고 할 수 있다.

여기서 대응점 문제를 포함하여 시뮬레이션한 결과를 그림 4.19, 4.20에 나타내었다. 또한 평균오차를 구한 결과도 샘플링 주기와 해상도를 고려하여 그림 4.21에 나타내었다.

이 결과로부터 본 연구에서 제안한 방법에 의하여 대응점 문제를 해석할 수 있는 각속도 vector의 시계열을 구할 수 있었다. 그러나 이 방법에 의하여 구할 수 있는 대응점의 수는 실제의 대응점의 수보다 적고 구한 각속도에도 영향을 미치고 있다.

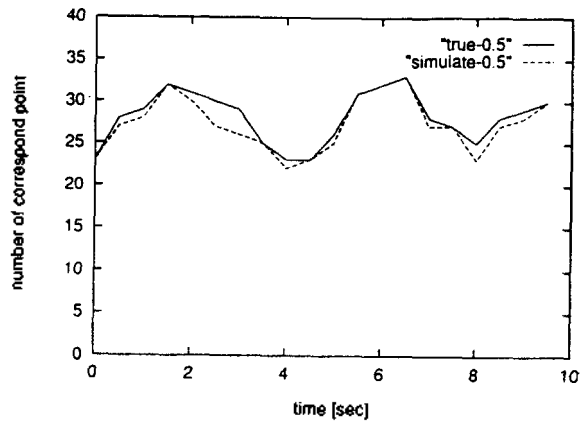


Fig. 4.17 Number of correspond points ( $\Delta t = 0.5$  [s])

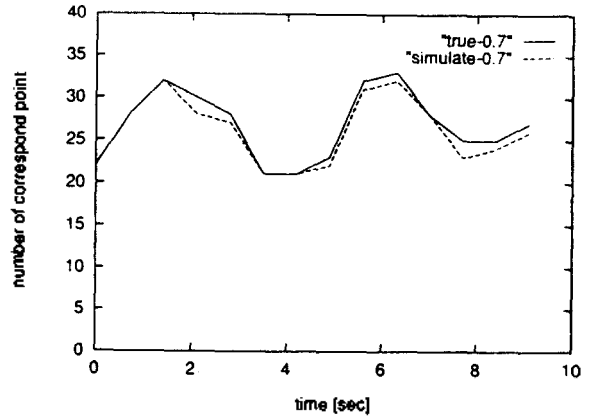


Fig. 4.18 Number of correspond points ( $\Delta t = 0.7$  [s])



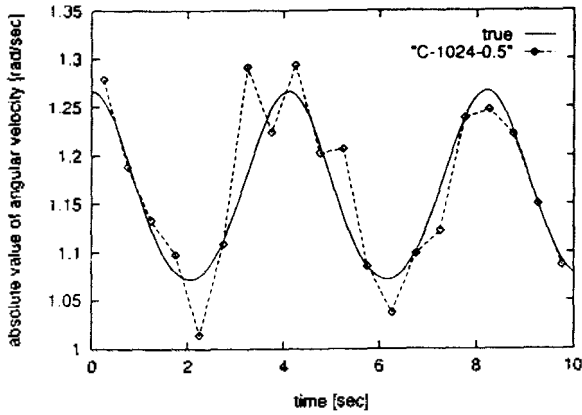


Fig. 4.19 Sequence of  $\omega$  from solving correspondence of feature points in case  $1024 \times 1024 (\Delta t = 0.5 [s])$

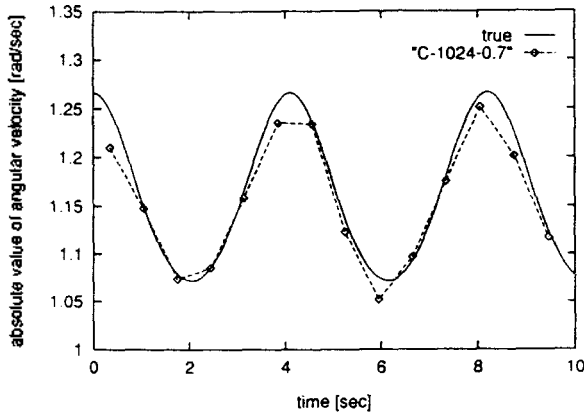


Fig. 4.20 Sequence of  $\omega$  from solving correspondence of feature points in case  $1024 \times 1024 (\Delta t = 0.7 [s])$

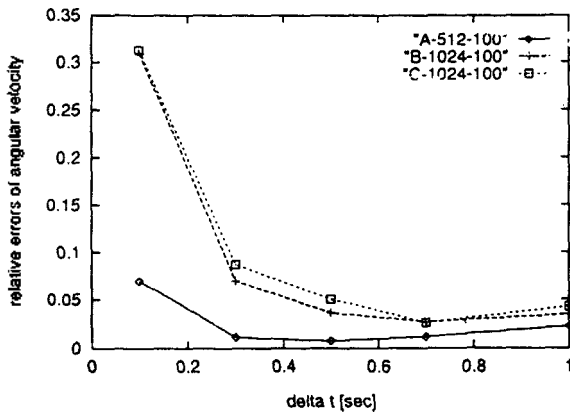


Fig. 4.21 Relative errors of angular velocity about  $\Delta t$

V. 결 론

본 논문에서는 무중력하에서 자유운동하는 물체에 대한 화상정보에 근거하여 그 운동을 추정할 때 특징점의 대응점 문제를 해결하는 방법을 제안하였다. 또한 관성

좌표계를 우주 로봇에 내장된 카메라 좌표계로 치환하여 화상에서 구해진 정보로부터 대응점 문제를 해석하고, 대상 물체의 운동을 결정하는 각속도 vector의 시계열을 구하는 것이 가능하다는 것을 시뮬레이션에 의하여 확인하였다. 또한 지금까지는 그다지 중요시하지 않았던 가려진 곳의 영향에 관해서도 검토하였다.

그러나, 본 연구에서는 카메라로부터 특징점을 화상 추출할 수 있다고 가정하여, 그 이하의 문제에 관해서 고찰하였지만 실화상으로부터 특징점을 추출할 때의 잡음의 영향을 고려하지 않고 시뮬레이션 단계에서의 평가가 이루어졌다. 또한 양자화 오차에 의한 영향이 크고 화상 처리의 연구 분야에 너무 많이 의존한다. 더구나 물체의 이면이 보이지 않는 것이 특징점 추출 및 운동 추정에 방해되는 큰 문제점이다. 그러나 우주에서 로봇이 자율적으로 미지 물체를 취급하는 경우 화상에 의한 정보 정도 밖에 없다는 것을 고려한다면 본 연구와 같은 분야의 연구가 필요하게 될 것이다.

참 고 문 헌

1. J. Weng, T. S. Huang, and N. Ahuja, "3-D Motion Estimation, Understanding, and Prediction from Noisy Image Sequences," *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell.*, vol. PAMI-9, no. 3, pp. 370-388, 1987.
2. "스페이스, 知能を身に着け宇宙に飛び立つ," *日経メカニカル*, pp. 18-30, 1990.
3. 独, "世界における宇宙ロボットの研究開発動向", *計測と制御*, Vol. 28, No. 12, pp. 5-10, 1989.
4. R. Y. Tsai and T. S. Huang, "Estimating 3-D motion parameters of a rigid planar patch," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-29, pp. 1147-1152, 1981.
5. R. Y. Tsai, T. S. Huang, and W. L. Zhu, "Estimating 3-D motion parameters of a rigid planar patch, II: Singular value decomposition," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-30, pp. 525-534, 1982.
6. J. Q. Fang and T. S. Huang, "Some experiments on estimating the 3-D motion parameters of a rigid body from two consecutive image frames," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAMI-6, pp. 547-554, 1984.
7. 坂和, "宇宙ロボットの制御," *計測と制御*, vol. 30, no. 5, pp. 400-405, 1991.
8. J. Weng, T. S. Huang, and N. Ahuja, "Motion and Structure from Two Perspective Views: Algorithms, Error Analysis, and Error Estimation," *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intell.*, vol. PAMI-11, no. 5, pp. 451-476, 1989.

▲정 남 채(Nam Chae Jung)



1984년 2월:조선대학교 공과대학 전자공학과(공학사)  
 1987년 2월:조선대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1992년 8월:조선대학교 대학원 전자전공(공학박사)  
 1996년 3월~현재:초당산업대학교 정보통신공학과 전임강사

※주관심분야:Digital 신호처리, Robot 공학, 의용생체 전자공학

▲문 용 선(Yong Sun Moon)



1989년 2월:조선대학교 대학원(공학박사)  
 1992년 3월~현재:순천대학교 공과대학 전자공학과 조교수

※주관심분야:시각영상처리, Visual servo control, Robot 공학

▲박 종 안(Jong An Park)



1975년:조선대학교 공과대학 전자공학과(공학사)  
 1986년:조선대학교 공과대학 전기공학과(공학박사)  
 1983년~1984년:미국 Massachusetts 주립대학교 전기&전자공학과 객원교수  
 1990년~1991년:영국 Surrey 대학 전기&전자공학과 객원교수

1975년~현재:조선대학교 공과대학 전자공학과 교수  
 ※주관심분야:Digital 신호처리, Vison 시스템, 패턴인식