

論文95-32B-5-13

## 물체의 운동패턴을 이용한 로봇트 팔의 자기보정

### (Self-Calibration of a Robot Manipulator by Using the Moving Pattern of an Object)

桂 泳 喆 \*

(Young Chul Kay)

#### 요 약

본 논문에서는 로봇트가 운동 물체의 운동 파라미터를 추정하는 동안, 그 로봇트의 링크 파라메트를 자율적으로 보정하는 새로운 방법을 소개한다. 물체운동의 추정은 로봇트 팔의 선단에 부착된 스테레오 카메라를 이용하여 행한다. 본 보정 방식은, 정교하게 제작된 다른 어떤 외부의 보정기구에도 의존함이 없이, 단지 운동물체의 운동을 여러 각도에서 관측함으로써 로봇트의 보정을 행할 수 있다는 점에서 기존의 다른 보정 방법과 상당히 다르다. 미소오차 모델을 개발하여 로봇트의 측정오차를 로봇트의 링크 파라메터 오차와 물체의 운동 파라메터의 함수로 표현한 후, 참(true) 측정치를 표현하는 측정 방정식을 유도한다. 이 측정 방정식과 실제의 운동패턴과의 차이를 최소화 하도록 측정 방정식에 포함된 위의 두종류의 파라메터를 추정함으로써 로봇트의 보정 및 이에 따른 물체운동의 추정도 동시에 행한다.

#### Abstract

This paper presents a new method for automatically calibrating robot link (kinematic) parameters during the process of estimating motion parameters of a moving object. The motion estimation is performed based on stereo cameras mounted on the end-effector of a robot manipulator. This approach significantly differs from other calibration approaches in that the calibration is achieved by simply observing the motion of the moving object ( without resorting to any other external calibrating tools) at numerous and widely varying joint-angle configurations. A differential error model, which expresses the measurement errors of a robot in terms of robot link parameter errors and motion parameters, is developed. And then a measurement equation representing the true measurement values is derived. By estimating the above two kinds of parameters minimizing the difference between the measurement equations and the true moving pattern, the calibration of the robot link parameters and the estimation of the motion parameters are accomplished at the same time.

#### I. 서 론

\* 正會員, 弘益大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Hong-ik Univ.)

※ 이 연구는 92년도 한국 과학 재단 연구비 지원에 의한 결과임(과제번호: 923-0800-009-2)

接受日字: 1994年5月27日, 수정완료일: 1995年4月29日

최근까지 로봇트 팔의 정확도를 개선하기 위하여 많은 노력이 행하여져 왔다. 이중에는 정확도를 개선하기 위한 디자인 tool로서 오차모델을 이용하는 방식과<sup>1,2,1</sup>, 이와는 별도로 kinematic 오차를 보정하기 위하

여 센서를 이용하는 방식이 있다.<sup>[3,4]</sup> 센서를 이용하는 대부분의 보정 방법은 특별한 보정기구 (calibration tool)가 필요하며<sup>[4,5]</sup>, 이 보정기구는 보정이 필요할 때면 언제 어디서든지 로봇트 팔에 의하여 쉽게 이용될 수 있도록 준비가 되어 있어야 한다. 그러나 작업환경에 따라서는 이러한 보정기구가 항상 준비되지 못할 뿐만아니라, 사용하기에도 어려운 경우가 종종 생긴다. 따라서 이와같은 작업 임무를 위하여서는 보정기구에 의존하는 주기적인 기존의 보정방식 보다는 보정기구에 의존하지 않고 로봇트를 연속적으로 보정하는 방식이 더욱 바람직하다.

본 논문에서는 어떠한 외부의 보정기구에도 의존하지 않고 로봇트 팔을 보정하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 본 방식은 미지의 운동을 하고있는 운동물체를 단순히 관측함으로써 보정을 행하며, 그 결과 로봇트 팔을 보정할 수 있을 뿐만아니라 또한 동시에 미지의 물체운동도 추정하게 된다. 특히 본 논문에서는 그림 1에서와 같이 스테레오 카메라가 보정하고자 하는 로봇트의 선단 (end-effector)에 부착되어 있고, 물체는 외부의 힘이 작용하지 않는 자유공간(free space)에서 운동하고 있는 로봇트/시각 시스템 (robot/vision system)을 고려한다. 물체의 자세 (pose: 위치와 방향)를 측정할 값의 정확도는 로봇트 팔의 정확도와 스테레오 카메라의 정확도에 상당히 영향을 받는다. 로봇트의 정확도는 로봇트의 (1)기하학적 (geometric) 오차, (2)비기하학적 (nongeometric) 오차, (3)로봇트 선단과 카메라 사이의 자세 (hand/eye) 오차에 의하여 좌우되며, 카메라의 정확도는 (4)카메라의 모델링 오차, 그리고 (5)영상점 (image-plane points)의 측정 잡음 (measurement noise)에 주로 영향을 받는다. 영상점의 측정잡음은 미세한 것이 사실이나, 3차원 재생 (reconstruction) 시 이것에 의하여 야기되는 3차원 공간에서의 위치 오차는 물체가 카메라로 부터 멀리 떨어져 있을수록 더 커지게 된다. 본 논문에서 제안된 방식은 로봇트 보정을 위하여 움직이는 물체를 이용하고 있으므로, 보정을 행하는 동안 물체가 점점 카메라로 부터 멀어지기 시작하면 영상점 측정잡음의 영향도 무시할 수 없게 된다. 따라서 물체자세의 정확한 측정을 위하여서는 위의 (1),(2),(3),(4), 그리고 (5)를 모두 고려하여야 하나, (2),(3), 그리고 (4)의 오차를 줄이는 방법은 (1)에 대한 방법과 마찬가지로 각각의 모델을 설정한 후, 해당 모델 파라미터를 추정하는 동일한 방식을 이용하고 있으므로,<sup>[3,4,5,6]</sup> 본고에서는 논문의 목적상 (1)로봇트의 링크 파라미터에 존재하는 기하학적 오차와 (5)영상점 측정잡음만을 고려하기로 한다.

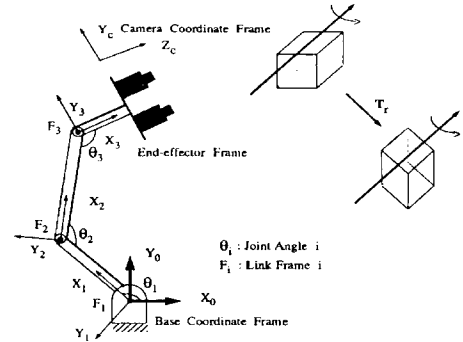


그림 1. 로봇트/시각 시스템

Fig. 1. A robot/vision system.

본 연구에서는 물체의 회전운동을 이용하여 링크 휨과 조인트 각도를 우선적으로 보정한다. 링크 휨과 조인트 각도가 보정되고 나면, 나머지 2 종류의 링크 파라미터인 링크 상쇄 (link offsets)와 링크 길이 (link lengths)를 물체의 병진운동(translation)을 이용하여 보정한다.

회전운동은 일반적인 운동<sup>1)</sup>으로 부터 쉽게 분리될 수 있다. 외부에서 토크(torque)가 가해진 상태에서의 회전운동의 형태는 대단히 복잡하므로 최신의 추정 방법을 이용하여도 직접적으로 추정하기가 매우 어렵다. 대부분의 운동 추정 (motion estimation) 알고리즘은 짧은 시간 동안에는 외부에서의 토크가 거의 없다고 현실적으로 가정함으로써 이와같이 복잡한 추정 문제를 해결한다.<sup>[7,8]</sup> 외부의 힘이 작용하지 않는 자유공간 (free space)에서의 회전운동은 등속도 회전운동 (constant rotation) 또는 등세차운동 (constant precession)이나,<sup>[7]</sup> 본 논문의 목적상 여기에서는 등속도 회전운동만 고려하기로 한다.

## II. 물체 자세의 미소 오차 모델

물체 자세 (object pose)의 측정의 정확도는 로봇트 팔의 정확도와 컴퓨터 시각(computer vision)의 정확도에 의하여 영향을 받음을 그림 1로부터 쉽게 알 수 있다. 본 절에서는 로봇트의 링크 파라미터와 스테레오 카메라의 영상점 (image-plane points)에 존재하는 미소량의 오차가 물체 자세의 측정에 미치는 영향에 대하여 분석하고, 이것을 설명하는 미소 오차

1) 일반적인 운동이란 회전운동과 병진운동이 혼합된 운동을 의미한다.

모델 (differential error model) 을 유도한다.

그림 1 에서 보듯이 로보트의 각 링크(link)에 Denavit-Hartenberg 관례에 따라 링크 좌표계 (link frame)  $F_i$  가 부착되어 있다고 가정한다<sup>2)</sup>. 좌표계  $\{i-1\}$ 에 대한 좌표계  $\{i\}$ 의 homogeneous 변환은, (흔히 링크 변환(link transformation) 이라고도 함). 다음과 같은 일반적인 형태를 갖게 된다<sup>[9]</sup> :

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \sin \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 볼 수 있듯이 링크 변환  $A_i$  는 변수인 조인트 각도(joint angle)  $\theta_i$  와 다른 세 종류의 고정 파라미터인 링크 뒤틀림(link twist)  $\alpha_{i-1}$ , 링크 길이(link length)  $a_{i-1}$ , 링크 상쇄(link offset)  $d_i$  로 정의되어 있다.

로보트의 기지 좌표계(base frame)에 대한 물체 좌표계<sup>3)</sup> (object frame)의 변환,  ${}^0T_n$ ,은 각 링크 변환  $A_i$  와 카메라 좌표계를 기준으로한 물체 좌표계의 변환인  ${}^cH_n$  를 연속적으로 곱하여(concatenation) 구하여 진다:

$${}^0T_n = A_1 A_2 \dots A_n A_{n+1} {}^cH_n \quad (2)$$

여기서 로보트는  $n$  조인트를 갖고 있는 것으로 가정한다. 수식 (2) 에서  $A_{n+1}$ 는 좌표계  $\{n\}$  에 대한 카메라 좌표계의 링크 변환을 의미하며, 또한  ${}^0T_n$  과  ${}^cH_n$  의 원점자 0 과  $c$  는 변환의 기준 좌표계가 각각 기지 좌표계와 카메라 좌표계 임을 뜻한다.

$A_i$  에 존재하는 4 개의 링크 파라미터에 미소량의 오차가 있다고 가정하면, 미소량의 변화  $dA_i$  가 존재하게 되고 그에 따른 참(true) 링크 변환  $A_i + dA_i$  가 된다. 고차항을 무시하면 미소량의 변화  $dA_i$  는 다음과 같은 선형 형태로 표시될 수 있다:

$$dA_i = \frac{\partial A_i}{\partial \theta_i} d\theta_i + \frac{\partial A_i}{\partial \alpha_{i-1}} d\alpha_{i-1} + \frac{\partial A_i}{\partial a_{i-1}} da_{i-1} + \frac{\partial A_i}{\partial d_i} dd_i \quad (3)$$

여기서  $d\theta_i$ ,  $d\alpha_{i-1}$ ,  $da_{i-1}$ , 와  $dd_i$  는 링크 파라미터  $\theta_i$ ,  $\alpha_{i-1}$ ,  $a_{i-1}$ , 와  $d_i$  에 존재하는 미소량의 오차를 나타낸다. 식 (1) 로 부터  $\partial A_i / \partial \theta_i$  의  $4 \times 4$  매트릭스 표현은 유도될 수 있으며,  $\theta_i$  의 단위 변화(unit change)에 대한 미소 변환 (differential transformation) 을  $\Delta_{i,\theta}$  라고 다음과 같이 정의하면

$$\frac{\partial A_i}{\partial \theta_i} \hat{=} \Delta_{i,\theta} A_i \quad (4)$$

$\Delta_{i,\theta}$  의 표현식은 다음에 의하여 구할 수 있다:

$$\Delta_{i,\theta} = \frac{\partial A_i}{\partial \theta_i} A_i^{-1} \quad (5)$$

다른 3 종류의 링크 파라미터에 대하여서도 같은 방법으로  $\Delta_{i,\alpha}$ ,  $\Delta_{i,a}$ , 그리고  $\Delta_{i,d}$  을 정의하고 식 (3)에 대입하면, 미소 변화  $dA_i$  를 미소량의 링크 파라미터 오차의 항으로 선형적으로 표현할 수 있다 :

$$dA_i = (\Delta_{i,\theta} d\theta_i + \Delta_{i,\alpha} d\alpha_{i-1} + \Delta_{i,a} da_{i-1} + \Delta_{i,d} dd_i) A_i \quad (6)$$

$A_i$  의 미소 변환을  $\delta A_i$  라고 다음과 같이 정의하면

$$dA_i \hat{=} \delta A_i A_i \quad (7)$$

$\delta A_i$  를 식 (6)에 의하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\delta A_i = \Delta_{i,\theta} d\theta_i + \Delta_{i,\alpha} d\alpha_{i-1} + \Delta_{i,a} da_{i-1} + \Delta_{i,d} dd_i = \begin{bmatrix} 0 & -\cos \alpha_{i-1} d\theta_i & -\sin \alpha_{i-1} d\theta_i \\ \cos \alpha_{i-1} d\theta_i & 0 & -da_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} d\theta_i & da_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} da_{i-1} \\ -a_{i-1} \cos \alpha_{i-1} d\theta_i - \sin \alpha_{i-1} dd_i \\ -a_{i-1} \sin \alpha_{i-1} d\theta_i - \cos \alpha_{i-1} dd_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

마찬가지로 카메라 좌표계를 기준으로한 물체 좌표계의 변환에도 영상점의 측정시 발생하는 잡음 때문에 미소량의 변화  ${}^c dH_n$  가 존재하게 된다.

$${}^c H'_n = {}^c H_n + {}^c dH_n \hat{=} (I_4 + {}^c \delta H_n) {}^c H_n \quad (9)$$

2) 본 논문에서는 특별한 언급이 없는 한 매트릭스는 italic 문자로, 벡터는 roman 문자로 표시하기로 한다.

3) 물체의 자세를 정의하기 위하여 임의의 좌표계를 물체에 부착시킨다. 이를 본 논문에서는 물체 좌표계라고 한다.

여기서  $I_4$  는  $4 \times 4$  identity 매트릭스이고  ${}^c\delta H_o$  는 식 (7) 과 같은 방법으로 정의하였다.

기저 좌표계에 대한 물체 좌표계의 참(true) 변환은  $A_i$  와  ${}^cH_o$  를 연속적으로 곱하여(concatenation) 아래와 같이 구할 수 있다.

$${}^0T_o = \left[ \prod_{i=1}^{n+1} (A_i + dA_i) \right] ({}^cH_o + {}^c dH_o) \quad (10)$$

$$\hat{=} {}^0T_o + {}^0dT_o + {}^0d^2T_o$$

여기서 앞쪽의 아랫첨자  $l$  과  $c$  는 미소량의 변화가 각각 링크 파라미터에 존재하는 오차와 카메라의 영상 좌표를 측정할 시 생기는 측정 오차에 기인한 것이라는 것을 의미한다. 고차항을 무시하면서 식 (10) 를 전개하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다:

$${}^0dT_o = \sum_{i=1}^{n+1} (A_1 A_2 \cdots A_{i-1} dA_i A_{i+1} \cdots A_{n+1} {}^cH_o) \quad (11)$$

$${}^0d^2T_o = A_1 A_2 \cdots A_{n+1} {}^c d^2H_o$$

${}^0T_o$  의 미소 변환,  ${}^0\delta T_o$  와  ${}^0dT_o$  을 식 (7) 에서와 같은 방법으로 정의하고,

$${}^0dT_o \hat{=} {}^0\delta T_o {}^0T_o, \quad {}^0d^2T_o \hat{=} {}^0\delta^2 T_o {}^0T_o \quad (12)$$

식 (7) 과 (2)를 이용하면, 식 (11) 을 다음과 같이 다시 표시할 수 있다:

$${}^0\delta T_o = \sum_{i=1}^{n+1} U_{i-1} \delta A_i U_{i-1} \quad (13)$$

$${}^0dT_o = U_{n+1} {}^c\delta H_o U_{n+1}$$

여기서

$$U_{i-1} \hat{=} (A_1 A_2 \cdots A_{i-1})^{-1} \quad (14)$$

$\delta A_i$  와  ${}^c\delta H_o$  는 간략화된 미소 homogeneous 변환의 형태를 갖고 있기 때문에 (식 (8) 참조), 식 (13) 의  ${}^0\delta T_o$  와  ${}^0dT_o$  는 다음과 같은 간략한 형태를 갖는다.

$${}^0\delta T_o = \begin{bmatrix} 0 & -{}^0\delta_{o,z} & {}^0\delta_{o,y} & {}^0d_{o,x} \\ {}^0\delta_{o,z} & 0 & -{}^0\delta_{o,x} & {}^0d_{o,y} \\ -{}^0\delta_{o,y} & {}^0\delta_{o,x} & 0 & {}^0d_{o,z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

미소 변환  ${}^0\delta T_o$  는 영상점의 측정시 존재하는 측정 잡음에 의한 것이며, 식 (15) 과 같은 형태로 6 개의 성분으로 구성되어 있다. 미소 변환  ${}^0\delta T_o$  에 대한 분석이 이미 행하여져 있으며, 그 결과에 의하면  ${}^0\delta T_o$

의 6 개의 성분은 측정 잡음에 의해 선형적으로 표시될 수 있음이 밝혀졌다.<sup>[11]</sup> 식 (15)의  ${}^0\delta T_o$  의 6 개의 성분은 식 (8)를 (13)에 대입함으로써 계산할 수 있다:

$${}^0\delta_{o,x} = \sum_{i=1}^{n+1} [ (n_{i-1} m_i^2) \Delta\theta_i + (n_{i-1} m_i^3) \Delta a_{i-1} ]$$

$${}^0\delta_{o,y} = \sum_{i=1}^{n+1} [ (o_{i-1} m_i^2) \Delta\theta_i + (o_{i-1} m_i^3) \Delta a_{i-1} ] \quad (16)$$

$${}^0\delta_{o,z} = \sum_{i=1}^{n+1} [ (a_{i-1} m_i^2) \Delta\theta_i + (a_{i-1} m_i^3) \Delta a_{i-1} ]$$

$${}^0d_{o,x} = \sum_{i=1}^{n+1} [ \{ (n_{i-1} m_i^1) + (P_{i-1} \times n_{i-1}) \cdot m_i^2 \} \Delta\theta_i + (n_{i-1} m_i^2) \Delta d_i + (n_{i-1} m_i^3) \Delta a_{i-1} + [ (p_{i-1} \times n_{i-1}) \cdot m_i^3 \} \Delta a_{i-1} ]$$

$${}^0d_{o,y} = \sum_{i=1}^{n+1} [ \{ (o_{i-1} m_i^1) + (P_{i-1} \times o_{i-1}) \cdot m_i^2 \} \Delta\theta_i + (o_{i-1} m_i^2) \Delta d_i + (o_{i-1} m_i^3) \Delta a_{i-1} + [ (p_{i-1} \times o_{i-1}) \cdot m_i^3 \} \Delta a_{i-1} ]$$

$${}^0d_{o,z} = \sum_{i=1}^{n+1} [ \{ (a_{i-1} m_i^1) + (P_{i-1} \times a_{i-1}) \cdot m_i^2 \} \Delta\theta_i + (a_{i-1} m_i^2) \Delta d_i + (a_{i-1} m_i^3) \Delta a_{i-1} + [ (p_{i-1} \times a_{i-1}) \cdot m_i^3 \} \Delta a_{i-1} ]$$

여기서  $n_{i-1}$ ,  $o_{i-1}$ ,  $a_{i-1}$  와  $p_{i-1}$  는  $U_{i-1}$  의 column 벡터이고,

$$U_{i-1} = \begin{bmatrix} n_{i-1} & o_{i-1} & a_{i-1} & p_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

벡터  $m_i^1$ ,  $m_i^2$  와  $m_i^3$  는 다음과 같이 정의된다.

$$m_i^1 = (0, -a_{i-1} \cos \alpha_{i-1}, -a_{i-1} \sin \alpha_{i-1})^t$$

$$m_i^2 = (0, -\sin \alpha_{i-1}, \cos \alpha_{i-1})^t$$

$$m_i^3 = (1, 0, 0)^t$$

식 (10) 과 (12) 로 부터,

$${}^0T_o = (I_4 + {}^0\delta T_o + {}^0dT_o) {}^0T_o \quad (17)$$

$$= (I_4 + {}^0\delta T_o) {}^0T_o$$

식 (16) 과  ${}^0\delta T_o$  를 구성하는 6 개의 성분을 설명하는 관계식을 (<sup>[11]</sup> 참고) 식 (17) 에 대입하면, 물체 좌표계의 참 변환  ${}^0T_o$  을 링크 파라미터에 존재하는 미소량의 오차와 영상점의 측정잡음으로써 표시할 수 있다.

### III. $\theta_i$ 와 $a_{i-1}$ 의 보정:

식 (16)을 분석하여 보면 회전 성분은  $\Delta\theta_i$  와

$\Delta a_{i-1}$  에만 영향을 받고, 위치 성분은 4 종류의 링크 파라미터 모두에 의해 선형적으로 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 위치 성분의 각각을 구성하는 4 개의 항을 조사하여 보면,  $\Delta\theta_i$  와  $\Delta a_{i-1}$  를 포함하는 항은  $U_{i-1}$  의 위치 벡터  $p_{i-1}$  도 포함하고 있기 때문에 다른 2 개의 항 보다 더 영향력이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 정확한 보정을 위하여서는 조인트 각도  $\theta_i$  와 링크 휨  $a_{i-1}$  의 정확도에 더 중점을 두어야 한다. 그러므로 물체의 회전 운동만을 이용하여  $\theta_i$  와  $a_{i-1}$  을 우선적으로 보정하고, 그다음에 정확하게 보정된 조인트 각도와 링크 휨 을 기반으로 하여 링크 상쇄(link offset) 와 링크 길이(link length) 를 보정하는 것이 바람직하다.

1. Quaternion 의 성질

본 논문에서는 quaternion 으로 회전 매트릭스(rotation matrix)를 표현한다.<sup>[12]</sup> 단위(unit) quaternion  $q = (q_1, q_2, q_3, q_4)'$  는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} q_1 &\hat{=} \eta_1 \sin \frac{-\theta}{2}, & q_2 &\hat{=} \eta_2 \sin \frac{-\theta}{2} \\ q_3 &\hat{=} \eta_3 \sin \frac{-\theta}{2}, & q_4 &\hat{=} \cos \frac{-\theta}{2} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서  $(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$  는 회전축 방향으로의 단위 벡터이고  $\theta$  는 회전 각도이다.

또한 다음과 같이 회전운동을 표시하는 일반적인  $3 \times 3$  매트릭스  $[a_{ij}]$  로 부터도 quaternion 을 쉽게 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} q_4 &= \pm \frac{1}{2} (1 + a_{11} + a_{22} + a_{33})^{1/2} \\ q_1 &= \frac{1}{4q_4} (a_{23} - a_{32}) \\ q_2 &= \frac{1}{4q_4} (a_{31} - a_{13}), & q_3 &= \frac{1}{4q_4} (a_{12} - a_{21}) \end{aligned} \quad (19)$$

quaternion 표현 방식을 이용하는 장점 중의 하나는 다음과 같다: 두 개의 회전 매트릭스가 곱하여 질 때, 그 결과 만들어지는 매트릭스에 해당하는 quaternion 은 각각의 회전 매트릭스에 해당하는 quaternion 으로 부터 직접 구할 수가 있다. 즉,

$$R(q^*) = R(q')R(q) \quad (20)$$

이면

$$q^* = \begin{bmatrix} q_4' & q_3' & -q_2' & q_1' \\ -q_3' & q_4' & q_1' & q_2' \\ q_2' & -q_1' & q_4' & q_3' \\ -q_1' & -q_2' & -q_3' & q_4' \end{bmatrix} q \quad (21)$$

위와 같은 경우 quaternion 표현 방식을 이용하지

않고 그외의 표현방식을 이용하면, 결과 매트릭스에 해당하는 회전 파라미터  $(\theta, \psi, \phi, k)$  는 각각의 회전 매트릭스에 해당하는 회전 파라미터에 의해 상당히 복잡하게 구성되는 비선형 방정식을 풀어야 구할 수가 있다. 본 논문에서는 이와같은 quaternion 표현 방식의 간편함 때문에 회전운동의 표현방식으로서 quaternion 을 채택하기로 한다.

2. 측정 모델의 Quaternion 표현

본 절에서는 물체 좌표계의 참 방향(true orientation)을 quaternion 표현방식으로 표시한다. 식 (17)에 있는 homogeneous 변환에서 회전 부분만을 취하면, 기지 좌표계에 대한 물체 좌표계의 참 방향을 구할 수 있다. 즉,

$$R_o' = (I + \delta R_o') R_o = \delta R_o' R_o \quad (22)$$

여기서

$$I + \delta R_o = \begin{bmatrix} 1 & -\delta_{o,z} & \delta_{o,y} \\ \delta_{o,z} & 1 & -\delta_{o,x} \\ -\delta_{o,y} & \delta_{o,x} & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 기지 좌표계를 의미하는 윗첨자 <sup>0</sup> 는 편의상 생략한다.  $R_o'$  과  $R_o$  는 식 (17)의 homogeneous 변환 <sup>0</sup> $T_o'$  와 <sup>0</sup> $T_o$  내의  $3 \times 3$  회전 매트릭스를 각각 나타낸다. 앞서 미소 변화  $\delta_{o,x}, \delta_{o,y},$  와  $\delta_{o,z}$  는 고정된 크기의 링크 파라미터 오차와 영상점의 랜덤오차에 기인한다고 설명하였다. 따라서 식 (15) 와 (16) 으로부터 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta_{o,x} &= {}^0\delta_{o,x} + {}^0\delta_{o,x} \\ \delta_{o,y} &= {}^0\delta_{o,y} + {}^0\delta_{o,y}, & \delta_{o,z} &= {}^0\delta_{o,z} + {}^0\delta_{o,z} \end{aligned} \quad (23)$$

회전 매트릭스  $R_o$  에 대한 quaternion  $q_o = (q_{o1}, q_{o2}, q_{o3}, q_{o4})'$  와 미소 회전 매트릭스  $I + \delta R_o$  에 대한 quaternion  $dq_o = (dq_{o1}, dq_{o2}, dq_{o3}, dq_{o4})'$  는 식 (18) 혹은 (19) 를 이용하면 쉽게 구할 수 있다. 특히,  $dq_o$  는 다음과 같이 된다:

$$\begin{aligned} dq_{o4} &\approx 1, & dq_{o1} &\approx \frac{-\delta_{o,x}}{2} \\ dq_{o2} &\approx \frac{-\delta_{o,y}}{2}, & dq_{o3} &\approx \frac{-\delta_{o,z}}{2} \end{aligned} \quad (24)$$

식 (22)에 있는  $R_o'$  에 대한 quaternion  $q_o' = (q_{o1}', q_{o2}', q_{o3}', q_{o4}')'$  은 식 (20) 과 (21), 그리고  $dq_{o4} \approx 1$  을 이용하면 다음과 같이  $q_o$  와  $dq_o$  의 항으

로 표시할 수 있다.

$$q_o' = q_o + \begin{bmatrix} q_{o4} & -q_{o3} & q_{o2} \\ -q_{o2} & q_{o1} & q_{o4} \\ -q_{o1} & -q_{o2} & -q_{o3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dq_{o1} \\ dq_{o2} \\ dq_{o3} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\hat{=} q_o \cdot Q [ dq_{o1} \quad dq_{o2} \quad dq_{o3} ]^t$$

식 (24) 와 (23) 을 이용하여,  $(dq_{o1}, dq_{o2}, dq_{o3})^t$  를 이것에 해당하는 미소 변화로 대처하면 식 (25) 는 다음과 같이 된다.

$$q_o' = q_o - \frac{1}{2} Q \begin{bmatrix} {}^0\delta_{o,x} \\ {}^0\delta_{o,y} \\ {}^0\delta_{o,z} \end{bmatrix} - \frac{1}{2} Q \begin{bmatrix} {}^0\delta_{o,x} \\ {}^0\delta_{o,y} \\ {}^0\delta_{o,z} \end{bmatrix} \quad (26)$$

식 (16) 을 이용하면, (26)의  $({}^0\delta_{o,x}, {}^0\delta_{o,y}, {}^0\delta_{o,z})^t$  을 다음과 같은 매트릭스-벡터 형태로 표시할 수 있다.

$$q_o' = q_o - \frac{1}{2} Q Q_t \cdot [ \Delta\theta_1 \cdots \Delta\theta_n \quad \Delta\alpha_0 \cdots \Delta\alpha_n ]^t - \frac{1}{2} Q [ {}^0\delta_{o,x} \quad {}^0\delta_{o,y} \quad {}^0\delta_{o,z} ]^t \quad (27)$$

여기서  $Q_t$  은 식 (16) 의  $\Delta\theta_i$  와  $\Delta\alpha_{i-1}$  의 계수로 이루어진  $3 \times 2n$  매트릭스이다.  $(\Delta\theta_1 \cdots \Delta\theta_n, \Delta\alpha_0 \cdots \Delta\alpha_n)^t$  를  $u$  로 정의하면, (27)은 다음과 같이 된다:

$$q_o'(k) = q_o(k) - \frac{1}{2} Q(k) Q_t(k) u - \frac{1}{2} Q(k) Q_t(k) N(k) \quad (28)$$

$$\hat{=} q_o(k) + \widehat{Q}(k) u + \widehat{Q}(k) N(k)$$

여기서 시간 인덱스  $k$  는 측정순간을 나타낸다. 영상점의 측정 잡음에 기인하는 미소 회전 파라미터 벡터인  $({}^0\delta_{o,x}, {}^0\delta_{o,y}, {}^0\delta_{o,z})^t$  는 측정잡음 벡터  $N$  의 선형 함수 (즉, 식(28)의  $Q_t(k)$ ) 로 매우 정확히 근사화 될 수 있음이 확인되었다.<sup>[11]</sup> 식 (28)에 의하면 기지 좌표계를 기준으로한 물체 좌표계의 참 방향을 나타내는 quaternion 표현식은 미소량의 링크 파라미터 오차,  $u$ , 와 영상점의 측정 잡음,  $N(k)$ , 에 의하여 선형적으로 표시할 수 있다.

### 3. 등속도 회전운동의 Quaternion 전파

등속도 회전운동을 나타내는 quaternion 은 다음과 같은 간단한 패턴으로 전파한다:<sup>[12]</sup>

$$q_o'(k+1) = \begin{bmatrix} k_d' & -k_z' & k_y' & -k_x' \\ k_z' & k_d' & -k_x' & -k_y' \\ -k_y' & k_x' & k_d' & -k_z' \\ k_x' & k_y' & k_z' & k_d' \end{bmatrix} q_o'(k) \quad (29)$$

$$\hat{=} F(k') q_o'(k)$$

여기서  $k' = (k_d', k_x', k_y', k_z')^t$  는 다음과 같이 정의되며,  $\tau$  는  $k+1$  과  $k$  사이의 일정한 측정간격이다.

$$k_x' = \frac{\omega_x'}{|\omega'|} \sin \frac{|\omega'| \tau}{2}$$

$$k_y' = \frac{\omega_y'}{|\omega'|} \sin \frac{|\omega'| \tau}{2} \quad (30)$$

$$k_z' = \frac{\omega_z'}{|\omega'|} \sin \frac{|\omega'| \tau}{2}$$

$$k_d' = \cos \frac{|\omega'| \tau}{2}$$

$k' = (k_d', k_x', k_y', k_z')^t$  는 삼각함수에 의하여 정의될지라도, 식 (29) 자체는 삼각함수가 포함되지 않은 간단한 선형의 형태가 된다는 것은 주목할 만하다. 링크 파라미터만을 보정하기 위하여서는  $\omega$  의 추정은 불필요하다. 따라서 다음절에서는 미보정된 로봇트 링크 파라미터 때문에 발생하는 일련의 부정확한 측정을 교정하기 위한 기준으로서 식 (29)의 간단한 전파 패턴을 이용한다.

### 4. Weighted Least-Squares 보정 방법

식 (28)에 의하여 표시되는 일련의 참 quaternion 은 식 (29) 에서 설명한 quaternion 의 전파 패턴을 만족하여야한다. 따라서 식 (28) 을 (29) 에 대입하여 전파시킨 후, 이것과 이에 대응하는 참 quaternion 의 제곱차(squared difference) 를 최소화 시키는 파라미터의 값을 구하면, 미지의 링크 파라미터 오차를 추정할 수 있다.

식 (29)의 quaternion 전파 패턴은  $k' = (k_d', k_x', k_y', k_z')^t$  에 의하여 식 (31) 과 같은 매트릭스-벡터 형태로 다시 표시할 수 있다.

$$q_o'(k+1) = Q_i(q_o'(k)) k' \quad (31)$$

링크 파라미터에 오차가 존재하면, 미보정된 자세로부터 계산한 측정 (nominal) quaternion  $k$  는 참 quaternion  $k'$  와 미소량의 벡터  $dk$  만큼 차이가 난다고 하면, 즉

$$k' = k + dk \quad (32)$$

식 (28)의  $q_o'(k)$  를 (31)에 대입한 후 (29) 와 (32)를 이용하여 미소 오차의 고차항을 무시하면서 전개하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$Z(k+1) = [ Q_i(q_o'(k)) : F(k) \widehat{Q}(k) - \widehat{Q}(k+1) ] \begin{bmatrix} dk \\ \vdots \\ u \end{bmatrix} + N(k+1) \quad (33)$$

$$\hat{=} H(k) X + N(k+1)$$

여기서  $Z(k+1)$ 는  $\{q_o(k+1) - Q_o(q_o(k))k\}$  로,  $N(k+1)$ 는  $\{F(k) \hat{Q}(k)N(k) - \hat{Q}(k+1)N(k+1)\}$ 이라 정의하고, 미지의 파라미터는  $X$  로 정의 하였다. 또한  $Z(k)$  는 측정치에 의하여 결정되므로 (즉,  $q_o(k)$  와  $k$ ), 그 값은 쉽게 구할 수 있다. 본 논문에서 측정 방정식이라 일컬을 식 (33) 은 일반적인 선형 측정 모델의 형태를 하고 있으므로, 미지의 파라미터 벡터  $X$  는 반복최소자승 (iterative least-squares) 추정 방법에 의하여 추정될 수 있다.

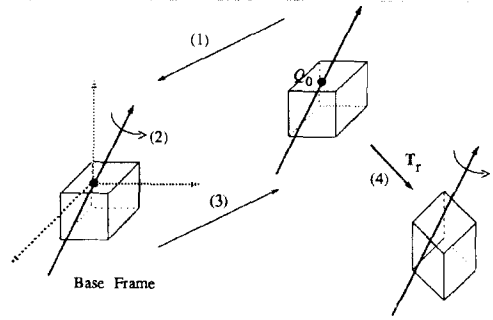


그림 2. 실제의 운동과 동등한 표현 방식  
Fig. 2. An equivalent representation of an actual motion.

IV.  $a_{i-1}$  과  $d_i$  의 보정:

조인트 각도  $\theta_i$  와 링크 휨  $a_{i-1}$  이 보정되고 나면, 나머지 2 종류의 링크 파라미터인 링크 길이  $a_{i-1}$  와 링크 상쇄  $d_i$  는 이미 보정된  $\theta_i$  와  $a_{i-1}$  를 기초로 하여 보정될 수 있다.

식 (33)에서 설명한 최소자승 (least-squares) 추정 방법에 의해, 물체의 회전운동을 나타내는 quaternion 벡터  $k$  는 정확히 추정될 수 있으며, 그 결과, 두 측정순간의 회전운동을 나타내는 회전 매트릭스도 추정된  $k$  로부터 유일하게 결정될 수 있다. 회전 매트릭스란 회전축이 항상 원점 (origin)을 통과하는 회전을 나타내기 때문에, 실제의 회전운동을 앞서 구한 회전 매트릭스를 이용하여 동등하게 표시하기 위하여 그림 2 와 같은 표현방식을 사용한다. 그림 2 에서는 물체가 회전운동과 병진운동 (translation)을 동시에 행하고 있으며  $Q_0$  는 실제의 회전축 상의 임의의 점(즉, 회전중심)의 위치이다. 이 동등한 표현식(5)은 다음의 4 단계로 이루어진다: 1)  $Q_0$  가 기저좌표계의 원점과 일치되도록 물체를 병진운동 시킨 후, 2) 실제의 회전 만큼 회전시키고, 3) 다시 원래의 위치로 병진운동 시키고, 4) 마지막으로 실제의 병진운동  $T_r(t)$  만큼 병진운동 시킨다. 시간 구간  $t$  동안에 발생한 회전을 표시하는 회전 매트릭스를  $R(t)$  라 하고, 순간  $t=0$  일때 실제의 회전축 상의 임의의 점 (즉, 회전중심)의 위치를  $Q_0$  라 하면, 순간  $t$  일때 특징점  $p_i$  의 (기저 좌표계를 기준으로 한) 위치  $P_i(t)$  는 다음과 같이 동등하게 표시될 수 있다.

$$P_i(t) = R(t)(P_i(0) - Q_0) + Q_0 + T_r(t) \quad (34)$$

여기서  $T_r(t)$  는 구간  $t$  동안에 행하여진 병진운동을 나타낸다. 식 (34) 를 이용하면 순간  $t$  에서의 회전중심의 위치  $Q(t)$  를 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$Q(t) = Q_0 + T_r(t) = P_i(t) - R(t)P_i(0) + R(t)Q_0 \quad (35)$$

특징점  $p_i$  의 기저 좌표계에 대한 위치인  $P_i(t)$  는 식 (17) 을 이용하여도 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_i(t) \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \{I_4 + {}^0\delta T_o(t)\} {}^0T_o(t) \begin{bmatrix} {}^0p_i \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \{I_4 + {}^0\delta T_o(t)\} {}^0T_o(t) \begin{bmatrix} {}^0p_i \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + [ \dot{N}(t) : 0 ]^t \quad (36)$$

여기서  $[ \cdot : 1 ]^t$  는 해당 3 차원 벡터의 homogeneous 표시를 의미한다. 식 (36) 의  ${}^0p_i$  는 특징점  $p_i$  의 물체 좌표계에서의 좌표이며, 그 값은 물체의 운동에 관계 없이 항상 일정하다.  ${}^0\delta T_o(t)$  의 성분은 식 (16)에 정의 되어 있으며,  ${}^0\delta T_o(t)$  의 표현식에서 유일한 미지수는  $\Delta a_{i-1}$  와  $\Delta d_i$  이다. 회전에 의하여서는 회전중심의 위치가 변하지 않으므로, 회전중심의 궤적  $Q(t)$  는 병진운동  $T_r(t)$  에 의하여서만 영향을 받는다. 병진운동 궤적  $T_r(t)$  가 완만하고  $n$ -차의 다항식으로 근사화 될 수 있다고 가정하면, 회전 중심의 궤적  $Q(t)$  는 다음과 같이 표시할 수 있다:

$$Q(t) = Q_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_n t^n \quad (37)$$

4) 등속도 회전 (constant rotation)의 경우는 회전축 상의 어떠한 임의의 점도 회전중심으로 생각할 수 있다.

5) 동등성은 운동전과 운동후의 물체의 자세만을 고려할 때 유지된다. 물체의 운동 경로는 이 동등한 표현이 성립되지 않는다.

식 (36)을 (35)에 대입하고 (35)와 (37)을 등식화 하면,

$$\begin{aligned} & \{ [ I_4 + {}^0\delta T_o(t) ] {}^0T_o(t) - R_k(t) \cdot \\ & \{ I_4 + {}^0\delta T_o(0) \} {}^0T_o(0) \} \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \Bigg\}_3 + R(t) Q_o \quad (38) \\ & = Q_o + b_1 t + b_2 t^2 + \dots + b_n t^n + \hat{N}(t) \end{aligned}$$

여기서  $R_k(t)$  는  $R(t)$  의 homogeneous 표현이고,  $\{ \cdot \}_3$  은 homogeneous 좌표계에서 주어진  $4 \times 1$  벡터에 대응하는 3 차원 벡터로 정의한다. 등속도 회전인 경우는 회전축 상의 어떠한 점도 회전중심  $Q_o$  로 선택할 수 있음을 고려하면,  $Q_o$  의 한 성분 (즉, z-성분) 을 고정하고 다른 2 성분을 구할 수 있다. 식 (38)은 일반적인 선형 측정 모델의 형태를 갖고 있으며, 그것의 미지의 파라미터는  ${}^0\delta T_o(t)$  에 포함된  $\Delta a_{i-1}$  와  $\Delta d_i$ ,  $Q_o$  의 2 성분, 그리고  $b_i$  이다. 따라서  $\hat{N}(t)$  의 역분산 매트릭스를 가중치로 이용한 최소자승 추정 방법을 사용하면 이러한 파라미터들을 모두 추정할 수 있다.

V. 컴퓨터 모의실험

로봇트 링크 파라미터 보정을 위해 본 논문에서 제안된 방식의 성능을 측정하기 위하여 컴퓨터 모의 실험을 행하였다. 카메라는 촛점거리(focal length)가 1 단위(unit)인 핀홀(pinhole) 카메라로 모델링 하였고, 물체는 각 변의 길이가 10 단위인 정육면체라고 가정하였으며, 한 평면 상에 포함되지 않는 물체의 4 꼭지점(vertex)을 특징점(feature point)으로 이용하였다.

특징점의 영상좌표의 측정잡음을 시뮬레이션 하기 위하여, 백색 독립 Gaussian 잡음을 2 차원의 참 영상좌표에 더하며, Gaussian 잡음의 표준 편차는 실제 카메라의 digitization 잡음을 시뮬레이션 할 수 있을 정도의 크기로 선택하였다. 2차원 영상좌표의 3차원 재생을 위하여서는 좌우 영상좌표의 corresponse 를 찾는 문제를 포함한 제반 영상처리의 문제도 함께 고려하여야 하나, 이는 본 연구의 범위를 벗어나므로 본 논문에서는 오직 영상좌표의 측정잡음만을 고려하기로 한다.

로봇트의 보정을 위하여서는 운동물체가 필요하며, 이를 위한 시뮬레이션 데이터는 다음과 같은 시나리오에 의하여 얻어졌다: 물체는 1 초당 5 도(degree)의 속도로 회전하고 z-축 을 따라 앞뒤로 1 초당 20 단위의 속도로 병진운동 한다. 이와같이 느린 속도의 운동을 가정하는 것은 영상처리에 필요한 시간을 고려하기 때문이다. 매 측정 순간 마다 로봇트의 조인트 각도를 다양하게 변화시키면서 물체 좌표계의 자세를 구하는 계산 과정을 똑같이 반복하면 충분히 많은 물체의 자세를 구할 수 있으며, 이는 본 연구에서 제안된 보정 방법을 (식 (33) 과 (38)) 위한 입력 측정 데이터로 이용된다.

그림 3 부터 그림 6 까지는 모의실험 결과를 보여주고 있다. 여기서 세로축은 참값으로 부터의 오차를 의미하며, 가로축은 사용한 측정횟수를 나타낸다. 모의실험을 위해서는 이웃하는 두 조인트 축(joint axis)이 서로 직각인 3-축 revolute manipulator 를 사용하였다. 그림 3 은 조인트 각도와 링크 휨이 각각 0.5 도의 오차가 있다고 가정할때 그것들의 참값으로 수렴하는 것을 보여주고 있다. 그림 3 에 의하면 약 30 샘플 정도 지나면 링크 파라미터들이 각기 그것들의 참

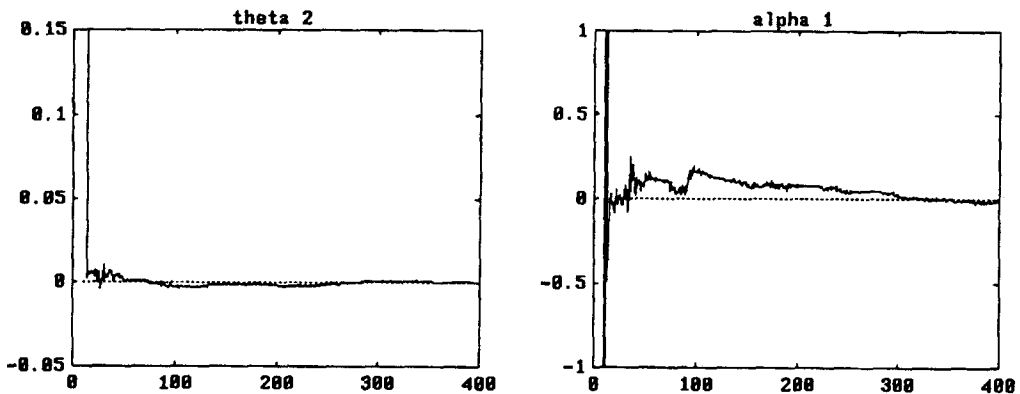


그림 3. 조인트 각도와 링크 휨의 보정 (단위: degree)  
Fig. 3. Calibration of joint angles and link twists.



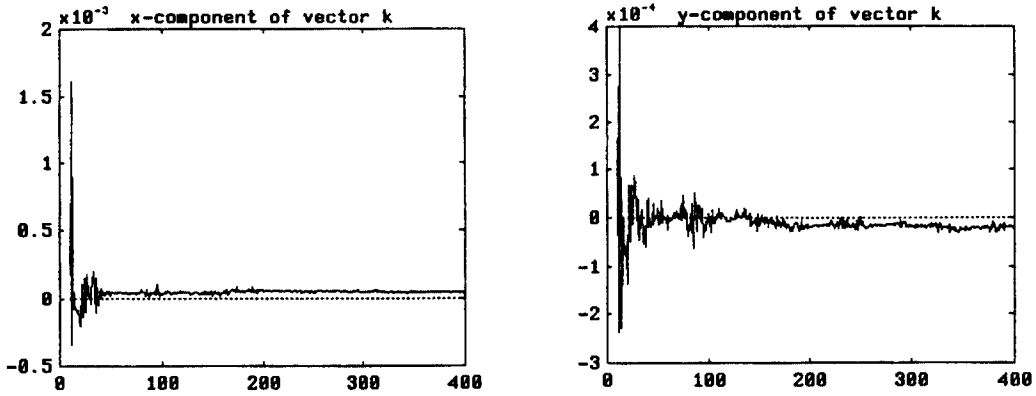


그림 4. 회전운동 파라미터의 추정  
Fig. 4. Estimation of rotational motion parameters.

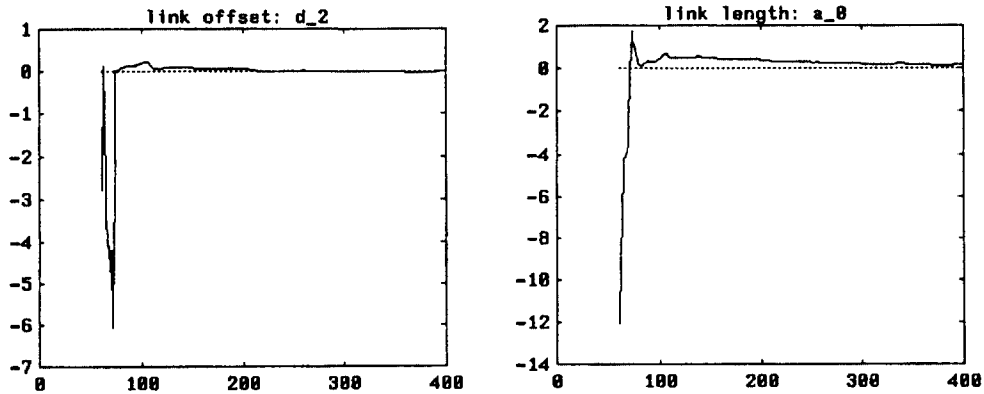


그림 5. 링크상쇄 와 링크길이의 보정  
Fig. 5. Calibration of link offsets and link lengths.

값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그림 4 는 회전운동 (rotational motion) 파라미터인 quaternion 벡터  $k$  의 수렴상태를 보여주고 있다. 벡터  $k$  는 링크 파라미터를 보정하는 도중에 가중 반복 최소자승 (weighted iterative least-squares) 방법에 의하여 얻어진다. 운동 파라미터는 처음에는 로봇트 팔의 부정확한 기하학적 구조 때문에 부정확하게 측정되나, 본 논문에서 제안된 보정 방법에 의하면 마침내는 그것의 참값으로 수렴되는 것을 그림 4 는 보여주고 있다.

그림 5 와 그림 6 은 링크 길이  $a_{i-1}$  과 링크 상쇄  $d_i$  의 보정과 이에 관계된 파라미터들의 수렴을 나타낸다. IV 절에서 언급한 바와같이, 그림 5 와 그림 6 의 파라미터는 그림 3 과 그림 4 의 파라미터들이 그것들의 참값에 매우 가까이 수렴이 된 시점인 50 샘플이 지난 후 보정되기 시작하였다. 모의실험에 사용된 로봇트 팔의 각 링크 길이와 링크 상쇄는 각각 300 단

위와 영 단위로 하였고, 링크 길이와 링크 상쇄에 존재하는 오차는 각각 모두 5 단위이라고 가정하였다. 그림 5 에 의하면 본 논문에서 제안된 보정 방법은 보정 전에 주어진 오차의 10 % 이하로 오차를 줄일 수 있음을 관측할 수 있다. 물체의 병진운동의 속도와 회전 중심의 위치를 추정한 값이 그림 6 에 나타나 있다. 모의실험의 목적상 등속도 병진운동을 가정하였다. 그림 6 을 관찰하여 보면 병진운동 파라미터는 적어도 50 샘플만 있으면 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다.

## VI. 결론

로봇트를 보정하기 위한 새로운 보정방법을 제안하였다. 어떠한 보정기구도 사용함이 없이 단지 물체의 움직임만 관측함으로써 보정을 이룰 수 있다는 점에서

본 방식은 다른 보정방식과 상당한 차이가 있다.

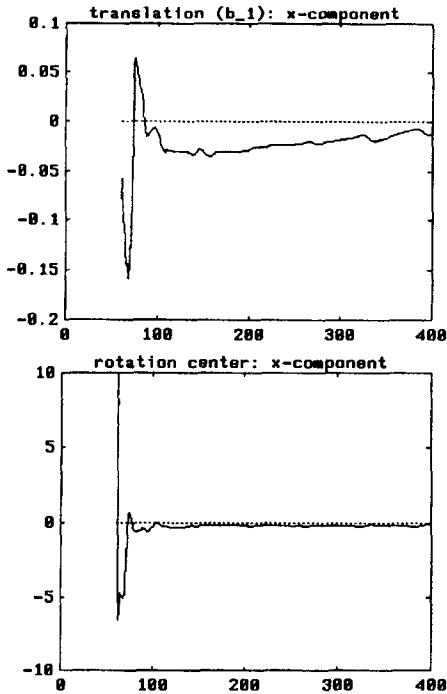


그림 6. 병진운동 파라미터의 추정  
Fig. 6. Estimation of translational motion parameters.

본 방식에서는 물체의 운동 패턴이 보정기구의 역할을 대신하고 있다. quaternion 을 도입함으로써 링크 파라미터의 기하학적 오차를 미지의 파라미터로 갖는 연립 선형 방정식을 유도하였으며, 그 결과 비선형인 회전운동을 다루는 계산상의 복잡도를 상당히 감소시켰다.

본 논문에서는 회전운동의 비교적 간단한 경우인 등속도 회전만을 고려하였다. 자유공간에서의 좀더 일반적인 회전운동은 등세차운동 (constant precession) 일 것이다.<sup>[7]</sup> 이 등세차운동에 대한 quaternion 의 전파 패턴은 이미 알려져 있으므로,<sup>[8]</sup> 물체가 등세차운동을 할 경우도 본 논문에서 제안하는 보정방식을 쉽게 확장시킬 수 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] C.H. Wu. The kinematic error model for the design of robot manipulator. In *Proceedings of the 1983 American Con-*

*trol Conference*, pages 497-502, June 1983.

- [2] S. Ahmad. Analysis of robot drive train errors, their static effects, and their compensations. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, volume RA-4, pages 117-128, April 1988.
- [3] J.L. Caenen and J.C. Angue. Identification of geometric and non-geometric parameters of robots. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1032-1037, May 1990.
- [4] G.V. Puskorius and L.A. Feldkamp. Global calibration of a robot/vision system. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 190-195, 1987.
- [5] R.Y. Tsai and R.K. Lenz. Real time versatile robotics hand/eye calibration using 3-D machine vision. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 554-561, 1988.
- [6] R.Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3-D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, volume RA-3, pages 323-344, August 1987.
- [7] J. Weng, T.S. Huang, and N.Ahuja. 3-D motion estimation, understanding, and prediction from noisy image sequences. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume PAMI-9, pages 370-388, May 1987.
- [8] G.S. Young and R. Chellappa. 3-D motion estimation using a sequence of noisy stereo images: models, estimation, and uniqueness results. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, volume PAMI-12, pages 735-759, 1990.
- [9] John J. Craig. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Addison-Wesley, 1986.

- [10] Young C. Kay and Sukhan Lee. A robust 3-D motion estimation with stereo cameras on a robot manipulator. In *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1102-1107, 1991.
- [11] Sukhan Lee and Young Chul Kay. An-accurate estimation of 3-D position and orientation of a moving object for robot stereo vision: Kalman filter approach. In *Proceedings of the 1990 International Conference on Robotics and Automation*, pages 414-419, 1990.
- [12] J.R. Wertz, editor. *Spacecraft Attitude Determination and Control*. D. Reidel Publishing Co., 1978

---

저 자 소 개



桂 泳 喆(正會員)

1957年 12月 29日生. 1980年 서울대학교 전자공학과 졸업. 1982年 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학 석사. 1991年 Univ. of Southern California 전기과 공학박사. 1991년 9월 ~ 현재 홍익대학교 전자공학과 조교수. 주관심 분야는 디지털 신호처리, 음성 및 영상 인식, 로봇트 비전