로보트 Accuracy 향상을 위한 Kinematic Identification
(Kinematic Identification For Improving Robot Accuracy)

조 선휘* 김 문상** 김 기식* 장 현상*
(S. W. Cho, M. S. Kim, K. S. Kim, H. S. Chang)

* 서울대학교 기계설계학과 (Seoul National Univ.,Dept. of M.D.P.E)
** 한국과학기술연구원 CAD/CAM실 (KAIST CAD/CAM Lab)

The effect of kinematic model choice on robot calibration is examined. This paper presents a complete formulation to identify the actual robot kinematic parameters directly from position data . The method presented in this paper applies to any serial link manipulator with arbitrary order and combination of revolute and prismatic joint.

1. 서 론

현재 사용되고 있는 로보트들은 높은 absolute positioning accuracy 를 요구하는 작업, 예를들어 off-line programing 을 필요로하는 advanced flexible manufacturing 에 사용될 수 있을 정도로 그 absolute positioning accuracy 가 좋지못하다. 그러나 대부분의 기존 로보트에 있어 positioning accuracy 보다 높은 정도의 repeatability 를 보여 주고 있기 때문에, 앞으로도 positioning accuracy 를 향상시킬 수 있는 여지가 많다.

이에 여러가지 calibration 과 compensation technique 을 이용하여 로보트의 positioning accuracy 를 향상시키려는 많은 연구(1)(2)(3)(4) 들이 행하여져 왔으나 아직까지 크게 공감을 얻고있는 방법은 제시되지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 로보트의 calibration 과 compensation 시 앞선 다른 연구들에서 제시된 문제점들을 살펴보고 얻은 결과로부터 로보트 calibration 에 적합한 kinematic model 을 선정하고, 이 선정된 kinematic model 에 기초하여 로보트의 true kinematic parameter 를 직접 구해내는 calibration algorithm 을 제시하였다.

2. Kinematic Modelling

Kinematic model의 선택은 로보트의 accuracy 를 결정하는 매우 중요한 요인중의 하나이다. Denavit & Hartenberg 의 kinematic model(9) 은 로보트 link 의 크기와 형태, 로보트 전체의 운동만을 나타내 주었다. 그러나 보다 높은 정도의 positioning accuracy 를 얻기 위해서는 kinematic model에 위의 사항 외에 하중과 온도의 변화에 따른 link deformation, 가공 및 조립시의 오차 등 여러가지 error의 요인이 modelling 되어야하나, 로보트의 accuracy 를 저하시키는 요인이 많이 modelling 될수록 보다 높은 정도의 positioning accuracy 를 보장할 수 있는 반면, 이는 한편으로 로보트 control 을 복잡하게 만들어, 로보트 작업속도의 감소를 가져온다.

따라서 로보트 calibration 후 원하는 positioning accuracy 와 작업속도를 보장하는 kinematic model의 선정에 있어, 본 연구에서는 gear backlash , link deformation 등과 같이 geometry 와 무관한 positioning error 요인들의 modelling 을 배제하고 geometry 에 기인하는 positioning error 요인만을 고려하였다. 이와 같이 geometry 에 기인하는 positioning error 요인만을 고려한 로보트 calibration 시 주로 문제되는 것이 kinematic model 의 parameter 갯수이다.

우선 Figure-1.의 Denavit & Hartenberg model을 살펴보면 link i 를 나타내는 kinematic parameter 들이 전 link i-1 의 형태와 위치에 영향을 받는다. 이들 i 번째 link parameter 의 i-1 번째 link 에 대한 종속성은 Figure-2.의 near parallel joint 의 경우 두 joint 간의 약간의 misalignment 는 다른 kinematic parameter 의 큰 변화를 야기시킨다.

특히 이 경우 Figure-2.에서 볼 수 있듯이 misalignment 의 양이 적어질수록 실제 kinematic parameter d 와 model parameter d 의 값차이가 커진다.

따라서 이 near parallel joint 의 경우를 해결하기 위하여 Denavit & Hartenberg 의 kinematic model 에 y 축방향의 회전을 추가한 5 개의 kinematic parameter 로 구성된 modified kinematic model 을 선정하였다.

Figure-1. Denavit & Hartenberg Model

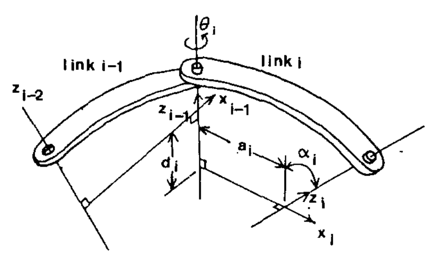
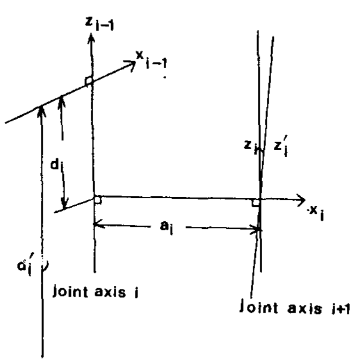


Figure-2. Near Parallel Case

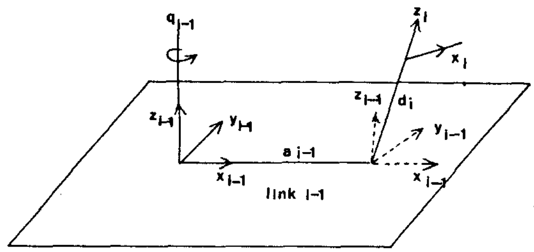


3. Modified Kinematic Modelling

앞에서 살펴본 kinematic modeling 요인들로부터 채택된 5 개의 kinematic parameter 로 구성된 kinematic model 의 i-1 번째 coordinate frame 으로부터 i 번째 coordinate frame 으로의 transformation matrix 는 다음과 같다.

$$ {}^{i-1}_{i}T = Rot(x_{i-1},\alpha_{i-1})\; Trans(x_{i-1},a_{i-1})\; Rot(y_{i-1},\beta_{i-1})\; Rot(z_i,\theta_i)\; Trans(z_i,d_i) \qquad (3\text{-}1)$$

Figure-3. Modified Kinematic Model



$$ {}^{i-1}_{i}T = $$

$$\begin{bmatrix} c\beta_{i-1}c\theta_i & c\beta_{i-1}s\theta_i & s\beta_{i-1} & s\beta_{i-1}d_i + a_{i-1} \\ c\alpha_{i-1}s\theta_i + s\alpha_{i-1}s\beta_{i-1}c\theta_i & c\alpha_{i-1}s\theta_{i-1} - s\alpha_{i-1}s\beta_{i-1}s\theta_i & -s\alpha_{i-1}c\beta_{i-1} & -s\alpha_{i-1}c\beta_{i-1}d_i \\ s\alpha_i s\theta_i - c\alpha_{i-1}s\beta_{i-1}c\theta_i & s\alpha_{i-1}c\theta_i + c\alpha_{i-1}s\beta_{i-1}s\theta_i & c\alpha_{i-1}c\beta_{i-1} & c\alpha_{i-1}c\beta_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}2)$$

4. Kinematic Identification

기본 idea 는 screw matix 를 이용하여 transformation 을 나타내는 법(5)(6)(7), 즉 joint axis 를 나타내는 unit vector ($\vec{a}$) 와 이 unit vector 에대한 rotational angle (ϕ), joint axis 가 통과하는 점 ($\vec{p}$) 를 이용하는 방법에서 얻었다. 그러나 이 개념을 직접 kinematic identification 에 응용한 Mooring(5) 의 방법은 다음과 같은 결점을 가지고 있다.

1) Screw matrix 를 이용한 joint axis의 표현은 물리적으로 이해하기 어려운 점이 있다.

2) Prismatic joint를 가진 로보트의 경우 $\vec{a}$, ϕ , $\vec{p}$ 를 구하기 위하여 각각의 joint axis 를 회전시켜야하는 방법상의 문제로 이 방법의 적용이 불가능 하다.

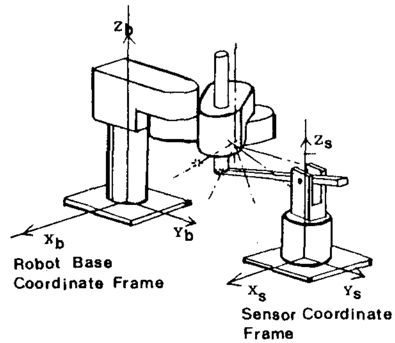
3) 동시에 end effector 상의 일직선상에 있지않은 4 점을 측정해야하는 번거로움이 있다.

4-1) Kinematic parameter identification

본 연구에서 채택한 kinematic parameter identification 방법은 각각의 joint를 회전시켜 얻은 점들의 position data 로부터 rotational plane 과 rotational center 를 estimate 하여 rotational plane 으로부터는 joint axis 에 해당하는 unit normal vector ($\vec{a}$) 를 구하고, rotational center 로부터 joint axis 가 통과하는 점 ($\vec{p}$)를 구한다. 이 구해진 $\vec{a}$, $\vec{p}$ 로부터 modified kinematic model 의 kinematic parameter 들을 구해낸다.

Figure-4. 측정 개략도에서 볼 수 있듯이 i 번째 joint 만을 회전시켜서 얻어진 position data 를 p_{ij} (j=1,....,m) 이라할때, 이 측정된 position data 로부터 i 번째 rotational plane 과 i 번째 rotational center 를 구한다. 여기서 측정된 점들의 position data 로부터 i 번째 rotational plane 과 rotational center 를 구하는 문제는 $\vec{X}_j$ 를 점

Figure-4. Measurement Process



p_{ij} 에 대응하는 rotational plane 상의 점들, $\vec{a}$ 를 rotational plane 에대한 unit normal vector, $\vec{p}_{i,c}$ 를 i 번째 rotational center 라 할 때, 다음의 constraints 를 갖는 함수 $\sum_{j=1}^{m}|\vec{X}_j-\vec{p}_{ij}|^2$ 의 최소화 문제로 해결할 수 있다.

CONSTRAINTS :

$$(\vec{X}_j - \vec{p}_{i,c})^T \cdot \vec{a} = 0$$

$$|\vec{X}_j - \vec{p}_{i,j}|^2 - r^2 = 0$$

$$|\vec{a}| = 1$$

앞에서 언급된 revolute joint 의 경우 외에 prismatic joint 의 경우는 position data 로부터 least squares 를 이용 translation line 을 구하면 이 translation line 이 prismatic joint 의 joint axis 가 된다. 앞에서 구하여진 rotational plane, rotational center, translation line 과 modified kinematic modelling 에서 제시된 link coordinate frame 을 정의하는 방법에의해 transformation matrix 를 구성하면 이 때 사용된 position data 가 sensor coordinate frame 에대한 좌표값들이므로 구하여진 transformation matrix 는 i 번째 coordinate frame 을 sensor coordinate frame 에대하여 나타내주는 transformation matrix 이다.

마지막 joint 로부터 맨 처음 joint 까지 차례로 회전시키며 얻어진 transformation matrix 들을 ${}^{i}_{s}T$, ${}^{s}_{i-1}T$, ... 라 할때 이들로부터 ${}^{i-1}_{i}T$ 를 구해보면 다음과 같다.

$$ {}^{i-1}_{i}T = {}^{i-1}_{s}T\,{}^{i}_{s}T $$
$$ = ({}^{s}_{i-1}T)^{-1}\,{}^{i}_{s}T $$

여기서 sensor coordinate frame 에대한 trnsformation matrix 로부터 ${}^{i-1}_{i}T$를 구하는 것은 robot base coordinate frame 에대한 sensor coordinate frame 의 위치가 임의적이고, sensor coordinate frame의 위치를 robot base coordinate frame 에대하여 정확히 정의하기가 어렵다는 면에서 합당하다.

4-1-1) Rotational plane estimation

평면의 일반식은 다음과 같다.

$$ Ax + By + Cz + D = 0 \qquad (4\text{-}1) $$

구해질 plane과 측정된 점들의 position 값들의 오차를 $\epsilon(x,y,z)$ 라 할때,

$$ \epsilon(x,y,z) = Ax + By + Cz + D \qquad (4\text{-}2) $$
$$ \Phi = [\, x\ y\ z\ 1\,]^T \qquad (4\text{-}3) $$
$$ \Theta = [\, A\ B\ C\ D\,]^T \qquad (4\text{-}4) $$

이되며, 식 (4-2)는 다음과 같이 정리된다.

$$ \epsilon(x,y,z) = \Phi^T\Theta = \Theta^T\Phi \qquad (4\text{-}5) $$

이 오차의 크기 $\epsilon^2(x,y,z)$와 측정된 모든 점들에서 오차의 합 Ξ 은 다음과 같다.

$$ \epsilon^2(x,y,z) = \Theta^T\Phi\Phi^T\Theta \qquad (4\text{-}6) $$
$$ \Xi = \sum_{j=1}^{m}\epsilon_j^2 = \sum_{j=1}^{m}(\Theta^T\Phi_j\Phi_j^T\Theta) = \Theta^T\Phi\Theta \qquad (4\text{-}7) $$
$$ \Phi = \sum_{j=1}^{m}\Phi_j\Phi_j^T \qquad (4\text{-}8) $$

rotational plane 과 측정된 점들의 position 값과의 수직거리 제곱의 총합 최소화 문제는, 측정된 점 p_{ij} (j=1,...,m) 에서 error 함수의 평균 gradient 값이 1 이라는 조건하에 식 (4-7)을 최소화시키는 것과 같다. 함수 ϵ 의 gradient $\nabla\epsilon$ 의 제곱 값은 다음과 같다.

$$ (\nabla\epsilon)^2 = \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial z}\right)^2 \qquad (4\text{-}9) $$
$$ \Theta^T\Psi\Theta = 1 \qquad (4\text{-}10) $$

따라서 식 (4-10)의 constraint 를 갖는 식 (4-7)의 최소화 문제는 Lagrange multiplier 를 이용하여

$$ \Phi\Theta = \lambda\Psi\Theta \qquad (4\text{-}11) $$

의 generalized eigenvalue problem 으로 만들 수 있다. 따라서 식 (4-11)로부터 구해진 eigenvalue 중 가장 적은 값의 eigenvalue 에 해당하는 eigenvector 가 구하고자하는 평면방정식의 계수가 된다. 식 (4-11)의 eigenvalue problem 을 Jacobi method 를 이용하여 풀기위하여 symetric matrix로 만들어 주면 다음과 같다.

$$ \begin{bmatrix} \sum x_j^2 & \sum x_jy_j & \sum x_jz_j & \sum x_j \\ \sum y_jx_j & \sum y_j^2 & \sum y_jz_j & \sum y_j \\ \sum z_jx_j & \sum z_jy_j & \sum z_j^2 & \sum z_j \\ \sum x_j & \sum z_j & \sum z_j & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} $$

$$ = \lambda \begin{bmatrix} 1\,0\,0\,0 \\ 0\,1\,0\,0 \\ 0\,0\,1\,0 \\ 0\,0\,0\,0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}12) $$

양변의 마지막 행으로부터 계수 D의 값을 구하면 다음과 같다.

$$ D = -\frac{A\sum_{j=1}^{m}x_j + B\sum_{j=1}^{m}y_j + C\sum_{j=1}^{m}z_j}{m} \qquad (4\text{-}13) $$
$$ = -\,(A\bar{x} + B\bar{y} + C\bar{z}\,) $$

여기서 $\bar{X},\bar{Y},\bar{Z}$ 는 측정된 점의 $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ 값의 평균 값이다. 식 (4-12)으로부터 식 (4-13)을 이용 D를 소거하면 다음과 같다.

$$ \begin{bmatrix} \sum x_j^2 - m\bar{x}^2 & \sum x_jy_j - m\bar{x}\bar{y} & \sum x_jz_j - m\bar{z}\bar{x} \\ \sum x_jy_j - m\bar{x}\bar{y} & \sum y_j^2 - m\bar{y}^2 & \sum y_jz_j - \bar{z}\bar{y} \\ \sum z_jx_j - m\bar{x}\bar{z} & \sum z_jy_j - m\bar{z}\bar{y} & z_j^2 - m\bar{z}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} $$

$$ = \lambda \begin{bmatrix} 1\,0\,0 \\ 0\,1\,0 \\ 0\,0\,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \qquad (4.14) $$

식(4-14)는 앞에서 언급된 Jacobi method 나 QR method와 같이 잘알려진 eigenvalue problem 에의해 그 해를 얻을 수 있다.

4-1-2) Rotational center estimation

Rotational center는 joint axis 상의 coordinate frame의 위치를 나타낸다. 측정된 점들의 position data 로부터 rotatioanal center를 estimate하는 것은 , 이들 측정점들을 공간상의 원에 fitting하는 것과 같다. 앞서 구해진 평면상에 측정된 점들을 투영시켜 이 평면상의 점들로부터 least squares 를 이용하여 원을 estimate 하려할때, 원의 일반식은 다음과 같다.

$$(x-g)^2+(y-h)^2=r^2 \tag{4.15}$$

식 (4-15)를 이용하기위해 sensor coordinate frame 과 원점은 일치하고 Z축이 구하여진 평면의 unit normal vector 와 일치하는 S′coodinate frame 을 가정한다. estimate된 평면상에 투영된 점들을 이 가상의 S′ coodinate frame 으로 transform시키면 이 가상의 coordinate frame 에대한 rotational center 의 Z값은 estimate 된 평면과 가상의 coordinate frame S′의 X-Y 평면이 평행하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_s=\frac{D}{(A^2+B^2+C^2)^{1/2}} \tag{4-16}$$

원의 일반식을 least squares 를 이용하기위해 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\omega=x^2+y^2=Ax+By+C=\phi^T\Theta \tag{4-17}$$

$$\phi=[\,x\ y\ 1\,]^T \tag{4-18}$$

$$\Theta=[\,A\ B\ C\,]^T \tag{4-19}$$

식(4.17)의 ω 의 최소화 문제는, 다음 (4-20)식의 Ξ 를 최소화 시키는 것과 같다.

$$\Xi=\sum_{j=1}^{m}\epsilon_j=\sum_{j=1}^{m}(\omega-\omega_j)^2=\sum_{j=1}^{m}(\phi^T\Theta-\omega_j)^2 \tag{4-20}$$

$$\omega_j=x_j^2+y_j^2 \tag{4-21}$$

위의 해는

$$\Phi=[\,\phi_1,\phi_2,\cdots,\phi_m\,]^T \tag{4-22}$$

$$\Omega=[\,\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_m\,]^T \tag{4-23}$$

일때, 다음과 같다.

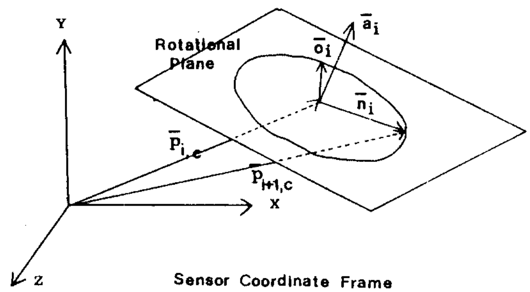
$$\Theta=[\,\Phi^T\Phi\,]^{-1}\,\Phi\Omega \tag{4-24}$$

식 (4-24)로부터 얻은 해는 S′좌표계에대한 값이며 이를 다시 sensor coordinate frame 의 값으로 변환시키면 이 값들이 구하고자하는 rotational center 의 sensor coordinate 에대한 값이 된다.

4-2) Link coordinate frame specificaton.

4-1)절의 방법으로 얻어진 $\vec{a}$, $\vec{p}$ 벡터로부터 Figure-5.에 도시된 방법에따라 ${}^s_iT$ 를 구한다.

Figure-5. Coordinate frame specification



$\vec{p}_{i+1,c}$ 를 i 번째 estimate 된 평면상에 i+1번째 rotational center 를 투영시킨 점이라 할때 방향 vector $\vec{n}_i$ 는 다음과 같다.

$$\vec{n}_i=\frac{\vec{p}_{i+1,c}-\vec{p}_{i,c}}{|\vec{p}_{i+1,c}-\vec{p}_{i,c}|} \tag{4-25}$$

구하여진 방향 벡터를 $\vec{a}_i$, $\vec{n}_i$ 로부터 $\vec{o}_i$ 는 다음과 같다.

$$\vec{o}_i=\vec{a}_i\times\vec{n}_i \tag{4-26}$$

앞절에서 구한 벡터 $\vec{a}_i$, $\vec{p}_i$ 와 이로부터구한 벡터 $\vec{n}_i$, $\vec{o}_i$ 로부터 ${}^s_iT$ 를 구성한다.

$${}^s_iT=\begin{bmatrix}\vec{n}_i & \vec{o}_i & \vec{a}_i & \vec{p}_i\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{4-27}$$

4-3) Kinematic paramrter derivation

구해진 transformation matrix ${}^{i-1}_{i}T$ 로부터 true kinematic parameter 를 구해보면 다음과 같다.

$$
{}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
= \begin{bmatrix} c\beta_{i-1}c\theta_i & c\beta_{i-1}s\theta_i & s\beta_{i-1} & s\beta_{i-1}d_i + a_{i-1} \\ c\alpha_{i-1}s\theta_i + s\alpha_{i-1}s\beta_{i-1}c\theta_i & c\alpha_{i-1}s\theta_{i-1} - s\alpha_{i-1}s\beta_{i-1}s\theta_i & -s\alpha_{i-1}c\beta_{i-1} & -s\alpha_{i-1}c\beta_{i-1}d_i \\ s\alpha_i s\theta_i - c\alpha_{i-1}s\beta_{i-1}c\theta_i & s\alpha_{i-1}c\theta_i + c\alpha_{i-1}s\beta_{i-1}s\theta_i & c\alpha_{i-1}c\beta_{i-1} & c\alpha_{i-1}c\beta_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}28)
$$

[2,3] [3,3] element로부터 α_{i-1} 를 구하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
-s\alpha_{i-1}c\beta_{i-1} &= a_y \\
c\alpha_{i-1}c\beta_{i-1} &= a_z \qquad (4\text{-}29) \\
\alpha_{i-1} &= atan2(-a_y, a_z)
\end{aligned}
$$

Backward multiplication technique (11) 을 이용 식 (4-28)의 양변에 $Rot^{-1}(x_{i-1},\alpha_{i-1})$을 곱하면 다음과 같다.

$$
Rot^{-1}(x_{i-1},\alpha_{i-1})\,{}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_{i-1} & s\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & -s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
= \begin{bmatrix} c\beta_{i-1}s\theta_i & -c\beta_{i-1}s\theta_i & s\beta_{i-1} & s\beta_i d_i + a_{i-1} \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ -s\beta_{i-1}c\theta_i & s\beta_{i-1}s\theta_i & c\beta_{i-1} & c\beta_i d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}30)
$$

식 (4-30) 의 [2,1] [2,2] element로부터 θ_i 를 구하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
s\theta_i &= c\alpha_{i-1}n_y + s\alpha_{i-1}n_z \\
c\theta_i &= c\alpha_{i-1}o_y + s\alpha_{i-1}o_z \qquad (4\text{-}31) \\
\theta_i &= atan2(c\alpha_{i-1}n_y + s\alpha_{i-1}n_z,\ c\alpha_{i-1}o_y + s\alpha_{i-1}o_z)
\end{aligned}
$$

[1,3] [3,3] element로부터 β_{i-1} 를 구하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
s\beta_{i-1} &= a_x \\
c\beta_{i-1} &= -s\alpha_{i-1}a_y + c\alpha_{i-1}a_z \\
\beta_{i-1} &= atan2(a_x, -s\alpha_{i-1}a_y + c\alpha_{i-1}a_z) \qquad (4\text{-}32)
\end{aligned}
$$

[3,3] element로부터 d_i 를 구하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
-s\alpha_{i-1}p_y + c\alpha_{i-1}p_z &= c\beta_i d_i \\
d_i &= (-s\alpha_{i-1}p_y + c\alpha_{i-1}p_z)/c\beta_i \qquad (4\text{-}33)
\end{aligned}
$$

[1,4] element로부터 a_{i-1} 를 구하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
p_x &= s\beta_i d_i + a_{i-1} \\
a_{i-1} &= p_x - s\beta_i d_i \qquad (4\text{-}34)
\end{aligned}
$$

5. 결 론

본 연구에서는 선정된 kineamtic model 의 실제 parameter 값을 측정된 position data 로부터 직접 구해내는 방법을 제시하였다. 이 방법을 사용하면 model parameter를 이용 differential error matrix 로부터 kinematic parameter 를 구할 시, differential model 의 선형화 과정 중 발생할 수 있는 error 가 제거되어 calibartion 에 사용된 position data 의 값만 정확하다면 differential model 을 사용한 앞서의 다른 연구보다 정확한 실제의 kinematic parameter 값을 얻을 수 있을 것이다.

6. 참고 문헌

1) Hayati,S.A. "Robot Arm Geometric Link Parameter Estimation", Proceeding of the 22nd IEEE Conference on Decision and Control, 1983.

2) Hsu,T.W. and Everitt,L.J., "Identification of the Kinematic Parameters of a Robot Manipulator for Positional Accuracy Improvement", Proceeding of the ASME 1985 Internatonal Computers in Engineering Conference, 1985.

3) Veitschegger,W.K. and Wu,C.,"A Method for Calibration and Compensating Robot Kinematic Errors", Proceeding of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1987.

4) Stone,H.W. and Sanderson,A.C." A Prototype Arm Signature Identification System", Proceeding of the 1987 IEEE International Conference on Robotic and Automation, 1987.

5) Mooring,B.W., "The Effect of Joint Axis Misalignment on Robot Positioning Accuracy", Proceeding of the 1983 ASME International Computers in Engineering Conference, 1983.

6) Mooring,B.W. and Tang,G.R.,"An Improved Method for Identifying the Kinematic Parameters in a Six-Axis Robot", Proceeding of the 1984 ASME International Computers in Engineering Conference, 1984.

7) Suh,Chung-Ha and Radcliffe,C.W.,Kinematic & Mechanisms Design, Wiley & Sons,1978.

8) Whitney,D.E.,Lozinski,C.A., and Rourke,J.M., "Industrial Robot Calibration Method and Results", Proceeding of the 1984 ASME Conference on Computers and Engineering,1984.

9) Denavit,J. and Hartenberg,R.S.," A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices", Journal of Applied Mechanics,1955.

10) Strang, G., Linear Algebra and Its applications, Academic Press,New York, 1980.

11) Paul,R.P., Robot Manipulator: Mathematics, Programing, and Control, The MIT Press, Cambrige, MA, 1981