

고온 환경 단조 공정자동화를 위한 6축 수직다관절 로봇의 기구학 및 동특성 해석에 관한 연구

A Study on Kinematics and Dynamics Analysis of Vertical Articulated Robot with 6 axes for Forging Process Automation in High Temperatures Environments

조상영^{1*}, 김민성¹, 구영목¹, 원종범², 강정석² 한성현³

Sang-Young Jo^{1*}, Min-Seong Kim¹, Young-Mok Koo¹, Jong-Beom Won²,
Jeong-Seok Kang², Sung-Hyun Han³

〈Abstract〉

In general, articulated robot control technology is limited to the design of robot arm control systems considering each joint of the robot joint as a simple servomechanism. This method describes the varying dynamics of a manipulator inadequately because it neglects the motion and configuration of the whole arm mechanism. The changes of the parameters in the controlled system are significant enough to render conventional feedback control strategies ineffective. This basic control system enables a manipulator to perform simple positioning tasks such as in the pick and place operation. However, joint controllers are severely limited in precise tracking of fast trajectories and sustaining desirable dynamic performance for variations of payload and parameter uncertainties. In many servo control applications the linear control scheme proposes unsatisfactory, therefore, a need for nonlinear techniques that increasing. for Forging process automation.

Keywords : Force/Torque Analysis, Dynamic, Vertical Articulated Robot, Forging

1*정회원, 교신저자, 경남대학교 첨단공학과
(E-mail: yjswnstjr123@naver.com)

2 (주)SMEC

3 정회원, 경남대학교 기계공학부 교수 工博

1*Dept. of Advanced Engineering, Kyungnam University.

2 Prof., School of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Ph. D.

1. 서론

최근 금형의 생산공정에서는 고온환경인 주·단조 공정등의 3D 환경의 작업 기피현상이 심화되고 있다. 이러한 시대 교류변화에 따라 산업의 대형화, 정밀화, 자동화가 급격히 이루어지면서 현재 금형제조 산업현장에서 다관절 로봇의 존재는 필수적인 것이 되고 있다. 간단한 링크를 가진 로봇으로부터 용접 및 도장 그리고 정밀 부품의 조립에 쓰이는 고정밀/다관절 로봇에 이르기까지 산업현장에서 로봇의 종류와 그 적용범위는 다양하게 되었다.

본 논문에서는 고온환경에서 사람들이 작업을 기피하는 작업이 수행되는 주조 및 단조 공정의 자동화를 위한 수직다관절 로봇을 개발하기 위하여 작업공정에 적합한 로봇의 기구학적해석을 통해서 관절에 작용하는 힘/토크의 특성 해석에 대한 기본적인 사항에 대해서 언급하며 동역학 특성들을 분석을 하고자 한다.

2. 수직 다관절 로봇 아암의 동적 모델링

Fig. 1에 주어진 바와 같이 다관절 로봇시스템 매니퓰레이터의 링크사이의 상호관계는 Denavit - Hartenberg의 표현방식에 의하여 표현될 수 있다. Denavit - Hartenberg 표현방법은 각 링크에 좌표계를 설정하여 전체계를 해석하는 행렬 해석방법으로서, 앞의 링크 좌표계에 대한 다음 링크 좌표계의 관계를 링크의 기하학적 파라미터 $a_i, \theta_i, \alpha_i, d_i$ 에 대한 (4×4) 동차변환행렬(homogeneous transform matrix)로서 표현된다.

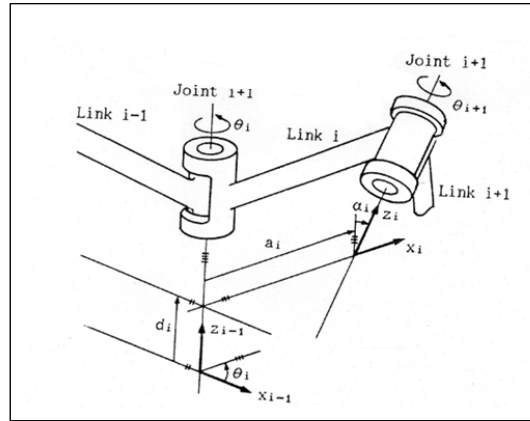


Fig. 1 Link Coordinates of Robotic Manipulator.

Fig. 1에서 정의된 링크 파라미터들을 이용하여 (i-1)번째 좌표계에 대한 i 번째 링크 좌표계의 상대적 위치를 나타내는 동차변환행렬 ${}^{i-1}A_i$ 를 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}A_i &= Rot(Z_i, \theta_i) Trans(0,0,d_i) Trans(a_i,0,0) Rot(X_i, \alpha_i) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

2.1 링크아암의 회전속도

로봇 매니퓰레이터의 관절속도를 구하기 위하여 링크 I 위의 임의의 고정된 점을 ${}^i r_i$ 이라고 정의 하면, 점 ${}^i r_i$ 은 i 번째 링크 좌표계에 대하여 다음과 같은 동차좌표(homogeneous coordinate)로 표현할 수 있다.

$${}^i r_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

링크 i 위의 점 ${}^i r_i$ 을 기준좌표계(base coordinate frame)에 대하여 표시하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$${}^o r_i = {}^o A_i {}^i r_i \quad (3)$$

여기서 ${}^o r_i$ 는 기준좌표계에 대한 링크 i 위의 고정된 점 ${}^i r_i$ 의 상대적 위치를 나타내고 있고, ${}^o A_i$ 는 i 번째 링크좌표계와 기본좌표계 사이의 관계를 나타내는 동차좌표변환행렬로서 다음과 같이 정의된다.

$${}^o A_i = {}^o A_1 {}^1 A_2 \dots {}^{i-1} A_i \quad (4)$$

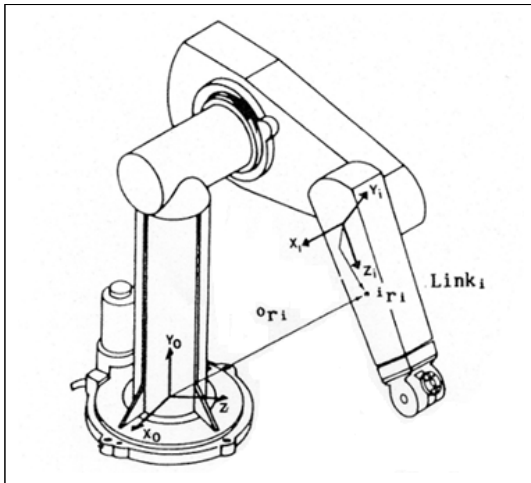


Fig. 2 Point ${}^i r_i$ in link i.

일반적으로 관절 i의 관절 변수는 회전관절의 경우에는 θ_i 가 변수이고 미끄럼관절의 경우에는 d_i 가 변수 이므로 회전관절 및 미끄럼관절에 대

하여 동시에 적용 가능한 동적방정식을 유도하기 위하여 관절 i에 대한 일반화된 좌표 (generalized coordinate)를 나타내는 변수를 q_i 로 정의하면, 기준 좌표계에 대하여 표시된 링크 i의 점 ${}^i r_i$ 의 속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{d}{dt} ({}^o r_i) = \frac{d}{dt} ({}^o A_i {}^i r_i) \\ &= {}^o \dot{A}_i {}^1 A_2 \dots {}^{i-1} A_i {}^i r_i + {}^o A_1 {}^1 \dot{A}_2 \dots {}^{i-1} A_i {}^i r_i + \dots \\ &= {}^o \dot{A}_i {}^i r_i + {}^o A_i \dot{{}^i r_i} \\ &= \left[\sum_{j=1}^i \frac{\partial {}^o A_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right] \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식 (5)에서의 ${}^o A_i$ 의 q_i 에 대한 편미분 ($\partial {}^o A_i / \partial q_i$)은 회전관절의 경우 ($q_i = \theta_i$)를 고려하면, 식 (1)의 θ_i 에 대한 미분으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.[4,5]

$$\begin{aligned} \frac{\partial {}^{i-1} A_i}{\partial \theta_i} &= \begin{bmatrix} -\sin \theta_i - \cos \alpha_i \cos \theta_i & \sin \alpha_i \cos \theta_i & -a_i \sin \theta_i \\ \cos \theta_i - \cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_i - \cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기서,

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

으로 정의하면, 식 (6)은 다음 식으로 정의된다.

$$\frac{\partial {}^{i-1} A_i}{\partial \theta_i} = Q_i {}^{i-1} A_i \quad (7)$$

그러므로, 식 (7)의 결과로부터 다음의 관계식을 정의할 수 있다.

$$\frac{\partial^0 A_i}{\partial q_j} = \begin{cases} {}^0 A_1 {}^1 A_2 \dots {}^{j-2} A_{j-1} Q_j & j \leq i \\ 0 & j > i \end{cases} \quad (8)$$

식 (8)은 링크 i 위의 모든 점들에 대한 관절 j의 운동의 효과를 나타내고 있다. 여기서 $U_{ij} = \partial^0 A_i / \partial q_j$ 으로 정의하면 식 (8)은 다음과 같이 정의된다.

$$U_{ij} = \begin{cases} A_{j-1} Q_j & j \leq i \\ 0 & j > i \end{cases} \quad (9)$$

그러므로 식 (9)를 식 (5)에 대입하면, 링크 i 위의 점 ${}^i r_i$ 의 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$V_i = \left[\sum_{j=1}^i U_{ij} \dot{q}_j \quad {}^i r_i \right] \quad (10)$$

여기서 θ_i 는 Z_{i-1} 축을 중심으로 X_{i-1} 축과 X_i 축 사이의 관절각을 나타내고, d_i 는 Z_{i-1} 축을 중심으로 생각할 때 (i-1)번째 좌표계의 원점에서 Z_{i-1} 축과 X_i 축의 교점간의 거리이며, a_i 는 Z_i 축과 Z_{i-1} 축과의 가장 가까운 거리를 나타낸다. 또한 α_i 는 X_i 축을 중심으로 했을 경우 Z_i 축에서 Z_{i-1} 축 사이의 각을 나타내고 있다. 식 (2.1)에서 회전관절 (revolutional joint)의 경우에는 θ_i 가 변수이고, 미끄럼관절(prismatic joint)의 경우에는 d_i 가 관절변수이며, a_i 의 값은 0이 된다.[1,2,3]

2.2 링크 아암의 운동에너지

K_i 를 링크 i의 운동에너지라고 정의하면, 링크

i 위의 미소질량 dm_i 의 운동에너지 dK_i 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} dK_i &= \frac{1}{2} (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) dm_i \\ &= \frac{1}{2} Tr(V_i V_i^T) dm_i \end{aligned} \quad (11)$$

위의 식 (10), (11)로부터 식 (11)의 미소질량 dm_i 의 운동에너지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} dK_i &= \frac{1}{2} Tr \left[\sum_{p=1}^i U_{ip} q_p \quad {}^i r_i \left[\sum_{l=1}^i U_{il} q_l \quad {}^i r_i \right]^T \right] dm_i \\ &= \frac{1}{2} Tr \left[\sum_{p=1}^i \sum_{l=1}^i U_{ip} \quad {}^i r_i \quad {}^i r_i^T \quad q_p q_l \right] dm_i \\ &= \frac{1}{2} Tr \left[\sum_{p=1}^i \sum_{l=1}^i U_{ip} ({}^i r_i \quad dm_i \quad {}^i r_i^T) U_{il}^T q_p q_l \right] \end{aligned} \quad (12)$$

링크 i의 전체 운동에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$K_i = - \int dk_i = \frac{1}{2} Tr \left[\sum_{p=l=1}^i U_{ip} \left(\int {}^i r_i \quad {}^i r_i^T dm_i \right) U_{il}^T q_p q_l \right] \quad (13)$$

식 (13)에서 적분항은 링크 i 위의 모든 점의 관성으로 다음과 같이 정의된다.

$$J_i = \int {}^i r_i \quad {}^i r_i^T dm_i = \begin{bmatrix} \int x^2 dm_i & \int x y dm_i & \int x z dm_i & \int x dm_i \\ \int x y dm_i & \int y^2 dm_i & \int y z dm_i & \int y dm_i \\ \int x z dm_i & \int y z dm_i & \int z^2 dm_i & \int z dm_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

그러므로 식 (13)을 정리하여, $I_{ij} = \int [\delta_{ij} (\sum x^2 - x_i x_j)] dm_i$ 정의되는 관성텐서 (inertia tensor)를 사용하면, J_i 는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$J_i = \begin{bmatrix} (-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{xy} & I_{yz} & m_i x_i \\ I_{xy} & (I_{xx} - I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{yz} & m_i y_i \\ I_{xz} & I_{yz} & (I_{xx} + I_{yy} - I_{zz})/2 & m_i z_i \\ m_i x_i & m_i y_i & m_i z_i & m_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 ${}^i r_i = (x_i, y_i, z_i, 1)$ 는 i 번째 링크 좌표계로부터의 링크 i 의 질량중심벡터를 나타낸다. 위의 식 (15)에서 기본좌표계에 대한 각 링크의 회전반경을 사용하면 J_i 는 다음과 같이 정리된다.

$$J_i = \begin{bmatrix} (-K_{i11}^2 + K_{i22}^2 + K_{i33}^2)/2 & K_{i12}^2 & K_{i13}^2 & x_i \\ K_{i12}^2 & (x_{i11}^2 - K_{i22}^2 + K_{i33}^2)/2 & K_{i13}^2 & y_i \\ K_{i13}^2 & K_{i32}^2 & (K_{i11}^2 + K_{i22}^2 - K_{i33}^2)/2 & z_i \\ x_i & y_i & z_i & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 K_{i23} 는 yz 축에 대한 링크 i 의 회전 반경을 나타낸다.

그러므로 로봇 매니퓰레이터의 전체 운동에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K &= \sum_{i=1}^n K_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Tr \left[\sum_{p=1}^i \sum_{l=1}^i U_{ip} J_i U_{il}^T q_p q_l \right] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ai} q_i^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^i \sum_{l=1}^i [Tr(U_{ip} J_i U_{il}^T) q_p q_l] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ai} q_i^2 \end{aligned} \quad (17)$$

위의 식에서 마지막 항은 액추에이터에 의한 운동에너지를 나타내고, I_{ai} 는 액추에이터의 관성을 나타내고 있다.

2.3 링크 아암의 위치에너지

매니퓰레이터의 링크 i 의 위치에너지를 P_i 로 정의하면, 링크 i 의 위치에너지 P_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_i = -m_i g {}^o r_i = -m_i g ({}^o A_i {}^i r_i), i=1,2,\dots,n \quad (18)$$

로봇 매니퓰레이터의 전체 위치에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n -m_i g ({}^o A_i {}^i r_i) \quad (19)$$

여기서 $g^T = (g_x, g_y, g_z, 0)^T$ 는 기준좌표계에서 표현되어지는 중력벡터이며, ${}^i r_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T$ 는 링크 i 의 질량중심 벡터를 나타낸다.

2.4 링크 아암의 운동방정식

로봇 매니퓰레이터의 운동방정식을 구하기 위하여 Lagrange-Euler의 운동방정식을 기술하면 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (20)$$

여기서 q_i 는 로봇의 관절변수를 나타내고, τ_i 는 로봇 시스템에 인가된 힘(혹은 토크)을 나타내며, L 은 매니퓰레이터의 운동에너지와 위치에너지의 차이로 정의되는 라그랑지안(Lagrangian)을 나타낸다. 그러므로 n 자유도를 갖는 로봇 매니퓰레이터에 적용하면, 식 (17), (19)로부터 라그랑지안 L 은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} L &= K - P \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i [Tr(U_{ij} J_i U_{ik}^T) q_k q_j] \\ &\quad + \sum_{i=1}^n m_i g ({}^o A_i {}^i r_i) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ai} q_i^2 \end{aligned} \quad (21)$$

따라서 식 (21)으로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial q_p} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^i Tr(U_{ip} J_i U_{ik}^T) q_k + I_{ap} q_p \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n Tr(U_{ij} J_i U_{ip}^T) q_j \\ &= \sum_{i=pk=1}^n Tr(U_{ik} J_i U_{ip}^T) q_k + I_{ap} q_p \end{aligned} \quad (22)$$

그리고 식 (22)을 시간에 대해 미분하면 식 (20)의 우변의 첫째항은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial q_p} &= \sum_{i=pk=1}^n Tr(U_{ik} J_i U_{ip}^T) \dot{q}_k + I_{ap} \dot{q}_p \\ &+ \sum_{i=pk=1}^n \sum_{l=1}^i Tr(U_{ikl} J_i U_{ip}^T) q_k \dot{q}_l \\ &+ \sum_{i=pk=1}^n \sum_{l=1}^i Tr(U_{ipl} J_i U_{ik}^T) q_k \dot{q}_l \end{aligned} \quad (23)$$

식 (20)에서 우변의 두 번째 항은 식 (21)으로부터

$$\frac{\partial L}{\partial q_p} = \sum_{i=pj=1k=1}^n Tr(U_{ipj} J_i U_{ik}^T) q_j q_k + \sum_{i=p}^n m_i g^T U_{ip}^T r_i \quad (24)$$

으로 표현된다. 그리고 식 (23)과 (24)으로부터 다음의 관계식이 정의된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial q_p} - \frac{\partial L}{\partial q_p} &= \sum_{i=pl=1}^i \sum_{k=1}^i Tr(U_{ik} J_i U_{ip}^T) \dot{q}_k \\ &+ \sum_{i=pk=1l=1}^n \sum_{k=1}^i Tr(U_{ikl} J_i U_{ip}^T) q_k \dot{q}_l \\ &- \sum_{i=p}^n (m_i g^T U_{ip}^T r_i) + I_{ap} \dot{q}_p \end{aligned} \quad (25)$$

그러므로 로봇 매니퓰레이터의 동적방정식은 식 (25)로부터 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau_i &= \sum_{j=1k=1}^n \sum_{l=1}^j Tr(U_{jk} J_j U_{ji}^T) q_k - \sum_{j=i}^n (m_j g^T U_{ji}^T r_i) \\ &+ \sum_{j=1k=1l=1}^n \sum_{l=1}^j Tr(U_{jkl} J_j U_{ji}^T) q_k q_l + I_{ai} \ddot{q}_i \end{aligned} \quad (26)$$

식 (26)의 로봇 매니퓰레이터의 동적방정식을 행렬식으로 표현하면 다음 식으로 정의된다.

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n D_{ij} \dot{q}_j + I_{ai} \ddot{q}_i + \sum_{j=1k=1}^n \sum_{l=1}^n C_{ijk} q_j q_k + G_i \quad (27)$$

여기서 D_{ij} 는 symmetric positive definite 관성행렬 ($n \times n$)을 나타내고, C_{ijk} 는 원심력과 코리올리스력에 의한 비선형행렬 ($n \times 1$)을 나타내며, G_i 는 중력하중행렬 ($n \times 1$)을 나타내고 있는데, 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} D_{ij} &= \sum_{p=\max(i,j)}^n Tr(U_{pj} J_p U_{pi}^T) \\ C_{ijk} &= \sum_{p=\max(i,j,k)}^n Tr(U_{pj} J_p U_{pi}^T) \\ G_i &= \sum_{p=1}^n -m_p g^T U_{pi}^T r_p \end{aligned}$$

3. 수직 다관절 로봇의 힘/토크 분석

매니퓰레이터의 정적 평형상태를 유지하기 위해서는 매니퓰레이터 말단에는 큰 힘과 모멘트가 작용하여야 하고 정적 평형상태 유지 조건으로 각 링크에 작용하는 모든 외력, 모멘트의 합이 0이 되어야 한다.

매니퓰레이터 관절에서 외부 작업에 의해 발생되는 힘과 모멘트를 상쇄시킬 수 있는 일정한 크기의 힘과 토크를 가하여야 한다.

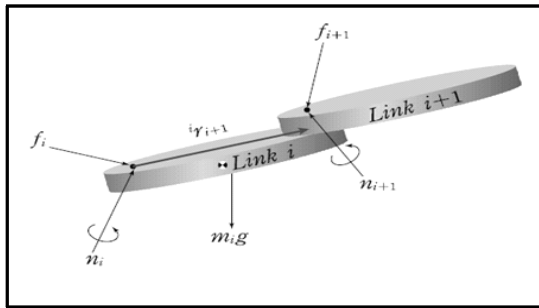


Fig. 3. 힘과 모멘트의 작용을 받고 있는 링크

그림에서 f_i , n_i 는 i-1번째 링크에 작용하는 힘과 모멘트 벡터, f_{n+1} , n_{n+1} 는 머니플레이터 말단에서 외부환경(n+1번째 링크)과 주고받는 힘과 모멘트벡터, $-f_{n+1}$, $-n_{n+1}$ 는 링크 i+1에 의한 반력이다.

말단부에 작용하는 힘과 관절토크사이의 관계는 직교좌표 공간에서 머니플레이터 링크의 말단에 작용한 힘 F에 의해 발생한 미소변위 δX 에 따른 미소 일은 $F \cdot \delta X$ 이다. 일의 단위는 에너지의 단위와 같고 직교좌표 공간에서의 일은 관절변수 공간에서의 일과 같다. 직교좌표 공간에서 주어진 힘과 평형을 이루는 관절토크를 자코비안의 정의($\delta X = J\delta\theta$)를 이용하면,

$$\begin{aligned} F^T J \delta\theta &= \tau^T \delta\theta \\ \Rightarrow F^T J &= \tau^T \\ \Rightarrow \tau &= J^T F \end{aligned}$$

머니플레이터에 작용하는 힘과 평형을 이루는데 필요한 관절 토크를 힘-모멘트 평형식의 적용없이 자코비안만 이용하여 간단히 구할 수 있다. 작업자가 쉽게 인지할 수 있는 공간인 직교공간과 머니플레이터가 실제 구동하는데 필요한 정보들이 정의되는 공간인 관절 공간 사이의 관계를 규정하는 대단히 중요한 정보를 자코비안을 통해 얻을 수 있다.

운동방정식에는 머니플레이터의 구체적인 운동을 구현하기 위해 필요한 관절토크를 계산하는데 방정식에는 Newton-Eule와 Lagrang방법이 있다.

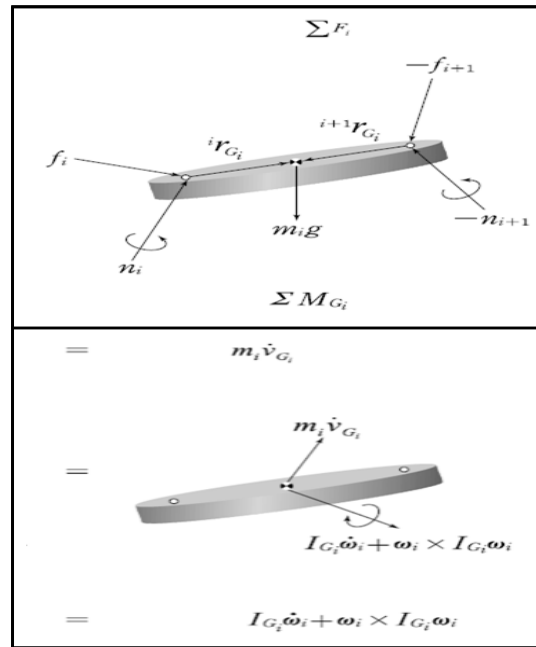


Fig. 4. 힘 · 모멘트의 동적 평형 상태를 이용한 운동 방정식 유도(Newton-Euler방법)

힘 I모멘트의 동적 평형상태를 이용한 운동방정식을 유도한 머니플레이터 운동방정식의 일반적인 형태는

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q)$$

여기서 M은 머니플레이터의 질량행렬을 뜻하고, 원심력과 코리올리 힘은 $C(q, \dot{q})$ 로 나타내고, G(q)는 중력에 의한 항을 말한다. 작업자가 원하는 로봇의 특정한 운동 경로를 직교좌표 공간에서 설계를 하여 역기구학을 통해 그 운동경로를 구현할 수 있는 각 관절 좌표(θ, d)값 및 그 미분 값($\dot{\theta}_1, \dot{d}_2, \dot{\theta}_1, \dot{d}$)계산을 하여 $\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})$

+ $G(q)$ 에 대입하면 설계된 운동경로를 구현할 수 있는 관절 토크의 값을 얻을 수 있다.

4. 맺음말

본 논문에서는 주/단조공정의 자동화를 위한 6축 수직 다관절 로봇의 운동학적 해석을 통한 동적 모델링을 수행하였다. 그리고 고온 환경의 작업 공정인 단조 및 주조 공정에서의 금형 및 부품 등의 핸들링 및 이동 작업 시 로봇 링크 아암에 작용하는 힘과 토크에 대한 동적 특성 분석을 수행 하였다.

후 기

본 연구는 로봇비즈니스벨트조성사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] D. B. Westmore and W. J. Wilson, 1991, "Direct Dynamic Control of a Robot Using an End-Point Mounted Camera and Kalman Filter Position Estimation", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2376-2384.
- [2] T.C. Hasi, "Adaptive Control Scheme for Robot Manipulators-A Review," In Proceeding of the 1987 IEEE Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, 1986.
- [3] D. Koditschek, "Quadratic Lyapunov Functions for Mechanical Systems," Technical Report No. 8703, Yale University, New Haven, CT, 1983.
- [4] J. J. Craig, "Adaptive Control of Mechanical Manipulator," Addison-wesley, 1988.
- [5] H. Berghuis, R.Orbega, and H.Nijmeijer, "A Robust Adaptive Robot controller," IEEE Trans., Robotics and Automation, Vol. 9, No. 6, pp. 825-830, 1993.
- [6] A. Koivo and T. H. Guo, "Adaptive Linear Controller for Robot Manipulators." IEEE Transactions and Automatic Control, Vol. AC-28, pp. 162-171, 1983.
- [7] R. Ortega and M.W. Spong, "Adaptive Motion Control of Rigid Robots: A Tutorial," Automatica, Vol. 25, pp. 877-888, 1989.
- [8] P. Tomei, "Adaptive PD Controller for Robot Manipulators," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol.7, No.4, Aug, 1991.
- [9] S. Nicosia and P. Tomee, "Model Reference Adaptive Control Algorithm for Industrial Robots," Automatica, Vol. 20, No. 5, pp. 635-644, 1984.
- [10] N. Sadegh and R. Horowitz, "An Exponentially Stable Adaptive Control Law for Robot Manipulators," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 9, No. 4, Aug, 1990.
- [11] Z. Ma, J. shen, A. Hug, and K. Nakayama, "Automatic optimum Order Assignment in Adaptive Filters," International conference on signal Processing Applications & Technology, Boston pp. 629-633, Oct, 1995.