

직접구동 로봇의 기구설계와 제어

김 영 탁
중앙대학교 기계설계학과 교수



● 1956년생
● 로봇공학을 전공하였으며 DD로봇과 로봇의 접촉력제어에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

각종의 정밀기구나 가전기기 등에 직접구동(direct-drive) 방식이 채용된 것은 꽤 오래전부터의 일이나⁽¹⁾ 로봇에 로봇에 직접구동 방식의 채용이 검토되기 시작한 것은 1980년대에 들어서이다. 모터 축과 부하 사이에 감속기와 같은 동력 전달기구를 생략하고 모터와 부하를 직결시킴으로써 전동기구에서의 문제점을 극복할 수 있음이 직접구동의 특징인데 다자유도의 로봇 암(arm)의 경우에는 여러 개의 모터가 직렬로 연결되는 형식이되어 직접구동 방식의 채용이 곤란한 것으로 여겨졌다. Asada는 이와 같은 관념에서 벗어나 6자유도의 회전관절형 직접구동 로봇을 개발하였는데 이것이 직접구동 로봇의 시초이다.⁽²⁾

로봇 암(arm)은 일반적으로 회전관절형의 開 루프(open loop) 형태이어서 정밀도나 강성의 면에 있어서 일반적인 기계에 비하여 불리한 구조를 하고 있는 셈이다. 즉 회전관절형에 있어서는 관절 각도의 작은 제어오차가 암(arm) 끝부분에서는 큰 위치오차로 확대되게 되고 다자유도일 경우에 이러한 오차는 선단부로 갈수록 누적되게 된다. 따라서 감속기 등의 전동기구에서의 오차가 일반적인 기계에서는 허용범위 내에 있더라도 로봇에서는 허용범위 밖인 경우가 많다. 또한 감속기의 마찰이나 백

래쉬에 의한 전달 토크의 맥동은 제어정밀도를 저하시키고 접촉력 제어에 있어서 커다란 장애로서 작용한다. 더구나 감속기로 인한 기계적 강성의 저하는 진동 발생의 원인이 되어 고속운동을 어렵게 한다. 감속기에서의 이러한 문제점을 극복하기 위하여 감속기를 제거하고 모터 축과 아암을 직접 연결한 것이 직접구동 로봇인데 최초의 개발품인 CMU-DD Arm에서는 모터에 보통의 DC 토크 모터를 이용하였기 때문에 可搬중량이 매우 작아서 실용화하는 거리가 멀었다. 그러나 그후 MIT에서는 DC brushless 모터를 이용한 MIT Arm Model III를 개발하여 최대속도 12m/s, 최대가속도 52 m/s², 가반중량 8kg을 달성 하였다.⁽³⁾

이를 계기로 직접구동 로봇의 개발이 활발하

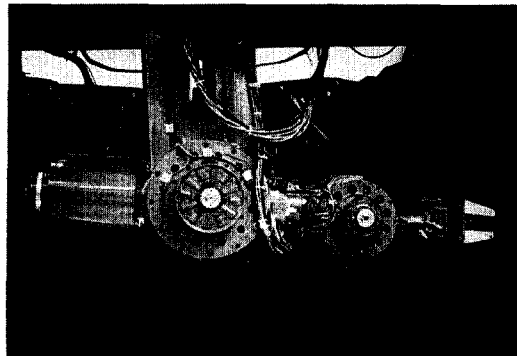


그림 1 최초의 DD로봇(CUM DD Arm)

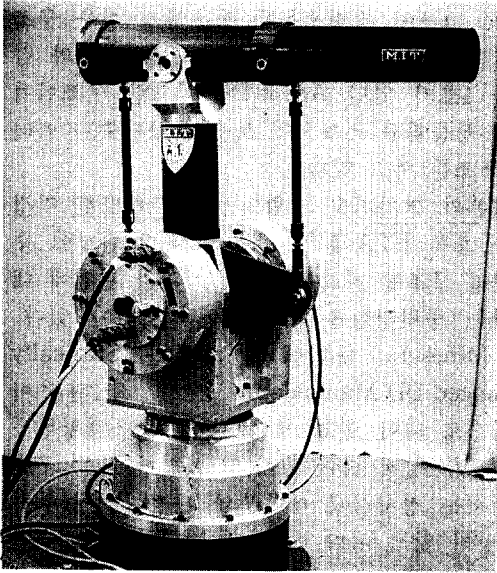


그림 2 MIT DD로봇(MIT DD Arm Model III)

게 되어 일본의 松下電産業(株)가 수평다관절 소형 직접구동 로봇을, 新明和가 레이저 절단 로봇을 개발하여 실용화에 접근하였다.⁽⁴⁾ 더욱이 미국의 Adept Technology 社가 1984년에 Adept I 이라고 불리우는 수평다관절 직접구동으로 로봇을 개발하여 상품화시킴으로써 실용화의 길이 열리게 되었다.⁽⁵⁾ 그러나 그 후 수많은 직접구동으로 로봇에 대한 연구개발이 진행 되면서 당초 기대되었던 직접구동의 장점과는 달리 문제점도 제기 되었다.

이 글에서는 지금까지의 연구 개발 과정에서 얻어졌던 직접구동 로봇의 문제점과 해결책을 기구설계와 제어의 관점에서 정리하려 한다. 덧붙여서 지금까지 개발된 직접구동 로봇의 특징과 사양을 부록에 수록한다.

2. 직접구동 로봇의 문제점

이 절에서는 직접구동 로봇이 가지게 되는 고유의 문제점에 대하여 항목별로 나열해 본다. 우선 암(arm)의 중량이 문제이다. 직접구동 로봇에서는 손목을 구동하는 모터가 팔꿈치

의 부하가 되고 다음에는 손목과 팔꿈치를 구동하는 모터가 모두 어깨를 구동하는 모터의 직접적인 부하로 작용하므로 손목쪽에서 어깨 쪽으로 갈수록 모터의 크기가 기하급수적으로 커지게 되고 암(arm)의 중량 또한 커지게 된다.

다음은 제어계의 감쇠성 문제이다. 감속기를 사용하는 일반적인 로봇에서는 감속기의 마찰이 일종의 점성저항으로 작용하나 직접구동 로봇에서는 감속기가 제거됨으로 인하여 기계적인 감쇠가 거의 없게 되고 따라서 제어계의 감쇠성이 나쁘게 된다. 감쇠성을 개선하는 데는 높은 이득(gain)의 속도 피이드백 보상이 유용한데 이를 위해서는 S/N 비가 높은 속도 신호가 필요하게 된다. 정밀한 속도의 계측은 일반적으로 저속에서 어렵게 되는데 모터의 경우 감속기를 사용하는 모터에 비하여 현저히 저속으로 회전하므로 정밀한 속도의 계측이 곤란하다.

다음은 부하감도의 문제이다. 다음 식은 감속비 1:n인 감속기를 사용한 로봇 암(arm)의 일반적인 운동방정식이다.⁽⁶⁾

$$\left(Hr + \frac{Ha}{n_i^2}\right) \ddot{\theta}_i + \frac{\tau_{coup}}{n_i} + \frac{\tau_{non}}{n_i} = \tau_{mot} \quad (1)$$

여기서 Hr 은 감속기를 기준으로 하여 감속기의 관성을 포함한 모터 회전부의 관성, Ha 는 암(arm)의 관성이다. Ha 는 암(arm)의 자세가 바뀌거나 로봇이 물건을 집었을 때 그 값이 변화하게 되는데 모오터 축에는 그 영향이 $1/n^2$ 로 축소 되어 반영됨을 알 수 있다. 그러나 직접구동에서는 $n=1$ 이므로 관성부하나 자세의 변화에 의한 Ha 의 변동이 모터에 직접 반영된다. 즉 부하감도가 높기 때문에 제어계의 응답성 및 안정성에 특별한 주의를 필요로 한다.

직접구동에서는 간섭력 그리고 코리올리력이나 원심력과 같은 비선형력이 큰 것도 문제이다. 식(1)에서 τ_{coup} , τ_{non} 이 각각 간섭력과 비선형력을 나타내는데 감속기 사용 로봇에서는 $1/n$ 로 축소되어 모터에 반영되나 역시 직접구

동에서는 $n=1$ 이므로 직접 반영된다.

이와 유사한 현상은 서보 강성에서도 나타난다. 서보 강성은 로봇 암(arm)에 작용하는 외력에 대한 관절각도의 변화의 비로서 다음 식과 같이 표시될 수 있다.⁽⁷⁾

$$\lim_{\theta(s)} \frac{\tau_e(s)}{\theta(s)} = \frac{n^2 B}{A} \quad (2)$$

여기에서 τ_e 는 관절에 작용하는 외력 토크, θ 는 관절변위 그리고 A 와 B 는 제어계의 파라미터에 의하여 결정되는 상수이다. A 와 B 가 일정하다고 할 때 직접구동에서는 n 이 1이므로 서보강성이 현저하게 낮아짐을 알 수 있다.

이상의 여러 가지 문제점을 고려한 직접구동 로봇의 기구설계 및 제어방법을 이하에서 설명한다.

3. 직접구동 로봇의 기구설계

3.1 경량화 설계

앞절에서는 언급한 바와 같이 다자유도의 로봇에 직접구동 방식을 채용하면 암(arm)중량이 매우 커지고 가반중량이 작게 된다. 이러한 급격한 중량증가를 방지하기 위해서는 모터가 소형이면서 높은 토크를 발생시킬 수 있어야 한다. 즉 소형 경량의 고성능 모터의 개발이 무엇보다 선행되어야 하는데 여기서는 구조설계의 측면에서 이문제를 해결하는 방법에 대하여 고찰한다.

일반적인 구조에서는 암(arm) 자체의 중량이 모터의 부하로 작용하게 되고 중량이 장시간 동안 모터의 부하로 작용할 때 모터는 과열의 우려가 있다. 따라서 암(arm)의 중량이 가능한 한 모터의 부하로 작용하는 것을 회피하여야 한다. 아암의 중량은 암(arm)의 기구학적 구조에 크게 의존하기 때문에 기구학적 구조의 개선을 고려한 로봇의 설계는 중요한 의미를 가진다. 이른바 수평다관절형은 직동관절인 선단부의 관절 하나를 제외하고는 회전 3자유도가 모두 중력부하를 받지 않게 되는 구조

이다. 그래서 직접구동을 적용하기 쉬운 구조로서 인식되고 있고 실제 직접구동 로봇의 상품화 1호기였던 Adept I이 이러한 구조이며 현재 상품화된 직접구동 로봇의 상당수가 이러한 구조를 하고 있다.

일본의 전자기술 종합연구소가 개발한 직접구동 로봇 ETA-II⁽⁸⁾에서는 제 1, 2 관절이 수평관절 구조를 하고 있고 그 이외의 관절에 대해서는 중력평형을 이루도록 설계되어 있다. 또 Minnesota 대학에서 개발한 Statically Balanced DD Manipulator 역시 제 1관절이 수직으로 되어 있고 제 2, 3관절이 중력평형을 이루도록 설계 되어 있다.⁽⁹⁾ 이러한 모든 구조들에서는 정지시에 대부분의 관절이 중력부하를 받지 않게 된다. 그리고 MIT Arm II에서는 5링크 구조를 이용한 병렬구동방식을 채용하여 경량화를 꾀하고 있다. 즉 2개의 모터를 base에 고정하여 閉루프 링크의 구조로서 2차원 운동을 시킨 것인데⁽¹⁰⁾ 이를 좀더 세련되게 재설계한 것이 그림 2의 MIT Arm Model III이다.

3.2 동역학적 기구설계

일반적으로 직접구동 로봇의 운동방정식은 i 번째의 모터 출력 토크를 τ_i , 외부로부터 작용하는 외력 토크를 τ_e , 회전각도를 θ_i 라고하면

$$\begin{aligned} & H_{ii} \ddot{\theta}_i + \sum_{j \neq i} H_{ij} \ddot{\theta}_j \\ & + \sum_{jk} \left(\frac{\partial H_{ik}}{\partial \theta_j} - \frac{1}{2} \frac{\partial H_{jk}}{\partial \theta_i} \right) \theta_j \theta_k \\ & + \tau_{gi} = \tau_i + \tau_e \end{aligned} \quad (3)$$

와 같이 된다.⁽⁶⁾ 여기에서 H_{ij} 는 모터 축에 관한 암(arm) 관성텐서의 ij 성분이다. 식의 좌변 첫번째 항 H_{ii} 은 i 번째 이외의 모든 모터 축을 고정하였을 때의 i 번째 관절 모터에 걸리는 관성부하를 나타내고 제 2항은 다른 관절로부터의 간섭토크를, 제 3항은 코리올리력과 원심력이라 불리는 비선형력을, 제 4항은 중력토크를 나타낸다.

직접구동 로봇에서는 이러한 복잡한 동특성

이 모터 축에 직접 반영되어 부하감도가 높고 간섭력 및 비선형력이 크게 됨을 앞에서 언급하였다. 일반적인 제어 시스템에 있어서는 이와 같은 동특성의 문제를 해결하기 위하여 보상의 설계나 비선형제어와 같은 방법이 제안되어 있으나 직접구동 로봇과 같이 운동속도가 빠르면 제어연산 부담이 커져서 서어보율이 떨어지고 계가 불안정해지는 경우가 많다. 더구나 가공작업이나 조립작업과 같이 로봇이 작업대상과 기계적인 접촉을 이루는 작업에 있어서는 로봇과 작업대상 사이에 발생하는 접촉력의 시정수가 수 ms 이하이므로 제어연산 부담이 더욱 중요한 문제가 된다. 그래서 제어계의 설계에만 의존하지 말고 기계구조의 설계단계에서부터 바람직한 동특성을 가지도록 기구나 질량분포를 개선할 필요가 있다.

MIT Arm Model II는 링크의 구조와 질량분포를 변화시킴으로써 암(arm) 동특성의 선형화 및 비간섭화를 이룩한 좋은 예이다. 이른바 비간섭 일정관성 암(arm)으로서 각 모터에 작용하는 부하는 암(arm)의 자세에 의존하지 않고 항상 일정하게 되기 때문에 항상 일정한 안정성과 응답성이 유지된다. 더욱이 제어대상을 단일 입력 단일 출력계로 취급할 수 있어서 제어연산량이 현저하게 감소된다. 그럼 여기서 그 MIT Arm Model II의 설계 사상에 대하여 좀더 자세히 관찰하여 보자.

그림 3에 나타낸 바와 같은 평행링크기구의

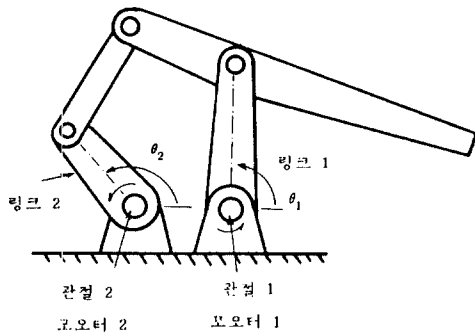


그림 3 5개 링크로 된 병렬구조 로봇

암(arm)에 있어서 그림 중에 표시한 질량 파라미터(질량 m_i , 관성모멘트 I_i , 질량중심의 위치 g_i)와 링크길이를 이용하면 그 관성행렬은 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{12} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기에서

$$\begin{aligned} H_{11} &= I_1 + m_1 g_1^2 + I_3 + m_3 g_3^2 + m_4 l_1^2 \\ H_{12} &= (l_2 m_3 g_3 - l_1 m_4 g_4) \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ H_{22} &= I_2 + m_2 g_2^2 + I_4 + m_4 g_4^2 + m_3 l_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 그런데 만약 H_{12} 가 0이 될 수 있다면 식(3)의 제2항이 0이 된다.

H_{12} 가 0이 될 수 있는 조건은 우선 $\theta_1 - \theta_2 = \pm 90^\circ$, 즉 2개의 링크가 직교하는 상태에서인데 이것이 항상 만족되려면 암(arm)이 자유롭게 움직일 수 없으므로 의미가 없다. 그래서 삼각함수의 계수 $(l_2 m_3 g_3 - l_1 m_4 g_4) = 0$ 이 되도록 하는 것을 생각해 보자. 즉

$$\frac{m_4 g_4}{m_3 g_3} = \frac{l_2}{l_1} \quad (6)$$

이 되면 운동방정식의 제 2항이 0이 된다. 더구나 이러한 구조에서는 관성행렬의 대각 요소도 모두 관절 각도와는 무관하게 되므로 제 3항도 0이 되어 운동방정식은 암(arm)의 자세에도 무관하고 간섭력과 비선형력도 제거된 매우 간단한 형태가 된다. 즉 중력을 무시한다면 선형 1입력 1출력계로 볼 수 있다.

그런데 이 방법은 다자유도로 직접 확장되기 어렵고 병렬구조가 됨으로 인하여 로봇 크기에 비하여 작업공간이 작아지는 결점도 있다. 그래서 Yang 등은 이와 유사한 설계사상을 직렬구조의 일반적인 로봇에 대하여도 적용하려고 시도하였는데 그 내용은 에너지 개념을 도입한 선형화이다.⁽¹¹⁾

q_1 를 일반화 좌표, Q_1 를 일반화력, L 을 lagrangian($T-P$), T 를 운동에너지, P 를 위치에너지라고 할 때 n 개의 강체로 된 로봇의 Lagrange 운동방정식은

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \right) = Q_i \quad (7)$$

과 같이 된다. 또 M_i 와 I_i 는 질량과 관성텐서, V_i 와 ω_i 는 선속도와 각속도라고 할 때 운동에너지는

$$T_i = \frac{1}{2} \text{tr} (V_i M_i V_i^T) + \frac{1}{2} \omega_i^T I_i \omega_i \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} V_i &= \sum_{j=1}^i f_{ij} (\theta_1, \dots, \theta_i) \dot{\theta}_j \\ \omega_i &= \sum_{j=1}^i g_{ij} (\theta_1, \dots, \theta_i) \dot{\theta}_j \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} T_i &= \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i A_{ijk} (\theta_1, \dots, \theta_i) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \\ A_{ijk} &(\theta_1, \dots, \theta_i) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \end{aligned} \quad (10)$$

이 되고 위치에너지는

$$P = \sum_{i=1}^n F_i (\theta_1, \dots, \theta_i) \quad (11)$$

이 된다. 이 두 식 (10), (11)을 식 (7)에 대입하면

$$\begin{aligned} Q_i &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^i A_{ijk} (\theta_1, \dots, \theta_i) \ddot{\theta}_k \\ &+ \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^i \frac{\partial A_{ijk} (\theta_1, \dots, \theta_i)}{\partial \theta_l} \dot{\theta}_k \dot{\theta}_l \\ &- \sum_{j=1}^n \frac{\partial F_j (\theta_1, \dots, \theta_i)}{\partial \theta_i} \end{aligned} \quad (12)$$

을 얻을 수 있다. 따라서 A_{ijk} 와 F_i 를 정수 또는 0으로 할 수 있다면 운동방정식이 선형화될 수 있다.

조금 구체적으로 설명하기 위해 그림 4와 같은 3자유도 직렬구조 로봇을 예로 들어 보자. 운동에너지와 위치에너지를 구하여 보면

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \left((I_{1a} \theta_1^2 + I_{2t1} \theta_2^2 \right. \\ &\quad \left. + I_{3t1} (\theta_2 + \theta_3)^2 + M_3 a_2^2 \theta_2^2 \right) \\ &+ \frac{1}{2} \left((I_{2t2} + M_3 a_2^2) \text{COS}^2 \theta_2 \right. \\ &\quad \left. + I_{2a} \text{SIN}^2 \theta^2 \right) \theta_1^2 \\ &+ \frac{1}{2} \left((I_{3t2} + M_3 \rho_3^2) \text{COS}^2 (\theta_2 + \theta_3) \right. \\ &\quad \left. + I_{3a} \text{SIN}^2 (\theta_2 + \theta_3) \right) \theta_1^2 \end{aligned}$$

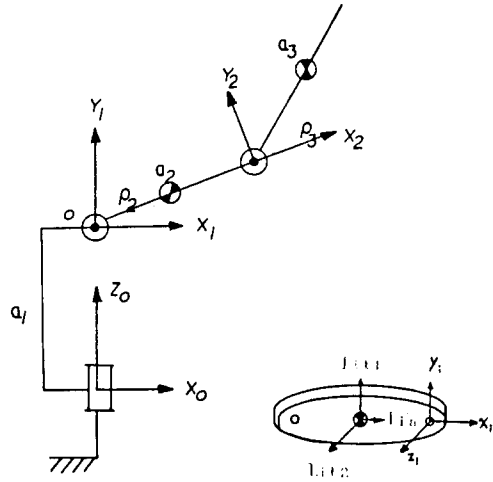


그림 4 3자유도 로봇

$$\begin{aligned} &+ M_3 a_2 \rho_3 \text{COS} \theta_2 \text{COS} (\theta_2 + \theta_3) \theta_1^2 \\ &+ M_3 a_2 \rho_3 \text{COS} \theta_3 (\theta_2^2 + \theta_2 \theta_3) \\ &+ \frac{M_3}{2} \rho_3^2 (\theta_2 + \theta_3)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P &= (M_2 \rho_2 + M_3 a_2) g \text{SIN} \theta_2 \\ &+ (M_3 \rho_3) g \text{SIN} (\theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \quad (14)$$

와 같이 된다. 여기서 a_i 는 링크의 길이, ρ_i 는 $i-1$ 좌표로부터 i 링크의 질량중심까지의 거리, I_{ia} , I_{it1} , I_{it2} 는 i 링크의 질량중심에 관한 주관성(principal inertias)이다. 단 $i=2$ 일 때의 I_{2a} , I_{2t1} , I_{2t2} 는 고정점 0에 관한 주관성이다. 식 (13), (14)에서

$$\rho_3 = 0 \quad (15)$$

$$I_{3t2} = I_{3a} \quad (16)$$

$$M_2 \rho_2 + M_3 a_2 = 0 \quad (17)$$

$$I_{2t2} + M_3 a_2^2 = I_{2a} \quad (18)$$

의 조건이 만족될 수 있다면 운동에너지와 위치에너지는

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \left(I_{1a} \theta_1^2 + I_{2t1} \theta_2^2 + I_{3t1} (\theta_2 + \theta_3)^2 \right. \\ &\quad \left. + I_{2t2} \theta_1^2 + I_{3a} \theta_1^2 + M_3 a_2^2 \theta_2^2 \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$P = 0 \quad (20)$$

와 같이 된다. 식(15)~(18)의 설계조건은 암 (arm) 형태의 설계에 의하여 만족될 수 있는 조건이고 따라서 식(19), (20)를 식(12)에 대입하여 보면 운동방정식이 선형화됨을 알 수 있다.

3.3 Collocated 구조의 설계

3.1. 3.2절에서는 직접구동 로봇의 약점을 보완할 수 있는 설계방법에 대하여 논하였다. 여기서는 직접구동 로봇의 장점을 확대할 수 있는 설계방법으로서 센서와 액츄에이터가 같은 곳에 설치될 수 있도록 한 이른바 collocated 구조에 대하여 논한다.

제어시스템에 있어서 극과 영점의 수의 차 (number of poles-number of zero)는 제어의 어려움을 나타내는 하나의 지수로서 그 수가 2보다 클 때는 루프 이득을 높게 함에 따라 계가 불안정해질 우려가 있다. 그런데 극과 영점의 수의 차는 센서와 액츄에이터 사이에 탄성체의 존재 여부 그리고 액츄에이터 운동(회전 또는 병진)부의 질량(또는 관성모멘트)의 크기에 의존한다.⁽¹²⁾

이것을 로봇 시스템에 대하여 적용해 보기 위해 우선 모터와 암 (arm)으로 구성되는 기계계를 모델링하여 보자. 이야기를 간편하게 하기 위하여 1자유도를 예로 들면 감속기를 사용하는 일반적인 로봇은 그림 5와 같이 표시될 수 있다. 감속기에서의 강성의 저하가 탄성체 k_j 로 표시되었다. 탄성체를 기준으로 하여 감속기를 포함한 모터의 회전부 관성을 H_r , 암 (arm)측의 관성을 H_a 라고 하자. 로봇 센서로서는 기본적으로 위치센서(관절각도 센서)가 쓰여지는데 흔히 암 (arm) 측에 설치하게 된다. 따라서 그림과 같은 간단한 위치 루프를 구성하였다고 할 때 전달함수는

$$\frac{\theta_a(s)}{\theta_d(s)} = \frac{K_p k_j}{H_r H_a s^4 + (H_r + H_a) s^2 + k_p k_j} \quad (21)$$

이 되어 극과 영점의 수의 차는 4가 된다. 그

런데 만약 H_r , 또는 H_a 가 0이 되게 할 수 있다면 극과 영점의 수의 차는 2가 된다. 따라서 안정성을 해치지 않고 루프 이득을 높일 수 있게 된다. 감속기를 사용한 로봇은 H_r , 또는 H_a 의 어떤 쪽도 0이 되게 할 수 없는 구조이다. 이에 반하여 직접구동 로봇에서는 탄성체 k_j 가 없으므로 자연적으로 H_r , 또는 H_a 가 영이 된다.

그런데 문제는 토크센서와 같은 탄성체를 삽입시킬 경우이다. 최근 토크센서를 이용한 고도의 제어방식이 제안되어 효과를 입증하고 있고 직접구동 모터의 경우 토크 ripple을 해소하기 위한 목적으로 쓰여진 예도 있어 토크센서의 이용도가 높아지고 있는데 토크센서를 설치할 경우 직접구동 로봇이라 할지라도 그림 5와 같은 구조가 될 수도 있다.

Asada는 탄성체를 가능한 한 모터의 회전축에 가깝게 설치하면 H_r 을 0에 가깝게 할 수 있고 직접구동의 경우에는 이와 같은 구조의 설계가 가능하다는 것을 보이고 있다.⁽¹³⁾ 그림 6은 이와 같은 원리에 의하여 설계한 토크센서의 예를 나타내는데 회전자와 축을 연결하는 Hub 부분에 구멍을 내어 탄성변형이 일어나도록 하고 있다. 이로써 탄성체를 기준으로 회전부의 관성이 암 (arm)측의 관성에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작게 설계될 수 있다. 따라서 모터 토크는 그림 7과 같이 탄성체 스프링 k_j 에 직접 작용하는 결과가 되고 액츄에이터와 센서(위치센서, 토크센서 모두)는 같은 위치에 존재하게 되는 이른바 collocated 구조가 된다.

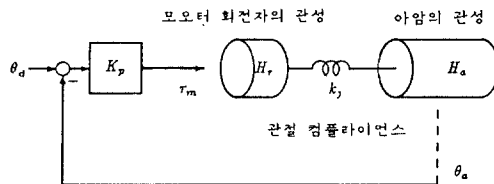


그림 5 감속기를 사용한 로봇의 모델링

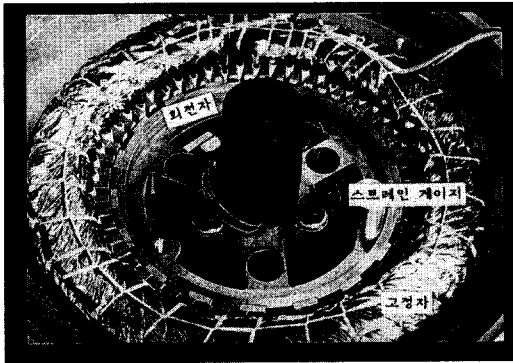


그림 6 토크센서

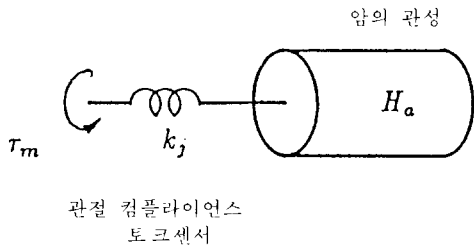


그림 7 1자유도 DD로봇의 토크 센서를 포함한 모델링

Asada는 이러한 구조를 계의 고유진동수 상승이라는 측면에서 설명하고 있다. 즉 계의 고유진동수를 구하면 보면

$$\omega_n = \omega_o \frac{1}{\sqrt{p(1-p)}} \quad (22)$$

와 같이 되는데 여기서

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k_j}{H_a + H_r}} \quad (23)$$

$$p = \frac{H_r}{H_a + H_r} \quad (24)$$

이므로 p 가 0과 1에서 고유진동수는 무한대가 된다. 직접구동에서는 $H_a \gg H_r$ 의 조건이 만족 되도록 설계가 가능하므로 p 는 0에 가깝게 되고 따라서 계의 고유진동수가 높게 유지 될 수 있다.

4. 직접구동 로봇을 위한 제어방식

이 절에서는 제어방식에 의하여 직접구동 로봇의 약점을 보완할 수 있는 방법에 대하여 설명한다. 직접구동 로봇에서는 모터 토크가 암(arm)에 그대로 전달될 수 있고 토크센서를 용이하게 설치할 수 있다는 측면에서 직접구동 로봇에 특히 잘 어울리는 제어방법에 대하여 개괄적으로 설명한다.

4.1 비간섭·자세독립제어

설명을 간편하게 하기 위하여 2자유도의 예를 들면 운동방정식은 다음과 같다.

$$\tau_1 = a_{11}\ddot{\theta}_1 + a_{12}\ddot{\theta}_2 + b_{11}\dot{\theta}_1^2 + b_{12}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \tau_{g1} \quad (25)$$

$$\tau_2 = a_{21}\ddot{\theta}_1 + a_{22}\ddot{\theta}_2 + b_{21}\dot{\theta}_1^2 + b_{22}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \tau_{g2} \quad (26)$$

여기서 a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} 는 관성계수 b_{11} , b_{12} , b_{21} , b_{22} 는 원심력 및 코리올리력 계수이고 τ_{gi} 는 중력 토크이다. 이 두 식이

$$\tau_1 = a_{11} u_1 + a_{12} u_2 + b_{11} \dot{\theta}_1^2 + b_{12} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \tau_{g1} \quad (27)$$

$$\tau_2 = a_{21} u_1 + a_{22} u_2 + b_{21} \dot{\theta}_1^2 + b_{22} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \tau_{g2} \quad (28)$$

과 같이 되도록 하면

$$u_1 = \ddot{\theta}_1 \quad (29)$$

$$u_2 = \ddot{\theta}_2 \quad (30)$$

가 되고 u_1 , u_2 을 조작량으로 취함으로써 비간섭, 자세독립제어가 가능하게 된다.⁽¹⁴⁾ 식(27), (28)의 제 3항부터 마지막항은 실시간으로 각도와 각속도를 검출하여 다이내믹 모델에 준해서 각항을 계산한다.

4.2 토크 피드백 제어

여기서는 토크센서를 이용한 제어방식에 대하여 설명한다. 토크센서를 설치한 직접구동 로봇을 그림 8과 같이 나타내고 토크센서로부터의 신호를 τ_{si} 라고 한다면 다시 각 관절의 운동방정식은

$$\tau_i = H_i \ddot{\theta}_i + \tau_{si} + R_i \quad (31)$$

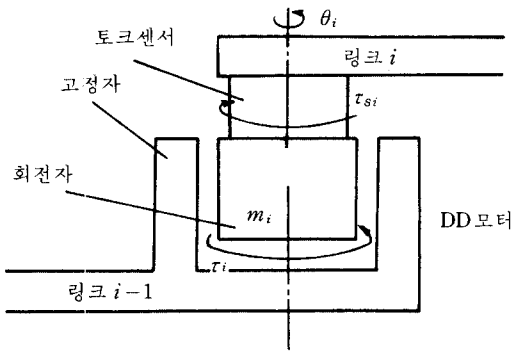


그림 8 DD로봇 관절의 모델링

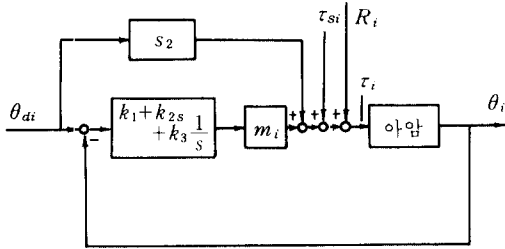


그림 9 토크 피드백 제어계의 구조

와 같다.⁽¹⁵⁾ 여기에서 τ_i 는 모터 출력 토크, H_i 는 모터 회전부의 관성모멘트, V_i 는 관절의 점성마찰 계수, R_i 는 회전체 자체의 비선형력(원심력 및 코리올리력)이다. 여기에

$$\tau = H_i \{ \ddot{\theta}_{di} + k_1 \dot{e}_i + k_2 e_i + k_3 \int e_i(t') dt' \} + \tau_{si} + R_i \quad (32)$$

와 같은 제어계를 구성하면 암(arm)측에서 전달되는 간섭력 및 비선형력 등이 보상된다. 여기서 물론 $e_i = \theta_{di} - \theta_i$ 이다. 그림 9는 제어계

의 불럭선도를 나타낸다.

그리고 만약 H_i 가 무시할 수 있을 정도로 작은 경우는 R_i 가 무시될 수 있고 위식의 H_i 대신에 적당한 정(正)의 실수 δ 를 택함으로써

$$\tau_i = \delta \{ \ddot{\theta}_{di} + k_1 \dot{e}_i + k_2 e_i + k_3 \int e_i(t') dt' \} + \tau_{si} + R_i \quad (33)$$

로 하면 된다.

5. 맺음말

직접구동 로봇의 특성과 문제점에 대하여 기술하고 기계설계와 제어방식에 의한 대책 및 개선방향을 해설하였다.

직접구동 로봇은 고속, 고정밀도, 토크제어의 가능 등 여러 가지 좋은 잠재력을 가지고 있는 반면 자체 중량에 비하여 가반중량이 작고 관절 간의 간섭 및 비선형력이 크며 부하감도가 높은 등의 문제점이 있음을 나타내고 모터의 배치나 기구의 변환에 의해 이와 같은 문제점을 어느 정도 개선할 수 있음을 보였다. 또한 비간섭·자세독립제어, 토크피드백 제어에 의하여 직접구동의 문제점을 개선할 수 있음을 보였는데 직접구동의 장점을 충분히 활용하기 위해서는 아직도 해결하여야 할 문제가 많다. 그 중에 무엇보다도 중요한 것은 소형 경량이면서 높은 토크를 발생시킬 수 있는 모터의 개발이다. 최근 초음파 모터의 연구개발이 활발한데 이를 이용한 직접구동 모터의 개발이 기대된다.

부 록

표 1 직접구동 로봇의 개발현황

로봇명칭	개발처	자유도 수 및 형식	총중량	가반중량	정밀도	개발년도
인간팔형DD	日 기계기술연구소	7자유도 회전다관절				1986
DARM-2	日 東芝	7자유도 회전다관절	100kg	3kg		
CMU DD Arm	美Carnegi Melon 大	6자유도 회전다관절				1981
ETA 3	日 전자기술연구소	6자유도 회전다관절 (基底 3자유도만 DD)	90kg	3kg	0.10mm	1985
재봉로봇2호	日 기계기술연구소	6자유도 회전다관절	212kg	5kg	0.05mm	
Yokogawa DD	日 Yokogawa 電機	6자유도 수직다관절	65kg	3kg	0.014	1985
레이저가공로봇	日 新明和	5자유도 수평다관절			0.05mm	1983
RH-D1	日 三菱電機	4자유도 수평다관절		3kg	0.02mm	
DD 로봇	日 松下電器	4자유도 수평다관절		5kg	0.10mm	
Clean 로봇	日 安川電機	4자유도 원통좌표형	45kg	2kg	0.03mm	
SR5900	日 三協電機	4자유도 수평다관절	60kg	5kg		
Adept I	美 Adept Technology	4자유도 수평다관절	181kg	6kg	0.05mm	1984
Yamaha DD	日 Yamaha 發動機	4자유도 수평다관절	116kg	5kg	0.05mm	
MIT DD Arm III	美 MIT	3자유도 병렬링크		8kg		1984

참 고 문 헌

- (1) 山田, 1975, 精密小形モータの基礎と應用, 綜合電子出版社
- (2) Asada, H. Kanade, T. et al., 1981, "Design Concept of Direct-Drive Manipulators Using Rare-Earth DC Torque Motors", Proc. of 11th ISIR, pp. 629~636.
- (3) Asada H., Youcef-Toumi K. and Ramirez R. 1984, "Design of MIT Direct-Drive Arm" In International Symposium on Design and Synthesis, Japan Society of Precision Engineering, Tokyo, Japan
- (4) 井上, 1986, 松下電器生産技術研究所開發, (研究室紹介), 日本 Robot 學會誌, Vol.4, No.4, pp.452~453.
- (5) Curran R. and Mayer, G., 1985, "The Architecture of the ADEPT I Direct-Drive Robot", Proc. of 1985 American Control Conference, pp. 716~721, Boston.
- (6) Asada, H. and Youcef-Toumi, K. 1987, Direct-Drive Robots, The MIT Press.
- (7) 金寧鐸, Asada, H., 1989, "光學式トルクセンサーを内蔵したダイレクト・ドライブロボットの動的コンプライアンス制御", 日本 Robot 學會誌, Vol.7, No.2, pp.3~12.
- (8) 高瀬, 1983, "直接駆動及び低比率減速駆動方式を併用したトルク制御マニピュレータ", 第22會計測自動制御學會學術講演會豫告集, pp.121~122.
- (9) Kazerooni, H., 1988, "Statically Balanced Direct-Drive Manipulator for Constrained Maneuvers", IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems Programs, October 1988, Japan, pp. 579~584.
- (10) Asada, H. and Youcef-Toumi, K., 1984, "Analysis and Design of a Direct-Drive Arm with a Five-Bar-Link Parallel Drive Mechanism," ASME Journal of a Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 106, No.3, pp.225~230.
- (11) Yang, D.C.H. and Tzeng, S.W., 1986 "Simplification and Linearization of Manipulator Dynamics by the Design of Inertia Distribution", The International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.3, pp.120~128.
- (12) 金寧鐸, Asada, H., 1988, "力制御ロボットの動特性解析とコロケトなツステムの設計", 第32回システ

- ムと制御研究発表講演會 豫告集, pp.381~382.
- (13) Asada, H., and S.K., Lim, 1985, "Design of Joint Torque Sensors and Torque Feedback Control for Direct-Drive Arms", Proceedings of the 1985 ASME Winter Annual Meeting, Robotics and Manufacturing Automation Symposium, pp.277~284.
- (14) 高瀬, 1987, "DD ロボットの制御", 日本ロボット學會誌 Vol.5, No.1, pp.55~60, .
- (15) Kouge, K., Takeuchi, H. and Furuta, K., 1987, "Control of Robot Arms Using Joint Torque Sensors", Proceedings of SICE'87, pp.359~360. 