

자동평형장치가 부착된 로봇트 매니플레이터에 관한 연구

(A Study on a Robot Manipulator with an Auto-Balancing Mechanism)

南 光 熙*

(Kwang Hee Nam)

要 約

로봇트는 일반적으로 성능에 비해 링크 및 구동기가 심히 과도설계(overdesign) 되어 있다. 로봇트의 링크를 평형화(balancing) 시키면 역학이 간단해 질 뿐아니라 지배적으로 큰 중력항을 제거시킬 수 있다는 점이 최근에 보여졌다. 본 연구에서는 평형화에 의한 중력항의 제거가 과도설계를 피하는 한 방법으로 보고 페이로드에 따라 변하는 평형조건을 적극적으로 만족시켜주는 자동평형장치(auto-balancing mechanism)을 제안하고 그 성능을 컴퓨터 시뮬레이션으로 예시하였다.

Abstract

The size of links and actuators of robots tends to be overdesigned compared with their performance. It is recently reported that the balancing of a robot links simplifies its dynamics and eliminates the gravity terms. As a way of avoiding overdesign problem, an auto-balancing mechanism is proposed, which enables to satisfy varying balancing condition according to payloads. The performance of this auto-balancing mechanism is illustrated by the computer simulation evidences.

I. 서 론

현재의 대부분의 로봇트들은 그 제어방식에 있어서 위치 써보(position servo)의 형태를 취하고 있기 때문에 kinematic 방정식만 풀므로써 trajectory planning 이 가능했다. 이와 같은 정적 접근방법(static approach)이 컴퓨터 산업에 이용되고 있는 소형 정밀 로봇트에는 문제가 되지 않지만 철강, 자동차 산업과 같이 무거운 물질을 취급하거나 빨리 움직이는 로봇트에 있어서는 심각한 문제가 된다. 달리 말한다면,

페이로드의 변화도 로봇트 입장에서 볼 때, 로봇트 역학 변화의 한 요인이 되며 이 페이로드가 커짐에 따라, 그 비중도 증대된다. 그러나, 대부분의 로봇트는 제어방식에 있어서, 이러한 역학의 세세한 부분이 고려되어 있지 않다고 볼 수 있다. 현재 로봇트에 있어서 하나의 큰 문제점은 정적 접근방식과 역학적 접근방법이 아닌 - 재래식 제어방식의 적용 등으로 인해서, 로봇트가 심히 과도설계 되어 있다는 점이다. 예를들어 PUMA 562의 경우 자체 중량이 182kg이며 power requirement가 1.15KW이나, 최대 페이로드가 4Kg, 최대 직선속도도 50cm/sec에 불과하다.

구체적으로, 로봇트가 과도설계된 이유로서 다음

*正會員, 浦項工科大学 電子電氣工學科
(Dept. of Electrical Eng., POSTECH)
接受日字: 1988年 7月 9日

을 들 수 있다. 로봇의 역학이 실제로 매우 비선형임에도 불구하고 제어기법의 어려움을 피하기 위하여 선형 시스템으로 접근을 시도했기 때문이다. 즉, 링크 상호간의 움직임에 의한 영향력, 페이로드 및 마찰에 의한 비선형 항들을 모두 링크 하나를 움직일 때 주어지는 선형 시스템에 대한 외란(external perturbation)으로 처리했고, 또 이러한 접근방식을 유효하게 하기 위해서 각 링크 자체의 중량을 크게 하지 않으면 안되었다. 따라서 이를 동작시키기 위해서, 큰 모터를 사용하게 되고 이것 또한 로봇의 하중을 증가시킨다. 그러므로, 로봇의 과도설계를 피하기 위해서 로봇의 역학을 충분히 고려하지 않으면 안된다.

로봇 역학은 일반적으로 고차로 결합된 비선형 방정식으로 표현되기 때문에 제어기 설계에 앞서 방정식을 간단하게 하는 것도 하나의 중요한 문제이다. 이러한 관점에서 비선형 항을 케환으로 소거시켜 주는 케환 선형화 기법(feedback linearization)이 제안되기도 하였고, 로봇의 링크들을 평형화시켜 줌으로써 그 역학 방정식을 간단히 할 수 있다는 것이 Yang과 Tzeng^[3]에 의해서 보여지기도 하였다. 다시 말해서 Yang과 Tzeng은 관성분배(inertia distribution)를 통해 역학 방정식이 선형 혹은 간단한 상미분 방정식으로 표현된다는 것을 조직적인 방법으로 보였다. 이러한 관성분배에 따른 링크의 평형화가 중력항을 소거시켜 줄 수도 있기 때문에 관절 구동기의 부담을 덜고, 따라서 보다 효율적인 - 과도설계를 피하는-로봇 설계를 유도한다.

본 연구에서는 그들의 결과를 발전시켜, 페이로드가 변할 때 달라지는 평형조건을 적극적으로 만족시켜 주는 자동평형 장치를 소개하고 그 자동평형 알고리즘을 논한다. 제 2 장에서는 Yang과 Tzeng의 관성분배에 따른 역학 방정식의 단순화에 대하여 소개한다. 3 장에서는 자동평형 장치가 달린 3자유도 로봇 매니플레이터의 역학 모델링을 하고 제어방법과 함께 자동평형 알고리즘을 차례로 설명한다. 4 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션으로 자동평형장치의 효과를 제시하였다.

II. 로봇역학의 선형화 및 단순화를 고려한 링크설계

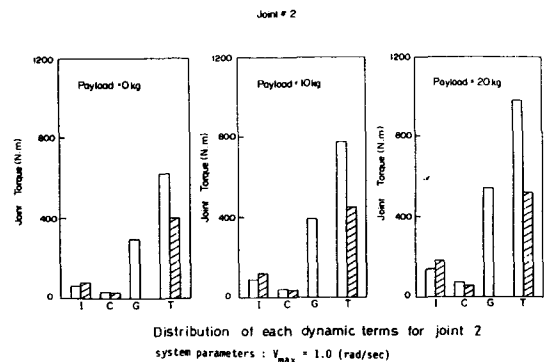
로봇의 역학 특성을 고려하지 않고 재래식 PID 제어기에 의존하는 제어기법이 로봇의 과도설계의 한 요인이 된다. 이러한 과도설계를 피하는 한 방법으로 Yang과 Tzeng^[3]은 Asada^[1]의 관성분배(inertia

distribution)의 개념을 사용할 수 있다. 관성분배를 통하면 로봇의 역학이 선형화되거나, 현저하게 단순화 되어진다. 다시말해서, 제어기 이전에 로봇의 링크를 관성분배의 개념을 사용하여 설계하면 그 로봇의 역학이 현저하게 단순화 되거나 선형화되어 제어기 설계를 한층 용이하게 한다. 이러한 로봇은 역학을 단순화시킨다는 이상의 의미를 갖는다. 이러한 개념의 로봇은 링크의 평형화를 이루기 때문에 입력토크의 가장 큰 부분인 중력항을 사라지게 한다. 따라서, 관절 구동기의 부담 및 크기가 줄어들면서 성능은 증대되는 여러가지 유리한 효과들이 나타난다. 이러한 평형화를 통한 장점들이 PUMA760을 사용하여 실험적으로 입증되었다. 다음 도표 1^[4]은 PUMA760 링크 2의 중력항인 G와 나머지 관성에 의한 힘I와 구심력 더하기 Coriolis 힘인 C를 페이로드 변화에 따라 비교하여 그린 것이다. 흰 막대 그래프는 평형화를 취하기 이전의 토크를 나타내고 빗줄친 막대 그래프는 평형화를 취한 후의 토크를 나타낸다. 이 도표에서 보면, 평형화 이전에 중력항 G가 I와 C보다 훨씬 크나 평형화를 취하면 0으로 되어 전체 토크인 T가 평형화를 취했을 때 약 반으로 줄어드는 것을 페이로드 0, 10, 20Kg 일 때 그린 것이다.

이제 Yang과 Tzeng의 관성분배를 통한 로봇역학의 단순화 과정을 다음과 같은 로봇의 역학을 예로 들어 설명하겠다.

표 1. PUMA760의 관절 2의 토크 구성비, I = 관성력, C = Coriolis 힘+구심력, G=중력, T=I+C+G(참고문헌[4]에서 발췌)

Table 1. Distribution of dynamic terms of PUMA760 joint2,
I=Inertia, C=Coriolis+Centrifugal,
G=Gravity, T=I+C+G.



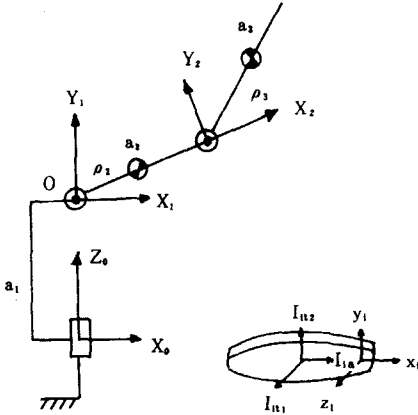


그림 1. 간단한 3링크 로봇의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of 3-link robot.

여기서 ϕ_i, a_i, M_i 는 링크 i 의 관절각, 길이 및 질량을 나타내고 ρ_i 는 링크 i 의 무게중심과 관절 i 사이의 거리를 나타낸다. $i=2, 3$ 일 때, $I_{1i1}, I_{1i1}, I_{1i2}$ 는 링크 i 의 무게중심에서의 각 주축 방향으로의 관성을 나타내고, $i=2$ 일 때 $I_{1i1}, I_{1i1}, I_{1i2}$ 는 점 O 으로 부터 계산된 값이다. 그리고 $\phi_{2+3} = \phi_2 + \phi_3$ 이다. 이 때 운동에너지는

$$T = \frac{1}{2} [I_{11a} \dot{\phi}_1^2 + I_{211} \dot{\phi}_2^2 + I_{311} \dot{\phi}_3^2 \cos^2 \phi_2 + I_{2a} \dot{\phi}_2^2 \sin^2 \phi_2 + I_{311} \dot{\phi}_{2+3}^2 + I_{311} \dot{\phi}_2^2 \cos^2 \phi_{2+3} + I_{3a} \dot{\phi}_3^2 \sin^2 \phi_{2+3}] + \frac{M_2}{2} [(a_2 \cos \phi_2 + \rho_2 \cos \phi_{2+3})^2 \dot{\phi}_2^2 + (a_2 \dot{\phi}_2 + \rho_2 \dot{\phi}_{2+3} \cos \phi_2)^2 + (\rho_2 \dot{\phi}_{2+3} \sin \phi_2)^2] \quad (1)$$

이고, 위치에너지는

$$U = M_2 g \rho_2 \sin \phi_2 + M_3 g [a_2 \sin \phi_2 + \rho_3 \sin \phi_{2+3}] \quad (2)$$

로 주어진다. 이것들을 다음과 같이 재배열할 수가 있다.

$$T = \frac{1}{2} [I_{11a} \dot{\phi}_1^2 + I_{211} \dot{\phi}_2^2 + I_{311} \dot{\phi}_{2+3}^2 + M_2 a_2^2 \dot{\phi}_2^2] + \frac{1}{2} [(I_{311} + M_2 a_2^2) \cos^2 \phi_2 + I_{2a} \sin^2 \phi_2] \dot{\phi}_2^2 + \frac{1}{2} [(I_{311} + M_2 \rho_2^2) \cos^2 \phi_{2+3} + I_{3a} \sin^2 \phi_{2+3}] \dot{\phi}_3^2 + M_2 a_2 \rho_2 \cos \phi_2 \cos \phi_{2+3} \dot{\phi}_2 \dot{\phi}_3 + M_2 a_2 \rho_2 \dot{\phi}_2 \dot{\phi}_{2+3} \cos \phi_2 + \frac{M_3}{2} \rho_3^2 \dot{\phi}_{2+3}^2 \quad (3)$$

$$U = (M_2 \rho_2 + M_2 a_2) g \sin \phi_2 + M_3 \rho_3 g \sin \phi_{2+3} \quad (4)$$

여기서 다음 식이 만족되면,

$$\rho_3 = 0 \quad (5)$$

$$M_2 \rho_2 + M_2 a_2 = 0 \quad (6)$$

$$I_{311} = I_{2a} \quad (7)$$

$$I_{311} + M_2 a_2^2 = I_{2a} \quad (8)$$

위치에너지 U 가 0이 되고 운동에너지 T 는 상수계수를 갖는 각 속도 제곱항의 합으로 표현된다.

$$T = \frac{1}{2} [I_{11a} \dot{\phi}_1^2 + I_{211} \dot{\phi}_2^2 + I_{311} \dot{\phi}_{2+3}^2 + I_{2a} \dot{\phi}_2^2 + I_{3a} \dot{\phi}_3^2 + M_2 a_2^2 \dot{\phi}_2^2] \quad (9)$$

$$U = 0 \quad (10)$$

따라서 다음과 같이 선형화된 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= (I_{11a} + 2I_{2a} + 2I_{3a}) \ddot{\phi}_1 \\ \tau_2 &= 2(I_{211} + I_{311} + M_2 a_2^2) \ddot{\phi}_2 + 2I_{311} \ddot{\phi}_3 \\ \tau_3 &= 2I_{311} (\ddot{\phi}_2 + \ddot{\phi}_3) \end{aligned} \quad (11)$$

말하자면, 식 (5 ~ 8)와 같은 평형화 조건 (balancing condition)이 만족되면 제어 (feedback control) 없이도 로봇의 방정식이 선형화 될 수 있다. 항상 이와 같은 방법에 의해서 선형화가 되는 것은 아니지만, 평형화 (balancing)를 통하면 그 역학 방정식이 매우 간단해 진다.

여기서 (5)와 (6)은 질량 평형 (mass balancing)에 관한 식이고, 식 (7)과 (8)은 관성 평형 (inertia balancing)에 관한 식이다. 즉, ρ_2 가 $-a_2 M_2 / M_2$ 가 되도록 링크 2의 중심이 축 2 뒷편에 -관절 3의 반대 방향 -잡혀 있고 관절 3과 링크 3의 무게중심이 일치하도록 하면 $-\rho_3 = 0$ - 질량이 평형화 되어서 중력항이 0으로 되어 중력에 의한(비선형) 항인 중력항 (gravity term)이 역학 방정식 (11)에 나타나지 않는다. 그리고 이러한 질량 평형화는, 불평형인 경우에도, 링크의 축 반대편에 평형추 (balancing mass or counter mass)를 부가함으로써 쉽게 이루어진다.

한편, 링크의 관성평형 (inertia balancing) 조건이 만족되는 경우에는 시스템이 더욱 단순화되지만 실질적으로 이 조건들을 만족시키는 데는, 질량 평형화와는 달리, 어려운 문제가 있다. 즉 식 (7) (8)을 만족시키기 위해서는 a-축 방향의 관성 I_{2a}, I_{3a} 이 y-축 방향의 관성 I_{211}, I_{311} 과 같거나 커져야 하는데 이 조건들이 링크의 모양을 괴상하게 (구형이나 별모양) 만든다.

질량 평형화와 관성 평형화를 비교하여 정리하면 다음과 같다. 질량 평형화는 입력 토크에서 공급해야 할 가장 지배적인 중력항을 평형화를 통하여 없애 주므로써 각 관절구동기(joint actuator)의 부담을 덜어주며 평형추를 부가하므로써 쉽게 질량평형화를 이룰 수 있다. 이에 비해, 관성평형화는 이루기가 실질적으로 힘들며, 그 효과가 중력항과 관계없는 항들의 단순화 이외에 큰 의미를 갖지 못한다.

III. 자동평형장치의 설계

우리는 전 장에서 로봇의 링크를 어떻게 설계하면 그 역학을 선형화 혹은 단순화시킬 수 있는지에 대해 생각해 보았다. 즉, 질량평형조건을 만족시키면 중력항을 상쇄시킬 수 있으며 나아가서 관성 평형조건까지 만족시키면 역학의 선형화, 단순화를 이룰 수 있다는 것을 보였다. 전 장에서 기술한 대로 질량평형이 관성평형에 비해서 중력항의 소거라는 입장에서 중요하며 또한 질량평형화 과정이 단순하기 때문에 이 장에서는 질량평형화에 대해서만 고려하기로 하며, 앞으로 아무런 단서없이 평형화라 말할 때는 질량평형화를 의미한다.

역학이 페이로드의 함수이기 때문에 페이로드가 바뀌면 역학도 바뀌며 또한 평형조건이 바뀐다. 그런데, 우리는 많은 경우에, -여러 종류의 물건을 다루는 경우, 물건을 집었을 때와 놓았을 때- 페이로드의 조건이 바뀌는 것을 알 수 있다. 따라서 이렇게 변화

하는 페이로드에 대응하여 적극적으로 만족시키기 위해서는 평형추(balancing mass)의 무게 혹은 위치가 상용하여 변해 주어야 한다. 여기서는 평형추의 위치를 조정해 주어 변하는 평형조건을 만족시켜 주는 자동평형 장치와 자동평형 알고리즘에 대해 소개하려고 한다.

1. 자동평형장치가 달린 로봇의 역학

다음 그림 2와 같이 평형추를 prismatic 관절에 연결하여 구동기를 통해 움직일 수 있게 만들었다고 가정한다. 여기서, m_2, m_3 와 l_2, l_3 는 평형추의 무게, 관절i로 부터의 거리를 의미하고 m_p 는 페이로드를 의미한다. 실질적으로 그림3과 같이 screw pair와 스테핑모터, 혹은, 다른 종류의 모터를 사용하여 평형추의 운동기구를 간단히 만들 수 있다.

그러면 운동에너지 T 및 위치에너지 U가 다음과 같이 주어진다.

$$T = \frac{1}{2} [I_{1a} \dot{\phi}_1^2 + (I_{211} + m_2 l_2^2 + \bar{M}_3 a_2^2) \dot{\phi}_2^2 + (I_{311} + \bar{I}_3) \dot{\phi}_{2+3}^2] + \frac{1}{2} [I_{212} + \bar{M}_3 a_2^2 + m_2 l_2^2] \cos^2 \phi_2 + I_{21a} \sin^2 \phi_2 \dot{\phi}_1^2 + \frac{1}{2} [(I_{312} + \bar{I}_3) \cos^2 \phi_{2+3} + I_{31a} \sin^2 \phi_{2+3}] \dot{\phi}_1^2 + \mu a_2 (\cos \phi_2 \cos \phi_{2+3} \dot{\phi}_1^2 + \cos \phi_2 \dot{\phi}_2 \dot{\phi}_{2+3}) \tag{12}$$

$$U = (M_2 \rho_2 - m_2 l_2 + \bar{M}_3 a_2) g \sin \phi_2 + \mu g \sin \phi_{2+3} \tag{13}$$

여기서

$$\bar{M}_3 = M_3 + m_p + m_3 \tag{14}$$

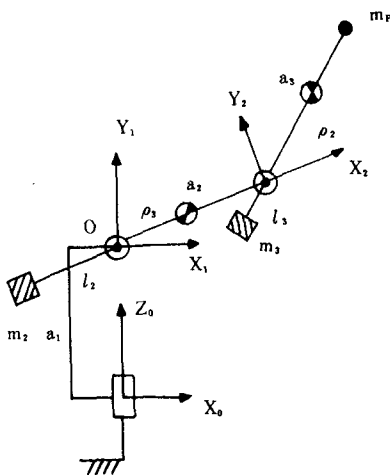


그림 2. 자동평형 장치가 부착된 3 링크 로봇의 개략도

Fig. 2. Schematic diagram of 3-link robot with auto-balancing mechanism.

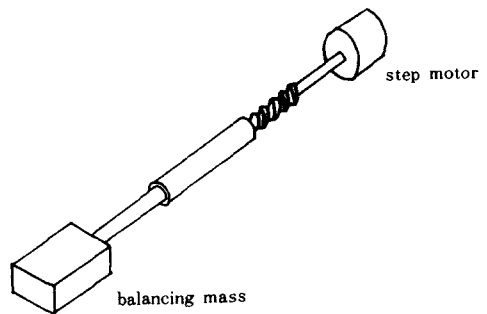


그림 3. 평형장치의 조정기구
Fig. 3. Auto-balancing mechanism.

$$\bar{I}_3 = M_3 \rho_3^2 + m_p a_3^2 + m_3 l_3^2 \quad (15)$$

$$\mu = M_3 \rho_3 + m_p a_3 - m_3 l_3 \quad (16)$$

이것에 라그랑지안을 가하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\tau_1 = D_{11} \ddot{\phi}_1 + 2H_{12} \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 + 2H_{13} \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_3 \quad (17)$$

$$\tau_2 = D_{22} \ddot{\phi}_2 + D_{23} \ddot{\phi}_3 + H_{11}^2 \dot{\phi}_1^2 + 2H_{23}^2 \dot{\phi}_2 \dot{\phi}_3 + H_{33}^2 \dot{\phi}_3^2 + G_2 \quad (18)$$

$$\tau_3 = D_{33} \ddot{\phi}_3 + D_{32} \ddot{\phi}_2 + H_{11}^3 \dot{\phi}_1^2 + H_{22}^3 \dot{\phi}_2^2 + 2H_{23}^3 \dot{\phi}_2 \dot{\phi}_3 + G_3 \quad (19)$$

여기서

$$D_{11} = I_{1a} + (I_{212} + \bar{M}_3 a_2^2 + m_2 l_2^2) \cos^2 \phi_2 + I_{2a} \sin^2 \phi_2 + (I_{312} + \bar{I}_3) \cos^2 \phi_{2+3} + I_{3a} \sin^2 \phi_{2+3} + 2\mu a_2 \cos \phi_2 \cos \phi_{2+3}$$

$$D_{22} = I_{211} + I_{311} + \bar{M}_3 a_2^2 + \bar{I}_3 + 2\mu a_2 \cos \phi_2 + m_2 l_2^2$$

$$D_{23} = D_{32} = \bar{I}_3 + \mu a_2 \cos \phi_2 + I_{312}$$

$$D_{33} = I_{311} + \bar{I}_3$$

$$H_{12}^2 = -\frac{1}{2} (I_{212} + \bar{M}_3 a_2^2 + m_2 l_2^2 - I_{2a}) \sin 2\phi_2 - \frac{1}{2} (I_{312} + \bar{I}_3 - I_{3a}) \sin 2\phi_{2+3} - \mu a_2 \sin (2\phi_2 + \phi_3)$$

$$H_{13}^2 = -\frac{1}{2} (I_{212} + \bar{I}_3 - I_{3a}) \sin 2\phi_{2+3} - \mu a_2 \cos \phi_2 \sin \phi_{2+3}$$

$$H_{11}^2 = -H_{12}^2$$

$$H_{23}^2 = H_{32}^2 = -\mu a_2 \sin \phi_2$$

$$H_{11}^3 = -H_{12}^3$$

$$H_{22}^3 = H_{33}^3 = -\mu a_2 \sin \phi_2$$

$$G_2 = (M_2 \rho_2 - m_2 l_2 + \bar{M}_3 a_2) g \cos \phi_2 + \mu g \cos \phi_{2+3}$$

$$G_3 = \mu g \cos \phi_{2+3}$$

다음 평형조건을 통하면

$$\mu = M_3 \rho_3 + m_p a_3 - m_3 l_3 = 0 \quad (20)$$

$$M_2 \rho_2 - m_2 l_2 + \bar{M}_3 a_2 = 0 \quad (21)$$

식 (18), (19) 우변에서 지배적인 중력항을 0으로 만들 수 있다. 따라서, 질량평형화를 통해서 관절구동기의 부담을 현저히 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 평형추 m_2 와 m_3 를 움직여서 l_2 와 l_3 를

$$l_2 = \frac{1}{m_2} (M_2 \rho_2 + \bar{M}_3 a_2) \quad (22)$$

$$l_3 = \frac{1}{m_3} (M_3 \rho_3 + m_p a_3) \quad (23)$$

으로 택할 때의 장점을 다음과 같이 열거할 수 있다.

- 1) 관절 2, 3의 중력항과 Coriolis 힘이 사라진다.
- 2) 연계관성(coupling inertia) 항이 작아진다.

그러나 식 (20), (21)에서 알 수 있듯이, 평형화 조건이 페이로드인 m_p 의 함수이므로 페이로드가 변하면 평형조건도 틀리게 된다. 문제는 '페이로드 m_p 가 미지일 때 어떻게 평형을 취하는가?' 이다.

2. 제어기의 설계

관절각 ϕ_i 와 각속도 $\dot{\phi}_i$ 가 항상 측정 가능하다고 가정하고 다음과 같이 중력항이 보상되는 PID 위치 서보제어기(position servo controller)를 생각해 보자.

$$\tau_i = u_i \quad (24)$$

$$\tau_2 = u_2 \quad (25)$$

$$\tau_3 = u_3 \quad (26)$$

여기서

$$u_i = K_p e_i + K_{D1} \dot{e}_i + K_{I1} \int_0^t e_i(\tau) d\tau, \quad i = 1, 2, 3$$

$e_i = \phi_i - \phi_{di}$ 이며 ϕ_{di} 는 원하는 i 번째 관절각을 나타낸다. 이때 제어블럭선도를 관절당 그리면 그림 4와 같다. 여기서 d_i 는 각종 오차 및 마찰, 미모델화된 역학(unmodeled dynamics) 등에 의한 외란(disturbance)을 말한다. 관절 2, 3의 구동기에서 발생해야 할 토크의 요소중 가장 큰 비중을 차지하는 중력항을 평형에 의해 없애주므로써 구동기의 부담을 덜 수 있다는 것을 식 (18~19), (25~26)으로 부터 구한 오차 방정식(error equation)에서 알 수 있다. 이것은 또한 평형화를 통해서 구동기의 크기를 줄일 수 있다는 것을 의미하며 로봇의 과도설계를 피하는 한가지 방법이 될 것이다.

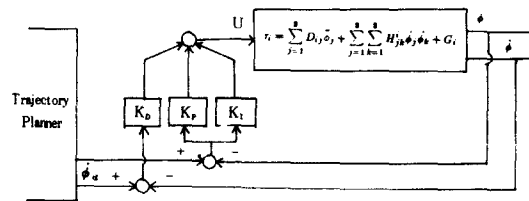


그림 4. 관절 제어기의 블럭선도
Fig. 4. Block diagram of joint actuator controller.

3. 자동평형장치

식 (22), (23)으로 부터 알 수 있듯이 평형조건은 위치 및 속도, 즉 로봇의 움직임과 무관하다. 따라

서 우리는 로보트 운전과는 독립적으로 평형화 과정을 생각할 수가 있다. 평형추의 움직임이 로보트 역학에 영향을 주지만 평형추의 이동속도가 관절의 움직임에 비해 충분히 느다고 볼 수 있기 때문에 그 영향을 무시할 수 있다고 가정한다. 그림 4의 블럭선도에서, l_2 와 l_3 의 함수인 G_2 와 G_3 의 크기는 항상 측정 가능하며, 이것이 관절 2와 3의 불평형의 상태를 반영하기 때문에 이를 이용해 미지의 페이로드에 대해서도 평형화를 꾀할 수 있다. 즉 불평형이 되었을 때에는 G_2 와 G_3 가 nonzero가 되기 때문에 l_2 , l_3 를 조정해서 G_2 와 G_3 를 0이 되도록 해주는 것이 자동평형화의 목적이다. 따라서 우리는 적당한 이득 $K_1, K_2 > 0$ 에 대해서

$$J = G_2 + G_3$$

$$i_2 = -K_1 \text{sgn} \left[\frac{\partial J}{\partial l_2} \right] = C_1 \text{sgn}(G_2 \cos \phi_2)$$

$$i_3 = -K_2 \text{sgn} \left[\frac{\partial J}{\partial l_3} \right] = C_2 \text{sgn}[(G_2 + G_3) \cos \phi_{2,3}]$$

(27)

로 잡으면 G_2 와 G_3 를 0의 부근으로 수렴시킬 수 있다. 여기서 $C_1 = 2K_1 m_2 g$, $C_2 = 2K_2 m_3 g$ 이다. 이 알고리즘은 pseudogradient algorithm의 일종이다. 여기서 sgn 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

식 (27)에서 i_2, i_3 는 $\pm C_1$ 또는 $\pm C_2$ 가 되므로 상속도(constant speed)로 동작하게 되며 값 C_1, C_2 는 모타 및 평형추의 특성에 따른다.

식 (27)의 의미를 링크 2의 예를 들어 설명하면 아래와 같다. $\cos \phi_2 > 0$ 인 경우에 $G_2 < 0$ 이면 링크가 과도평형화(over balancing)되어 무게중심이 관절 2 뒤에 있기 때문에 중력에 의해 링크가 반시계방향으로 도는 것을 의미한다. 따라서 이 경우는 l_2 를 줄여 주어야 하고 ($i_2 < 0$) 이것은 식 (27)의 부호와 일치한다. 반대로 $\cos \phi_2 < 0, G_2 > 0$ 이면 평형이 충분히 취해지지 못해 중력에 의해 시계방향으로 움직이려고 하는 경우를 의미하기 때문에 l_2 를 크게 하여 ($i_2 > 0$) 평형을 취해야 하는데, 이것 역시 식 (27)의 부호와 일치한다. 같은 방법으로 링크 3의 평형추 조정에 대해서 설명할 수 있다.

$\cos \phi_2, \cos \phi_{2,3} < 0$ 인 경우에는 평형추의 역할이 바뀌기 때문에 l_2, l_3 의 조정방향 역시 바뀌어야 한다. 그리고 $\phi_2 = \pm 90^\circ, \phi_{2,3} = \pm 90^\circ, \pm 270^\circ$ 인 곳 - 링크 2

혹은 3이 수직방향인 곳 -에서는 평형화동작이 취해지지 않음을 알 수 있다. 그런데 실질적으로는 여러 가지 오차와 외란이 포함되기 때문에 식 (28), (29)와 같은 평형알고리즘(robust balancing algorithm)이 선호되어 진다. 즉 어떤 $\epsilon > 0$ 에 대해서

$$i_2 = \begin{cases} -C_1 & \text{if } G_2 \cos \phi_2 > \epsilon \\ 0 & \text{if } -\epsilon \leq G_2 \cos \phi_2 \leq \epsilon \\ C_1 & \text{if } G_2 \cos \phi_2 < -\epsilon \end{cases}$$

(28)

$$i_3 = \begin{cases} -C_2 & \text{if } (G_2 + G_3) \cos \phi_{2,3} > \epsilon \\ 0 & \text{if } -\epsilon \leq (G_2 + G_3) \cos \phi_{2,3} \leq \epsilon \\ C_2 & \text{if } (G_2 + G_3) \cos \phi_{2,3} < -\epsilon \end{cases}$$

(29)

와 같이 취한다. 이것이 식 (27)과 다른 점은 l_2 와 l_3 를 움직이는데 ϵ -불감대를 두어 잡음에 대해서 평형화가 불안하게 되는 것을 방지하고 있다.

마지막으로 이 평형알고리즘은 로보트 관절운동과 동시에 작동시킬 수 있다는 점을 주지하기 바란다. 즉 평형추의 움직임이 관절운동보다 충분히 느려, 역학에 미치는 영향이 과히 크지 않다는 가정하에서, 로보트가 어떤 일을 수행중에 이러한 평형화 과정을 병행할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

로보트의 링크에 관한 data는 다음과 같다.

	l_{1n} (Nm)	I_{111} (Nm)	I_{112} (Nm)	M_1 (Kg)	m_1 (Kg)	ρ_1 (m)	a_1 (m)
링크1	0.5						
링크2	0.3	19.4	11.1	110.8	50	0.15	0.43
링크3	0.00047	2.44	2.47	36.3	30	0.01	0.43

여기서 링크 2와 3에 관한 data는 PUMA 760의 링크 2, 3의 data와 같다. 여기서, 페이로드 m_p 를 30Kg으로 잡았다. -PUMA 760의 최대 허용 페이로드가 10Kg인 것을 참고하기 바람 - 입력 data들의 초기치는 다음과 같다.

$$\phi_1(0) = 5.0, \phi_2(0) = \phi_3(0) = \dot{\phi}_1(0) = \dot{\phi}_2(0) = \dot{\phi}_3(0) = 0$$

또한 토크입력을 다음과 같이 잡았다.

$$\tau_1 = -5000(\phi_1 - \phi_{1a}) - 500(\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_{1a})$$

$$\tau_2 = -40000(\phi_2 - \phi_{2a}) - 200(\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_{2a})$$

$$\tau_3 = -40000(\phi_3 - \phi_{3a}) - 200(\dot{\phi}_3 - \dot{\phi}_{3a})$$

여기서 $\phi_{1a} = 3.14, \phi_{2a} = 0.4, \phi_{3a} = -0.45, \dot{\phi}_{1a} = \dot{\phi}_{2a} =$

$\dot{\phi}_a=0$ 이다. 즉, 이 예제에서는 PID제어기 대신 PD 제어기를 택했다.

l_2, l_3 조정알고리즘(평형알고리즘)에 있어서 $l_2(0) = l_3(0) = 0.1, \epsilon = 0.8, C_1 = C_2 = 0.3$ 로 잡았다. 그림 5는 자동평형 알고리즘에 의해서 중력항이 현저히 줄어드는 것을 보여준다. 그림 6은 l_2, l_3 의 움직임의 나타내고 그림 7은 관절각 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 의 궤적으로 원하는 값인 3.14, 0.4, -0.45를 찾아가는 모습을 그린 것이다.

V. 결 론

로봇링크에 평형을 취하면 중력항이 소거되고 연결된 항(coupled term) 및 Coriolis항의 많은 요소들이 줄어든다. 그런데, 중력항은 관절구동기에서 발생해야 하는 토크의 지배적부분을 차지하기 때문에,

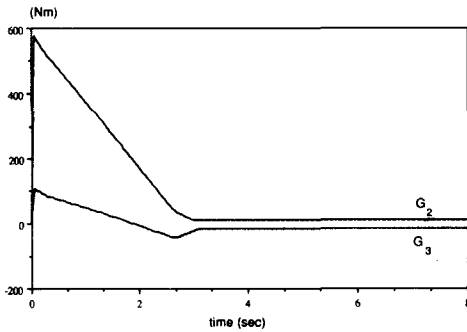


그림 5. 자동평형 장치에 의해 중력항 G₂와 G₃가 줄어드는 모습
Fig. 5. Plot of G₂ and G₃ versus time.

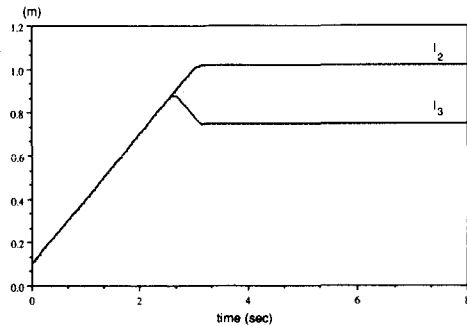


그림 6. 자동평형 장치에 의해 평형추 m₂, m₃가 움직이는 모습
Fig. 6. Plot of m₂ and m₃ versus time.

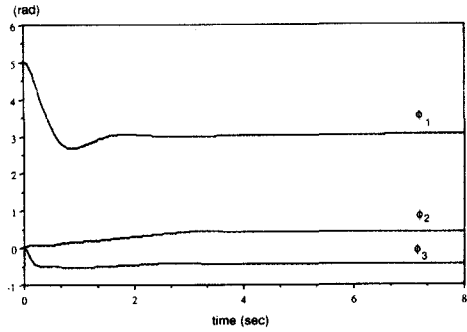


그림 7. PD제어에 의해 관절각 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 가 원하는 값을 찾아가는 모습
Fig. 7. Trajectories of ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 with PD controller.

중력항의 제거로 인해서 관절구동기의 부담이 줄어든다. 따라서, 평형화를 취하는 것이 로봇트의 과도설계를 피하는 한 방법이 될 수 있다. 평형조건은 페이로드의 함수이므로 페이로드에 따라 변화하는 평형조건을 적극적으로 만족시켜 주는 것을 자동평형장치라 한다. 자동평형장치는 링크의 한쪽끝에 모터에 의해 움직이는 평형추를 달므로써 구현이 된다. 또한, 중력항이 nonzero가 된것을 불평형의 sign으로 택하여 중력항이 영이 되도록 평형추의 위치를 조정하는 자동평형 알고리즘을 유도했다. 이 자동평형 알고리즘은 미지의 페이로드에 대해서도 동작을 하며 관절운동과 동시에 작동시키는 것이 가능하다. 평형 알고리즘에 불감대를 설정하여 강인도(robustness)를 증대시키고, 그 성능을 computer simulation 결과로 예시했다.

参 考 文 献

- [1] Asada, H., "A geometrical representation of manipulator dynamics and its application to arm design," *ASME J. Dyn. Sys., Meas., Contr.* 105, pp. 131-135.
- [2] Asada, H. and Slotine, J.-J. E., "Robot analysis and control," John Wiley and Sons, New York, 1986.
- [3] Yang, D.C.H. and Tzeng, S.W., "Simplification and linearization of manipulator dynamics by the design of inertia distribution," *Int. J. Robotics Res.* 5(3), pp. 120-128.
- [4] Chung, W.K., "On the dynamic characteristics and control of balanced robot manipulators," KAIST Ph. D. dissertation, 1987. *

著 者 紹 介



南 光 熙(正會員)

1980年 서울공대 공업화학 학사학
위 취득. 1982年 서울공대 제어계
측공학과 공학석사학위 취득. 1986
年 The University of Texas at
Austin에서 수학석사, 전기공학 박
사학위 취득. 1987年~현재 포항
공대 전자전기 공학과 조교수 재직. 주관심분야는
로보틱스, 비선형제어, 전자빔 역학 등임.