

산업용 로봇의 유연관절 제어기 설계: Part 1

- 2관성계 모델링

Controller Design for Flexible Joint of Industrial Robots: Part 1

- Modeling of the Two-Mass System

이 상 훈*, 박 종 현
(Sang Hun Lee and Jong Hyeon Park)

Abstract : Increasing requirements for the high quality of industrial robot performance made the vibration control issue very important because the vibration makes it difficult to achieve quick response of robot motion and may bring mechanical damage to the robot. This paper presents the vibration mechanism of an industrial robot which has flexible joints. The joint flexibility of the robot is modeled as a two-mass system and its dynamic characteristics are analysed. And some characteristics of the two-mass system, especially for the joint of industrial robots, such as disturbance, non-linearity and time-varying characteristics are studied. And finally, some considerations on controller design for the flexible joint of industrial robots are discussed.

Keywords : industrial robot, joint flexibility, two-mass system, reducers

I. 서론

최근 산업용 로봇을 비롯하여 동력전달부를 가지고 있는 산업용 기기는 구동기(actuator)와 부하간의 동력전달에 있어 고 감속화가 이루어지고 있다. 또한 고속 고정도 동작이 동작성능 면에서 강력하게 요구되고 있다. 하지만 구동부-동력전달부-부하로 구성된 산업기기에서 구동부와 부하 사이의 동력전달부를 과거 저성능 기기에서처럼 강체(rigid body)로 보아 제어기를 설계한다면 진동을 피할 수 없어 만족할 만한 동작성능을 달성하기 힘들 수도 있다. 이에 따라 동력전달부를 유연한 것으로 생각하는 2관성계(two-mass system) 모델이 고도사양 기기 제어모델의 주류가 되고 있고 이를 바탕으로 한 제어기의 개발이 시도되고 있다[1-3].

그러나 동력전달부에 유연성(flexibility)이 있는 기구를 진동 없이 제어하는 것은 용이하지 않다. 여기에 더해 보통 센서는 구동부에 위치하게 되므로 제어 대상이 되는 부하 측의 정보나 부하와의 상대변위로 표현되는 비틀림 진동을 측정하기가 매우 힘들다. 이러한 문제에 PID 형태의 간단한 제어기로는 효과적인 대응이 매우 어렵다. 따라서 현대 제어이론, H_∞ 제어이론, 비선형제어이론 등 고급 제어이론을 이용한 방법들이 시도되었다[1,4,5,6]. 그러나 이런 방법들은 이론적으로 복잡하여 개발이 어렵고 사용하기에도 간편하지 않아 그동안 산업용 제어기에는 적용되지 못하였다.

하지만 최근 산업용 제어기는 그 동안 이루어진 제어기 H/W의 성능향상에 따라 다소 복잡한 제어이론의 구현도 가능하게 되어, 2관성계의 모델링을 통하여 직접 측정할 수 없는 비틀림 정보를 관측하는 관측기를 설계하고 관측된 상태량을 이용해 상태피드백 제어기로 제어하는 방법의 적

용도 이루어지고 있다[7-10].

본 논문에서는 상업적 적용이 가능한 실용적인 제어기를 설계하기 위해 유연한 동력전달부를 가진 산업용 기기에 나타나는 2관성계의 모델링과 동적 특징을 분석한다. 또한, 유연한 산업용 로봇 관절의 효과적인 제어기 설계를 위해 산업용 로봇에 특징적으로 발생하는 주요 비선형성 및 외란 요인을 분석하고 제어기 설계 시 고려해야할 주요한 사항을 분석한다.

II. 산업용 로봇 관절의 2관성계 모델

1. 2관성계 모델의 필요성

산업용 기기의 요구 성능이 고도화됨에 따라 그동안 무시할 수 있었던 구동대상의 유연성에 의한 진동이 나타나게 되어, 동력전달부를 강체로 간주하는 그림 1과 같은 종

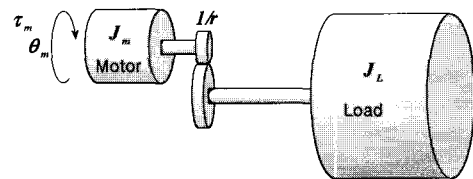


그림 1. 종래 1관성계 모델.

Fig. 1. Conventional one-mass system.

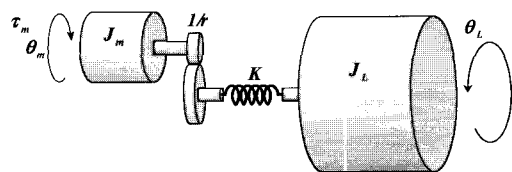


그림 2. 2관성계 모델.

Fig. 2. Two-mass system.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 10. 10., 채택확정 : 2006. 1. 22.

이상훈 : 한양대학교 정밀기계공학과(mrshlee@hhi.co.kr)

박종현 : 한양대학교 기계공학부(jongpark@hanyang.ac.kr)

래의 1관성계 모델로는 적절한 제어기의 설계가 어렵게 되었다. 모터로 부하기계를 구동하는 경우 동력을 전달하는 축(shaft)이나 기어(gear) 등 동력전달부의 강성(stiffness)이 낮으면 모터축과 부하축의 관성이 분리되는 2관성 공진계가 되어 진동이 발생하게 된다. 따라서 근래에는 그림 2와 같이 구동부와 구동대상 사이의 동력전달부를 유연하게 생각하는 2관성계 모델이 고도사양 기기 제어모델의 주류가 되고 있다[1-3].

유연한 동력전달부를 갖는 산업용 기기가 갖는 문제점으로는 가장 대표적으로 진동의 발생에 의한 동작 품질 저하가 있고, 동작이 마무리 되는 시점에서 진동이 멈출 때 까지 기다린 후 작업을 할 수 밖에 없게 되는 작업 속도의 저하가 있다. 또한 과도한 진동은 매우 큰 비틀림 토크를 유발해 유연한 동력전달부를 파괴할 수도 있다.

2관성계 모델링이 필요한 산업용 기기의 대표적인 사례는 다음과 같다.

1.1 회전-회전 동력전달

우선 본 논문에서 주로 다룰 그림 3과 같은 산업용 로봇 관절의 유연성이 대표적이다. 최근 산업용 로봇은 자체 중량 대비 가반 하중의 증가 및 고속화에 따라 소형화된 모터와 높은 감속비를 가진 감속기(reducer)를 이용하여 큰 부하를 구동하고 있다. 이에 따라 큰 힘이 집중되는 감속기의 유연성에 의한 진동이 문제가 되고 있다. 진동의 억제를 위해서는 관절을 모터, 유연한 동력전달부 및 부하링크를 가진 2관성계로 모델링 하지 않으면 원활한 제어가 불가능하다. 또한 그림 4와 같은 제철용 압연기계 또는 제지기계 등에서도 모터와 부하 사이의 동력전달계의 유연성이 문제가 되고 있고, 대형 롤러로 이루어진 부하도 매우 커 2관성계 모델이 필요한 전형적인 경우이다[11-13].

1.2 회전-직선 동력전달

그림 5와 같이 공작기계 또는 공장자동화용 반송장치 등 볼스크류 구동부를 사용하는 장치들은 고속, 고정도 운전을 하게 되면서 그동안 무시되었던 볼스크류 및 커플링 등 동력전달부의 유연성을 고려하여야만 정교한 동작을 실현할 수 있게 되었다[14]. 또한 그림 6과 같은 엘리베이터의 모터-케이블-부하로 이루어진 구동시스템도 고성능 동작을 구현하기 위해 케이블의 유연성을 고려한 2관성계 모델링이 필요한 경우이다[15].

이와 같이 각종 산업용 기기의 고성능화가 추구되면서 기존에 강체 모델링에서 통해 무시되었던 기기의 유연성이 대두되고 있다. 특히 고성능 기기에서 열악한 조건에 놓이게 되는 동력전달계의 유연성이 관심받게 되었고 이를 고려한 진동계의 모델링이 필연적으로 요구되고 있다.

2. 산업용 로봇의 관절 유연성

산업용 다관절 로봇에 있어 관절 유연성(joint flexibility)은 진동을 유발하는 대표적인 원인으로 얘기할 수 있다. 산업용 로봇의 각 링크 요소는 강성이 충분히 높게 설계된다고 말할 수 있으나, 로봇이 고속, 고정도화 되면서 로봇 관절에서 동력을 전달하는 주요한 요소인 감속기는 그 유연성이 관심을 받게 되었다. 그림 7과 같이, 감속기가 장착된 산업용 로봇[16] 관절의 감속비는 보통 100배 전후로 매우

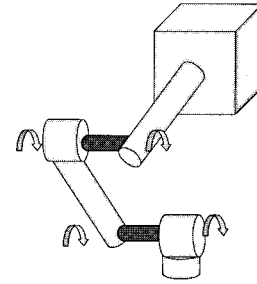


그림 3. 유연 관절 로봇암.
Fig. 3. Flexible joint robot arm.

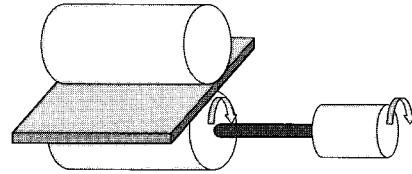


그림 4. 유연한 축을 갖는 압연기계.
Fig. 4. Rolling mill with flexible shaft.

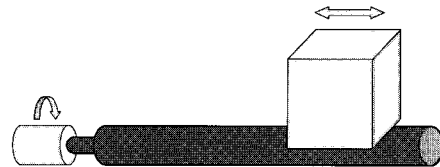


그림 5. 유연한 볼스크류.
Fig. 5. Flexible ball-screw.

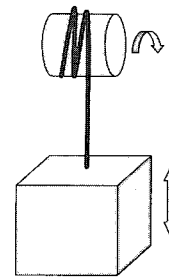


그림 6. 유연 로프를 갖는 엘리베이터.
Fig. 6. Elevator with flexible rope.

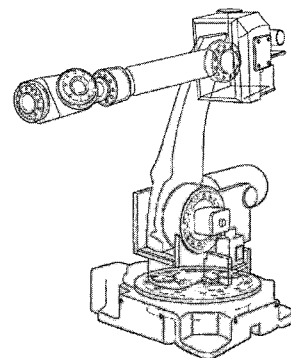


그림 7. 감속기가 장착된 산업용 로봇.
Fig. 7. Industrial robot with reducers.

크고, 이에 따라 매우 큰 로봇 링크 및 부하를 구동해야 한다. 이와 같이 로봇 관절의 감속기는 작은 크기의 모터에 비해 매우 큰 부하를 구동하여 큰 힘이 집중되는 열악한 동작조건에 처한다.

로봇용 감속기로는 대표적으로 그림 8과 같은 하모닉 드라이브, RV감속기 등이 사용되고 있다[16,17]. 이들은 모두 과거의 동력전달장치보다는 강성이나 백래쉬(backlash) 등의 면에서 매우 우수한 기구이지만 앞서 말한 열악한 구동 조건과 고성능 추구에 의해 상대적으로 유연성이 나타나게 되어 진동유발의 주요 요인으로 꼽히고 있다[18-20].

3. 2관성계 모델링

유연한 산업용 로봇의 관절은, 그림 2와 같이 모터이너서와 링크의 연쇄로 구성된 부하이너서, 그리고 모터와 부하 사이에서 동력을 전달하는 유연한 감속기를 가진 2관성계 모델로 표현할 수 있다[2]. 마찰을 무시한 2관성계의 운동방정식은 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_m &= J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + \frac{1}{r} K(\frac{\theta_m}{r} - \theta_L) \\ K(\frac{\theta_m}{r} - \theta_L) &= J_L \frac{d^2\theta_L}{dt^2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, τ_m 은 모터측 입력토크, J_m, J_L 은 각각 모터와 링크의 이너서, θ_m, θ_L 은 각각 모터와 링크의 각도, K 는 감속기의 강성, 그리고 r 은 감속비를 나타낸다.

일반적으로 로봇 관절의 위치센서는 모터측에 장착된다. 따라서 제어의 목표가 되는 링크측의 정보는 직접 측정이 불가능하다. 그리고 진동의 원인이 되는 모터와 링크간의 비틀림 각도 또한 직접 측정이 불가능하다. 하지만 그림 9의 2관성계의 블록선도에서 보는 바와 같이 작용, 반작용력 관계에 의해 비틀림 토크가 모터의 토크 입력 쪽으로 궤환(feedback)되어 결국 모터각도에 반영되고 있다. 따라서 적절한 관측기를 사용하면 링크의 각도나 비틀림 각도의 정보를 재구성해 낼 수 있다.

2관성계 시스템을 상태방정식으로 표현하면 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_s \\ \dot{\omega}_L \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K}{rJ_m} & 0 \\ \frac{1}{r} & 0 & -1 \\ 0 & \frac{K}{J_L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tau_m \\ y &= [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ω_m, ω_L 은 각각 모터와 링크의 각속도를 나타낸다. 그리고 θ_s 는 비틀림각도로서 모터와 링크의 각도차이다.

모터에 가해지는 토크입력에 대한 모터와 링크의 각속도의 관계는 (3), (4)와 같은 전달함수로 표현할 수 있다.

$$\frac{\omega_m(s)}{\tau_m(s)} = \frac{J_L s^2 + K}{J_m J_L s^3 + K(J_m + \frac{1}{r^2} J_L) s} \quad (3)$$

$$\frac{\omega_L(s)}{\tau_m(s)} = \frac{\frac{1}{r} K}{J_m J_L s^3 + K(J_m + \frac{1}{r^2} J_L) s} \quad (4)$$

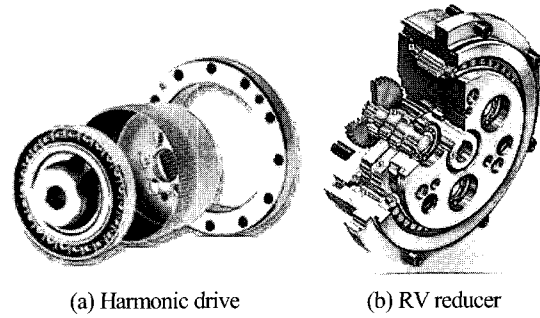


그림 8. 로봇용 감속기.

Fig. 8. Reducers for robots.

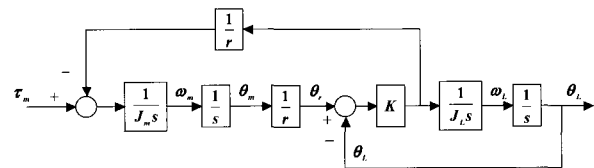


그림 9. 2관성계의 블록선도.

Fig. 9. Block diagram of two-mass system.

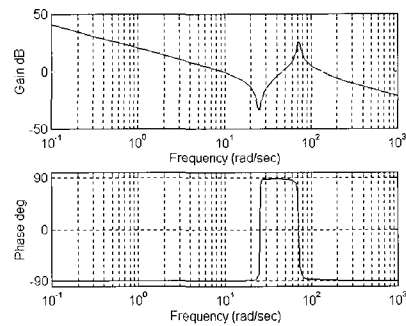


그림 10. τ_m 에 대한 ω_m 의 주파수응답.

Fig. 10. Frequency response of ω_m with respect to τ_m .

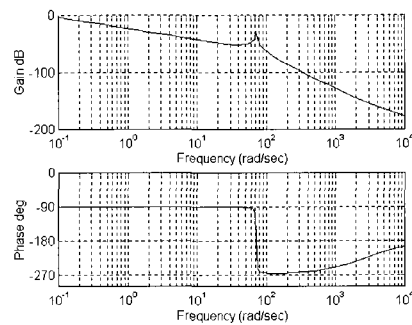


그림 11. τ_m 에 대한 ω_L 의 주파수응답.

Fig. 11. Frequency response of ω_L with respect to τ_m .

2관성계에서는 같은 토크입력에 대해 모터측과 링크측이 서로 다른 전달함수를 갖고 있다. 모터측은 영점(zeros)을 가지고 있지만 링크측은 영점이 없다. 이에 따라 모터측과 링크측은 같은 토크입력에 대해 서로 다른 응답을 보인다. 그림 10에서 13까지는 산업용 로봇의 제1관절의 모델에 대

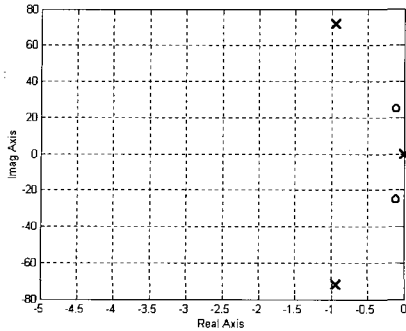


그림 12. $\omega_m(s)/\tau_m(s)$ 의 극점 및 영점.
Fig. 12. Pole-zero map of $\omega_m(s)/\tau_m(s)$.

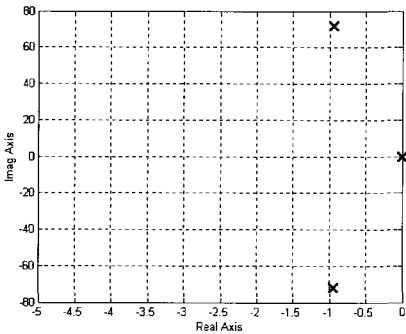


그림 13. $\omega_L(s)/\tau_m(s)$ 의 극점 및 영점.
Fig. 13. Pole-zero map of $\omega_L(s)/\tau_m(s)$.

하여 주파수 응답특성 및 극점, 영점의 위치를 구해 본 것이다. 그림 10~13에서는 이해의 편의를 위하여 2관성계 모델에 약간의 점성마찰(viscous friction)을 포함하였음을 밝힌다. 토크입력에 대한 모터 및 링크 각속도의 주파수 응답특성인 그림 10과 11을 보면 이러한 2관성계의 동적 특성을 더욱 명확히 알 수 있다.

그림 10에서 위상이 -90° 에서 $+90^\circ$ 로 전환되는 노치(notch)점의 주파수는 반공진주파수(anti-resonance frequency)로서 시스템의 영점이다. 이는 2관성계에서 특징적으로 나타나는 것으로, 이 주파수의 토크가 인가되어도 모터는 움직이지 않는, 전달함수 (3)에서의 시스템 영점이다. 그러나 그림 11에서 알 수 있듯이 반공진 주파수에서 링크측은 응답이 있어 움직이고 있는 상태이다. 또한, 반공진 주파수는 브레이크 등으로 모터의 회전자를 단단히 붙잡아 고정시켰을 때 감속기의 강성과 링크의 이너셔로만 이루어지는 진동계의 고유진동수이기도 하다. 2관성계의 공진주파수(resonance frequency)는 모터측이나 링크측 모두 같은 값을 가진다. 반(反)공진주파수 ω_a 와 공진주파수 ω_n 은 (5)와 같이 계산된다.

$$\omega_a = \sqrt{\frac{K}{J_L}} \tag{5}$$

$$\omega_n = \sqrt{\left(1 + \frac{J_L/r^2}{J_m}\right)} \omega_a$$

2관성계에 제어가 연결되어 피드백제어가 이루어지면

공진주파수와 반공진주파수가 매우 중요한 역할을 하게 된다. 반공진주파수로 나타나는 영점은 극점을 유인하게 되므로 제어기 설계에 있어 세심한 고려가 필요하다. 시스템의 극점은 모터측과 링크측이 공유하게 되므로 결국 전달함수에 영점이 없는 링크측에도 영향을 주게 된다.

모터 또는 링크측에 점성마찰이 작용하는 경우에는, 공진주파수 및 반공진주파수가 점성마찰에 의해 변화되어 감쇠된 주파수(damped frequencies)의 형태로 나타나게 된다. 점성마찰이 증가하게 되면 그림 10과 11에 보이는 공진피크가 사라져 진동이 없어질 수도 있으나, 마찰의 존재는 기계시스템의 효율을 떨어뜨리게 되므로, 보통 가능한 한 작은 마찰을 가지도록 설계되어, 기계적인 마찰을 통하여 진동문제를 회피하기는 힘들다. 점성마찰의 영향에 관한 보다 자세한 연구는 [21]에서 수행되어 있다.

III. 산업용 로봇 관절의 주요 특징

유연한 산업용 로봇 관절의 효과적인 제어를 위해서는 유연성을 설명하는 2관성계의 특징을 잘 이해하고 있어야 한다. 여기에 더해 산업용 로봇에서 나타나는 주요한 동적 특징을 이해하고 이러한 특징이 개별 관절의 2관성계에 어떠한 영향을 끼치는 지 이해하는 것 또한 필요하다. 본 장에서는 산업용 로봇의 동적 특징을 바탕으로 로봇 관절을 2관성계로 모델링 할 때 독립관절제어기(independent joint controller)의 관점에서 고려해야할 주요한 사항에 대해 분석한다.

1. 외란

1.1 로봇 외부에서 가해지는 외력

산업용 로봇이 작업을 할 때 작업 도구 또는 대상물에서 로봇에 가해지는 외력은 각 관절에 외란의 형태로 작용한다. 그림 14는 산업용 로봇에 148kg 무게의 대형 스폿용접건(spot welding gun)을 장착한 것이다. 이러한 스폿용접건을 작업을 위해 가압 및 개방하였을 때 로봇의 각 관절에는 매우 큰 충격이 가해지게 된다.

본 논문의 시험에 사용된 로봇은 수직6축 다관절로봇으로서 165kg의 부하를 다룰 수 있고 중량 1350kgf, 주 3축 최고속도 1.833rad/sec, 반복정도 ± 0.3 mm의 성능을 갖는 현대중공업의 HX165로봇이다[22].

그림 15는 위와 같은 스폿용접건을 가압, 개방했을 때 발생하는 로봇 선단의 진동 변위를 측정된 결과이다. 시험 결과를 보면 가압 및 개방 시 모두 매우 큰 진동이 발생하고 또한 발생한 진동이 오래 유지되는 것을 볼 수 있다.

1.2 로봇 동작에 따른 동력학적 간섭력

링크의 연쇄로 이루어진 로봇의 동작은 (6)과 같은 동력학의 지배를 받는다[2,23].

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) = K(\theta - q) \tag{6}$$

$$J_m\ddot{\theta} + K(\theta - q) = \tau$$

여기서 q 는 관절의 각도벡터, θ 는 모터의 각도벡터, $D(q)$ 는 일반화 관성행렬, $H(q, \dot{q})$ 는 코리올리 및 원심토크 벡터, $G(q)$ 는 중력토크 벡터, K 는 관절의 강성행렬, 그리고 τ 는 각 관절에서의 구동토크 벡터이다.

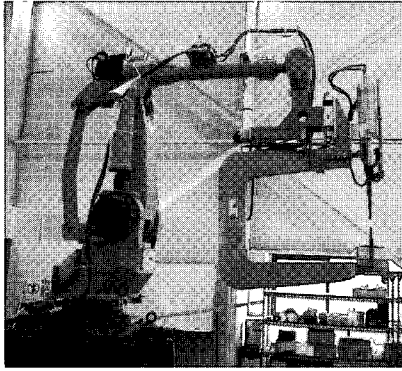


그림 14. 대형 스폿용접 건을 장착한 산업용 로봇.
Fig. 14. Industrial robot equipped with large size spot welding gun.

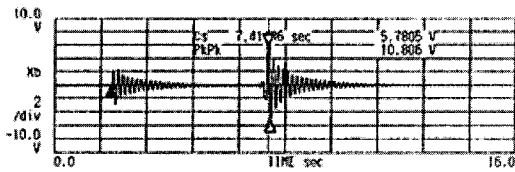


그림 15. 스폿용접 건 동작에 의한 로봇 선단의 진동.
Fig. 15. Vibration on end effector by spot welding gun operation.

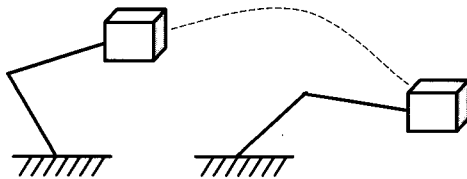


그림 16. 로봇 매니플레이터의 동작.
Fig. 16. Movement of robot manipulator.

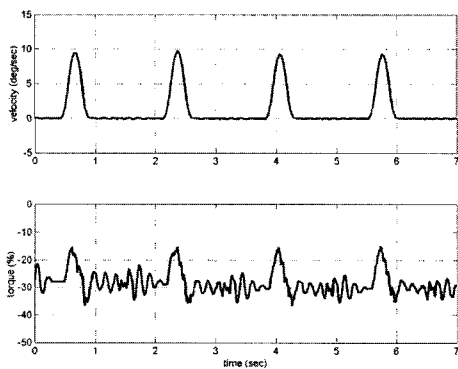


그림 17. 수직방향 이동시 속도 및 토크.
Fig. 17. Velocity and torque of vertical move.

각 관절은 로봇의 움직임에 따라 자신의 운동에 필요한 토크 이외에도 다른 축의 움직임과 자세에 따라 다양한 동력학적 간섭력을 받게 된다. 그림 16을 참고하여 동력학적 간섭력을 생각해 보면, 두 자세간의 이동에서 로봇의 한 관절은 자신의 부하를 움직이는 구동토크 이외에도 시간에 따라 변하는 중력 토크, 또한 다른 축이 움직이면서 발생하

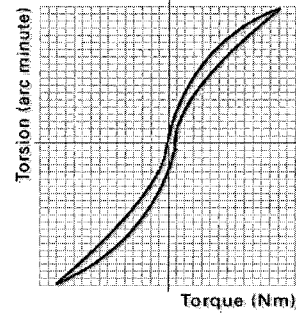


그림 18. 감속기의 히스테리시스 곡선.
Fig. 18. Hysteresis curve of reduction gear.

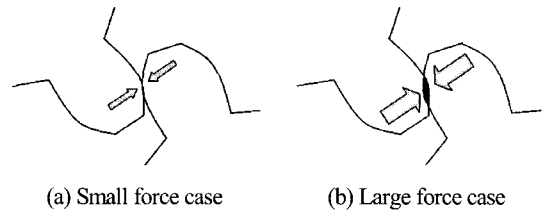


그림 19. 기어의 작용력과 탄성변형.
Fig. 19. Force and elastic deformation of gear teeth.

는 가감속 토크의 영향과 원심력 및 코리올리력 등의 간섭력을 동시에 받게 되는 것을 알 수 있다.

그림 17은 로봇이 짧은 거리를 이동할 때 발생하는 진동 현상을 측정된 결과이다. 120kg의 시험용 부하를 로봇 선단에 장착한 채 수직방향으로 짧은 거리를 이동하고 일정시간 정지한 후 다시 이동할 때 가장 움직임이 큰 제 3축의 속도와 토크를 측정된 것으로 각 구간의 정지 후 상당량의 진동이 존재하는 것을 알 수 있다.

이렇게 유연한 관절에 로봇 외부에서 외력이 가해지거나, 다른 관절의 동작에 의한 동력학적 간섭력이 있을 경우, 유연성을 고려한 제어를 하지 못한다면 그림 15와 17과 같이 심각한 진동이 발생하게 되고, 이러한 진동 문제는 작업품질에 많은 영향을 끼쳐 산업용 로봇에 있어 매우 중요한 사용자 불만요인이 된다. 특히 운동의 정지 후 발생하는 진동을 잔류진동으로 부르는데, 로봇의 작업에 있어서 잔류진동이 존재하면 진동이 멎을 때까지 기다려야 하기 때문에 작업시간이 늦어지는 주요한 요인이 된다.

2. 비선형성: 비선형 강성

로봇에 사용되는 감속기의 강성은 비선형 특성을 가지고 있다. 그림 18은 대표적인 로봇용 감속기인 하모닉드라이브의 강성특성곡선으로, 토크가 작게 가해질 때 강성이 낮아지고 크게 가해질 때는 높아지며, 또한 히스테리시스(hysteresis) 특성을 갖고 있다[24-26]. 이러한 비선형 특성은 감속기 내부의 동력전달 및 지지 요소들 사이의 복잡한 상호작용에 의하여 발생하기 때문에 해석적인 방법으로 예측하기는 매우 어렵지만, 정성적으로는 기어이에 작용하는 힘과 탄성변형에 관련된 현상으로 이해될 수 있다. 그림 19(a)처럼 작은 힘이 가해질 경우, 맞물리는 기어이는 접촉부위가 매우 좁아 단위 면적당 가해지는 힘의 비율이 매우 크

게 되고, 변위의 절대량은 작지만 상대적으로 가해진 힘에 의한 변위가 커져, 강성이 낮아지는 현상을 보인다. 또한 그림 19(b)에서처럼 큰 힘이 가해지는 경우, 탄성변형에 의해 기어의 접촉 면적이 커지고 이에 따라 단위면적당 힘의 비율이 작아져 상대적인 변위가 작아지게 되어, 강성이 증대되는 현상을 보이게 되는 것으로 이해할 수 있다[27].

한편 감속기 제작회사에서는 보통 몇 개의 대표적 토크에 대한 강성값만을 제공하거나 정격토크에 대한 강성값만을 제공한다. 또한 그림 18과 같은 정확한 강성곡선을 얻는다 하여도 강성값은 감속기에 가해지는 토크의 함수가 되므로 매 순간 정확한 강성값을 결정하기는 매우 어렵다.

또한 비선형 강성까지 고려한 제어를 설계하기에는 제어기의 복잡성과 어려움을 피하기 어렵다. 따라서 보통, 사용되는 조건에서의 적절한 강성값을 실험을 통해 규명해 선형 강성으로 보아 설계하게 된다[28]. 경험적으로, 산업용 로봇에서 진동이 문제가 되어 고려될 필요가 있는 정지무렵의 잔류진동의 강성값의 경우, 정격토크에 해당하는 값의 1/2 이내의 값을 보이는 경향이 있다.

3. 시변특성: 로봇 자세 변화에 따른 부하이너서 변화

부하이너서의 변화는 로봇의 자세 즉, 각축 각도의 함수이다. 6자유도 로봇의 자세에 따른 축별 부하이너서는 (6)의 로봇 운동방정식중 $D(q)$ 의 대각선항 6개가 된다. 산업용 다관절 로봇의 경우 거의 모든 관절에서 부하이너서가 로봇의 자세에 따라 변한다. 이너서의 변화량 또한 매우 커서 수백% 이상이 될 수도 있다. 따라서 각 관절을 2관성계로 볼 때 부하축 이너서가 시변특성을 보이게 된다.

그림 20은 그림 2의 2관성계에 대해서 고정된 모터이너

서에 대해 부하이너서 J_L 을 일정한 간격으로 변화시켰을 때의 주파수 응답특성의 변화 추이이다. 이는 로봇의 제 1축을 대상으로 로봇의 자세가 변할 때, 부하이너서의 변화에 따라 발생하는 2관성계의 특성 변화를 살펴본 것이다. 부하이너서 J_L 의 변화에 따라 시스템의 반공진주파수와 공진주파수가 매우 크게 변화하고 있다. 특히 J_L 이 J_m 보다 작아질 경우, 제어기의 설계가 매우 어려워진다는 것이 보고 되어 있다[29,30].

이상과 같이 산업용 로봇 관절의 2관성계에는 외란, 비선형성, 시변특성 등이 나타난다. 이러한 특성 이외에도 산업용 로봇의 동작제어에 있어서는 파라미터의 불확실성, 다관절 로봇의 고차 진동현상에 의한 진동수 왜곡 및 고차 불확실성 등 극복해야할 보다 복잡한 특성들도 존재한다.

4. 로봇용 관절제어기 설계상의 고려사항

이상과 같은 분석을 바탕으로 산업용 로봇의 관절을 효과적으로 제어할 수 있는 독립관절제어기의 설계에 있어서의 고려사항을 정리해 본다.

우선 로봇의 관절 유연성에 의한 진동을 억제할 수 있도록 2관성계를 고려한 진동억제 제어기의 설계가 반드시 필요하다. 이와 함께 로봇의 작업에 의한 충격력 및 로봇 동작에 의한 동력학적 간섭력 등 빈번히 발생하는 외란을 극복할 수 있도록 설계하여야 한다.

감속기의 비선형 강성에 대해서는 관심영역에서의 값을 규명하여 사용할 수 있지만 정확한 값의 규명이 어렵고 조건에 따라 변화될 수 있어, 계수의 불확실성에 대응 가능한 강인한 제어기의 설계가 필요하다. 또한 로봇 자세 변화에 따른 부하이너서의 변화에 대응하는 제어기의 설계가 필요하다. 단, 부하이너서의 변화는 모델링 오차로 보기에 그 범위가 매우 크므로 게인스케줄링 등 적응적 제어방법이 필요하다.

IV. 결론

본 논문에서는 산업용 로봇 관절의 유연성에 의한 진동현상을 설명할 수 있는 2관성계 모델에 대하여 분석하였다. 먼저 2관성계 모델링이 필요한 기기들을 분류하여 제시하였고, 2관성계 모델링과 그 특징을 분석하였다. 또한 산업용 로봇의 경우 특징적으로 나타나는 외란, 비선형성 및 시변특성에 대해 실험과 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 그리고 이러한 분석을 바탕으로 효과적인 산업용 로봇의 관절제어기 설계를 위한 고려사항을 검토하였다. 계속되는 논문에서는 유연한 관절을 갖는 산업용 로봇의 관절제어기 설계상의 주요 문제와 상태피드백 및 부하이너서의 변화에 대응하기 위한 게인스케줄링 방법 설계에 대하여 서술할 것이다.

참고문헌

[1] N. Matsui and Y. Hori, "Advanced technologies in motor control," *Trans. of IEE Japan*, vol. 113-D, no. 10, pp. 1122-1137, Oct. 1993.
 [2] M. W. Spong, "Modeling and control of elastic joint robots," *Journal of dynamic systems, measurement, and*

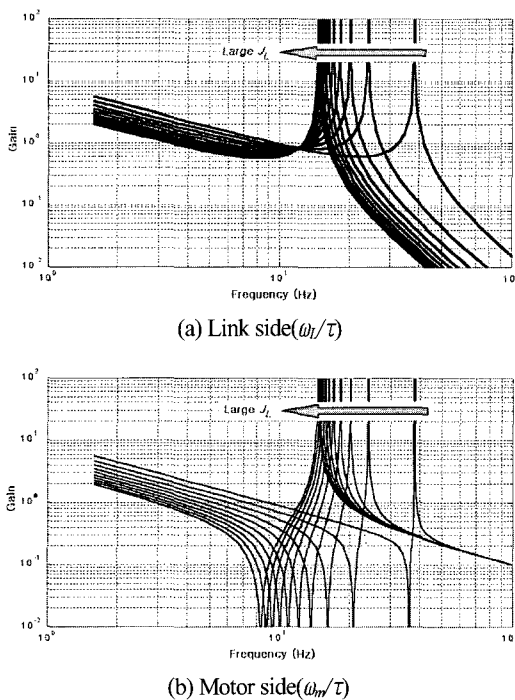
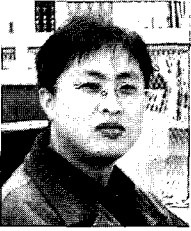


그림 20. 부하 변화에 따른 응답특성의 변화.
 Fig. 20. Variation of frequency response along load inertia variation.

- control*, vol. 109, pp. 177-182, Dec. 1987.
- [3] H. Tomisaki and K. Tomita, "Anti-vibration control for industrial robots using state observer," *技報 安川電機*, 第58卷, no. 3, pp. 177-182, 1994.
- [4] S. Ouchi, T. Mita and K. Yano, "Active vibration control of a motor system by using H_∞ control theory," *Trans. of IEE Japan*, vol. 113-D, no. 3, pp. 325-332, 1993.
- [5] 조도현, 이종용, 이상호, "매개변수 변동을 갖는 2관성 시스템의 강건제어," *제어 · 자동화 · 시스템공학논문지*, 제4권, 제6호, pp. 729-737, 12. 1998.
- [6] J. H. Oh and J. S. Lee, "Control of flexible joint robot system by backstepping design approach," *Automation and Soft Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 267-278, 1999.
- [7] R. Oguro and K. Tomita, "Machine control technology in servo systems," *技報 安川電機*, 第62卷, no. 4, pp. 274-279, 1998.
- [8] S. H. Lee, D. H. Kim and J. H. Song, "A vibration suppression controller for the industrial manipulators using gain-scheduling with real-time calculation of inertias," *Proc. of ISR2001*, pp. 8-13, Apr. 2001.
- [9] J. S. Hur, S. H. Lee and J. H. Song, "State observer based vibration suppression for an industrial robot," *Proc. of 1st Korea-China Joint Workshop on Robotics*, pp. 162-166, May 2001.
- [10] 지준근, 송승호, 설승기, 박민호, "2관성계를 갖는 전동기 구동 시스템의 축비틀림 진동 억제를 위한 속도 제어기," *대한전기학회논문지*, 제42권, 제8호, pp. 44-53, 8. 1993.
- [11] Y. Hori, H. Sawada and Y. Chun, "On optimal estimation speed of disturbance observer used in the slow resonance ratio control," *Trans. of IEE Japan*, vol. 117-D, no. 1, pp. 50-56, 1997.
- [12] R. Dhaouadi, K. Kubo and M. Tobise, "Two-degree-of-freedom robust speed controller for high-performance rolling mill drives," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 29, No. 5, pp. 919-926, Sep./Oct. 1993.
- [13] M. A. Valenzuela, J. M. Bentley and R. D. Lorenz, "Evaluation of torsional oscillations in paper machine sections," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 41, no. 2, pp. 493-501, Mar./Apr. 2005.
- [14] J. Fujita, S. Hayama, M. Hamamura, Y. Kakino, A. Matsubara and S. Ohwaki, "The influence of the torsional vibration of ballscrew on the stability of NC servo drive system," (*日本精密工學會誌*, vol. 65, no. 8, pp. 1190-1194, 1999.
- [15] J. K. Kang and S. K. Sul, "Vertical-vibration control of elevator using estimated car acceleration feedback compensation," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 1, pp. 91-99, Feb. 2000.
- [16] <http://www.nabtesco.com/en/product/index.html>
- [17] <http://www.hdsi.net/products/harmonicdrive/>
- [18] M. C. Good, L. M. and K. L. Strobel, "Dynamic models for control system design of integrated robot and drive systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, pp. 53-59, Mar. 1985.
- [19] T. Hidaka, M. Sasahara, Y. Tanioka and K. Okada, "Torsional vibration in the robot due to wave gears," *日本機械學會論文集(C編)*, 第52卷, 第480号, pp. 2207-2215, 1986.
- [20] M. Hasimoto, Y. Kiyosawa, T. Horiuchi and H. Hirabayashi, "The effects of joint flexibility on robot motion control based on joint torque positive feedback," *Proc. of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1220-1225, Apr. 1991.
- [21] N. Takesue, G. Zhang, J. Furusho and M. Sakaguchi, "Precise position control of robot arms using a homogeneous ER fluid," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 55-61, Apr. 1999.
- [22] <http://www.hyundai-engine.com/robot/products>
- [23] K. S. Fu, R. C. Gonzales, and C. S. G. Lee, *Robotics*, McGraw-Hill, 1987.
- [24] <http://www.hdsi.net/advantages/stooth.cfm>
- [25] T. D. Tuttle and W. P. Seering, "A nonlinear model of a harmonic drive gear transmission," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 3, pp. 368-374, Jun. 1996.
- [26] R. Dhaouadi, F. H. Ghorbel and P. S. Gandhi, "A new dynamic model of hysteresis in harmonic drives," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 6, pp. 1465-1171, Dec. 2003.
- [27] A. H. Slocum, *Precision Machine Design*, Prentice-Hall, pp. 228-235, 1992.
- [28] M. Hasimoto and Y. Kiyosawa, "Experimental study on torque control using harmonic drive built-in torque sensors," *Journal of Robotic Systems*, vol. 15, no. 8, pp. 435-445, 1998.
- [29] N. Egashira, M. Nakamura, S. Goto and N. Kyura, "Relationship between the inertia of motor and load in mechatronic servo systems," *日本ロボット學會誌*, vol. 19, no. 1, pp. 124-130, Jan. 2001.
- [30] N. Takesue and J. Furusho, "A consideration on inertia-ratio and damping property of vibration of two-inertia system," *Trans. of IEE Japan*, vol. 121-D, no. 2, pp. 283-284, 1997.

**이 상 훈**

1994년 한양대학교 정밀기계공학과(공학사) 졸업. 1996년 동 대학원 석사. 동대학 박사과정 재학중. 1996년~현재 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원. 관심분야는 로봇 및 메카트로닉스 기기 동작제어.

**박 종 현**

1981년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1983년 MIT 기계공학과(S.M.). 1991년 MIT 기계공학과(Ph.D.). 1992년~현재 한양대학교 기계공학부 교수. 1999년 및 2003년 JSPS 지원 일본 와세다대학 방문연구. 2000년 CNR 지원 이탈리아의 Scuola Superiore Sant' Anna 방문연구. 2002년~2003년 MIT 방문연구. 1991년~1992년, 2001년~2003년 미국 Brooks Automation 근무. 관심분야는 로봇제어, 동역학 시스템 제어, 선형제어, 지능제어 등. IEEE, KSME, KSPE, KSAE 및 ICASE 회원.