

산업용 로봇의 유연관절 제어기 설계: Part 2 - 진동억제 제어 및 게인스케줄링

Controller Design for Flexible Joint of Industrial Robots: Part 2 - Vibration Suppression Control and Gain-Scheduling

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 a vibration control solution for industrial robots which have flexible joints. The joint flexibility is modeled as a two-mass system. And we analyze the vibration problem of a classical P-PI controller when it used for the flexible joints of industrial robots. Then a state feedback controller is designed for vibration suppression of the two-mass system. Finally, a gain-scheduling method is designed for maintaining control performance in spite of the time-varying nature of each joint's load side inertia. Simulation and experimental results show effective vibration suppression and uniform properties in overshoot in spite of the variation of load. The result of this study can be applied to the appropriate gain manipulation of many other mechatronic devices which have the two-mass system with varying load side inertia.

Keywords : industrial robot, joint flexibility, two-mass system, state feedback, gain-scheduling

I 서론

최근 산업용 로봇을 비롯하여 동력전달부를 가지고 있는 산업용 기기의 제어용 모델로는 동작성능의 고속 고정도화에 따라 구동기(actuator)와 부하간의 동력전달부를 유연한 것으로 생각하는 2관성계 모델이 주류가 되고 있다[1-3].

2관성계(two-mass system)는 PID 형태의 간단한 제어기로는 효과적인 제어가 매우 어려워 다양한 고급 제어이론을 이용한 방법들이 시도되었다. 이러한 제어기들은 이론적 복잡성과 사용의 불편함으로 인해 그동안 산업용 제어기에는 적용되지 못하였으나, 최근 산업용 제어기 H/W의 성능향상에 따라 다소 복잡한 제어구조의 구현도 가능하게 되었다. 이에 따라 2관성계의 모델링을 통하여 직접 측정할 수 없는 비틀림 정보를 관측하는 관측기를 설계하고 관측된 상태량을 이용해 상태피드백 제어기로 제어하는 방법의 적용도 활발히 이루어지고 있다[3-6].

본 논문에서는 산업용 로봇을 위한 실용적인 2관성계 제어기의 설계법에 관하여 고찰한다. 우선 현재 산업용 로봇의 모터제어기로 널리 사용되고 있는 고전적인 P-PI 제어기의 2관성계 제어에 있어서의 문제점을 분석한다. 다음으로, 상태피드백을 이용한 속도제어기 및 위치제어기 설계를 통하여 유연한 관절을 가진 산업용 로봇의 진동억제 제어기를 설계한다. 마지막으로 로봇의 자세변화에도 불구하고 균

일한 성능을 유지할 수 있는 게인스케줄링(gain-scheduling) 방법을 소개한다. 개발된 제어알고리즘의 성능은 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다.

II 2관성계 모델 및 고전적 제어기의 문제점

1. 2관성계 모델링

산업용 로봇 관절의 유연성을 대표하는 2관성계를 그림 1에 보였다. 또한 2관성계를 상태방정식으로 표현하면 (1)과 같다[1,7].

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

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \end{bmatrix}$$

여기서, $\theta_m, \theta_L, \omega_m, \omega_L$ 은 각각 모터와 링크의 각도 및 각속도를 나타낸다. θ_s 는 비틀림각도로서 모터와 링크의 각도차이고, τ_m 은 모터 입력토크, J_m, J_L 은 각각 모터와

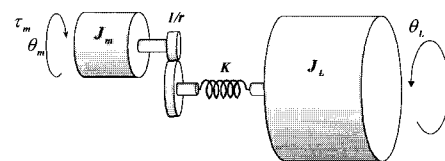


그림 1. 2관성계 시스템.
Fig. 1. Two-mass system.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 10. 14., 채택확정 : 2005. 1. 8.

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

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

※ 본 논문에 대하여 건설적이고 유익한 조언을 해주신 심사위원과 편집위원께 감사드립니다.

링크의 이너서, K 는 감속기의 강성, 그리고 r 은 감속비를 나타낸다. 그리고 2관성계에서 특징적으로 나타나는 반(反)공진주파수(anti-resonance frequency) ω_a 와 공진주파수(resonance frequency) ω_n 은 (2)와 같이 계산된다.

$$\omega_a = \sqrt{\frac{K}{J_L}} \tag{2}$$

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

2관성계로 나타나는 산업용 로봇의 유연한 관절의 제어기 설계에 있어서는 우선 관절의 유연성으로 인해 나타나는 진동을 억제할 수 있는 제어기의 설계가 필요하다. 이와 함께 로봇의 작업에 의한 충격력 및 로봇 동작에 의한 동역학적 간섭력 등 외란에 둔감하도록 제어기를 설계하여야 한다. 또한 로봇 자세 변화에 따른 부하이너서의 변화에 대해서도 성능을 유지할 수 있는 제어기의 설계가 필요하다. 단, 부하이너서의 변화는 매우 범위가 크므로 게인스케줄링 등 적응적 제어방법이 또한 필요하다.

2. 고전적 제어기의 문제점

본 절에서는 서보모터 및 로봇의 관절 제어에 전통적으로 사용되고 있는 그림 2와 같은 P-PI 제어기를 이용한 기존 제어 방법(이후 기존제어기로 부름)의 2관성계 제어에 있어서의 문제점을 분석한다.

기존제어기는 위치제어를 위해 비례제어(P제어)를 사용하고, 위치제어루프 내부의 속도제어를 위해 비례-적분제어(PI제어)를 사용하는 다중(cascade) 제어구조를 갖는다. 이는 산업용 로봇 관절제어기 및 모터의 제어기로 가장 대표적인 형태이다.

보통 산업용 로봇의 피드백(feedback)제어를 위한 센서는 궁극적으로 제어하려고 하는 링크축이 아닌 모터축에 부착되어 모터의 각도를 측정한다. 이때 고전적인 PID형 제어기를 사용하여 2관성계를 제어하려면, 링크각도에 대한 직접적인 제어가 불가능하여 진동 없이 빠른 응답을 얻는 데에는 제약이 있다[3].

그림 3은 2관성계에 대한 기존제어방법의 극점위치 분석을 위해서 시뮬레이션을 통하여 그린 위치 비례제어 이득 K_p 에 따른 근궤적이다. 극점은 이득 K_p 가 증가함에 따라 영점을 향해 이동하게 된다. 그림에서 극점(poles)은 x, 영점(zeros)은 o로 표시하였다.

여기서 동력전달부의 유연성이 없는 1관성계에 적용하던 속도응답 수준을 2관성계에서도 유지하려 이득을 설정하면, 유연성에 의해 생긴 허수축상의 영점이 극점을 유인하여 허수축 근방에 극점이 위치하게 만들어 진동이 유발되기 매우 쉬운 상태가 되게 된다. 따라서 기존제어기를 이용한 2관성계 제어에 있어 진동이 발생하지 않게 하려면 높은 수준의 이득은 사용할 수가 없다.

그러나 이러한 설정에서는 이득이 매우 낮아져 추종성능의 저하가 심해지기 때문에, 종전과 동일한 높은 이득을 사용하면서 진동을 회피할 수 있도록 제어기에 입력되는 지령에 저주파통과필터나 입력다듬기 등의 방법을 적용하기도 한다[8,9].

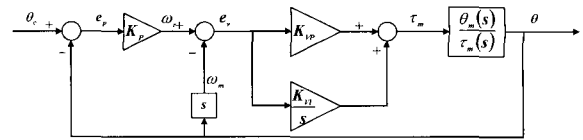


그림 2. 고전적 P-PI제어기의 구조.
Fig. 2. Conventional P-PI controller.

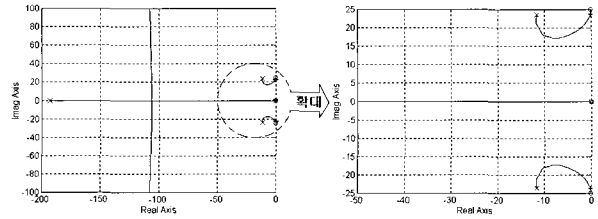


그림 3. 기존제어방법의 근궤적.
Fig. 3. Root locus of conventional controller.

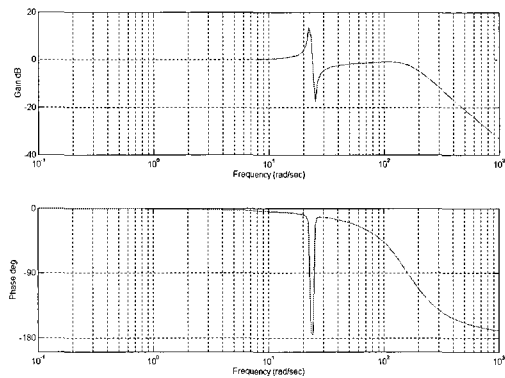


그림 4. 기존제어기의 주파수응답특성.
Fig. 4. Frequency response of conventional controller.

그림 4에 높은 위치 비례제어 이득으로 설정된 기존제어기의 주파수응답특성을 시뮬레이션을 통해 보인다. 허수축 근방으로 이동한 극점에 의해 반공진주파수 보다 약간 낮은 주파수에 공진피크가 생긴 것을 확인할 수 있다.

이렇게 공진 피크가 존재하는 제어기라도 저주파통과 필터 또는 입력다듬기 기법 등으로 공진주파수 성분을 제거한 기준입력을 만들어 입력하면 지령에 의한 진동은 발생하지 않는 시스템을 만들 수는 있다. 그러나 이렇게 지령만을 성형하는 방법은 로봇 외부에서 가해지는 외란, 시스템 내부의 비선형적 요소에 의해 발생하는 외란 등에는 영향을 끼칠 수가 없으므로 작업 중 발생하는 진동을 근본적으로 피할 수는 없게 된다.

여기에 더해 저주파통과 필터나 입력다듬기 기법 등은 필연적으로 시간지연을 가지고 있고, 공진주파수가 낮아질수록 긴 시간지연을 갖게 된다. 이러한 시간지연은 로봇의 동작이 느려지는 주요한 원인이 된다.

III. 상태계환 제어기의 설계

1. 제어기 설계

본 장에서는 2관성계의 진동을 효과적으로 억제할 수 있

는 상태궤환 제어기의 설계에 관해 논한다. 로봇의 관절은 모터와 링크가 비틀림 강성의 매개에 의해 비틀림 진동을 하며 동작하게 된다. 이렇게 발생하는 진동을 효과적으로 억제하기 위해서는 비틀림각과 링크의 각속도 등 기존의 1관성계에는 나타나지 않았던 상태량을 반영할 수 있는 제어기의 설계가 필요하다[3].

이에 따라 2관성계의 상태량을 모두 고려하여 진동 없이 제어하기 위하여 상태궤환(state feedback) 속도제어기를 설계하였다[6]. 또한 직접 측정이 불가능한 비틀림 각도와 링크각속도 등의 상태량은 (3)과 같은 최소차원관측기를 사용하여 추정하도록 하였다[10].

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Fz + Gy + Lu \\ [\hat{\theta}_s, \hat{\omega}_L]^T &= z + K_e y \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, z 는 관측상태변수, K_e 는 관측이득, F, G 및 L 은 관측이득과 시스템동역학으로부터 구하는 이득벡터이다.

2관성계의 진동을 억제할 수 있는 여러 가지 고급 제어방법이 제안되어 있으나, 산업용 로봇 제어기에의 실용적인 적용 측면에서 구현의 용이성과 기존 제어구조에의 이식성이 비교적 높은 상태궤환 제어기를 선정하여 설계하였다.

상태방정식 (1)의 상태변수 $\omega_m, \theta_s, \omega_L$ 에 더해 추종성을 높일 수 있도록 속도지령 ω_r 에 대한 속도오차의 적분 ξ 를 새로운 상태변수로 하여 증강된 시스템(augmented system)에 대한 상태궤환 제어기를 설계하였다[10]. 설계된 상태피드백 제어기의 제어입력은 (4)과 같다.

$$u = -[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4] \begin{bmatrix} \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \\ \xi \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$\xi = \omega_r - \omega_m, \quad \dot{\xi} = \int \xi.$$

상태궤환 제어기를 포함한 폐루프의 동역학은 (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= (A - BK)X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega_r \\ y &= CX \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \\ \xi \end{bmatrix}, \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K}{rJ_m} & 0 & 0 \\ \frac{1}{r} & 0 & -1 & 0 \\ 0 & \frac{K}{J_L} & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_m} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C &= [1 \ 0 \ 0 \ 0], \\ K &= [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]. \end{aligned}$$

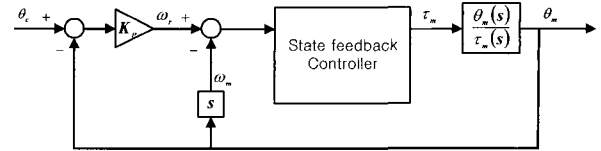


그림 5. 제안된 제어기 구조.

Fig. 5. Proposed control structure.

이득벡터 K 는 원하는 응답특성을 갖는 극점을 설정하고 이에 의해 각각의 이득을 결정하는 극점배치기법을 이용한다. 적분기가 추가된 시스템은 4차 시스템이므로 상태피드백에 의한 속도제어시스템의 극점을 (6)과 같이 한쌍의 복소근과 두 개의 실근을 갖도록 하였다. 대표근을 한 쌍의 복소근으로 하여 진동과 입력포화가 발생하지 않는 위치에 설정하고 두 개의 실근은 시행착오법에 의해 구한다.

$$(s^2 + 2\zeta\omega_s + \omega^2)(s + \tau_1)(s + \tau_2) = 0 \quad (6)$$

위치제어를 위해서는 설계된 속도제어기의 외부에 위치오차에 대한 비례제어루프를 설치하고 비례제어 이득 K_p 에 대한 근계적 분석을 통해 대략의 근위치를 정한 뒤, 시뮬레이션 및 시험을 통하여 적절한 값을 선정하도록 하였다.

이렇게 설계된 제어기는 기존제어기에서 사용되고 있는 모터각속도 ω_m 과 속도오차의 적분 ξ 를 계속 사용할 수 있어 새로운 상태량의 추가를 최소화 할 수 있는 장점이 있고, 그림 5와 같이 기존제어기와 동일한 다중(cascade)구조를 유지하여 사용자에게 친숙하면서도 상태궤환에 의해 향상된 2관성계 진동억제 성능을 확보할 수 있다.

2. 시뮬레이션 및 실험

설계된 제어기의 성능을 먼저 다음과 같은 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 시뮬레이션에서는 120kg의 부하를 든 로봇의 제 1축이 가장 큰 부하를 받는 조건에서, 152.1°를 2초간 이동하며 최고속은 117°/sec가 되는 사다리꼴 속도형태를 갖는 지령을 추종하도록 하였다. 시뮬레이션에 사용된

표 1. 시뮬레이션을 위한 상수.

Table 1. Physical parameters for simulation.

J_m	0.01136kgm ²	K	1212387Nm/rad
J_L	1177.2kgm ²	r	153.8

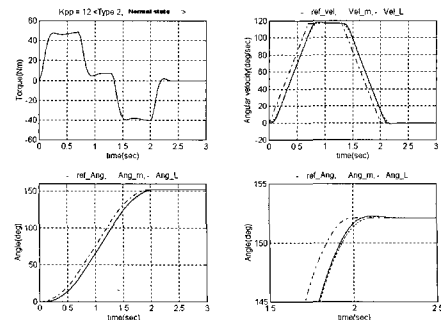
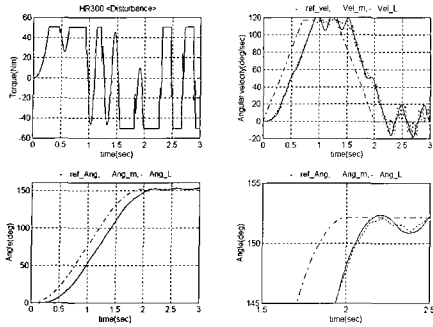
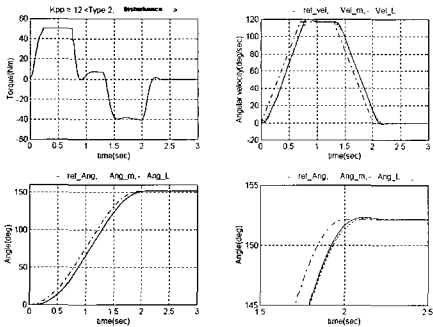


그림 6. 제안된 제어기의 시간 응답.

Fig. 6. Time response of proposed controller.



(a) Conventional controller



(b) Proposed controller

그림 7. 외란에 대한 시간응답.

Fig. 7. Time response with disturbance torque.

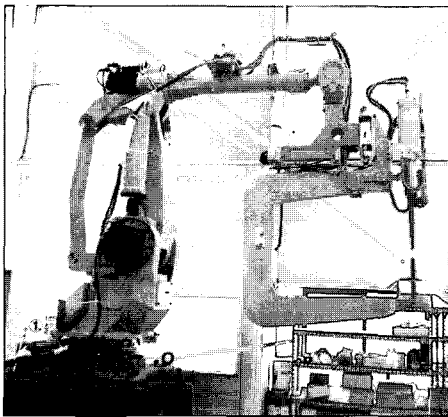


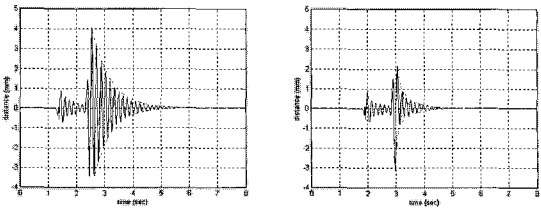
그림 8. 대형 스폿용접 건을 장착한 산업용 로봇.

Fig. 8. Industrial robot equipped with large size spot welding gun.

로봇 관절 모델의 주요 상수는 표 1과 같다. 그림 5와 같이 설계된 제어기에 대해, 속도제어기의 극점위치는 (7)의 근을 사용하였고, 위치 비례제어 이득은 12로 설정하였다.

$$(s^2 + 84s + 360)(s + 150)^2 = 0 \quad (7)$$

보다 현실적인 검증이 되도록 시뮬레이션용 플랜트모델에는 모터와 링크축에 각각 0.02Nms/rad과 3.08Nms/rad의 점성마찰을 추가하였다. 그림 6의 시뮬레이션 결과를 통해 설계된 제어기는 토크포화나 속도 및 위치에 진동이 발생하지 않고 안정된 운동을 하는 것을 확인하였다.

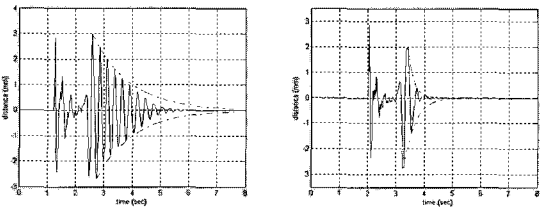


(a) Conventional controller

(b) Proposed controller

그림 9. 상하방향 진동억제 성능.

Fig. 9. Vertical vibration suppression.

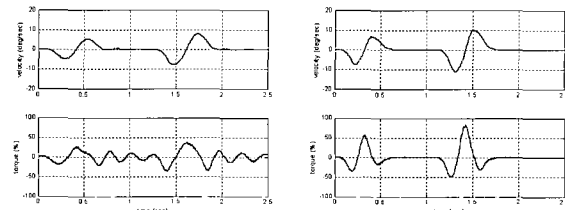


(a) Conventional controller

(b) Proposed controller

그림 10. 수평방향 진동억제 성능.

Fig. 10. Horizontal vibration suppression.

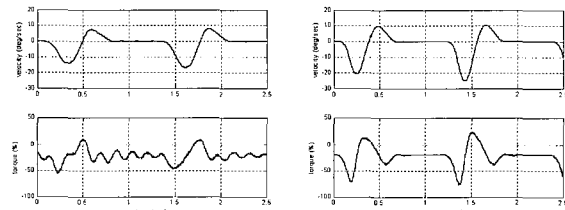


(a) Conventional controller

(b) Proposed controller

그림 11. 수평방향 단피치 이동.

Fig. 11. Horizontal short pitch movement.



(a) Conventional controller

(b) Proposed controller

그림 12. 수직방향 단피치 이동.

Fig. 12. Vertical short pitch movement.

다음으로 앞의 시뮬레이션과 동일하게 동작하는 도중 0.1초 시점부터 0.1초간 부하축에 20Nm의 외란 토크를 가했을 때의 응답을 분석하였다. 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 기존제어기는 외란이 가해진 후 진동이 격심해지며 제어가 불가능한 상태가 되었고, 그림 7(b)의 제안된 제어기는 일정시간 입력토크의 포화가 발생한 후 안정한 상태로 복귀하며 정상적인 동작을 유지하였다.

이상과 같이 설계된 제어 알고리즘을 상용 6축 수직다관절 로봇에 적용하여 시험하였다. 본 논문의 시험에 사용된 그림 8의 로봇은 수직6축 다관절 로봇으로서 165kg의 부하를 다룰 수 있고 로봇 중량 1350kgf, 주 3축의 최고속도 1.833rad/sec, 반복정도는 ±0.3mm의 성능을 갖는 현대중공업의 HX165로봇이다[11].

우선 외란에 대한 진동억제 성능 시험을 실시하였다. 로봇이 정지해 있고 중량 148kg의 대형 공압구동 용접건(gun)을 로봇에 장착하여 상하 및 좌우 방향으로 스폿(spot)용접 작업을 할 때, 건의 작동(가압/개방)에 의해 가해지는 외란에 대한 진동발생을 로봇전단의 위치 응답으로 비교하였다. 그림 9와 10에 보인 시험 결과와 같이, 외란이 인가되었을 때 발생하는 진동의 진폭이 상당히 감소되었고, 감쇠비가 대폭 증가한 것을 알 수 있어, 외란에 대해 제안된 제어기가 기존제어기에 비해 우수한 진동억제 성능을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 로봇의 동작 후 발생하는 잔류진동량을 평가하였다. 그림 11과 12는 로봇에 120kg의 시험용 부하를 장착하여 로봇 선단을 수평 및 수직 방향으로 짧은 거리를 이동하고 나서 정지하는 동작을 했을 때 각각 제 1축과 3축의 속도와 토크지령을 측정된 결과이다. 이와 같은 동작은 자동차 제조공정 중 산업용 로봇을 이용한 스폿용접에서 매우 자주 사용되는 대표적인 동작이다.

시험결과를 살펴보면, 기존제어기의 경우 이동 후 정지 구간에서 토크지령에 상당한 진동이 발생하지만, 제안된 제어기의 경우에는 로봇의 진동이 매우 잘 억제되었고 움직임이 안정적이라는 것을 알 수 있다. 또한 제안된 제어기는 향상된 추종성능에 의해 동작이 신속해져 같은 거리를 보다 빠른 시간에 이동하는 것을 알 수 있다. 이상과 같은 시뮬레이션 및 실험에서 제안된 제어기는 진동을 효과적으로 억제하면서, 기존제어기에 비해 향상된 추종성능을 갖는 것을 확인하였다.

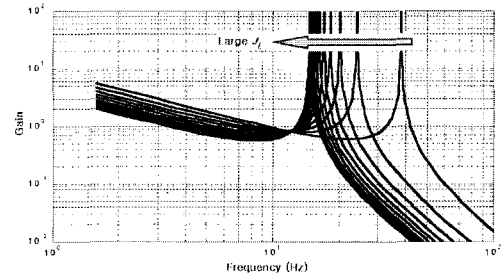
IV. 게인스케줄링

1. 게인스케줄링의 필요성

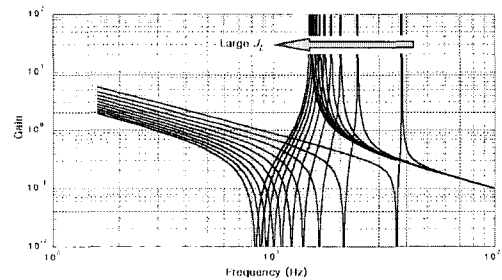
2관성계의 관점에서 다관절 로봇의 동작을 생각해 보면, 대부분의 관절에 대해 해당관절 이후 링크연쇄의 이너셔의 합으로 나타나는 부하 이너셔 J_L 이 로봇의 자세에 따라 변화한다. 또한 이너셔의 변화량은 매우 커서 동일 축에 대해 수백% 이상이 될 수도 있다.

부하이너셔 J_L 을 일정한 간격으로 변화시켰을 때의 주파수 응답 특성의 변화를 그림 13에 보인다. 이는 로봇의 제 1축을 대상으로 로봇의 자세가 변할 때, 부하이너셔의 변화에 따라 발생하는 2관성계의 주파수 응답특성의 변화를 살펴본 것이다. 부하이너셔 J_L 의 변화에 따라 시스템의 응답 특성이 매우 크게 변화하는 것을 알 수 있다.

이렇게 부하이너셔의 변화에 따라 시스템의 동역학이 매우 크게 변하기 때문에 어느 특정한 자세에 대해 결정된 고정된 제어이득을 사용하면 자세변화에 따라 동작특성에 과도한 변화가 생겨 원활한 제어가 불가능하다. 이에 따라 로봇의 자세를 기반으로 각 관절에 대한 부하이너셔를 실



(a) Link side(ω_L/τ)



(b) Motor side(ω_M/τ)

그림 13. 부하 변화에 따른 응답특성의 변화.

Fig. 13. Variation of frequency response along load inertia variation.

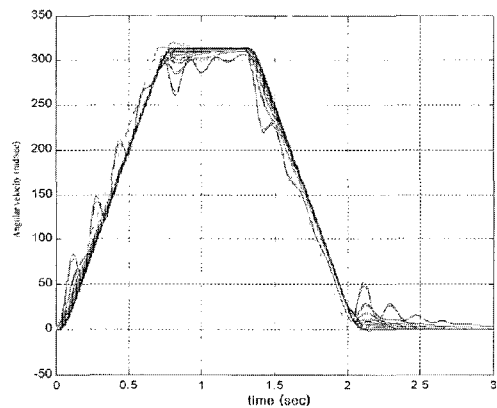


그림 14. 극점을 고정했을 때의 응답.

Fig. 14. Responses of fixed-pole case.

시간으로 계산하고 그 결과를 이용해 상태궤환 제어기의 이득을 계산하여 조건에 따라 적당한 응답을 가지도록 하는 게인스케줄링(gain-scheduling) 알고리즘이 필요하다.

게인스케줄링은 스케줄링 변수(scheduling variable)가 유한한 변화율을 가진 경우 안정성을 확보할 수 있음이 보고되어 있다[12,13]. 로봇 관절의 2관성계의 부하이너셔 J_L 은 로봇 운동방정식 중 일반화 이너셔의 대각선항이며, 그 크기가 유한하고 충분히 부드러운 로봇 각 축의 위치 및 속도에 대해서 J_L 의 변화를 또한 유한하게 할 수 있어[14], J_L 을 스케줄링 변수로 선정할 게인스케줄링 제어기의 설계가 가능하다.

전 장에서 설계된 상태궤환 속도제어기는 극점배치기법을 이득선정 수단으로 사용하고 있다. 이에 따라 부하이너

서 값을 스케들링 변수로 하여 이의 변화에 따라 극점의 위치를 스케들링 하고 극점배치기법에 의해 상태궤환이득을 결정하도록 설계하였다[15].

(6)과 같은 극점배치를 가지는 페루프시스템의 속도지령에 대한 링크 각속도의 전달함수는 (8)과 같다. 이를 보면 상태궤환에 의해 시스템의 극점은 원하는 위치에 설정할 수 있지만, 영점은 반공진주파수 ω_a 의 영향을 받게 되어 설계자가 자유롭게 결정할 수 없다는 것을 알 수 있다. 이러한 영점에 의해 시스템의 오버슈트 특성이 영향받게 된다.

$$\frac{\omega_L(s)}{\omega_r(s)} = \frac{(K/J_L)(\tau_1 + \tau_2 + 2\xi\omega)s + \omega^2 \tau_1 \tau_2}{(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)(s + \tau_1)(s + \tau_2)} \quad (8)$$

그림 14는 목표 극점을 특정한 값으로 고정된 상태에서 로봇의 몇 가지 자세에 대하여 사다리꼴 속도프로파일을 추종할 때를 상정한 시뮬레이션 결과이다.

이 극점배치 방법의 설계 의도는 로봇 자세의 변화에도 불구하고 고정된 극점을 유지할 수 있는 이득을 결정하여 자세 변화에 상관없이 같은 응답속도를 갖기를 원하는 것이었으나, 과도한 진동이 발생하는 자세가 존재하는 등 응답특성의 변화가 매우 심하다. 이는 반공진 주파수로 나타나는 시스템 영점의 영향으로서, 부하이너서의 변화에 따라 영점 또한 변화하여 결과적으로 응답특성을 변화시키는 것이다. 이와 같이 부하이너서가 변화하는 2관성계의 제어에는 목표 극점을 고정시키는 게인스케들링 전략은 적합하지 않고 보다 적절한 게인스케들링 전략이 필요하다.

2. 게인스케들링 방법 설계

위의 결과에서 알 수 있듯이 게인스케들링에 있어서는 스케들링 변수의 변화에 대해 안정성 외에 성능면에서 어떤 성능을 유지하는 것이 효과적인가를 결정할 필요가 있다. 2관성계 제어에 있어서는 응답 속도의 유지도 중요하지만 진동억제 성능이 유지되는 것이 우선적으로 필요하다. 여기에 더해 오버슈트, 시정수 등 시스템의 응답특성이 고르게 유지되는 것이 고려될 수 있다.

본 연구에서는 2관성계에 대한 진동억제 성능을 유지하면서 스텝응답에 대한 오버슈트 특성을 일정하게 유지할 수 있는 게인스케들링 방법을 제안한다. 부하이너서의 크기 변화에 따라 오버슈트의 크기가 바뀐다면 주변 장애물과의 간섭이 발생 하는 등 일관성을 가지고 로봇을 사용할 수 없게 되기 때문에 이를 일정하게 유지하는 방법이 반드시 필요하다.

오버슈트 특성은 시간응답특성으로서 전 장에서 설계된 상태궤환 제어시스템의 스텝응답을 분석하여 스케들링 방법을 찾았다. 상태궤환 속도제어시스템의 단위스텝응답은 (9)와 같다.

$$\omega_L(t) = 1 + \left(\left(\frac{K}{J_L} \right) G_{11} + K_{11} \right) e^{-\xi\omega t} \cos(\omega\sqrt{1-\xi^2}t) + \left(\left(\frac{K}{J_L} \right) G_{12} + K_{12} \right) e^{-\xi\omega t} \sin(\omega\sqrt{1-\xi^2}t) + \left(\left(\frac{K}{J_L} \right) G_2 + K_2 \right) e^{-\tau_1 t} + \left(\left(\frac{K}{J_L} \right) G_3 + K_3 \right) e^{-\tau_2 t} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \left(\frac{K}{J_L} \right) G_{11} + K_{11} &= \left(\frac{K}{J_L} \right) \frac{-(\tau_1 + \tau_2 - 2\xi\omega)(\tau_1 + \tau_2 + 2\xi\omega)}{(\omega^2 + \tau_1^2 - 2\xi\omega\tau_1)(\omega^2 + \tau_2^2 - 2\xi\omega\tau_2)} \\ &\quad + \frac{(\tau_1\tau_2(-\tau_1\tau_2 + \omega(\tau_1 + \tau_2)\xi - 4\omega\xi^2))}{(\omega^2 + \tau_1^2 - 2\xi\omega\tau_1)(\omega^2 + \tau_2^2 - 2\xi\omega\tau_2)} \\ \left(\frac{K}{J_L} \right) G_{12} + K_{12} &= \left(\frac{K}{J_L} \right) \frac{(\tau_1 + \tau_2 + 2\xi\omega)(\tau_1\tau_2 - \omega(\tau_1 + \tau_2)\xi + \omega^2(2\xi^2 - 1))}{(\omega^2 + \tau_1^2 - 2\xi\omega\tau_1)(\omega^2 + \tau_2^2 - 2\xi\omega\tau_2)\omega\sqrt{1-\xi^2}} \\ &\quad + \frac{-\tau_1\tau_2(\tau_1\tau_2\xi - \omega(\tau_1 + \tau_2)(-1 + 2\xi^2) + \omega^2\xi(-3 + 4\xi^2))}{(\omega^2 + \tau_1^2 - 2\xi\omega\tau_1)(\omega^2 + \tau_2^2 - 2\xi\omega\tau_2)\sqrt{1-\xi^2}} \\ \left(\frac{K}{J_L} \right) G_2 + K_2 &= \left(\frac{K}{J_L} \right) \frac{-(\tau_1 + \tau_2 + 2\xi\omega)}{(\tau_1 - \tau_2)(\omega^2 + \tau_1^2 - 2\xi\omega\tau_1)} \\ &\quad + \frac{\omega^2 \tau_2}{(\tau_1 - \tau_2)(\omega^2 + \tau_1^2 - 2\xi\omega\tau_1)} \\ \left(\frac{K}{J_L} \right) G_3 + K_3 &= \left(\frac{K}{J_L} \right) \frac{\tau_1 + \tau_2 + 2\xi\omega}{(\tau_1 - \tau_2)(\omega^2 + \tau_2^2 - 2\xi\omega\tau_2)} \\ &\quad + \frac{-\omega^2 \tau_1}{(\tau_1 - \tau_2)(\omega^2 + \tau_2^2 - 2\xi\omega\tau_2)} \end{aligned}$$

오버슈트 특성을 일정하게 유지하려면 시간응답함수내 각 항의 계수를 부하이너서 변화에도 불구하고 일정하게 유지할 필요가 있다. 일정한 계수를 유지하기 위해서는 (9)에 나타나는 G_{11}, G_{12}, G_2, G_3 를 반공진주파수 ω_a 의 제곱에 반비례하도록 설정하여야 한다는 것을 알 수 있다.

이제 기준자세에서의 부하측 이너서를 J_{Lref} 라고 할 때, 변화된 부하이너서 J_L 에서의 반공진 주파수의 변화율을 (10)과 같이 정의한다.

$$\Delta\omega_a = \sqrt{\frac{K/J_L}{K/J_{Lref}}} \quad (10)$$

그리고 기준자세에 대한 (6)의 극점위치 결정 파라미터를 각각 $\tau_{1ref}, \tau_{2ref}, \omega_{ref}$ 라고 할 때, 변화된 부하이너서에 대한 목표극점을 (11)과 같이 설정하기로 한다.

$$\tau_1 = \tau_{1ref}\Delta\omega_a, \quad \tau_2 = \tau_{2ref}\Delta\omega_a, \quad \omega = \omega_{ref}\Delta\omega_a \quad (11)$$

(11)과 같은 극점배치 전략을 사용하면 시스템의 시간응답함수는 (12)와 같이 부하 이너서의 변화에도 불구하고 시간응답함수 각 항의 계수를 기준자세의 것으로 유지할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \omega_L(t) &= 1 + \left(\left(\frac{K}{J_{Lref}} \right) G_{11} + K_{11} \right) e^{-\xi\omega_{ref}\Delta\omega_a t} \cos(\omega_{ref}\Delta\omega_a\sqrt{1-\xi^2}t) \\ &\quad + \left(\left(\frac{K}{J_{Lref}} \right) G_{12} + K_{12} \right) e^{-\xi\omega_{ref}\Delta\omega_a t} \sin(\omega_{ref}\Delta\omega_a\sqrt{1-\xi^2}t) \\ &\quad + \left(\left(\frac{K}{J_{Lref}} \right) G_2 + K_2 \right) e^{-\tau_{1ref}\Delta\omega_a t} \\ &\quad + \left(\left(\frac{K}{J_{Lref}} \right) G_3 + K_3 \right) e^{-\tau_{2ref}\Delta\omega_a t} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 응답시간에 관련된 삼각함수와 지수함수의 시정수는 반공진주파수의 변화에 따라 변하지만, 이는 낮은 반공진주파수(큰 부하)에 대해서는 천천히, 높은 반공진주파수(작은 부하)에 대해서는 빠르게 응답하는 것으로서 자연스러운 응답특성으로 생각할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험

본 절에서는 제안된 게인스케들링 방법과 직관적으로 설계된 게인스케들링 방법에 대하여 부하이너서의 크기 변화에 대한 비교분석을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 실시한다. 분석할 게인스케들링 방법은 다음과 같다.

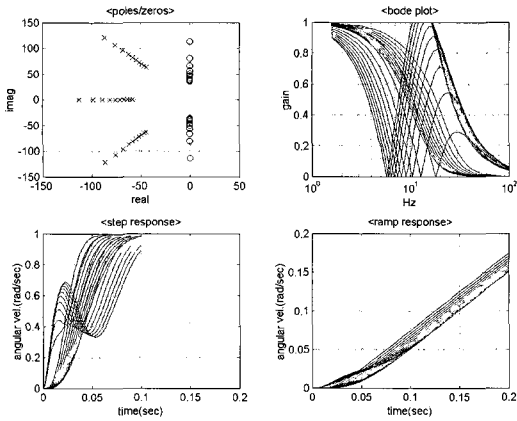


그림 15. 방법 1의 시뮬레이션 결과.
Fig. 15. Simulation results of method 1.

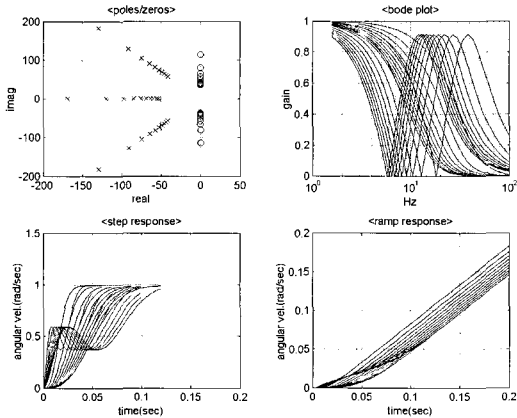


그림 16. 방법 2의 시뮬레이션 결과.
Fig. 16. Simulation results of method 2.

방법 1:

$$G_r = \sqrt{\frac{J_{totalref}}{J_{total}}} = \sqrt{\frac{r^2 J_m + J_{Lref}}{r^2 J_m + J_L}} \quad (13)$$

방법 2: (제안된 방법)

$$G_r = \Delta\omega_a = \sqrt{\frac{J_{Lref}}{J_L}} \quad (14)$$

첫 번째 방법 (13)은 모터측과 부하측의 이너셔를 합한 전체 이너셔 변화의 제곱근에 반비례하여 극점을 설정하는 방법이다. 두 번째 방법 (14)는 제안된 게인스케줄링 방법으로 2관성계의 반공진 주파수에 반비례하여 극점을 설정하는 방법이다. 모두 부하가 클 때는 느리게, 작을 때는 빠르게 움직이도록 하는 것이지만, 방법에 따라 약간의 차이가 존재한다.

두 가지 방법에 따른 시뮬레이션 결과를 그림 15와 16에 각각 보인다. 시뮬레이션 결과를 비교해 보면, 우선 폐루프 극점의 위치는 제안된 방법 2가 변화의 폭이 좀 더 크다. 주파수응답에서는 제안된 방법이 피크를 갖는 주파수에서 이득값이 일정한 것을 알 수 있다. 그리고 시간응답을 보면 방법 1은 자세 변동에 따라 응답속도의 변화는 상대적으로

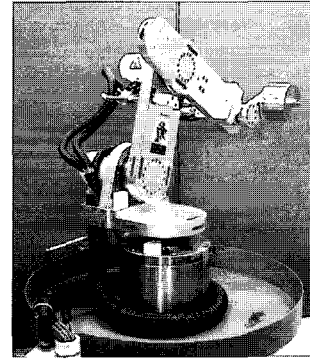
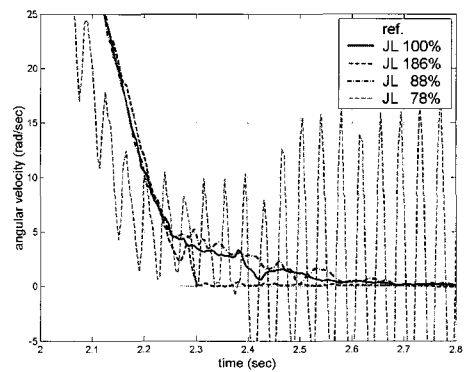
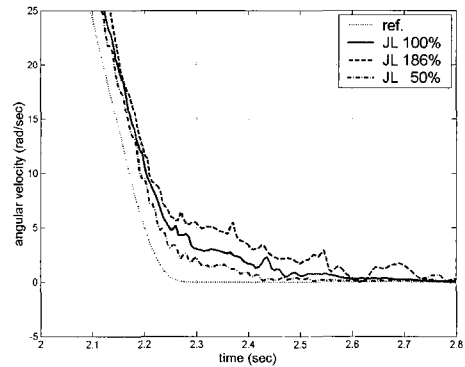


그림 17. HyRoHILS 매니퓰레이터.
Fig. 17. HyRoHILS manipulator.



(a) Method 1



(b) Method 2(proposed)

그림 18. HyRoHILS 로봇 실험 결과.
Fig. 18. Experimental results on HyRoHILS robot.

표 2. HyRoHILS 로봇의 주요 상수.

Table 2. Physical parameters of HyRoHILS manipulator.

J_m	$1.7145 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$	K	31000Nm/rad
J_L	0.85kgm^2	r	160

작지만 오버슈트 량이 변화하여 응답이 고르지 않다. 반면, 제안된 방법 2는 응답속도의 변화가 다소 크지만 오버슈트가 일정하게 유지되고 있다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 시뮬레이션 결과를 볼 때 제안된 방법 2가 자

세변동에도 불구하고 균일한 응답특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 응답을 일정하게 한다는 의미에서, 자세 변동에 따른 응답속도의 변동폭이 좁은 것도 유리하다. 그러나 응답속도의 변동폭이 좁은 방법 1의 경우, 시간응답에서 보듯이 각 자세에서의 오버슈트 량의 변화가 너무 커 같은 각도를 움직이더라도 부하가 큰 자세에서는 오버슈트가 커지고, 부하가 작은 자세에서는 작아지는 현상이 발생해 이것이 실제 로봇의 적용에 있어 더 큰 단점으로 작용할 수 있다. 그러나 제안된 방법 2는 모든 자세에서 같은 오버슈트 크기를 유지하며 동작할 수 있어 사용자에게 좀더 신뢰성 있는 동작을 보여준다.

다음으로 실험을 통해 제안된 게인스케줄링 방법을 검증한다. 실험은 현대중공업의 HyRoHILS (Hyundai Robot Hardware In the Loop Simulation) 시스템을 이용하여 실시하였다. HyRoHILS 시스템은 그림 17과 같은 3kg 가반중량을 갖는 소형 4축 수직다관절 로봇과 Matlab 및 dSPACE 장비로 이루어져 있다. 로봇의 실험 자세에서의 주요한 상수는 표 2와 같다. 이 시스템은 Matlab/Simulink로 설계된 제어알고리즘을 자동으로 구현하여 시험용 DSP보드에 실현하는 기능과 실험과정을 조정 및 모니터링하는 기능을 갖추어 개발자가 제어알고리즘의 적용 결과를 신속히 분석할 수 있도록 하는 장비이다[16].

로봇의 몇 가지 자세에 대하여 두 가지의 스케줄링 방법의 비교실험을 실시한 결과를 그림 18에 보였다. 방법 1의 실험에서는 자세의 변화에도 불구하고 비슷한 응답특성을 보이다가 기준값의 80%이하 부하조건이 되면서 불안정한 상태가 되었다. 반면에 제안된 방법인 방법 2는 자세 변화에도 불구하고 일정한 오버슈트 특징을 가지며 동작하였고 특히 기준자세의 50% 조건에서도 원활하고 안정적으로 동작하고 있는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 부하이내에서 변화에 대해 제안된 게인스케줄링 알고리즘이 동작성능의 유지 면에서 유효함을 확인하였다.

V. 결론

본 연구에서는 유연한 관절을 가진 산업용 로봇의 진동 억제제어 방법을 제안하였다. 우선, 로봇 관절의 유연성을 2관성계로 모델링하고 P-PI 형태의 고전적 제어기의 진동유발 문제점을 분석하였다. 다음으로 모터의 각속도 외에 모터와 링크사이의 비틀림 동작과 링크축의 각속도를 이용한 상태궤환 제어를 설계하였고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 산업용 로봇의 잔류진동을 매우 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다. 마지막으로, 로봇의 자세 변화에 따라 발생하는 각 관절의 부하이내에서 변화에 대응하여 오버슈트 특성을 균일하게 유지할 수 있는 게인스케줄링 방법을 설계하고 그 효용성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다. 향후에는 오버슈트 특성 외에도 속도 응답 또한 균일하게 유지할 수 있는 제어방법의 개발이 필요하다. 본 논문에서 제안된 게인스케줄링 방법은 유연한 관절을 갖는 로봇 이외에 부하이내에서가 변동하는 2관성계를 갖는 다른 메카트론스 기기에도 응용이 가능할 것으로 기대한다.

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 control*, vol. 109, pp. 310-319, 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] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 지준근, 송승호, 설승기, 박민호, "2관성계를 갖는 전동기 구동 시스템의 축비틀림 진동 억제를 위한 속도 제어기," *대한전기학회논문지*, 제42권, 제8호, pp. 44-53, 8. 1993.
- [8] D. Economu, C. Mavroidis, I. Antoniadis and C. Lee, "Maximally robust input preconditioning for residual vibration suppression using low-pass FIR digital filters," *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 124, pp. 85-97, Mar. 2002.
- [9] 박주이, 장평훈, "입력다듬기 기법을 이용한 유연관절을 갖는 로봇의 잔류진동 제어," *대한기계학회논문집*, 제18권 제11호, pp. 3066-3074, 11. 1994.
- [10] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 3rd ed., Prentice Hall, 1997.
- [11] <http://www.hyundai-engine.com/robot/products>
- [12] J. S. Shamma and M. Athans, "Gain scheduling: potential hazards and possible remedies," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 101-107, Jun. 1992.
- [13] W. J. Rugh and J. S. Shamma, "Research on gain scheduling," *Automatica*, vol. 36, no. 10, pp. 1401-1425, Oct. 2000.
- [14] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Prentice Hall, 1993.
- [15] S. H. Lee, J. S. Hur, J. G. Lim and J. H. Park, "A gain scheduling method for the vibration suppression servo controller of articulated robots," *Proc. of ICCAS2003*, pp. 2725-2730, Oct. 2003.
- [16] J. H. Song, S. H. Lee and J. S. Hur, "A HILS system and its application to collision detection of an industrial robot," *Proc. of ICCAS2002*, pp. 2161-2165, Oct. 2002.



이 상 훈

1994년 한양대학교 정밀기계공학과(공학사) 졸업. 1996년 동 대학원 석사. 동 대학 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 CNR지원 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.