

論文2002-39SC-6-2

안정된 고유 어드미턴스 제어방식을 이용한 강인한 힘 제어기의 구현

(Implementation of A Robust Force Controller Using Stable NAC(Natural Admittance Control) Method)

金承禹 *

(Seung Woo Kim)

요약

로봇 제어에서 로봇 핸드와 환경과 접촉하는 상황에서는 위치제어와 힘 제어를 동시에 필요로 한다. 그것을 구현하는 알고리즘 즉, 순응성 제어, 힘 제어, 하이브리드 힘/위치 제어, 임피던스 제어 등의 많은 제어기들이 발표되어 왔으나, 위치/힘 제어가 통합구조로 구성되어 있는 임피던스 제어기가 최근에 많은 연구들을 통하여 가장 효율적인 알고리즘으로 증명되고 있다. 고유 어드미턴스 제어기는 임피던스 제어기가 단순 변형된 것으로 속도 보상기와 힘 보상기로 구성되어 있으며, 로봇 핸드의 속도와 힘제어를 통합 구조로 수행한다. 어드미턴스 제어 방식은 이미 발표된 여러 논문에서 제어구조상의 장점이 확인된 바 있다. 본 논문에서는 고유 어드미턴스 제어기의 개인 파라미터 값을 시스템의 안정성을 확보하면서 결정하는 개인 튜닝 알고리즘을 설계하고, 그것을 실험용으로 제작한 1축 로봇 시스템에 적용하여 임의의 강성을 갖는 환경과의 접촉시에 발생 할 수 있는, 환경의 반작용 힘에 대해서 제어모터가 성공적으로 상호 작용하는 제어성을 실험한다. 또한, 1축 로봇 시스템에 쿨롱 마찰력을 가하여 로봇제어에 방해요소가 되는 외란의 영향에도 불구하고 고유 어드미턴스 제어기가 강인하게 대처함으로써 제어모터가 원하는 위치나 속도로 제어되는 것을 실험결과를 통하여 확인한다.

Abstract

An NAC(Natural Admittance Control) system design is presented for interaction controller that achieves high performance and guarantees stability. The NAC can be classified as a particular flavor of impedance control similar to control schemes that have velocity compensator and force compensator. The NAC significantly improves the response characteristics when Coulomb friction is presented in One-link Robot System and guarantees stability when robot contacts with environment. Pragmatic rules for NAC synthesis are derived. It shows method to choose a target impedance for realizable force compensator. Important parameters are found experimentally. It is demonstrated, by the experimental result, that NAC algorithm is successful in rejecting Coulomb friction through velocity compensator and guarantees stability through force compensator. We implement an experimental set-up consisting of environment-generated one-link robot system and DSP system for controller development. We apply the natural admittance controller to the One-link robot system, and show the good performance on desired force control in case of contacting with arbitrary environment.

Keyword : Natural Admittance Control, Stability, Coulomb Friction, One-link Robot System

* 正會員, 順天鄉大學校 情報技術工學部

Technology Engineering)

(Soonchunhyang University, Division of Information

接受日字:2001年1月19日, 수정완료일:2002年10月28日

I. 서론

최근에 산업현장에서 사용되어지는 각 분야의 로봇은 대부분이 로봇 핸드나 환경과의 접촉이 발생하는 작업환경으로 이루어져 있다. 따라서 이런 작업을 로봇이 인간과 동일하게 처리하기 위해서는 정확한 힘 제어가 필요할 뿐만 아니라, 로봇은 외부의 힘 자극에 대해서 더 좋은 응답특성이 요구된다. 그러므로 국내외의 많은 로봇의 힘 제어에 관한 연구가 이루어지고 있지만 실질적으로는 매우 실험적인 성향이 강하고, 그 실험 환경을 구축하는데 매우 다양한 기술이 복합적으로 요구되므로 많은 로봇 연구자들이 시뮬레이션 연구에 그치고 있는 실정에 있다. 본 논문에서는 이러한 점을 보완하는 실험환경을 구현하고자 한다. 또한, 로봇 제어에서 로봇 핸드나 환경과 접촉하는 상황에서는 위치제어와 힘 제어를 동시에 필요로 한다. 그것을 구현하는 알고리즘 즉, 순응성 제어, 힘 제어, 하이브리드 힘/위치 제어, 임피던스 제어 등의 많은 제어기들이 발표되어 왔으나,^[1-4] 위치/힘 제어가 통합구조로 구성되어 있는 임피던스 제어가 최근에 많은 논문들에서 우수한 결과를 확인하고 있다.^[5-8]

고유 어드미턴스 제어기는 임피던스 제어기가 단순 변형된 것으로 속도 보상기와 힘 보상기로 구성되어 있으며, 로봇 핸드의 속도와 힘제어를 통합 구조로 수행한다. 어드미턴스 제어 방식은 이미 발표된 여러 논문에서 제어구조상의 장점이 확인된 바 있다.^[5-7] 본 논문에서는 고유 어드미턴스 제어기의 게인 파라미터 값을 시스템의 안정성을 확보하면서 결정하는 게인 튜닝 알고리즘을 설계하고, 그것을 실험용으로 제작한 1축 로봇 시스템에 적용하여 임의의 강성을 갖는 환경과의 접촉시에 발생 할 수 있는, 환경의 반작용 힘에 대해서 제어모터가 성공적으로 상호 작용하는 제어성을 실험한다. 또한, 1축 로봇 시스템에 쿨롱 마찰력을 가하여 로봇제어에 방해요소가 되는 외란의 영향에도 불구하고 고유 어드미턴스 제어기가 강인하게 대처함으로써 제어모터가 원하는 위치나 속도로 제어되는 것을 실험 결과를 통하여 확인한다.

고유 어드미턴스 제어기 설계를 위하여 개루프 상태에서 어드미턴스 제어기에 로봇 시스템의 모델식을 전개하고, 모델식으로 부터 어드미턴스 파라미터들을 정의한다. 또한, 폐루프 고유 어드미턴스 제어기에 필요한

제어규칙을 유도하면서 어드미턴스 제어기 유도과정에서 필요한 속도 보상기와 힘 보상기의 입력단 및 출력단 어드미턴스를 정확하게 정의하여 적합한 속도 보상기와 힘 보상기의 게인값을 설계한다.

제안한 알고리즘의 구현을 위하여 1축 로봇 시스템을 제작하였고, 로봇 시스템을 구동하기 위한 제어환경 시스템으로는 고속의 DSP칩을 사용하여 실험상에서 발생할 수 있는 샘플링 제한, 센서 노이즈 등의 영향으로부터 자유로운 상태이기 때문에 제안한 알고리즘의 실험을 정확하게 수행할 수 있도록 하였다.

본 논문의 구성은 서론, 본론, 결론의 형식으로 구성되어 있다. 서론에서는 본 연구에 대한 필요성과 방법을 간단히 기술하며, 2장에서는 고유 어드미턴스 제어기의 설계방법을 설명하고, 3장에서는 고유 어드미턴스 제어기 알고리즘 설계 및 속도 보상기 및 힘 보상기 유도과정을 설명하고, 4장에서는 직접 제작한 1축 로봇 시스템과 로봇 시스템을 구동하기 위하여 DSP칩을 이용한 제어 실험 환경을 설명한다. 5장에서는 환경 모터가 정현파 속도로 구동되는 경우에 있어서 로봇이 주어진 환경과 접촉시에 원하는 로봇의 출력이 정현파인 경우에 어드미턴스 제어기를 적용한 실험 결과를 분석한다. 6장은 결론으로써 고유 어드미턴스 제어기가 환경의 반작용의 힘에 대해 안정성 유지 및 성공적으로 쿨롱 마찰력을 제거하는 제어기임을 보여준다.

II. NAC제어기 설계

1. 1축 로봇 시스템 모델

로봇 시스템의 어드미턴스 모델링을 구하기 위하여 힘 제어용 1축 로봇 시스템이 갖고 있는 역학적인 파라미터들의 표현을 <그림 1>에서 볼 수 있다.

1축 로봇 시스템이 갖는 개루프의 경우에 라플라스 도메인에서 로봇 시스템 모델의 운동 방정식을 구해보

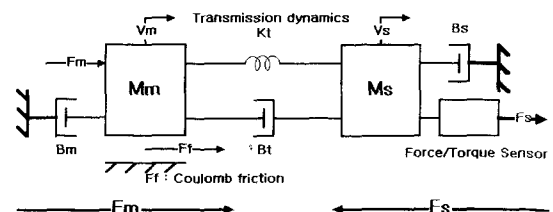


그림 1. 로봇 시스템 모델
Fig. 1. Robot System Model.

면 식(1)과 (2)로 표현된다.

$$F_m = M_m s v_m + (B_m v_m + B_t v_m - B_t v_s) + \frac{K_t(v_m - v_s)}{s} \quad (1)$$

$$F_s M_s s v_s + (B_s v_s + B_t v_s - B_t v_m) + \frac{K_t(v_s - v_m)}{s} \quad (2)$$

- F_m : 제어대상 모터에 가해주는 힘 또는 토크
- F_s : 시스템의 환경 모터가 발산하는 힘
- M_m : 제어대상 모터의 질량 또는 관성 모멘트
- M_s : 로봇 끝단의 질량 또는 관성 모멘트
- v_m : 제어대상 모터에서 내는 속도 또는 각속도
- v_s : 로봇 끝단의 속도 또는 각속도
- B_m : 제어대상 모터의 점성마찰
- B_s : 로봇 끝단의 점성마찰
- K_t : 커플링의 강성
- B_t : 커플링의 점성

모델식은 질량 M_m 을 갖는 제어 대상 모터에 토크 F_m 이 인가되면 속도 v_m 로 동작하는 상태를 의미한다. 1축 로봇 시스템에서 제어대상 모터가 환경 모터와 접촉시 환경모터에서 발생하는 반작용의 힘이 F_s 가 되며 이 반작용의 힘은 로봇 끝단의 속도가 v_s 로 회전하는 경우에 토크센서로부터 직접 측정되는 힘이다.

2. 개루프 어드미턴스

개루프(Open-Loop) 상태에서 구한 방정식 (1)과 (2)로부터 힘과 속도의 관계식을 어드미턴스 행렬 형태로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{pmatrix} v_s \\ v_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{ss} & Y_{sm} \\ Y_{ms} & Y_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_s \\ F_m \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)과 같이 서로 다른 조건의 Y_{ij} 형태의 4개의 어드미턴스가 존재함을 알 수 있다. 주어진 식에서 F_s 및 F_m 을 번갈아 0으로 두고 각각의 서로 다른 4개의 어드미턴스 함수를 다시 확장해 살펴보면 식 (4), (5), (6), (7)로 정의된다.

$$Y_{ss} = \frac{v_s}{F_s} \quad (F_m = 0) \quad (4)$$

$$Y_{ms} = \frac{v_m}{F_s} \quad (F_m = 0) \quad (5)$$

$$Y_{mm} = \frac{v_m}{F_m} \quad (F_s = 0) \quad (6)$$

$$Y_{sm} = \frac{v_s}{F_m} \quad (F_s = 0) \quad (7)$$

식(4) Y_{ss} 는 제어대상 모터의 정지 상태($F_m=0$)에서 질량 M_s 에 힘을 인가할 때 발생하는 속도 응답을 의미한다. Y_{mm} 은 링크의 끝단이 임의의 환경과도 접촉하지 않은 상태($F_s=0$)에서 제어대상 모터에 힘을 인가한 경우 발생하는 속도 응답을 의미한다. Y_{ms} 는 링크의 끝단에 힘을 인가한 경우의 제어대상 모터의 속도 응답을 의미한다. Y_{sm} 은 제어대상 모터에 힘을 인가한 링크 끝단의 속도 응답을 말한다. 이때 4개의 어드미턴스와 로봇의 시스템 파라미터와의 관계식을 식 (1)과 (2)를 이용하여 유도하면 아래와 같다.

$$Y_{mm} = -\frac{Y_{mm, num}}{Y_{den}} \quad (8)$$

$$Y_{sm} = Y_{ms} = -\frac{Y_{ms, num}}{Y_{den}} \quad (9)$$

$$Y_{ss} = -\frac{Y_{ss, num}}{Y_{den}} \quad (10)$$

$$Y_{den} = Y_{mm, num} Y_{ss, num} - Y_{sm, num} Y_{ms, num} \quad (11)$$

어드미턴스의 분자와 분모항을 구하기 위해 1축 로봇 시스템 모델식 (1)과 (2)에서 F_m , F_s , v_m , v_s 의 항을 분리시켜 임피던스 행렬 형태로 표현하면 식 (12)가 된다.

$$\begin{pmatrix} F_s \\ F_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{11} & I_{12} \\ I_{21} & I_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_s \\ v_m \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$I_{11} = \frac{M_s s^2 + (B_s + B_t)s + K_t}{s}$$

$$I_{12} = I_{21} = -\frac{B_t s + K_t}{s}$$

$$I_{22} = \frac{M_m s^2 + (B_m + B_t)s + K_t}{s}$$

하지만 어드미턴스 제어기는 임피던스 제어기와 비슷한 구조를 갖는 특별한 형태의 제어기로서 임피던스의 역수 형태이다. 따라서 어드미턴스는 임피던스 행렬 식 (12)로부터 임피던스의 역수를 취하여 식 (13)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} v_s \\ v_m \end{pmatrix} = \frac{1}{\det} \begin{pmatrix} I_{22} & -I_{12} \\ -I_{21} & I_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_s \\ F_m \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\det = I_{11} I_{22} - I_{12} I_{21}$$

$$Y_{ss} = \frac{I_{22}}{\det}$$

$$Y_{sm} = \frac{-I_{12}}{\det}$$

$$Y_{ms} = \frac{-I_{21}}{\det}$$

$$Y_{mm} = \frac{I_{11}}{\det}$$

$$Y_{den} = \frac{1}{\det}$$

따라서 I_{11} , I_{22} , I_{12} , I_{21} 의 정의식과 개방형 어드미턴스와 비교하면, 서로 다른 4개의 어드미턴스의 분자와 분모항은 식 (14), (15), (16), (17)로 정의된다.

$$Y_{mm, num} = M_s s^2 + (B_s + B_t) s + K_t \quad (14)$$

$$Y_{sm, num} = Y_{ms, num} = B_t s + K_t \quad (15)$$

$$Y_{ss, num} = M_m s^2 + (B_m + B_t) s + K_t \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Y_{den} &= M_m M_s s^3 \\ &+ [M_m (B_s + B_t) + M_s (B_m + B_t)] s^2 \\ &+ [K_t (M_m + M_s) + B_m B_s + B_m B_t + B_s B_t] s \\ &+ K_t (B_m + B_s) \end{aligned} \quad (17)$$

위의 어드미턴스의 분자와 분모항은 제안한 고유 어드미턴스 알고리즘의 입력단 어드미턴스 및 출력단 어드미턴스와 입출력단 어드미턴스가 포함하고 있는 속도 보상기와 힘 보상기를 정의하는데 사용되어진다.

3. 페루프 어드미턴스 제어기

페루프 어드미턴스 시스템에서 일반적인 고유 어드미턴스의 제어식을 식 (18)과 같이 구성할 수 있다.

$$F_m = G_f F_s - G_v v_m + F_f \quad (18)$$

F_m : 제어대상 모터의 토크 또는 힘

F_s : 환경과의 접촉시 발생하는 반작용의 힘

F_f : 쿨롱마찰력

v_m : 제어대상 모터 속도

G_f : 힘 피드백 보상기

G_v : 속도 피드백 보상기

F_s 는 쿨롱 마찰력으로써 제어하고자 하는 모터의 관성 모멘트에 직접 영향을 주는 외란이며, G_f 는 속도 보상기 이득으로 제어대상 모터의 속도를 피드백 받아서 제어대상 모터가 보다 좋은 속도응답으로 회전하게 하는 역할을 한다. 속도 보상기로 인해 제어대상 모터의 속도응답 특성은 좋아지지만, 환경과의 접촉시 환경이 파괴 될 수 있는 안정성 문제가 발생하며, 이를 해결하기 위하여 다시 힘보상기 G_f 이득을 조정(Tuning) 하여 환경과의 접촉시 안정성을 유지하게 된다. 즉 속도보상기 이득은 제어대상 모터에 불필요한 마찰을 제거하는데 중요한 역할을 하며 힘 보상기는 제어대상 모터가 환경과 접촉시 안정성을 유지하는데 중요한 역할을 한다.

III. NAC 제어 알고리즘

1. 입력단 어드미턴스

페루프 어드미턴스에서 제어대상 모터질량에 직접 영향을 주는 외란인 쿨롱 마찰력(F_f)의 제거는 쿨롱 마찰력에 대한 제어대상 모터의 속도(v_m)의 감도로 측정되는 값이기 때문에 입력단의 어드미턴스 Y 는 식 (19)처럼 표현된다.

$$Y_f = \frac{v_m}{F_f} \quad (19)$$

윗식을 서로 다른 4개의 어드미턴스 요소와 페루프 고유 어드미턴스 제어규칙으로부터 재정리함에 있어서 로봇의 끝단인(출력단 어드미턴스)와 관련있는 $F_s=0$ 으로 두고 계산하면 식 (20)로 유도되어진다.

$$F_m = -G_v v_m + F_f \quad (20)$$

개루프 어드미턴스 중에서 v_m 의 정의식을 이용함에 있어 역시 $F_s=0$ 으로 간주하고 v_m 을 유도하면 식 (21)로 간단하게 만들 수 있다.

$$v_m = Y_{mm} F_m \quad (21)$$

식 (21)를 식 (20)의 v_m 대신에 대입하여 다시 정리해보면 식 (22)처럼 바꿀 수 있다.

$$F_m + (G_v Y_{mm} F_m) = F_f \quad (22)$$

식 (22)에서 F_m 을 포함하는 항끼리 묶은 후 우측의 항을 $-\frac{v_m}{F_f}$ 의 형태로 바꾸면 식 (23)처럼 된다.

$$\frac{v_m}{(1 + G_v Y_{mm}) F_m} = -\frac{v_m}{F_f} \quad (23)$$

좌측의 항을 자세히 살펴보면 $-\frac{v_m}{F_m}$ 의 항이 생겨나는데 이 항은 이미 앞에서 언급한 개루프 어드미턴스의 정의식에 의해서 Y_{mm} 임을 알 수 있다. 최종적으로 얻어지는 입력단의 어드미턴스는 식 (24)로 결과를 얻을 수 있다.

$$Y_f = \frac{v_m}{F_f} = \frac{Y_{mm}}{1 + G_v Y_{mm}} \quad (24)$$

윗식에서 쿨롱 마찰을 제거하기 위해서는 되도록이면 입력단의 어드미턴스가 최소화 될 만큼 속도 보상기 이득값을 가능한한 큰 값으로 선택하는 것이 좋으며, 속도보상기의 이득이 클수록 제어대상 모터의 마찰을 줄이는데는 성공적이다. 즉 제어대상 모터의 핸드가 자신이 원하는 속도로 빠른응답 특성을 가지고 환경에 접근해 갈 것임은 분명한 사실이다. 제어대상 모터의 속도 응답에 영향을 미치는 쿨롱마찰을 제거 시킬 수 있는 속도 보상기의 값은 본 논문에서는 힘 제어용 1축 로봇 시스템을 제작하여 실험을 통하여 최적의 속도 보상기의 이득값을 찾는다. 여기서 주의해야 할 점은 빠른 속도로 환경에 접근해 가는 경우는 로봇의 속도응답 특성은 향상 될 수 있지만 임의의 환경과 접촉시 환경에서 발산하는 반작용의 힘은 반대로 너무 커져서 환경이 파괴 되거나 또는 환경의 질량이나 강성이 로봇보다 더 큰 경우는 로봇이 파괴되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 다음 장에서는 제어대상 모터가 환경과의 접촉시에 안정성을 보장하기 위한 출력단 어드미턴스에 대해서 알아본다.

2. 출력단 어드미턴스

앞에서는 입력단의 어드미턴스에서 속도 보상기의 역할에 대해서 살펴보았고 지금부터는 페루프의 끝단에 해당하는 출력단 어드미턴스에 대해서 알아보기로 한다. 로봇 끝단의 어드미턴스를 (Y_s)라고 정의하고 Y_s 를 수식으로 표현하면 식 (25)가 된다.

$$Y_s = -\frac{v_s}{F_s} \quad (25)$$

로봇의 최종 끝단의 어드미턴스를 유도하기 위해서는 1축 로봇 시스템의 어드미턴스 행렬식 (3)으로부터 식 (25)의 Y_s 형태로 바꾸기 위해 v_s 항을 이용하여 전개해보면 식 (26)처럼 된다.

$$v_s = Y_{ss} F_s + Y_{sm} F_m \quad (26)$$

윗식에서 F_s 로 모든 항을 나누면 출력단 어드미턴스의 형태인 식 (27)과 같이 유도되어진다.

$$Y_s = \frac{v_s}{F_s} = Y_{ss} + Y_{sm} \frac{F_m}{F_s} \quad (27)$$

여기서 $\frac{F_m}{F_s}$ 의 항을 처리하기 위하여 다시 로봇 시스템의 어드미턴스 행렬식 (3)에서 v_m 항의 식을 이용하여 전개해보면 식 (28)을 얻을 수 있다.

$$v_m = Y_{ms} F_s + Y_{mm} F_m \quad (28)$$

출력단 어드미턴스에 포함되어 있는 $\frac{F_m}{F_s}$ 항을 유도하기 위하여 주어진 식 (28)를 이용하여 페루프의 제어 규칙인 식 (18)의 v_m 대신에 대입하는데 출력단 어드미턴스를 구하고자 할 때는 반대로 입력단 어드미턴스에서 문제가 되는 쿨롱 마찰력은 이미 입력단 어드미턴스에서 속도 보상기에 의해 제거 되었으므로 끝단의 어드미턴스를 구하고자 할 때는 쿨롱 마찰력($F_f = 0$)으로 간주하고 유도하면 식 (29)와 같다.

$$F_m = G_f F_s - G_v (Y_{ms} F_s + Y_{mm} F_m) \quad (29)$$

F_m, F_s 을 포함하는 항으로 나누어 정리해보면 식(30)을 얻을 수 있다.

$$(1 + G_v Y_{mm}) F_m = (G_f - G_v Y_{ms}) F_s \quad (30)$$

윗식에서 출력단 어드미턴스인 Y_s 형태로 만들기 위해 우변의 F_s 로 양변을 나누면 식 (31)로 정리된다.

$$\frac{F_m}{F_s} = \frac{G_f - G_v Y_{ms}}{1 + G_v Y_{mm}} \quad (31)$$

식 (31)를 식 (27)에 대입해서 페루프에서 로봇 끝단의 어드미턴스 Y_s 를 최종적으로 유도해 보면 식 (32)와 같이 유도된다.

$$Y_s = \frac{v_s}{F_s} = Y_{ss} + Y_{sm} \left(\frac{G_f - G_v Y_{ms}}{1 + G_v Y_{mm}} \right) \quad (32)$$

최종적으로 유도한 로봇 끝단의 어드미턴스(Y_s)를 살펴보면 속도 보상기와 힘 보상기를 모두 포함하고 있음을 알 수 있다. 따라서 로봇 끝단의 어드미턴스가 속도 피드백 보상기와 힘 피드백 보상기를 해결하는 방법이 된다. 여기서 속도 피드백 보상은 앞에서 언급한 바와 같이 로봇 시스템 내부에 존재하는 쿨롱 마찰력을 제거하기 위한 역할을 하는 것이 주목적이다. 또한 속도 피드백 보상의 이득 설정은 될 수 있으면 쿨롱 마찰을 제거 할 만큼 가능한 큰 값으로 설정하는 것이 좋다. 하지만 실질적으로는 속도 보상기 이득을 무한정 크게 할 수는 없다. 왜냐하면 로봇이 빠른 속도로 환경에 접근해 가는 경우 환경과의 접촉시 안정성이 문제가 되기 때문에 속도 보상기의 이득은 실제로는 제약을 받는다. 따라서 임의의 환경과 접촉시 안정성의 문제를 고려하기 위하여 힘 보상기 이득을 다시 조절하여 내부의 쿨롱 마찰을 제거하면서 동시에 고유 어드미턴스 제어기의 안정성을 보장한다.

힘 보상기를 유도하기에 앞서 우리가 알아두어야 할 것은 출력단 어드미턴스가 결국은 환경과 직접적으로 접촉하는 부분이기 때문에 로봇 끝단의 어드미턴스는 당연히 환경이 갖고 있는 임피던스와 잘 조화를 이루어야 한다는 사실에는 의심할 여지가 없다. 따라서 로봇 끝단의 어드미턴스는 또한 환경과 조화를 이루는 원하는 임피던스의 역수로 간주 할 수 있기 때문에 출력단 어드미턴스를 다른 형태인 식 (33)로 표현 할 수 있다.

$$Y_s = \frac{1}{Z_{des}} \quad (33)$$

식 (33)을 식 (32)의 출력단 어드미턴스 대입하여 표현하면 식 (34)가 된다.

$$\frac{1}{Z_{des}} = Y_{ss} + Y_{sm} \left(\frac{G_f - G_v Y_{ms}}{1 + G_v Y_{mm}} \right) \quad (34)$$

윗식으로부터 양변을 Z_{des} 와 $1 + G_v Y_{mm}$ 으로 곱하여

식을 전개해보면 식 (35)를 얻을 수 있다.

$$1 + G_v Y_{mm} = Z_{des} Y_{ss} + Z_{des} G_v Y_{mm} Y_{ss} + Z_{des} Y_{sm} G_f - Z_{des} G_v (Y_{sm} Y_{ms}) \quad (35)$$

식 (35)에서 힘 보상기를 포함하는 항과 속도 보상기를 포함하는 항으로 분리시켜 보면 식 (36)처럼 구해진다.

$$Z_{des} Y_{sm} G_f = 1 + G_v Y_{mm} - Z_{des} Y_{ss} - Z_{des} G_v (Y_{mm} Y_{ss} - Y_{sm} Y_{ms}) \quad (36)$$

여기서 서로 다른 4개의 어드미턴스를 식 (8)에서부터 식 (11)까지 정의를 이용하여 표현하면 식(37)처럼 유도되어진다.

$$Z_{des} \frac{Y_{sm, num}}{Y_{den}} G_f = 1 + G_v \frac{Y_{mm, num}}{Y_{den}} - Z_{des} \frac{Y_{ss, num}}{Y_{den}} - Z_{des} G_v \left(\frac{Y_{mm, num} Y_{ss, num} - Y_{ms, num} Y_{sm, num}}{Y_{den}^2} \right) \quad (37)$$

약분하여 주어진 식을 힘 보상기 이득에 대하여 정리하면 힘 보상기의 결과는 식 (38)로 계산되어진다.

$$G_f = \frac{Y_{den} - Y_{ss, num} Z_{des} + G_v (Y_{mm, num} - Z_{des})}{Z_{des} Y_{sm, num}} \quad (38)$$

여기서 주의해야 할 점은 실현 가능한 힘 보상기를 얻기 위해서는 환경에 해당하는 환경(target) 시스템의 임피던스(Z_{des})를 선택해야만 한다. 환경의 임피던스를 일반적인 형태인 식 (39)로 표현한다.

$$Z_{des} = M_{des} s + B_{des} + \frac{K_t}{s} \quad (39)$$

식 (39)를 식 (38)에 대입하여 힘 보상기에 관련된 식을 분자와 분모로 나누어 표현해 보면 식(40)과 같이 유도된다.

$$G_f = \frac{G_f, num}{(B_t s + K_t)(M_{des} s^2 + B_{des} s + K_{des})} \quad (40)$$

윗식으로부터 힘 보상기에서 분자만을 따로 분리해서 전개하면 식 (41)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 G_{f, num} = & G_v s^2 (M_s - M_{des} + s(B_s + B_t - B_{des})) \\
 & + K_t - K_{des} + s^4 [M_m M_s - M_m M_{des}] \\
 & + s^3 [M_m B_s + M_s B_m + M_m B_t + M_s B_t \\
 & - M_m B_{des} - M_{des} B_m - M_{des} B_t] \\
 & + s^2 [B_m B_s + B_t B_m + B_t B_s + K_t M_m - K_t \\
 & - M_m K_{des} M_s - M_{des} K_t - B_m B_{des} - B_t B_{des}] \\
 & + s [K_t B_m + K_t B_s - K_{des} B_m - K_{des} B_t \\
 & - K_t B_{des}] - K_t K_{des} \quad (41)
 \end{aligned}$$

위의 식에서 보듯이 주의해야 할 점은 힘 보상기의 분자 $G_{f, num}$ 의 차수는 4차이고 힘 보상기의 분모 $G_{f, den}$ 의 차수는 3차가 됨을 알 수 있다. 따라서 전개한 힘 보상기의 경우는 극점(Pole)의 개수가 3개이고, 영점(Zero)의 개수가 4개이므로 영점의 개수가 극점의 개수보다 많은 상태이므로 제어기 설계가 불가능하다는 것을 알 수 있다.

실현 가능한 힘 피드백 보상 제어가 되기 위해서는 주어진 분자의 4차를 3차로 줄이기 위한 방법이 필요하다. 따라서 힘 보상기의 분자의 차수를 줄이기 위한 방법중의 하나로 환경의 원하는 임피던스 중 질량 또는 관성 모멘트 M_{des} 와 출력단의 고유 관성 모멘트 M_s 와 같게 선택하면, 즉 $M_{des} = M_s$ 와 같이 하면 힘 보상기의 분자의 차수를 4차에서 3차로 간단히 감소시킬 수 있다. 힘 보상기의 분자를 3차로 감소시켜 실현 가능한 힘 보상기의 분자식을 다시 표현해 보면 최종적으로 구한 힘 피드백 보상기의 분자식의 결과는 식 (42)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 G_{f, num} = & G_v s [s(B_s + B_t - B_{des}) + (K_t - K_{des})] \\
 & + s^3 [M_m B_s + M_m B_t - M_m B_{des}] \\
 & + s^2 [B_m B_s + B_m B_t + B_t B_s + K_t M_m \\
 & - M_m K_{des} - B_m B_{des} - B_t B_{des}] \\
 & + s [K_t B_m + K_t B_s - K_{des} B_m - K_{des} B_t \\
 & - K_t B_{des}] - K_{des} K_t \quad (42)
 \end{aligned}$$

따라서 $M_{des} = M_s$ 가 실현 가능한 힘 보상기를 구현하는 데 있어서 최상의 선택이며 힘 보상기의 최종 결과식은 분자와 분모는 3차의 전달함수가 된다.

IV. 1축 로봇 시스템 및 제어 실험환경

1. 1축 로봇 시스템

제안한 고유 어드미턴스 제어기의 실험을 위하여 제작한 1축 로봇 시스템은 750W AC 서보 모터와 400W AC 서보 모터, 토크 센서 그리고 2개의 커플링으로 구성되어 있으며, <그림 (4.1)>에서 보여진다. 1축 로봇 시스템의 왼쪽 샤프트에는 제어대상 모터(750W AC 서보 모터)가 장착되어 있고 제어 대상 모터는 로봇의 핸드 또는 공구단에 해당하는 부분이 된다. 토크 센서의 오른쪽에는 로봇과 접촉되는 환경의 효과를 주기 위해 부하 모터(400W AC 서보 모터)를 장착하여 원하는 환경을 로봇에 제공 할 수 있도록 하였다.

토크 센서와 토크 검출기(Torque Detector)는 로봇의 끝단이 임의의 강성(Stiffness)을 갖는 환경과의 접촉시 환경에서 발생하는 반작용의 힘을 측정하기 위한 것이다. 제어대상 모터인 750W AC 서보모터와 토크센서 사이 또는 환경모터인 400W AC 서보모터와 토크센서 사이에 존재하는 2개의 커플링은 제어 대상 모터로부터 환경 모터에까지 힘을 전달하는 역할을 한다.

쿨롱 마찰력은 오픈루프의 제어대상 모터의 관성 모멘트에 직접 영향을 주는 외란이며 750W AC 서보모터의 샤프트에 직접 고무 벨트를 걸어서 발생 시킬 수 있다.

본 논문에서 로봇 시스템에 어드미턴스 제어를 적용하기 위하여 연산속도가 빠른 고속의 DSP를 사용함으로써 실시간으로 제어대상 시스템인 1축 로봇 시스템

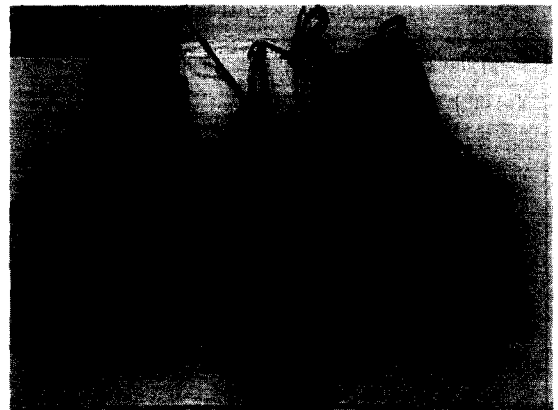


그림 2. 1축 로봇 시스템의 구성
Fig. 2. One-Link Robot System Set-Up.

택을 제어하고 있다. 제어 시스템의 구성은 중앙 처리 장치 보드와 입/출력 제어 신호를 발생시키는 인터페이스 보드로 구성되어 있다. DSP 보드를 PCI 버스에 장착하고, 외부 입출력 모듈을 탑재한 인터페이스 보드를 ISA 버스에 장착하여 구성하였다. 인터페이스 보드에는 A/D 컨버터 및 D/A 컨버터와 카운터 모듈이 탑재되어 있다. DSP 보드와 인터페이스 보드간의 데이터 송수신은 DSP-Link3 버스를 사용한다. 또한 인터페이스 보드와 IP 모듈간의 데이터 송수신은 IP 버스를 사용한다.

1축 로봇 시스템과 제어기 개발 환경 시스템의 연결 상태를 설명하면, 로봇핸드에 해당하는 750W AC 서보 모터와 가변적인 강성을 갖는 환경의 역할을 하는 400W AC 서보 모터에 D/A 컨버터로부터 제어 신호를 출력하고, 각각의 모터에서 나오는 엔코더 검출 신호는 카운터에 연결하여 모터의 위치를 파악한다. 로봇과 환경의 접촉시에 발생하는 토크를 측정하기 위해서 토크 센서에서 출력되는 값을 A/D 컨버터를 사용하여 토크 값을 측정할 수 있다.

제어기 개발 환경 시스템의 소프트웨어 구성은 프로그램을 작성을 하고 컴파일을 하여 DSP 보드로 다운로드 시키는 형식을 취하고 있다. 실행되고 있는 상황을 모니터링 할 수 있도록 시스템이 구성되어 있다.

2. 시스템 모델링

위에서 구축한 제어기 개발 환경을 이용하여 본 논문에서 제작한 힘 제어용 1축 로봇 시스템의 파라미터를 실험을 통하여 구한 결과가 <표 1>과 같다.

표 1. 파라미터 정의
Table 1. Parameter Identification.

파라미터 종류	파라미터 값
제어대상 모터의 질량 또는 관성 모멘트	$M_m = 0.671 \times 10^{-4} K_g m^2$
로봇 끝단의 질량 또는 관성 모멘트	$M_s = 0.191 \times 10^{-4} K_g m^2$
커플링의 마찰	$B_f = 0.0034 N / m (rad/sec)$
커플링의 강성	$K_t = 10.4 Nm / rad$
제어모터 입력	$V_{750W, motor} = 0.5 \sin \omega_c + 0.5$
환경모터 입력	$V_{400W, motor} = 0.3 \sin \omega_e + 0.3$
쿨롱 마찰력	$F_f = 2 Nm$

위의 파라미터 값들은 많은 데이터 분석과 실험을 통하여 산출한 결과로써 커플링의 마찰은 먼저 커플링을 제거한 상태에서 속도를 피드백 받아서 측정하고 측정이 끝 난후 다시 커플링을 연결한 상태에서 다시 속도 피드백을 받아 50번 이상의 실험을 통하여 나온 데이터의 평균을 낸 상태의 결과이고 커플링의 강성의 경우는 속도 대신에 엔코더 신호로부터 위치에 대한 데이터를 가지고 커플링을 연결한 경우와 커플링을 연결하지 않은 경우에 대해 똑같이 실험 후 평균을 계산한 결과이다.

쿨롱 마찰력의 경우는 750W AC 서보모터의 샤프트에 고무벨트를 걸어서 외란을 발생 시켰고, 쿨롱 마찰 값을 구하기 위해 벨트를 걸지 않은 경우의 토크센서 값과 벨트를 걸었을 때의 토크센서 값을 비교하여 산출한 결과이다.

위에서 구한 파라미터들은 고유 어드미턴스 제어기에서 중요한 역할을 하는 힘 보상기 또는 속도 보상기 이외에 서로 다른 4개의 어드미턴스 함수를 정의하는데 사용 할 뿐만 아니라 1축 로봇 시스템을 구동하기 위한 입력신호 및 가변적인 환경의 효과를 주기 위하여 사용되어 진다.

V. 실험 및 고찰

로봇이 접촉하는 환경의 효과를 주기 위해 환경모터인 400W AC 서보 모터에 정현파 전압을 인가하였다. 환경에 인가하는 입력전압은 $v_{env, motor} = 0.3 \sin \omega_e + 0.3$ 로 설정하였다. <그림 3>에서 보듯이 환경모터에

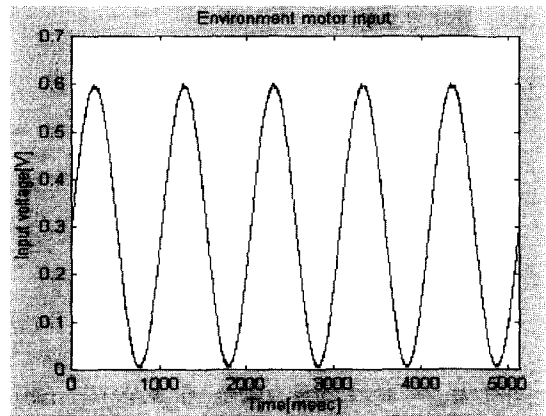


그림 3. 환경모터의 정현파 입력전압
Fig. 3. Sinusoidal Input for Environment Motor.

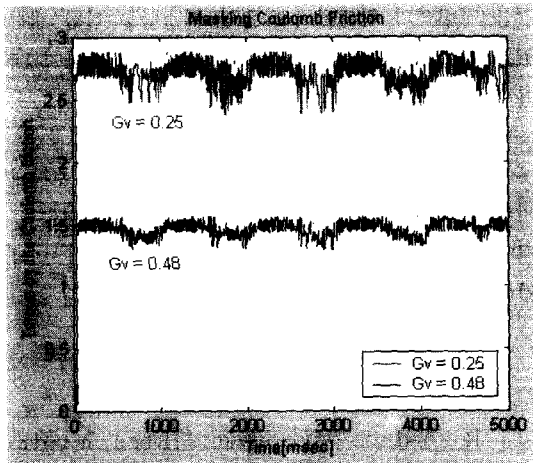


그림 4. 속도 보상에 따른 쿨롱 마찰의 제거
Fig. 4. Velocity Compensator for Rejecting Coulomb Friction.

입력 전압을 정현파로 인가함으로써 임의의 강성을 갖는 환경의 효과를 제어대상 모터에 충분히 제공할 수 있게 하였다.

<그림 4> 그래프는 1축 로봇 시스템의 입력단에 존재하는 쿨롱 마찰을 제거하기 위하여 속도 보상의 게인을 조정하여 환경과의 접촉시 발생하는 반작용의 힘을 토크센서로부터 측정된 결과의 그래프이다.

<그림 4>에서 보듯이 속도 보상의 게인 값에 따라서 다른 양상을 나타낸다. 속도 보상의 게인 값을 $G_v=0.25$ 로 작게 설정한 경우는 쿨롱 마찰을 제대로 제거하지 못하고 2Nm 이상이 된다. 속도 보상이 이득 값을 $G_v=0.48$ 로 높게 설정한 경우는 쿨롱 마찰을 확실히 제거시킬 수 있었고 속도 보상의 게인 값이 0.48에서 2Nm 보다 낮은 약 1.5Nm를 나타내고 있다.

속도 보상의 효과적인 마찰력 제거에 따라서 속도에도 역시 차이가 있음을 확인할 수 있는데 기준 속도를 $v_c=0.5 \sin \omega_c + 0.5$ 로 설정하였고 1v당 600rpm으로 회전하는 경우로써 3개의 그래프 중에서 제일 위에 있는 그래프로 0~600rpm으로 나타나고 있음을 볼 수 있다. 속도 보상의 게인 값이 $G_v=0$ 로 작은 경우 마찰력의 영향으로 제어대상 모터가 원하는 속도로 회전하지 못하고 450rpm으로 느리게 회전하고 있음을 볼 수 있다. $G_v=0.48$ 로 게인 값을 크게 가져가는 경우에 속도보상을 통하여 마찰력을 제거하기 때문에 빠른 응답 속도로 기준 속도를 추적(tracking)하고 있음을 <그림 5>를 통해 볼 수 있다.

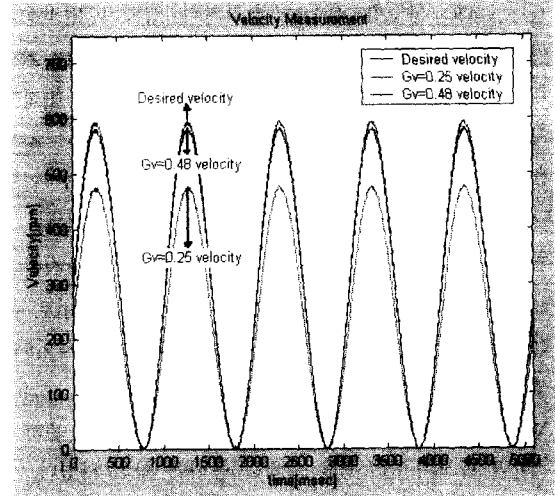


그림 5. 속도 추적도
Fig. 5. Tracking of Velocity.

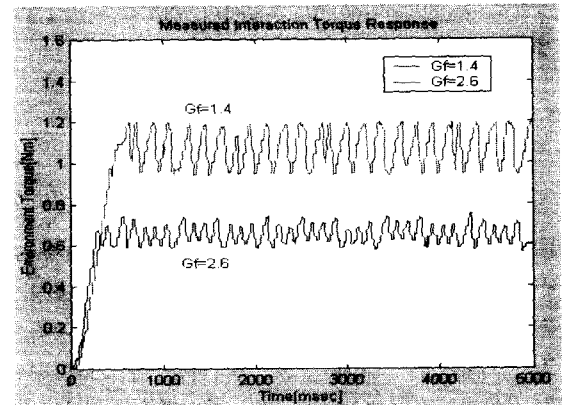


그림 6. 힘 보상을 통한 안정성 유지
Fig. 6. Maintenance stability through Force Compensator.

속도 보상을 통하여 쿨롱 마찰을 제거함으로써 고성능의 속도응답을 구현하였지만 여전히 <그림 4>에서 보듯이 토크센서에서 측정된 반작용의 힘이 오버슈트나 언더슈트가 존재하여 출렁거리고 있음을 알 수 있다. 오버슈트나 언더슈트를 줄이기 위하여 힘 보상을 이용하여 환경과의 접촉시 안정성을 보장하고자 한다. 힘보상을 이용한 그래프에서는 토크센서로부터 직접 측정되는 반작용의 힘을 피드백 받아 힘 보상 게인 값을 조정하여 빠른 응답 속도도 유지하면서 환경과의 접촉시 안정성을 유지하는 모습을 <그림 6>에서 나타내고 있다.

위의 그림에서 보듯이 힘 보상의 게인 값을

$G_f=1.4$ 로 설정한 경우는 환경과의 접촉시 반작용의 힘을 약 1.1Nm로써 앞에서 보았던 속도 보상기의 $G_f=0.48$ 인 경우의 1.5Nm에 비해서는 훨씬 더 반작용의 힘을 줄이면서도 제어대상 모터는 기준속도로 빠른 응답특성의 속도와 동시에 안정성을 유지 할 수 있었다. 힘 보상기의 게인이 $G_f=2.6$ 으로 높게 설정한 경우는 $G_f=1.4$ 와 마찬가지로 역시 안정성을 유지하고 있으면서 환경과의 접촉시 반작용의 힘도 0.6Nm로 훨씬 줄어 들었음을 확인 할 수 있다. 하지만 $G_f=2.6$ 인 경우 환경과의 접촉시 안정성은 좋지만 반대로 750W AC 서보 모터의 속도가 기준 속도로 회전하지 못하고 오히려 속도가 감소됨을 실험을 통하여 확인 하였다.

속도 보상기와 힘 보상기의 상호 보완적인 게인 값을 찾기 위해서 트레이드오프(trade-off)로 설정한 결과 우리가 제작한 1축 로봇 시스템에서는 속도 보상기의 게인은 $G_v=0.48$ 이고 힘 보상기의 게인은 $G_f=1.4$ 인 경우가 가장 좋은 결과를 보여 주었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 임피던스 제어기와 비슷한 구조를 갖는 어드미턴스 제어기를 이용하여 쿨롱 마찰이 1축 로봇 시스템에 존재하고 있음에도 불구하고 속도 보상기를 이용하여 강인성을 가지고 쿨롱마찰력을 성공적으로 제거함으로써 효과적으로 동작하는 제어기의 구현을 실험적으로 증명하였다. 로봇 시스템에 존재하는 외란을 효과적으로 제거하면서 동시에 힘 보상기를 이용하여 로봇이 환경과의 접촉시 안정성을 보장하였다. 여기서 환경과의 접촉시 안정성을 보장하기 위해서는 임의의 임피던스를 갖는 환경이 어느 정도 단단한 경우여야 한다. 속도 보상기의 게인 값이 너무 작으면 마찰을 제거하기 어렵고 게인 값이 너무 크게 되면 환경과 접촉시에 불안정성의 원인이 되므로 게인 값을 잘 조정하여야 한다. 또한 힘 보상기 역시 게인 값이 너무 크면 환경과의 안정성은 보장되지만 반대로 제어대상 모터의 속도가 다시 느려지는 상황이 발생하므로 속도 이득값과 힘 이득값은 트레이드오프로 잘 조정되어야 함을 알 수 있었다.

실험환경 구축의 어려움과 복잡한 기술을 필요로 하는 로봇 제어방식으로 인해 시뮬레이션에만 그치고 있는 실정에서, 고유 어드미턴스 알고리즘을 설계하고 그

것을 구현하기 위하여 1축 로봇 시스템을 직접 제작하였고, 제작한 1축 로봇 시스템을 구동하기 위하여 DSP를 이용한 실험 환경을 구축하였다.

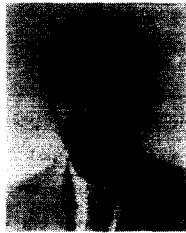
마지막으로 제안한 고유 어드미턴스 알고리즘은 로봇이 원하는 위치와 속도로 임의의 환경과 접촉시에도 외란을 제거하면서 동시에 안정성을 유지하는데 성공적인 제어기로서 동작하고 있음을 본 논문에서 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] R. Andeson, M. Spong, "Hybrid impedance control of robotic manipulators", In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1073~1080, 1987.
- [2] M.H. Raibert, J.J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators", Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 102:126~133, June 1981.
- [3] R.J Anderson, "Stable robot force control laws for arbitrary environments", In Proceedings of the ASME, pp. 13~23, December 1989.
- [4] Canudas Dewit K.J Astorm and K. Braun, "Adaptive friction compensation in robot manipulation: Low-velocity", Proc. of International Conference on robotics and automation pp. 1352~1357, 1994.
- [5] N. Hogan "Impedance control: An approach to manipulation: Part iii-applications" Journal of Dynamic systems Measurement and control, vol 107 pp. 17~24, 1996.
- [6] M.E Dohring, "Impedance control of redundant manipulation: theory and experiments". Case Western Reserve University, 1997.
- [7] Glosser. G. D, "The implementation of Natural Admittance Controller on a Robotic Manipulator", MS Thesis, Department of Systems Engineering, Case Western Reserve University, Jan. 1993.
- [8] Schimmels, J.M, Peskin, M. A, "Admittance Matrix Design for Force-Guided Assembly", IEEE Trans. Robotics Automat, vol. 8, pp. 213

- ~217, April 1992.
- [9] Homayoun Seraji, Richard Colbaugh "Force Tracking in Impedance Control", The International Journal of Robotics Research. Vol. 16, No 1, pp. 97~117, February 1997.
- [10] Ciro Natale, Bruno Siliano, "Spatial Impedance Control of Redundant Manipulators", In Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation Detroit, Michigan. May 1999.
- [11] Chien-Chern Cheah, Danwei Wang, "Learning Impedance Control for Robotic Manipulators," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol, 14, No. 3, June 1998.
- [12] J.E. Colgate, The Control of Dynamically Interacting Systems. Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, August 1988.
- [13] A.M. Khan, "Experimental Investigations of the admittance function of a robotic manipulator." Master's thesis, Case Western Reserve University, Department of Electrical Engineering and Applied Physics, May 1992.
- [14] Seul Jung, T. C. Hsia, "Neural Network Impedance Force Control of Robot Manipulator," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol, 45, No. 3, June 1998.
- [15] Dong Sun and Yunhui Liu, "Modeling and Impedance Control of a two-Manipulator System handling a Flexible Beam," Transactions of the ASME Vol. 119, pp. 736~742. December 1997.

 저 자 소 개



金承禹(正會員)

1987년 : 연세대 전자공학과 졸업.
 1989년 : 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1989~1990년 : 삼성종합
 기술원 근무. 1994년 : 동 대학원
 전자공학과 졸업(공학박). 1994년~
 현재 : 순천향대 정보기술공학부
 부교수. 1998~1999년 : 미국 Case Western University
 방문교수. <주관심분야 : 로봇시스템, 퍼지제어 시스템,
 자동화기술, RP머신개발 및 응용>