

퍼지 추론에 의한 로봇트 매니플레이터의 힘 제어

A Force Control of Robot Manipulator by a Fuzzy Reasoning Method

서 일 흥*, 강복현*, 엄광식*, 여회주*, 오상록**

I. H. Suh*, B. H. Kang*, K. S. Eom*, H. J. Yeo*, S. -R. Oh**

I. 서 론

로봇트가 환경의 변화에 상호작용 하거나, 불확실한 환경과 접촉할 때 원하는 응답을 얻거나 주어진 일을 수행하기 위해서는 힘 제어가 필수적으로 이루어져야 한다. 환경이나 매니플레이터의 모델링은 불확실한 환경과 접촉할 때나 조립등의 일을 수행할 때 부정확하게 이루어질 수 있다.

힘 제어는 오랫동안 필수적인 로봇트의 능력으로 인식되어 왔지만, 실제로는 적절한 제어 알고리즘[1, 2]의 부재로 인해 위치 서보 드라이브를 갖는 산업용 매니플레이터에 대해 만족스럽게 구현되지 않았다.

대부분의 힘 제어 방법[1, 2, 3, 4, 13]은 매니플레이터의 다이내믹스의 정확하게 알고 있다고 가정한다. 하지만 실제로는 다음과 같은 두가지 이유 때문에 오차가 발생하게 된다. 첫째, 측정기술의 한계 때문에 모델링이 부정확하다. 둘째, 다이내믹스가 완전하다고 가정하는 것은 정확하지 않다. 정지 마찰력과 같은 성분이 시스템의 동작에 어떤 영향을 미치는지는 알려져 있지 않기 때문에 모델링이 되지 않는다. 또한 고주파수에서 나타나는 동적 상황도 모델링이 되지 않는다. 불확실한 모델링과 왜란들은 시스템의 안정성과 수행능력에 영향을 미친다. 이러한 어려움에 대처하기 위하여 하이브리드(hybrid) 위치/힘 제어[1, 3]와 임피던스 제어[4, 5]에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 이러한 방법들을 성공적으로 수행하기 위해서는 각 조인트들에 토오크 서보가 적용되어야 한다. 따라서 입력이 위치인 기존의 위치 서보 드라이브만을 사용하는 대부분의 상용화된 산업용 로봇트에 그러한 힘 제어 방법을 직접적으로 적용하기가 힘들다.

본 논문에서는 위치 서보 드라이브를 갖춘 상용화된 산업용 로봇트에 대해 적용할 수 있는 퍼지 힘 제어 알고리즘을 제안한다. 여기서 제안한 퍼지 제어기의 제어규칙은 환경에 대한 강성의 크기에 따라 변화하며, 강성의 변화에 관계없이 원하는 힘 응답을 유지할 수 있다. 특히, 몇가지 퍼지 제어 규칙이 대표적인 환경의 강성에 대해 설계되고, 주어진 임의의 환경에 대한 제어량이 퍼지 보간법에 의해 결정된다. 강성은 사용자에게 의해 주어질 수도 있고, 알지 못하는 환경에 대해서는 실제로 로봇트를 이용하여 자동으로 측정할 수 있도록 되어 있다.

제안한 퍼지 제어기의 타당성을 보여주기 위하여, 몇가지 실험결과를 제시한다. 이 실험에는 힘/토오크 센서 시스템을 장착한 5축 수직관절형 로봇트 매니플레이터인 PT200V 로봇트와 다중로봇트 제어기[18]가 사용되었다.

*한양대학교 전자공학과

Intelligent Control and Robotics Laboratory, Dept. of Electronic Eng., Hanyang Univ

**한국과학기술원

Division of Electronics and Information technology, KIST

II. 퍼지 힘제어 알고리즘

K_X 와 δX 를 각각 직교좌표계에서의 6×6 대각선 강성 행렬, end-effector의 6×1 미소 위치 변위라고 하자. 그리고 q , δq , τ 를 각각 n 차원의 조인트 위치 벡터, 미소 조인트 변위벡터, 조인트 토크 벡터라 하자. 또 $6 \times n$ 행렬 $J(q)$, F_d , F_a 를 각각 δq 와 δX 를 연결시켜 주는 자코비언, 6차원의 원하는 힘 벡터, 6차원의 실제의 힘 벡터라 하자. 그러면 [2]에 있는 강성에 대한 기본 공식으로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\tau = J(q)^T K_X J(q) \delta q \quad (1)$$

[1]에서 제안한 힘 제어 방법은 위치 오차와 변화율에 의해 조인트 토크 τ 를 발생시키기 위해서 식(1)의 관계를 이용한다. 그래서 고정된 조인트 위치가 왜란에 의해서 벗어나게 되면 위치 오차를 0으로 만들기 위해서 각 조인트 토크가 발생하기 때문에 유연성이 생긴다. 그러나 외부 힘센서를 이용하여 제어를 할 경우 원하는 힘/토크를 발생시키기 위해서 위치 오차가 필요하다.

위치 서보를 수정하지 않고 힘 제어를 할 경우에 δq 는 외부 힘센서의 힘 오차로부터 얻어져야 한다. 우선 $\tau = J^T F$ 으로부터 $\delta q = [K_X J(q)]^{-1} F$ 를 얻을 수 있다. 여기서 제어기 설계 문제는 오차와 시스템 파라미터의 함수로써 F 를 찾아내는 것이다. 힘에 대한 오차와 오차 변화율을 $F_e \triangleq F_d$, F_a 와 $F_{et} \triangleq dF_e/dt$ 로 각각 정의하자. 그리고, 주어진 환경의 강성값에 대한 제어량은 다른 강성값을 가지는 환경에 대해서 효과적으로 반응하기 위해서 수정되어야 한다. 또한 환경의 강성값은 환경에 인가되는 원하는 힘 F_d 가 증가될 때에 증가된다. 그러므로, 제어 입력 힘은 퍼지 규칙에 의해서 구현되는 $h(F_e, F_{et}, K_E, F_d)$ 로써 주어지는 F_e, F_{et}, K_E, F_d 의 함수이어야 한다. 결과적으로 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\delta q = [K_X J(q)]^{-1} h(F_e, F_{et}, K_E, F_d) \quad (2)$$

조인트 위치 q 에서의 조인트 위치 명령 q_d 는

$$q_d = q + \delta q \quad (3)$$

에 의해서 얻어진다.

그림 1은 위치 서보만을 장착한 상용화된 산업용 로봇 제어기에 위에서 설명한 방법을 적용하였을 경우의 불력도이다. 식(2)에서의 제어 법칙 $h(F_e, F_{et}, K_E, F_d)$ 은 좋은 과도 응답을 가진 출력을 얻도록 설계되어야 한다. $h(F_e, F_{et}, K_E, F_d)$ 은 페루프 형태에서는 분석적으로 얻기가 어려우므로 퍼지 규칙에 의해서 추정한다. 그러나 입력 변수의 수가 2보다 크기 때문에, 필요한 퍼지 규칙을 만드는 것이 어려울 것이다. 따라서 $h(F_e, F_{et}, K_E, F_d)$ 는 [10, 20]에서 제안한 퍼지 보간법을 사용하여 설계한다. $i=1, 2, \dots, M$ 와 $j=1, 2, \dots, N$ 일때 $h(F_e, F_{et}, K_E, F_d)$ 는 $M \times N$ 개의 대표적인 함수 $g_{ij}(F_e, F_{et}) \triangleq h(F_e, F_{et}, K_{E,i}^*, F_{d,j}^*)$ 에 의해서 근사화되고 표현되어진 함수라고 하자. 여기서 $g_{ij}(F_e, F_{et})$ 는 $h(F_e, F_{et}, K_E, F_d)$ 함수의 K_E 와 F_d 변수에 상수값 $K_{E,i}^*$ 와 $F_{d,j}^*$ 를 할당하므로써 얻어진다. 주어진 입력 벡터 $h(F_e, F_{et}, \hat{K}_E, \hat{F}_d)$ 에 대해서 만약 \hat{K}_E 와 \hat{F}_d 가 $K_{E,i}^*$ 와 $F_{d,j}^*$ 와 각각 다르면 모든 i, j 에 대해서 $h(F_e, F_{et}, K_E, F_d)$ 의 출력 값은 $i=1, 2, \dots, M$ 이고 $j=1, 2, \dots, N$ 일때 $g_{ij}(F_e, F_{et})$ 에 의해서 추정된다. 이를 위해 모든 i, j 에 대해서 w_{ij} 는 \hat{K}_E 와 \hat{F}_d 가 $K_{E,i}^*$ 와 $F_{d,j}^*$ 에 얼마나 유사한가를 알려주는 가중치라고 하자. n_s 를 w_{ij} 에 대한 퍼지 규칙의 수라 하고 $i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N, k=1, 2, \dots, n_s$ 일 경우, $\Pi_{ik} : R \rightarrow [0, 1]$ and $\Pi_{jk} : R \rightarrow [0, 1]$ 를 각각 $|\hat{K}_E - K_{E,i}^*|$ 의 k 번째 언어 변수에 대한 멤버십 함수와 $|\hat{F}_d - F_{d,j}^*|$ 의 k 번째 언어 변수에 대한 멤버십 함수라고 하자. 또한 r_{ijk} 를 w_{ij} 의 k 번째 언어 변수에 대한 단일 멤버십 함수의 위치라고 하자. 그러면 w_{ij} 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

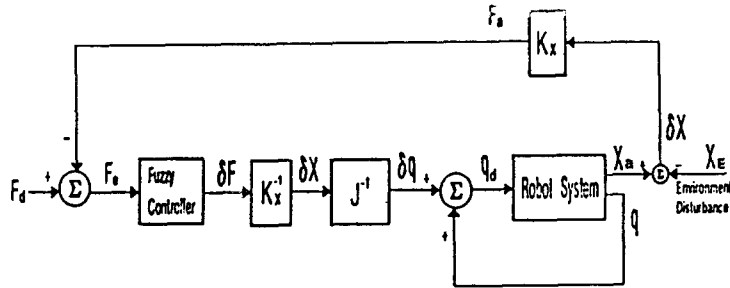


그림 1. 퍼지 힘 제어 알고리즘에 대한 블록도

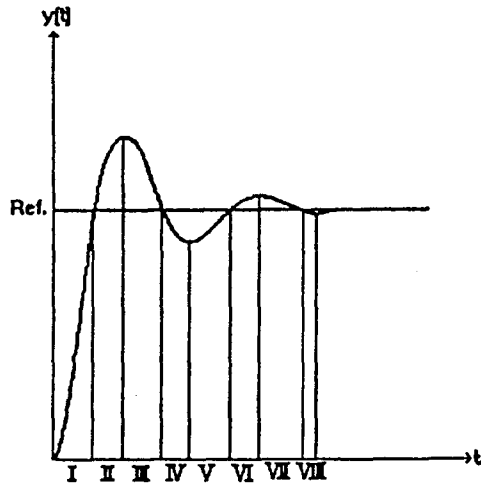


그림 2. 전형적인 스텝 응답

$$w_{ij} = \sum_{k=1}^{n_s} r_{ijk} \Pi_{ik}(\hat{K}_E) \Pi_{jk}(\hat{F}_d). \quad (4)$$

그래서, $h(F_e, F_{et}, \hat{K}_E, \hat{F}_d)$ 의 근사적인 함수 $\tilde{h}(F_e, F_{et}, \hat{K}_E, \hat{F}_d)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tilde{h}(F_e, F_{et}, \hat{K}_E, \hat{F}_d) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w_{ij} g_{ij}(F_e, F_{et})}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w_{ij}}. \quad (5)$$

식(5)에서, $g_{ij}(F_e, F_{et})$ 는 오버슈트를 작게하고 정착시간과 상승시간을 짧게 하는 것과 같은 몇몇의 performance criteria가 만족되어져야 하는 방식으로 설계되어져야 한다. 이것에 대해서는 그림 2에 보여진 것처럼 응답이 그것의 특성에 따라 I부터 VIII까지 여덟개의 구간으로 나뉘어지는 전형적인 계단 응답을 고려해야 한다. 만약 제어량이 각 구간에서 적절히 결정되어지면 그 응답은 향상되어질 것이라고 예상할 수 있다. 그러한 제어 법칙은 [6]에서 서술되었듯이 응답에 대한 "예측"에 기초하여 이루어져야 한다. 예를 들면, 구간 II와 VI의 경우에서 처

럼, 만약 응답이 오버슈트를 보이면, 제어량은 응답이 더 큰 오버슈트를 막기 위해서 에러의 양과 변화율에 관계 없이 음의 작은 값이어야 한다. 또한, 구간 I의 경우에서처럼 만약 에러 변화율이 너무 크면 응답은 오버슈트 현상을 보여줄 것으로 예상되므로, 제어량은 양의 작은 값이어야 한다. 이러한 관찰로부터, 다음에 제어규칙들을 제안해 놓았다.

(제어규칙)

- 구간 I, V : 출력 응답은 기준입력에 도달하기 위해서 증가한다. 만약 에러가 크면, 제어량은 시스템이 기준입력을 충분히 빨리 따라 가도록 해야 한다. 그리고 만약 에러가 작고 에러 변화율이 크면, 제어량은 시스템 출력이 원하는 값으로부터 발산하지 않도록 충분히 억제해야 한다. 만약 에러가 거의 0이면, 시스템이 현 상태를 유지하도록 하기 위해서 제어량은 0으로 주어야 한다.
- 구간 II, VI : 출력 응답은 이미 기준 입력을 지나서 더 증가하려고 한다. 그래서, 제어량은 출력이 기준값에 빨리 따라 가게 하기 위해서 충분히 작아야 한다.
- 구간 II, VII : 출력 응답은 구간 I 과 V에서의 출력의 뒤집은 형태와 비슷하다. 그러므로 언어제어 규칙은 구간 I 과 V의 것과 같은 것으로 주어져야 한다.
- 구간 IV, VIII : 출력 응답은 구간 II 과 VI에서의 응답의 뒤집은 형태와 비슷하다. 그러므로 언어 제어량은 구간 II 과 VI에서의 그것과 같게 주어져야 한다.

III. 실험 결과

실험 환경으로는 힘센서 시스템[22]을 장착한 5축 수직다관절 로봇 매니플레이터(PT200V)를 이용하였다. 제어 알고리즘은 C 언어로 구현하였으며, 다중 로봇 제어기[18]로 실험하였다. 힘제어 실험을 위한 실험 환경은 그림 3과 같다. 샘플링 시간은 F/T 센서 시스템으로부터 로봇 제어기로의 데이터 전송이 완전히 이루어지고 제어 알고리즘이 센서 데이터에 근거를 두고 수행될 수 있도록 80msec로 하였다.

실험에는 각각 다른 강성을 갖는 세 가지 고무를 사용하였고, 각각의 강성값은 고무1, 고무2, 고무3이 각각 5600, 26000, 15000 [N/m]이다.

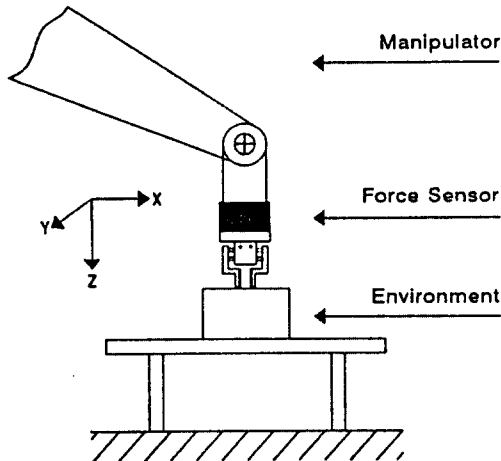


그림 3. 힘 제어 실험을 위한 실험 환경

퍼지 제어 규칙을 설계하기 위해 다음과 같은 여덟개의 언어 변수들을 사용하였다 : PL(Positive Large), NL (Negative Large), PM(Positive Medium), NM(Negative Medium), PS(Positive Small), PZ(Positive Zero), NZ(Negative Zero). 그리고 다음과 같은 경우에 대해 퍼지 제어 규칙을 설계하였다.

- 경우 1: 물체가 고무 1이고 원하는 힘이 10[N]으로 주어진 경우.
- 경우 2: 물체가 고무 1이고 원하는 힘이 40[N]으로 주어진 경우.
- 경우 3: 물체가 고무 2이고 원하는 힘이 10[N]으로 주어진 경우.
- 경우 4: 물체가 고무 2이고 원하는 힘이 40[N]으로 주어진 경우.

각 경우에 대한 퍼지규칙들은 2장에 제시한 제어규칙에 맞도록 언어 변수들로 만들어진다. 그리고 그 규칙들을 디지털화 하기 위해 14개의 레벨로 양자화되며, 구체적인 내용은 표 1과 같다. 표 2와 같이 각 퍼지 변수의 멤버십 함수를 사용한다. 그림 4는 경우 1, 경우 2, 경우 3, 경우 4에 대한 힘시스템응답을 보여준다. 그림 4에서 보는 바와 같이 출력응답은 오버슈트가 작고 정착시간이 빠르다는 것을 알 수 있다.

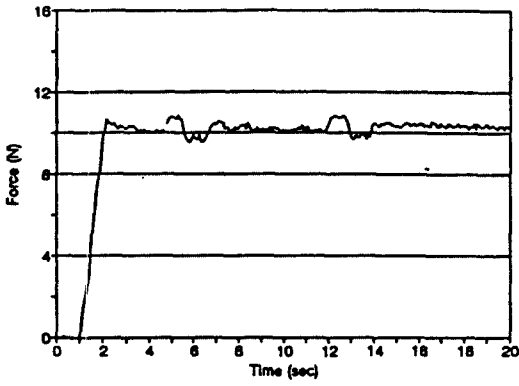
퍼지제어규칙이 환경강성의 변화에 따라 변해야 하는 것을 입증하기 위해 경우 1, 경우 2, 경우 3에 대한 퍼지 규칙을 새로운 물체 즉, $F_d=10[N]$ 이고 고무 3인 물체에 적용한다. 그림 5의 (a)와 (b)는 각각 미제동되고, 과제 동되는 출력응답을 보여준다. 그러나 같은 문제에 대해 본 논문에서 제안한 퍼지보간법을 적용할 경우 출력응답은 그림 6에서 처럼 합당한 특성을 보여준다. 이것은 제안한 제어가 환경의 강성 변화에 대해 효과적으로 작동함을 의미한다. 원하는 힘이 같은 물체에 대해 변하는 경우 어떤 응답을 얻을 수 있는가를 알아보기 위하여 $F_d=25[N]$ 인 고무 2에 대해 경우 3, 경우 4에 대한 퍼지제어규칙을 적용했다. 그림 7에서처럼 힘시스템응답은 큰 미제

표 1. 퍼지 변수에 대한 양자화 레벨

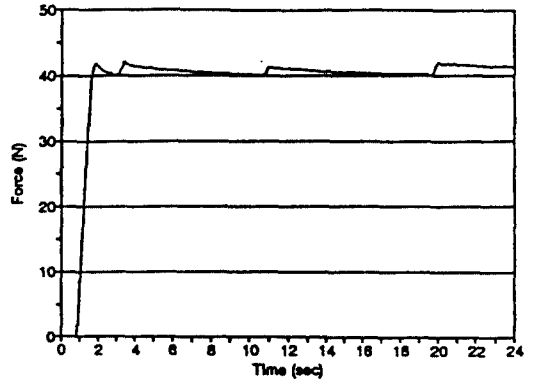
| Error(%) | ΔError(%) | Quantized Level |
|----------|-----------|-----------------|
| < -55 | < -55 | -6 |
| -55 | -55 | -5 |
| -45 | -45 | -4 |
| -35 | -35 | -3 |
| -25 | -25 | -2 |
| -15 | -15 | -1 |
| -5 | -5 | -0 |
| +5 | +5 | +0 |
| +15 | +15 | +1 |
| +25 | +25 | +2 |
| +35 | +35 | +3 |
| +45 | +45 | +4 |
| +55 | +55 | +5 |
| > +55 | > +55 | +6 |

표 2. 각 퍼지 변수에 대한 멤버십 함수

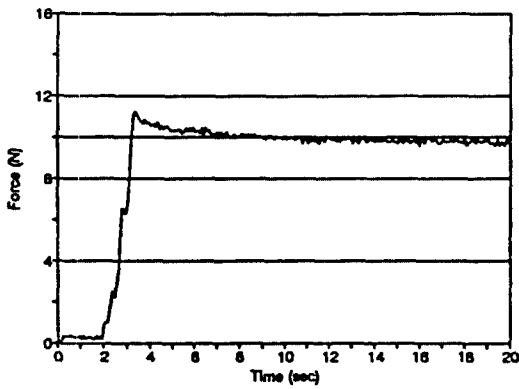
| | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | -0 | +0 | +1 | +2 | +3 | +4 | +5 | +6 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| NL | 1 | 0.7 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NM | 0.3 | 0.7 | 1 | 0.7 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NS | 0 | 0 | 0.3 | 0.7 | 1 | 0.7 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 1 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 1 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 0.7 | 1 | 0.7 | 0.3 | 0 | 0 |
| PM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 0.7 | 1 | 0.7 | 0.3 |
| PL | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 0.7 | 1 |



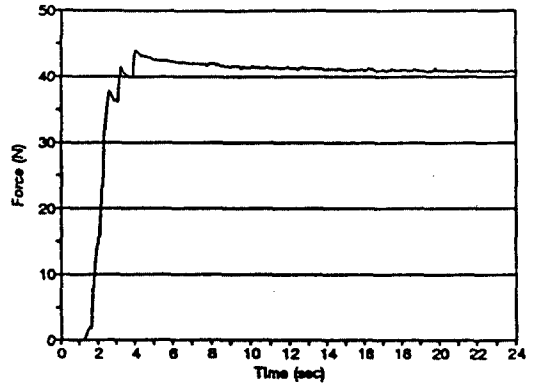
(a) 경우 1에 대한 힘 스텝 응답



(b) 경우 2에 대한 힘 스텝 응답

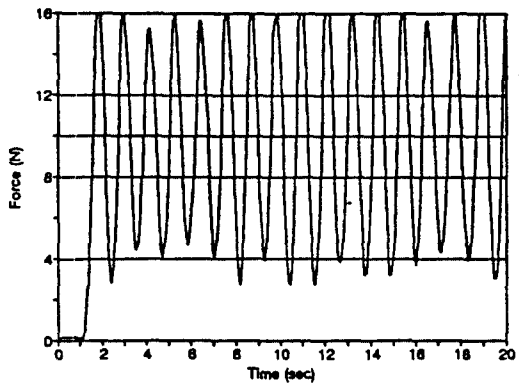


(c) 경우 3에 대한 힘 스텝 응답

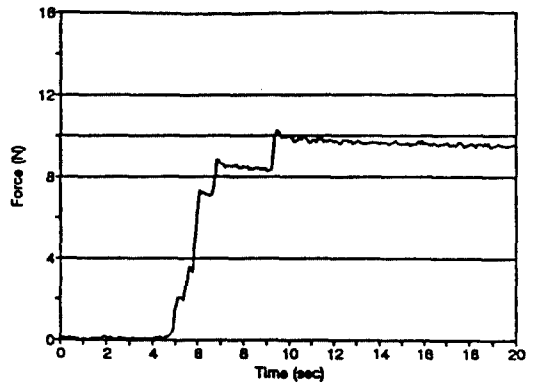


(d) 경우 4에 대한 힘 스텝 응답

그림 4. 경우 1, 2, 3, 4에 대한 힘 스텝 응답



(a) 경우 1의 퍼지 규칙을 적용하였을 때의 힘 스텝 응답



(b) 경우 2의 퍼지 규칙을 적용하였을 때의 힘 스텝 응답

그림 5. 경우 1과 경우 2에 대한 퍼지 규칙을 $F_d=10[N]$ 이고, 고무 3인 물체에 적용하였을 경우의 힘 스텝 응답

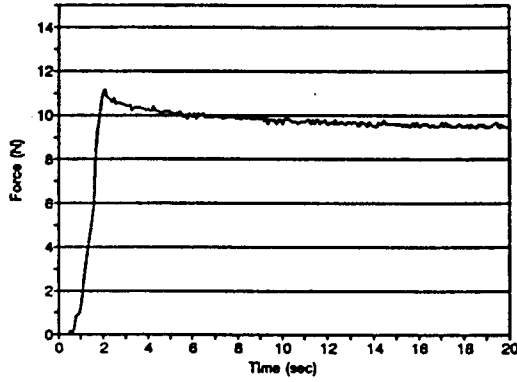
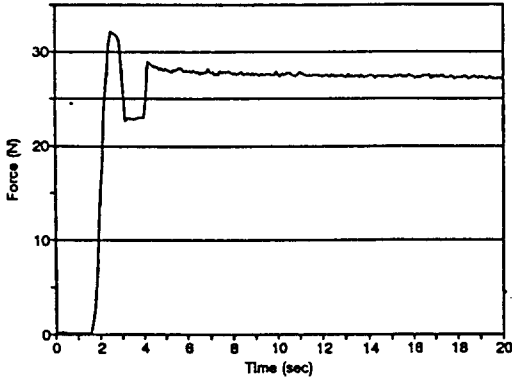
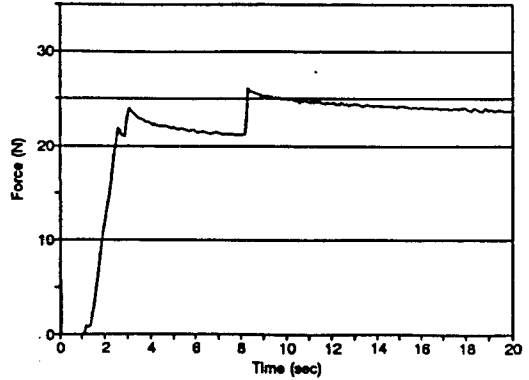


그림 6. 제안한 퍼지 보간법을 $F_d=10[N]$ 이고, 고무 3인 물체에 적용하였을 경우의 힘스텝 응답



(a) 경우 3의 퍼지 규칙을 적용하였을 때의 힘 스텝 응답



(b) 경우 4의 퍼지 규칙을 적용하였을 때의 힘 스텝 응답

그림 7. 경우 3과 경우 4에 대한 퍼지 규칙을 $F_d=25[N]$ 이고, 고무 2인 물체에 적용하였을 경우의 힘 스텝 응답

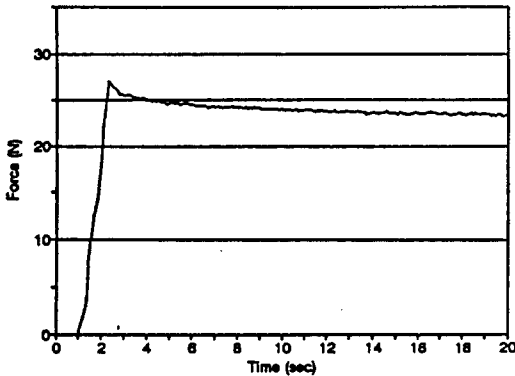


그림 8. $F_d=25[N]$ 이고, 고무 2인 물체에 적용하였을 경우의 힘 스텝 응답

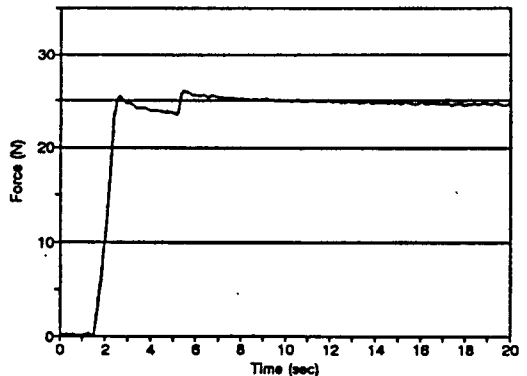


그림 9. $F_d=25[N]$ 이고, 고무 3인 물체에 적용하였을 경우의 힘 스텝 응답

동 또는 과제동된 과도응답 때문에 만족스럽지 못한 응답을 얻었다. 반면에, 제안한 퍼지 보간법이 적용될 때 출력 응답은 그림 8과 같이 위의 두 응답의 중간 정도의 좋은 과도응답을 보여준다.

환경의 강성과 원하는 힘이 동시에 바뀌는 경우에 제안한 방법의 타당성을 보여주기 위해 퍼지 보간법을 $F_d = 25[N]$ 인 고무 3에 적용했다. 그림 9는 상대적으로 좋은 과도응답을 보이는 힘스텝응답을 보여준다.

IV. 결 론

퍼지 힘제어 알고리즘은 환경의 강성 변화에도 불구하고 좋은 힘응답을 얻기 위해 제안하였다. 어떤 퍼지제어 규칙들이 몇몇 대표적인 환경강성에 대해 설계되었고, 그런 다음 제어량이 퍼지 보간법 의해 결정되었다. 제안한 알고리즘은 C언어로 구현되었고 위치 서보 드라이브를 장착한 5축의 상용화된 산업용 로봇을 사용하여 실험하였다. 실험결과들로부터, 제안한 퍼지 보간법은 환경의 강성이 변화할때에도 효과적으로 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

앞으로의 연구 과제는 퍼지 보간법에서 사용한 언어 변수에 대한 멤버십 함수를 자동적으로 알아서 구성할 수 있는 학습 알고리즘을 개발하므로써 더욱 좋은 힘응답을 얻을 수 있을 것이라고 생각된다.

참 고 문 헌

1. I. H. Suh, J. H. Hong, S. R. Oh and K. B. Kim, "Fuzzy Rule Based Position/Force Control of Industrial Manipulators," *Proc. IEEE/RSJ Int'l Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp.1617-1622, November 1991.
2. J. K. Salisbury, "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp.95-100, 1980.
3. M. H. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," *Transaction of the ASME*, vol.102, pp.126-133, June 1981.
4. G. J. Liu and A. A. Goldenberg, "Robust Hybrid Control of Robot Manipulators," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp.287-292, April 1991.
5. H. Mayeda and N. Ikeda, "Motion/Force/Impedance Control for Robot Tasks," *Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1522-1529, July 1993.
6. H. P. Qian and J. D. Schutter, "The Role of Damping and Low Pass Filtering in the Stability of Discrete Time Implemented Robot Force Control," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1368-1373, May 1992.
7. C. H. An and J. M. Hollerbach, "Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp.890-896, 1987.
8. S. D. Eppinger, "Understanding Bandwidth Limitations in Robot Force Control," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp.904-909, 1987.
9. J. D. Schutter, "A Study of Active Compliant Motion Control Methods for Rigid Manipulators Based on a Generic Scheme," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp.1060-1065, 1987.
10. I. H. Suh and T. W. Kim, "Nonlinear Function Approximation by Fuzzy-Neural Interpolating Networks," *Proc. Int'l Fuzzy Systems Association World Congress*, pp.1177-1180, 1993.
11. R. Volpe and P. Khosla, "An Analysis of Manipulator Force Control Strategies Applied to an Experimentally Drived Model," *Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1989-1997, July 1992.
12. G. Alici and R. W. Daniel, "Development and Experimental Verification of a Mathematical Model for

- Robot Force Control Design," *Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. of Interlligent Robots and Systems*, pp.1559-1565, July 1993.
13. R. Volpe and P. Khosla, "An Experimental Evaluation and Comparison of Explicit Force Control Strategies for Robotic Manipulators," *Proc. IEEE Int'l Conf. of Robotics and Automation*, pp.1387-1393, May 1992.
 14. P. Fraisse, F. Pierrot and P. Dauchez, "Virtual Environment for Robot Force Control," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp.219-224, 1993.
 15. E. Degoullange, P. Dauchez and F. Pierrot, "Force Control of an Industrial PUMA 560 Robot under Environmental Constraints : Implementation Issues and Experimental Results," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp.213-218, 1993.
 16. P. Elosegui, "A Study of Force Control Transfer Functions Identified on a PUMA 560 Arm," *Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1545-1552, July 1993.
 17. S. D. Eppinger and W. P. Seering, "On Dynamic of Robot Force Control," *Proc. IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp.29-34, 1986.
 18. I. H. Suh, T. W. Kim, H. J. Yeo and S. -R. Oh et al., "Design and Implementation of a Dual-Arm Robot Control System with Multi-Sensor Integrating Capability," *Proc. IECON'91*, Vol.2, pp.898-903, October 1991.
 19. C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller, Part II," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.20, No.2, March/April 1990.
 20. I. H. Suh and T. W. Kim, "Fuzzy Membership Function Based Neural Networks with Applications to the Visual Servoing of Robot Manipulators," to appear in *IEEE Trans. on Neural Networks*.
 21. CPU-30 User's Manual, FORCE COMPUTERS, Inc., Nov. 1991.
 22. Operation Manual of Universal Force-Torque Sensor System, Nitta Ltd., March 1993 (in Japanese).