로봇 매니퓰레이터의 퍼지 강성 제어

강상태*, 지종환*, 홍석교**
*아주대학원 제어계측 공학과, **아주대학교 전자공학부

Fuzzy stiffness control of Robot manipulator

*S. T. Kang, *J. H. Ji, **S. K. Hong.
*Dept. of Control & Instrumentation Eng. Ajou Univ. **School of Electronics Eng. Ajou Univ.

Abstract - We present a fuzzy model for a robot manipulator and use the model to decide the PD gains of a stiffness controller. Force control applications are extremely difficult to accomplish with such a stiffness robot because robot itself, unknown environment. So we identify a fuzzy model by using Hough transform. We present a method of design of the PD gains of the stiffness controller. We aim at controlling the end-effecor force in the face of uncertainty on the surface stiffness. simulation results verify the effectiveness of the proposed strategy.

1. 서 론

현대 산업사회, 특히 공장 자동화분야에 있어서 생산 자동화에 의한 생산성을 놀라운 향상뿐만 아니라 인간이 하기에는 위험이 따르는 일이나 높은 정밀도를 요구하는 일, 지루한 작업들을 로봇이 대신함으로 인해 로봇의 역할은 날이 갈수록 커지고 있다. 로봇 매니퓰레이터를 이용하여 작업 공간에서 원하는 궤적만을 추종할 경우에는 위치 제어기만으로도 제어가 가능했지만 점차 로봇 매니퓰레이터의 사용이 증가됨에 따라 다양한 환경과 접촉하게 되었다.[1] 이를 위하여 다양한 위치/힘 제어 이론들이 제시되었고, 이러한 연구 분야 중에 대표적인 것으로써 강성 제어,복합 임피던스 제어, 축소 상태 위치/힘 제어, 복합 위치/힘 제어등이 있다.[2][3][4]
복합 임피던스 제어는 힘과 속도 사이의 관계를 오옴의 법칙으로 표현한 것으로서 매니퓰레이터 임피던스는 환경을 모델화한이후에 결정되고 스텝 입력에 대한 정상 상태 오차를 영으로 하는 임피던스가 선택되어진다. 그리고 환경 임피던스와 매니퓰레이터 임피던스는 쌍대성 원리에 의해 선택되어진다.
축소-상태 위치/힘 제어는 McCla-mroch와 Wang[5]와 Kankaanranta와 Koivo[6]에 의해 이론적으로 공식화된 것으로 힘 제어에서 접하는 환경이 로봇 매니퓰레이터보다 훨씬 더 강인할 때 적용할 수 있지만 환경이 compliant할 경우에는 적용이 불가능하다는 단점을 가지고 있다.
강성 제어는 Salisbury와 Craig[8]에 의해 제안된 이론으로 환경을 하나의 스프링으로 모델화한 다음 동력학 식을 강성 상수를 이용하여 계산해서 원하는 힘을 추종하도록 제어하는 것이지만 원하는 힘이 상수일 경우에만 제어가 가능하다는 단점을 가지고 있다.[7][8] 그러나 하이브리드 위치/힘 제어기는 매니퓰레이터가 자유 공간에서 움직이고 있을 때, 엔드-이펙터의 위치와 힘이 궤적을 동시에 원하는 방향으로 추종하도록 하는 것으로써 표면과 접하는 위치와 표면에 작용하는 힘을 동시에 제어하는 것이다.
본 논문에서는 퍼지 모델링 방법에 의해 얻어지는 강성을 제어하는 힘 제어 방법을 제안한다. 먼저 Hough 변환으로 제안된 퍼지 동정 방법을 이용하는 환경 강성을 모델링하고 나서 강성 제어를 수행한다. 퍼지로 모델링된 강성를 이용한 제어 파라미터를 찾기 때문에 안정한 제어가 얻어질 수 있다.

2. 강성 제어기

강성 제어기는 로봇 매니퓰레이터가 접하는 환경을 하나의 스프링으로 모델화하여 다음과 같은 선형화된 식으로 표현한다.[7]

$$f = k_e(x - x_e) \tag{1}$$

여기서, x_e는 로봇 매니퓰레이터가 접하는 환경의 정해진 위치이고 k_e는 환경 강성으로서 양의 상수이다.

예를 들면, 하나의 자유도를 갖는 질량 m인 로봇 매니퓰레이터가 정해진 위치 x_e로 환경과 접촉한다고 가정할 때, 먼저 환경을 스프링 상수 k_e를 갖는 선형 스프링으로 모델화한다. 이때, 질량과 스프링으로 이루어진 하나의 자유도 시스템에서 중력 항과 마찰력 항을 무시한다면 이 시스템의 운동 방정식은

$$\tau = m\ddot{x} + k_e(x - x_e) \tag{2}$$

가 되고, 동력학 방정식은 PD제어 법칙을 이용하면 식(3)과 같다.

$$\tau = -k_v\dot{x} + k_p(x_d - x) \tag{3}$$

여기서, k_v, k_p는 양의 스칼라 제어 이득 상수이다.
식(2)와 식(3)을 정리하면,

$$m\ddot{x} + k_v\dot{x} + (k_p + k_e)x = k_p x_d + k_e x_e \tag{4}$$

$$\frac{1}{ms^2 + k_v s + (k_p + k_e)} \tag{5}$$

가 되고, 여기서 m, k_v, k_p, k_e는 양수이므로 페루프 시스템이 안정하기 위한 조건인 식(5)의 극이 복소평면의 왼쪽에 존재한다. 식(4)를 x에 관한 식으로 정리하고 라플라스 변환을 하면 다음과 같다.

$$x(s) = \frac{k_p x_d + k_e x_e}{s(ms^2 + k_v s + (k_p + k_e))} \tag{6}$$

정상 상태 위치는 최종치 정리를 사용하여 구하면,

$$\bar{x} = \lim_{s \to 0} x(s) = \frac{k_p x_d + k_e x_e}{k_p + k_e} \tag{7}$$

가 되고, 식(1)에 식(7)을 대입하면 다음과 같은 정상 상태의 힘이 구해진다.

$$\bar{f} = k_e(\bar{x} - x_e) = \frac{k_p k_e (x_d - x_e)}{k_p + k_e} \tag{8}$$

이때, k_e가 k_p보다 훨씬 큰 경우, 정상 상태의 힘은 $\bar{f} = k_p(x_d - x_e)$가 된다. 결국 원하는 위치에 의해 식(9)와 같이 위치 제어 이득의 영향을 받는 원하는 힘을 얻어서 제어한다.

$$f_d = k_p(x_d - x_e) \quad (9)$$

단, k_p는 양의 위치 제어 이득이다.

정상 상태 위치는 $\lim_{t\to\infty} x = x_d$를 만족하고 정상 상태 힘은 $\lim_{t\to\infty} f = k_p(x_d - x_e)$를 만족한다.

강성 제어기는 PD제어기 형태로서 다음과 같은 구조로 되어 있다.

$$\tau = J^T(q)(-K_v\dot{x} + K_p\tilde{x}) + G(q) + F(\dot{q}) \quad (10)$$

G(q)는 중력 행렬, $F(\dot{q}) = F_v(\dot{q}) + F_a$, F_v는 viscous 마찰, F_a는 dynamic friction, τ는 매니퓰레이터에 입력되는 힘, $J^T(q)$는 $J(q)$의 transpose, $J(q)$자코비안 행렬, $\tilde{x} = x_d - x$ 이다.

3. 퍼지 모델

퍼지 모델의 표현으로 Takagi-Sugeno에 의한 퍼지 모델을 사용한다. Takagi-Sugeno는 다음과 같이 퍼지 IF-THEN 법칙 사용을 제안했다.[10] :

$L^{(l)}$: IF x_1 is F_1^l and $\cdots$ and x_n is F_n^l,

THEN $y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + \cdots + C_n^l x_n$ (11)

여기서 F_i^l은 퍼지 집합, c_i는 실제 값 파라미터, y^l는 법칙 '$L(l)$에 대한 시스템 출력, 그리고 $l = 1, 2, \cdots, M$. 즉, IF 부분은 퍼지이고 THEN 부분은 보통 집합이다. 실제 값 입력 벡터 $\bar{x} = (x_1, \cdots, x_n)^T$을 위한 Takagi-Sugeno 퍼지 시스템의 출력 $y(\bar{x})$은 y^l의 가중치 평균 :

$$y(\bar{x}) = \frac{\sum_{l=1}^{M} w^l y^l}{\sum_{l=0}^{M} w^l} \quad (12)$$

가중치 w^l은 입력 법칙 $L^{(l)}$ 논리의 전체적인 참 값을 의미하고 다음과 같이 계산되어진다.

$$w^l = \prod_{i=1}^{n} u_{F_i^l}(x_i) \quad (13)$$

Takagi-Sugeno 퍼지 로직 시스템의 장점은 단순한 시스템 방정식(12)을 제공하고 파라미터 추정과 순차 결정 방법은 파라미터 c_i^l과 순차 M를 추정하는데 도움이되어질 수 있고 제어규칙의 전건부에만 언어표현이 나타나므로, 합성 추론법에 사용되는 제어규칙보다는 이해하기 어려우나, 제어규칙의 기술능력은 우수하다.만약 x_1을 편차, x_2를 편차 변화라하면 제어규칙수가 1개로서 biased PD 제어기와 유사한 형태를 가진다.그렇지만 Taka-gi-Sugeno 퍼지 로직 시스템의 단점은 THEN 부분이 퍼지가 아니라는 것이다. 그러므로 결과 파라미터들은 선형 방정식들의 집합을 찾는데 사용되어지고 선형 방정식들의 초기 값들을 고정시키는 것을 불필요하게 만드는데 사용되어지는 Hough 변환에 의해 확인 되어진다.

3.1 Hough 변환

Hough 변환은 이미지 프로세싱 방법이고 입출력 데이터의 관계를 몇 개의 조각 선형 방정식으로 나눈다.[11] 일단 입력이 나누어지면, 각기 영역은 퍼지 모델과 퍼지 법칙을 만들 수 있다. Hough 변환은 단일 입력과 단일 출력을 가질 때 시스템의 입출력은 2 차원 평면으로 맵핑할 수 있다. 그래서 Hough 변환 방법은 똑바른 직선 부분을 찾는데 사용되어지고 퍼지 모델의 파라미터들을 확인할 수 있다. 비록 Hough 변환이 2 차원 평면 데이터에 사용되어지지만 형식 $g(x, c) = 0$은 x가 직교 좌표계의 벡터이고 c는 계수 벡터이다. 그래서 어떠한 함수에 적용할 수 있다. Hough 변환 방법은 다 입력과 다 출력의 경우에도 사용되어질 수 있다.

3.2 Identification.

이 논문에서는 모든 소속 함수는 다음과 같이 가우시안 함수으로 표현되어질 수 있다.

$$A_i(Z_i, S_i, X) = \exp[(-((X - Z_i)/S_i)^2)] \quad (14)$$

z_i는 i번째 cluster의 중앙이고, S_i는 cluster의 표준 편차이다.

3.3 Gradient Descent 알고리즘[12]

정 리 1.

L^l : if x_1 is $A_1^i(p_{11}^i, p_{12}^i)$ and x_2 $y^i = a_0^i + a_1^i x^i + \cdots + a_m^i x_m$ is $A_2^i(p_{21}^i, p_{22}^i), \cdots, x_m$, then

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^{n} w^i y^i}{\sum_{i=0}^{n} w^i}, \text{ where } w^i = \prod_{j=1}^{m} A_j^i(x_j^0) \quad (15)$$

p_{jk}^i는 i번째 법칙에서 j번째 부분의 언어 변수를 반드는 k번째 변수이다.

$$\Delta p_{jk}^i = \gamma(y_{des} - y^*)(y - y^*)\frac{1}{\sum_{i=0}^{m}} \frac{\partial w^i}{\partial p_{jk}^i} \quad (16)$$

γ는 학습률, y_{des}는 원하는 출력, y^*는 퍼지 모델로부터 얻어지는 출력.

정 리 2.

결과 파라미터는 다음과 같은 학습방법에 의해 나타낼 수 있다.

$$\Delta a_j^i = \gamma(y_{des} - y^*)\frac{1}{\sum_{i=0}^{m}} w^i x_j \quad (17)$$

γ는 학습률, y_{des}는 원하는 출력, y^*는 퍼지 모델로부터 얻어지는 출력.

4. 퍼지 모델을 이용한 힘 제어기 설계

퍼지 모델을 이용하여 기본 2차 PD 제어기를 가지고 비교하므로서 제어기를 설계할 수 있다. 여기서의 P는 주어진 작업의 경로를 나타낸다. PD 제어 법칙 방정식은 (19)식에 나타나고 중력 항과 마찰력을 포함한 제어 법칙 방정식은 (18)식에 나타난다.

$$\tau = M\ddot{x} + G + K_E(P)(x - x_e) + F \quad (18)$$

$$\tau = -K_D\dot{x} + K_P(x_d - x) \quad (19)$$

여기서 K_D와 K_F는 경로에 따라서 변화하는 PD 이득이다. G는 중력, F는 마찰력을 나타내고 M는 관성력을 나타낸다. 우리는 (18)과 (19)식을 풀면,

$$M\ddot{x} + K_D(P)\dot{x} + (K_P(P) + K_E(P))x = K_P(P)x_d + K_E(P)x_e - G - F \quad (20)$$

여기서 $K_D(P)$와 $K_P(P)$는 경로 F의 어느 지점에서도 상수이다. (20)식을 라플라스 변환하면 다음과 같은 식이된다.

$$[Ms^2+K_D(P)s+(K_P(P)+K_E(P))]X(s) = K_E(P)X_E(s)+K_P(P)X_d-\frac{(G-F)}{s} \quad (21)$$

그럼므로, (21)식의 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$T(s)=\frac{1}{[Ms^2+K_D(P)s+(K_E(P)+K_P(P))]} \quad (22)$$

그림 1에서는 $K_D(P)$, $K_P(P)$, $K_E(P)$, M은 양의 상수이므로 폐루프 시스템이 안정하다.

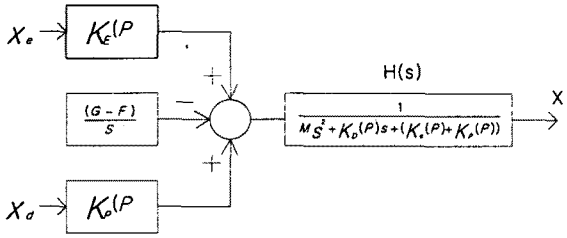

그림 1. 시스템 블록도

(22)식에서 주어진 M은 접촉 작업과 힘제어를 수행하기 때문에 상수로 간주할 수 있다. 우리는 전형적인 2차 제어기와 비교하므로서 설계할 수 있다.

$$H(s)=\frac{w_n^2}{s^2+2\zeta w_n s+w_n^2} \quad (23)$$

여기서 우리는 오우버슈트와 세트링 시간에 관하여 (22),(23)식을 비교하여 ζ와 w_n를 비교하여 필요한 P와 D의 이득을 계산할 수 있다.

$$K_P(P) = Mw_n^2 - K_E(P) \quad (24)$$

$$K_D(P) = M\times 2\zeta w_n \quad (25)$$

5. 모의 실험

그림 2는 2 자유도를 가진 매니퓰레이터의 제시한 제어기의 타당성을 검증하기 위하여 제어 대상의 모델에 대한 시뮬레이션을 보이고 있으며 제어 대상은 C-언어로 작성하였고 제시한 제어기는 matlab으로 시뮬레이션 하였다. 모의 실험에서는 수직 평면을 일정한 토크 7(N-m)으로 600mm인 평면을 따라서 내려오는 실험임을 보인다.

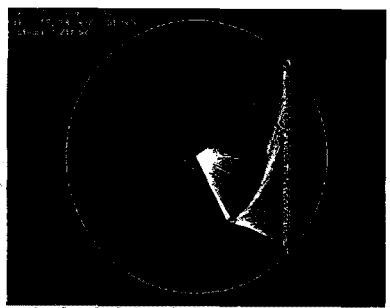

그림 2 수직 평면을 접하는 2자유도 매니퓰레이터

모의 실험에서는 강성 제어기와 퍼지 제어기를 이용하여 수직 평면을 일정한 토크를 가지고 움직이는 모의 실험을 통해 퍼지 제어기의 유용성을 보인다.
그림 3은 강성 제어기의 시뮬레이션 결과를 보이고 그림 4는 퍼지 제어기의 시뮬레이션 결과를 보인다. 일정한 토크 7(N-m)에 빠른 시간내에 도달하는 것은 퍼지 제어기임을 보이고 정착 시간과 정상 상태 오차에서 더 안정함을 보이고 있다.

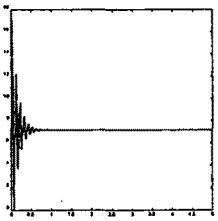

그림 3.

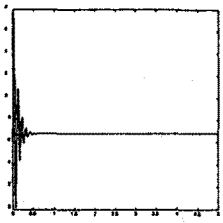

그림 4.

6. 결과 및 향후 연구방향

퍼지 제어기는 모든 실험된 조건들에서 PD제어기나 강성 제어기보다 더 우수함을 보였다. 더욱이, 퍼지 소속 함수 집합은 로봇의 다른 링크를 제어하고 운영하는데 발생하는 토크 변화를 충분히 대응할 수 있다. 이것은 퍼지 제어기가 강인하고 어떤 실제적인 실험을 하는데에 많은 미지의 요소를 적응할 수 있다는 것을 시뮬레이션으로 검증하였다.

차후의 연구 연구로서는 실제 매니퓰레이터에 적용하여 제시한 퍼지 제어기의 유용성을 실험통한 검증 및 연구가 필요하다고 생각된다.

[참 고 문 헌]

[1] S. D. Eppinger, W. P seering, " Introduction to Dynamic Models for Robot Force Control", IEEE Control system Magazine, 1987

[2] M. Ohto, H.Mayeda, " A Hybrid Position/Force Control for Robot Manipulators with Position Controllers", IECON, 1991

[3] T. Yoshikawa, "Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force", IEEE. J. of Robotics and Auto.,Vol Ra3, No. 5, 1987

[4] D. E. Whitney, "Historicsl Perspective and State of The Art in Robot Force Control", Int. J. of Robotics Research, Vol. 6, No. 1, Spring 1987

[5] McClamroch, N., and D. Wang, "Feedback stabilization and tracking of constrained robots", IEEE Trans. Autom. Control, vol. 33, no. 5, pp 419-426, May 1988

[6] Kankaanranta, R., and H. Koivo,"Dynamics and simulation of compliant motion of a manipulator", IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 4, pp. 163-173, Apr. 1988

[7] F. L. Lewis, C. T. Abdalliah, D. M. Dawson, " Control of Robot Manipulator", Macmillan. 1993

[8] Salisbury, J., and J. Craig, " Active stiffness control of manipulator in Cartesian coordinates",Proc. 19th IEEE Conf. Decision Control, Dec.1980

[9] Y. Tsukamoto, "An approach to fuzzy reasoning method" in Advances in Fuzzy Set Theory and Application, M. M.Gupta, R. K.Ragade, and R. R. Yager, Eds., Amsterdam : North-Holland, 1979

[10] Takagi, T. and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern., SMC-15(1) 116-132, 1985

[11] Robert M. Haralick and Linda G. Shapiro " Computer and Robot Vision" Vol 1, p 578-588, 1992

[12] Moon Ju Kim, Cheol Kwon, Min Kee Park, Mignon Park " A Stiffness Control of a Manipulator Using a Fuzzy Model" IEEE p 322-327 1995