

두 협동로봇을 위한 동력학 Hybrid 위치/힘 제어기

이 남구 김 중수 박 중국
경희대학교 공과대학 전자공학과

Dynamic hybrid position/force controller for two cooperating robots

Lee, Nam Gu Kim, Chong Soo Park, Chong Kug
Department of Electronic Engineering
Kyung Hee University

Abstract

In this paper, we propose dynamic hybrid control method which takes the manipulator dynamics into consideration and extend to two cooperating robots. The first step is the linearization of the manipulator dynamics and the second step is the design of position/force controllers for the linearized model which takes account of both the command response and the robustness of the controllers to modeling errors and disturbance. we also consider load sharing for each robot.

1. 서 론

로봇 매니플레이터의 정확한 제어를 위해서는 위치제어뿐만 아니라 힘제어를 동시에 해야 한다. 즉, 위치제어만을 할 경우 위치오차로 인해 말단효과장치가 물체에 도달하지 못하거나 물체와 말단효과장치에 과도한 힘이 발생하는 경우가 생길 수 있으므로 위치와 힘의 동시제어가 필요하게 된다. 매니플레이터의 힘 제어에 대한 방법들이 많이 연구되어 왔다[4]-[6]. 특정 방향으로는 말단효과장치의 위치가 제어되어지고 다른 방향으로는 힘이 제어되어지는 경우를 다루는 제어방법으로 Raibert와 Craig가 Hybrid 제어방법을 제안했다[1]-[2]. 그러나 이 제어방법에서는 매니플레이터의 동력학이 고려되지 않았다.

하나의 로봇으로 할 수 없는 작업과 조립작업, 작업실행시간, 에너지 소모, 정밀성등의 문제로 인해 다중로봇의 사용이 불가피한 경우가 생긴다. 두 협동로봇에 대한 제어방법중 대표적인 것이 master/slave 방법이지만

이 방법에서는 부하분할에 대한 고려가 없었다. 두 대 이상의 협동로봇이 동일물체를 잡고 이동작업을 할 경우 작업의 형태나 각 로봇의 성능등을 고려하여 각각의 로봇에 대해 적절한 부하분할을 해주어야 한다.

본 논문에서는 매니플레이터의 동력학 방정식과 말단효과장치의 제한조건에 기초한 Hybrid 위치/힘 제어방법을 제안했으며, 두 협동로봇에 적용하여 각각의 로봇에 대한 부하분할을 고려하였다. 첫번째 단계는 매니플레이터 동력학의 선형화이고 두번째 단계는 선형화된 모델을 위한 입력응답 개선과 모델오차 및 외란에의 강건성을 모두 고려한 위치와 힘 제어기설계이다[7]. 부하분할은 2차 손실함수를 최소화하도록 하는 값으로 결정된다. 모의실험에서는 동력학을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 결과를 비교하며 위치와 힘이 동시에 수렴함을 보임으로써 제안된 방법의 유용성을 입증한다.

2. 동력학 Hybrid 제어의 정식화

A. 말단효과장치의 제약조건

매니플레이터의 힘 제어를 연구하기 위해서는 말단효과장치의 제약조건을 정식화할 필요가 있다. 말단효과장치의 위치를 6차원 벡터 $r \in R^6$ 로 표시하면 주어진 말단효과장치의 제약조건은 m 개의 hypersurface의 집합으로 표시할 수 있다.

$$P_i(r) = 0, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

이 조건들은 R^6 의 부분공간 S 에서 서로 독립적이다.

$P_i(r)$ 은 r 에 대해 2번 미분이 가능하다고 가정한다. 식

(1)을 시간에 대해서 미분하면

$$E_F \dot{r} = 0 \quad (2)$$

이고 “ \cdot ”는 시간 미분을 나타낸다.

$$E_F = [e_{7-m}, e_{8-m}, \dots, e_m]^T \quad (3)$$

$$e_{6-m+i} = \frac{\partial P_i(r)}{\partial r} / \parallel \frac{\partial P_i(r)}{\partial r} \parallel \quad (4)$$

식 (1)의 독립성 가정으로 인해 E_F 는 m 차원을 갖는다.

식 (2)를 한번 더 미분하면 다음식을 얻는다.

$$E_F \ddot{r} + a_{rF} = 0 \quad (5)$$

$$a_{rF} = \dot{E}_F \dot{r} \quad (6)$$

$e_i (i=1, 2, \dots, m)$ 가 단위 길이이고, r 에 대해 미분가능하고, 서로 독립적이 되도록 벡터 $\{e_1, \dots, e_{6-m}\}$ 를 선택한다. 원점이 말단효과장치의 위치 r 에 있고 단위 벡터 $\{e_1, \dots, e_6\}$ 를 갖는 좌표 시스템을 제한계라고 한다. 말단효과장치의 속도 \dot{r} 과 가속도 \ddot{r} 를 제한계에서 표시하면

$$\dot{E}_r = \begin{bmatrix} E_F \dot{r} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\ddot{E}_r = \begin{bmatrix} E_F \ddot{r} \\ -a_{rF} \end{bmatrix} \quad (8)$$

처럼 표시되고 여기서, $E = [e_1, \dots, e_6]^T$, $E_F = [e_1, \dots, e_{6-m}]^T$ 이다.

식 (7)과 (8)은 말단효과장치의 제한표면으로의 속도 수직성분은 zero이며 제한표면으로의 가속도 수직성분은 \dot{r} 에 의해서만 결정된다는 사실을 나타낸다. 말단효과장치의 속도 \dot{r} 은 기준계의 축방향으로의 전이속도와 축에 대한 회전속도로 구성되어지는 6차원 벡터 v 로 표현될 수도 있다[3].

\dot{r} 과 v 의 관계식은

$$v = T \dot{r} \quad (9)$$

로 주어지며, T 는 변환 행렬을 나타낸다.

B. 제약조건에서의 매니플레이터의 운동

N 자유도를 갖는 매니플레이터에서 관절변수를 $q \in R^n (n \geq 6)$ 으로 표시하면 말단효과장치의 위치 r 과 관절벡터 q 와

의 관계는

$$r = c(q) \quad (10)$$

으로 주어지고

$$\dot{r} = J \dot{q}, \quad J = dc(q)/dq \quad (11)$$

$$\ddot{r} = J \ddot{q} + a_q, \quad a_q = \dot{J} \dot{q} \quad (12)$$

으로 나타내어진다. 매니플레이터의 동력학은 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$M(q) \ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (13)$$

여기서, $M(q)$ 는 관성행렬, $H(q, \dot{q})$ 는 코리올리스 및 원심력, $G(q)$ 는 중력, τ 는 관절구동 토크를 나타낸다. 관절의 운동(즉, \dot{q})과 제한된 힘은 관절구동 토크 τ_C 가 제한 조건(1)하에서 상태 (q, \dot{q}) 의 매니플레이터에 인가되어 질때 얻을 수 있다. 말단효과장치에 의해 표면에 가해진 힘 $f \in R^6$ 은 표면에 수직인 성분만으로 이루어지는 기준계에서 표현된다.

따라서, 식 (2)와 (9)로부터

$$f = \hat{E}_F^T f_F \quad (14)$$

$$\hat{E}_F = E_F^T{}^{-1} \quad (15)$$

이고, $f_F \in R^m$ 은 미지의 벡터이다. f 에 의해 발생하는 관절힘 τ_F 는 다음 식처럼 구해진다.

$$\tau_F = (TJ)^T f = J^T E_F^T f_F \quad (16)$$

$-\tau_F$ 와 τ_C 가 각 관절에 가해지므로 $\tau = \tau_C - \tau_F$ 을 식 (13)에 대입하면

$$M(q) \ddot{q} + J^T E_F^T f_F = \tau_C - \{H(q, \dot{q}) + G(q)\} = b_1 \quad (17)$$

이고, 식 (5)와 (12)로부터

$$E_F J \ddot{q} = -E_F a_q - a_{rF} = b_2 \quad (18)$$

식(17)과 (18)로부터 다음의 결과식을 얻는다.

$$\ddot{q} = M^{-1} \{b_1 + (E_F J)^T K (b_2 - E_F J M^{-1} b_1)\} \quad (19)$$

$$f_F = K (b_2 - E_F J M^{-1} b_1) \quad (20)$$

여기서,

$$K = (E_F J M^{-1} J^T E_F^T)^{-1} \quad (21)$$

C. 상태궤환에 의한 선형화

관절 구동 토크 τ_C 가 다음처럼 상태궤환 제어법칙에 의해 주어진다고 가정한다.

$$\tau_C = \tau_P + \tau_F \quad (22)$$

$$\tau_P = M\ddot{q}_d + H(q, \dot{q}) + G(q) \quad (23)$$

$$\tau_F = J^T E_F^T u_2 \quad (24)$$

$$\ddot{q}_d = J^{-1} (E^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ -a_{rF} \end{bmatrix} - a_q) \quad (25)$$

따라서, 페루프 시스템의 동력학은 다음의 선형법칙에 의해 주어진다.

$$\ddot{r}_{EP} = E_P \ddot{r} = u_1 \quad (26)$$

$$f_F = u_2 \quad (27)$$

윗 결과로부터 원하는 힘계측은 u_2 에 의해 결정되고 원하는 위치계측은 u_1 에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

식 (1)과 (13)이 정확하다면, 단순한 개루프 시스템으로 원하는 힘과 위치를 실현시킬 수 있다. 그러나 모델링 오차와 예측치 못하는 외란등으로 인해 이 시스템의 실제 응답은 원하는 값에서 벗어날 수도 있다. 이런 문제점에 대처하기 위해서 보상기를 설계한다.

3. 제어기 설계

A. 2자유도 제어 시스템

보상기는 그림.1의 2자유도 제어시스템으로 구성하였다. 이 시스템 구조의 장점은 입력응답을 개선하고 모델링 오차 및 미지의 외란에 대한 강건성을 독립적으로 만족시킨다는 점이다. 그림에서 G_P 는 제어되는 물체의 전달함수이고 G_M 과 C 는 설계되어지는 보상기이다. r 에서 y 로의 전달함수는 C 의 선택과는 무관하기 때문에 제어 시스템의 입력응답은 G_M 에 의해서만 결정된다. 반대로 C 의 역할은 모델링 오차와 외란에 대처하는 강건성을 보장한다.

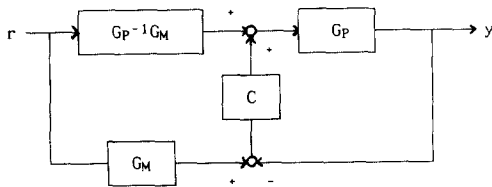


그림.1 2자유도 제어 시스템

B. 제어기 설계

정상상태 오차를 줄이기 위해 위치와 힘제어 시스템을

위한 C_M 과 C 의 값들은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$C_P = (a_1 + a_2 s + a_0 s^{-1}) I \quad (\text{position}) \quad (31)$$

$$C_F = b_0 / (s(s+b_1)) I \quad (\text{force}) \quad (32)$$

$$G_{MP} = (w_N^2 / (s^2 + 2\zeta w_N s + w_N^2)) I \quad (\text{position}) \quad (33)$$

$$G_{MF} = (1 / (T's + 1)) I \quad (\text{force}) \quad (34)$$

여기서, 파라미터 a_0 - a_1 , b_0 , b_1 , w_N , T' 와 ζ 는 모델 정확성, 외란과 입력신호의 주파수 특성등을 고려하여 결정한다.

4. 부하분할

다중 로봇트가 단일 물체를 잡고 이동할 때 로봇트의 성능이나 작업형태에 따라 각 로봇트간의 적절한 힘 분할이 필요하다. 본 논문에서는 두 로봇트에 대해 2차 손실함수를 최소화함으로써 부하분할을 결정한다.

2차 손실함수는 가중치 행렬 W 와 힘벡터로 이루어진다.

$$Q = F^T W F \quad (35)$$

여기서, $F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}$, $W = \text{Diag}(W_1, W_2)$ (36)

이며, $F_c = \sum F_i$ 라면 다음처럼 표현할 수 있다.

$$[I \quad I] \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = F_c \longrightarrow HF = F_c \quad (37)$$

Lagrange multiplier λ 를 도입하면

$$Q = F^T W F - \lambda^T (HF - F_c) \quad (38)$$

이고 $\partial Q / \partial F = 0$ 로부터 다음식을 얻는다.

$$2F^T W - \lambda^T H = 0 \quad (39)$$

식(37)과 식(39)에서 $F_c = (1/2) H W^{-1} H^T \lambda$ 이므로

$$\lambda = 2(H W^{-1} H^T)^{-1} F_c \quad (40)$$

이다. 식(40)을 식(39)에 대입하면 2차 손실함수 Q 를 최소화 하는 $F = W^{-1} H^T (H W^{-1} H^T)^{-1} F_c = A F_c$ 로 주어진다.

즉, W 행렬을 적절히 선택함으로써 원하는 부하분할을 할 수 있다.

4. 모의실험 및 고찰

본 논문의 유용성을 알아보기 위해서 2-링크 매니플레이터를 갖는 동일한 두 대의 협동로봇트에 대해 모의실험을 하였다. 사용된 수치값들은 PUMA 560의 2,3번째 링크값이

며 다음과 같다.

1) 링크의 길이

$$L1 = L2 = 0.432M$$

2) 링크의 질량

$$M1 = 15.91Kg$$

$$M2 = 11.36Kg$$

결과에서 알 수 있듯이 물체의 위치와, 물체와 팔단효과 장치사이의 힘이 동시에 원하는 값에 수렴하지만 동력학을 고려하지 않은 경우의 위치(그림.2)와 힘(그림.3,4)이 동력학을 고려할때의 위치(그림.5)와 힘(그림.6,7)보다 결과가 정확하지 않음을 알 수 있다. 그림.3, 그림.4, 그림.6, 그림.7은 각 로봇트의 부하분할된 힘값을 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 두 협동로봇트를 위한 동력학 Hybrid 위치/힘 제어기 설계에 대한 방법과 각 로봇트의 성능 및 작업형태에 따르는 적절한 부하분할 과정도 다루었다. 설계 방법은 두 단계로 나누어진다. 첫번째 단계는 매니퓰레이터 동력학의 선형화이고 두번째 단계는 선형화된 모델을 위한 입력응답 개선과 모델오차 및 외란에 강건한 Hybrid 위치/힘 제어기 설계이다. 다중 로봇트의 동일물체 이동작업시 요구되는 부하분할은 가중치 행렬 W 와 힘 벡터로 이루어지는 2차 손실함수를 최소화하는 값으로 결정된다.

본 논문의 유용성은 모의실험 결과를 통해 입증하였다.

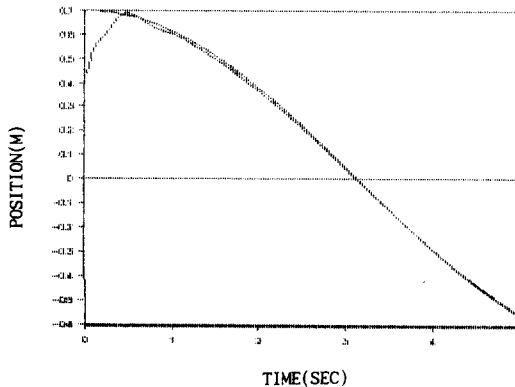


그림.2 동력학을 고려하지 않을 경우의 위치응답

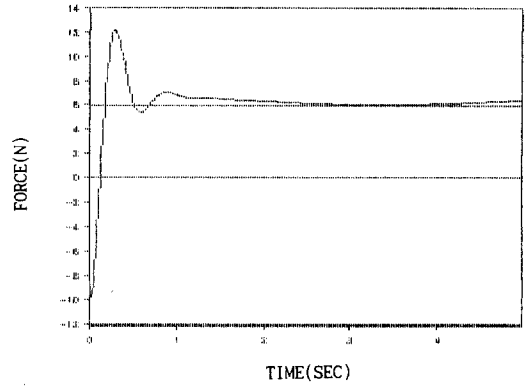


그림.3 동력학을 고려하지 않을 경우의 힘응답(로봇트 1)

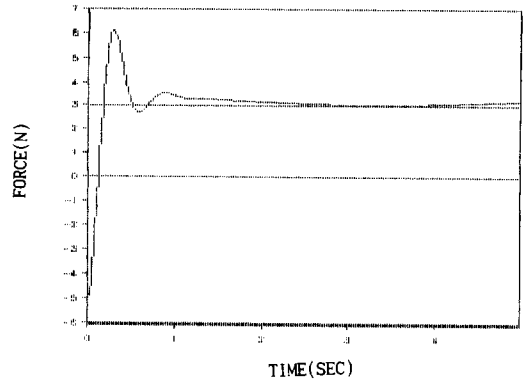


그림.4 동력학을 고려하지 않을 경우의 힘응답(로봇트 2)

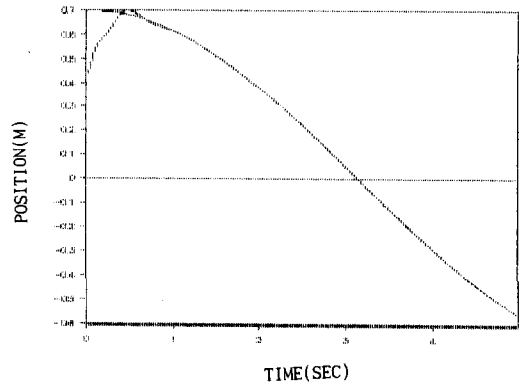


그림.5 동력학을 고려했을 경우의 위치응답

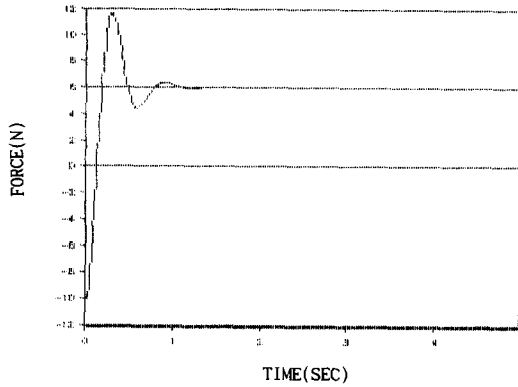


그림. 6 동력학을 고려했을 경우의 힘응답(로봇 1)

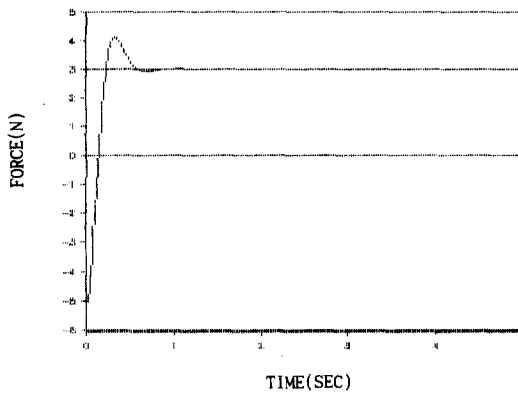


그림. 7 동력학을 고려했을 경우의 힘응답(로봇 2)

참고 문헌

- [1] John J. Craig, "Robotics", pp. 223-280, Addison Wesley Publishing Company, 1987.
- [2] M. H. Raibert, and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", Transaction of the ASME, Vol. 102, June 1981.
- [3] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee, "Robotics", McGraw-Hill International Editions, 1987.
- [4] Yoram Koren, "Robotics for Engineers", McGraw-Hill International Edition, 1987.
- [5] Whitney, D. E., "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control", Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 262-268, St. Louis.
- [6] M. T. Mason, "Compliance and Force for Computer controlled manipulator", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-11, pp. 418-432, June 1981.
- [7] T. Sugie and T. Yoshikawa, "General Solution of Robust Tracking Problem in Two-Degree-of-Freedom Control System", IEEE Trans. on Automatic Control, vol. AC-31-6, pp. 552-554, June 1986.