

적용 물체 추정용 이용한 로봇트 매니플레이터의 Force Control

이 길 한 * : 한 알 대
 정 용 칠 : 한 알 대
 알 해 원 : 한 알 대

Force Control with Adaptive Load Estimation of Robot Manipulator

1. 서 론

실제 산업현장에서는 한개의 로봇트가 무게가 다른 물체를 이동시키는 경우가 많다. 현재까지 고전적인 RMFC(Resolved Motion Force Control)방법으로는 이러한 작업을 수행하기에는 적절하지 못하였다. 본 논문에서는 적응 알고리즘을 이용하여 물체의 무게를 추정하며, 그에 실용한 적절한 힘을 매니플레이터에 가하는 새로운 방법을 제안하였으며, 위치오차를 줄이기 위한 위치제어 부분, 마지막 링크와 물체의 무게만을 고려하여 따른 오차와 마찰력, 중력등에 따라 발생하는 영향을 자동적으로 보상해주는 FCC(Force Convergent Control)부분, 그리고 물체의 무게를 알지 못하거나 그 무게가 변할 경우에 그 값을 추정하는 적응 알고리즘부분으로 구성된다.

특히 관절제어대신에 공간좌표에서의 위치와 힘을 제어하므로 Jacobian 전치행렬을 사용하여 계산량의 부담없이 6자유도 이상의 매니플레이터에도 적용이 가능하다. 또 적응 알고리즘은 동적방정식(dynamic equation)을 필요로 하는데 추정할 물체의 무게에 관련된 수식만을 선정하여 계산하므로 복잡한 수식에 대한 계산도 줄일 수 있다.

2. Resolved Motion Force Control

RMFC의 기본개념은 마지막 링크와 물체에만 무게가 있다고 가정된 이상적인 매니플레이터를 공간좌표에서 제어하기 위하여 기해준 관절모모를 구하는 것이다. 그런데 실제로 있어서는 매니플레이터의 나머지 링크에도 무게가 존재하는데, 이로 인해 발생하는 오차를 줄이기 위하여 FCC를 도입한다.

2-1. RMFC의 공간좌표 위치제어

n개의 링크로 구성된 매니플레이터의 마지막 링크의 위치(position)와 자세(orientation)는 변형행렬 T_n 으로 나타낼 수 있는데[1], 이 T_n 은 시간의 함수로 표현할 수 있다. 이와 같이 시간의 함수로 세워진 원하는 위치와 자세로부터 원하는 속도와 가속도를 구할 수 있다[2]. 원하는 공간좌표위치 T_{nd} 와 실제의 공간좌표위치 T_{ne} 로부터 공간좌표위치와 자세오차를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_e = x_d - x_a = [d_x \ d_y \ d_z \ \delta_x \ \delta_y \ \delta_z]^T \quad (1)$$

또, 원하는 공간좌표속도 $\dot{x}_d = [v_{dx} \ v_{dy} \ v_{dz} \ \omega_{dx} \ \omega_{dy} \ \omega_{dz}]^T$ 와 실제의 공간좌표속도 \dot{x}_a 로부터 공간좌표속도오차 \dot{x}_e 는 다음과 같이 된다.

$$\dot{x}_e = \dot{x}_d - \dot{x}_a \quad (2)$$

여기서 $\dot{x}_a = J\dot{q}_a$ 인데 \dot{q}_a 는 $n \times 1$ 인 실제의 관절속도이고 joint tachometer로 측정되며, J 는 $6 \times n$ Jacobian matrix이다. 원하는 공간좌표가속도는 다음과 같다.

$$\ddot{x}_d(t) = [\dot{x}_d(t+\Delta t) - \dot{x}_d(t)] / \Delta t \quad (3)$$

그림 1에서 실제의 공간좌표가속도 \ddot{x}_a 는 다음과 같다.

$$\ddot{x}_a(t) = k_v \dot{x}_e(t) + k_p x_e(t) + \ddot{x}_d(t) \quad (4)$$

여기서 k_v 와 k_p 는 속도와 위치이득이며 양의 상수이다. (1)식과 (4)식으로부터 다음 식을 얻는다.

$$\ddot{x}_e(t) + k_v \dot{x}_e(t) + k_p x_e(t) = 0 \quad (5)$$

그러므로 (5)식의 특성근이 음의 실수부를 갖도록 k_v 와 k_p 를 선택하면 $x_a(t)$ 가 $x_d(t)$ 로 수렴하게 된다.

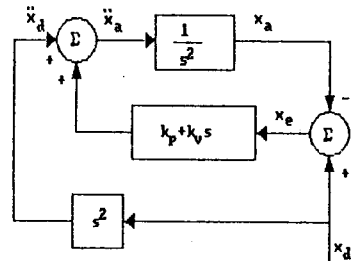


그림 1. 위치 루우프

위의 시어보 시스템에 기초를 두고 원하는 공간좌표 힘과 모멘트를 구하면 다음과 같다.

$$F_d(t) = M\ddot{x}_d(t) \quad (6)$$

$F_d(t) = [f_x \ f_y \ f_z \ m_x \ m_y \ m_z]^T$ 이고 M 은 다음과 같다.

$$M = \begin{bmatrix} m_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, m_x 는 물체와 마지막 링크의 무게이고 I_x, I_y, I_z 는 물체의 중심축의 관성모멘트이다. 본 논문에서는

물체와 마지막 링크의 축이 일치되어 있는 것으로 가정한다. (6)식과 같은 원하는 공간좌표힘을 다음과 같이 $n \times 1$ 관절모모크로 바꾸어 주어 매니플레이터에 가하게 된다.

$$T = J^T F_d \quad (8)$$

그런데 실제 매니플레이터의 링크는 무거가 존재하므로 마지막 링크와 물체의 무게만을 고려해줌에 따른 오차를 보상하기 위하여 FCC를 도입한다.

2-2. Force Convergent Control

FCC는 특정한 공간좌표힘 F_0 가 원하는 힘 F_d 로 수렴하도록 하는 가해집 공간좌표힘 F_a 를 구하는 방법으로서 Robbins Monroe stochastic 정리를 채택하였다. 여기서 F_0 는 multi-element strain gauge force wrist sensor로 측정된다. 매니플레이터에 가해 집 새로운 공간좌표힘은 다음식에 의해 계산되어진다.

$$F_a(k+1) = F_a(k) + \frac{F_0 - F_a(k)}{k+1} \quad (9)$$

지금까지는 M 의 값이 불변이고 알고 있을 경우에만 RMFC를 적용하였다. 그러나 M 의 값이 변하거나 알고 있지 못할 경우가 있어서는 다른 오차가 발생된다. 여기서 적응알고리즘을 도입함으로써 M 의 값을 추정하여 위치오차와 힘오차를 개선시킬 수 있게된다.

3. 적응 알고리즘

시스템의 매개변수값의 부정확으로 인한 오차로부터 실제의 매개변수를 추정하면서 이들 오차를 보상하여 주는 알고리즘이며 동적발정식으로부터 관련식들을 유도하여본다. 수식을 간단히 하기 위하여 우선 관절좌표에서 이론을 다루고, 뒤에 간단한 conversion으로써 RMFC에 적용이 가능하도록 하였다.

3-1. 동적발정식

n 개의 링크로 구성된 매니플레이터의 동적발정식은 다음과 같다.

$$T = M(q)\ddot{q} + \theta(q, \dot{q}) \quad (10)$$

여기서, T 는 $n \times 1$ 인 관절모모크이고 q 는 $n \times 1$ 인 관절위치이다. $M(q)$ 는 $n \times n$ 인 매니플레이터의 질량 행렬이고, $\theta(q, \dot{q})$ 는 원심력, Coriolis힘, 중력, 마찰력등에 의하여 발생하는 모모크를 나타낸다.

매개변수의 정확한 값을 알고있지 못할 때 제한된 제어법칙은 다음과 같다.

$$T = \hat{M}(q)\ddot{q}_d + \hat{\theta}(q, \dot{q}) \quad (11)$$

여기서 $\hat{M}(q)$, $\hat{\theta}(q, \dot{q})$ 는 $M(q)$, $\theta(q, \dot{q})$ 의 추정값이고.

$$\ddot{q}_d = \ddot{q}_d + k_v \dot{E} + k_p E \quad (12)$$

$$E = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$$

$$E = q_d - q_a \quad (13)$$

이다. 매개변수의 값이 정확하고 외란이 없다면

$$\ddot{E} + k_v \dot{E} + k_p E = 0 \quad (14)$$

이 된다.

3-2. 오차 방정식

추정된 매개변수값과 실제의 값이 일치하지 않을 경우 오차방정식은 (10)식과 (11)식으로부터 다음과 같이 구하여진다.

$$\ddot{E} + k_v \dot{E} + k_p E = \hat{M}(q)^{-1} [M(q)\ddot{q} + \theta(q, \dot{q}) - \hat{M}(q)\ddot{q}_d - \hat{\theta}(q, \dot{q})] \quad (15)$$

여기서, $\hat{M}(q) = M(q) - \hat{M}(q)$, $\hat{\theta}(q, \dot{q}) = \theta(q, \dot{q}) - \hat{\theta}(q, \dot{q})$ 이다. 추정을 필요로하는 매개변수만을 취하기 위하여 (15)식을 다음과 같이 쓴다.

$$\ddot{E} + k_v \dot{E} + k_p E = \hat{M}^{-1}(q) M(q, \dot{q}; \dot{q}) \phi \quad (16)$$

마지 매개변수의 수가 r 이고 $D = [d_1, d_2, \dots, d_r]^T$ 로 정의 하면 $\phi = D - \hat{D}$ 는 $r \times 1$ 매개변수오차이고, $\hat{D} = [d_1, d_2, \dots, d_r]^T$ 는 매개변수 추정치이다.

3-3. 적응속

우선 매개변수 추정을 filtered 시어보 오차신호의 함수로 변환시킨다. filtered 시어보 오차는 다음과 같다.

$$E_f = \dot{E} + \alpha E \quad (17)$$

여기서, $\alpha = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, α_i 는 양의 실수이다. α_i 는 (17)식에 대한 전달함수가 strictly positive real(SPR)이 되도록 선택한다[8]. $x_1 = [e_1, \dot{e}_1]^T$, $x_2 = [e_2, \dot{e}_2]^T, \dots, x_n = [e_n, \dot{e}_n]^T$ 라 상태변수를 정하고 (17)식에 대한 상태방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + B\hat{M}^{-1}W\phi \\ E &= CX \end{aligned} \quad (18)$$

positive real lemma[4]에 의해 다음과 같은 $2n \times 2n$ positive definite matrix $P = \text{diag}(P_1, P_2, \dots, P_n)$, $Q = \text{diag}(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ 가 존재한다.

$$\begin{aligned} A^T P + PA &= -Q \\ PB &= C^T \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, Lyapunov정리를 이용하여 다음 함수를 정의할 수 있다.

$$V(X, \phi) = X^T P X + \phi^T \Gamma^{-1} \phi \quad (20)$$

만, $\Gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r)$, $\gamma_i > 0$ 이다. (20)식을 시간에 대해서 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V}(X, \phi) = -X^T Q X + 2\phi^T (\hat{M}^{-1} E_1 + \Gamma^{-1} \dot{\phi}) \quad (21)$$

원식에서, $\dot{\phi} = \Gamma \hat{M}^{-1} E_1$ 으로하면 $\dot{V}(X, \phi) = -X^T Q X$ 와 같이 된다. $\phi = 0$ 이므로 $\dot{\phi} = -\dot{\phi}$ 이다. 그러므로 적응속은 다음과 같다.

$$\dot{\phi} = \Gamma \hat{M}^{-1} E_1 \quad (22)$$

본 논문에서는 매개변수의 정확한 값은 모르지만 그 값의 범위는 안다고 가정한다. 그리고, 매개변수 오차의 수렴에 대해서는 설명을 생략한다[8]. 그림 2에 적응 알고리즘을 적용한 RMFC를 나타냈다. conversion부분은 공간좌표계를 관절좌표계로 바꾸어 주는 부분이다[5].

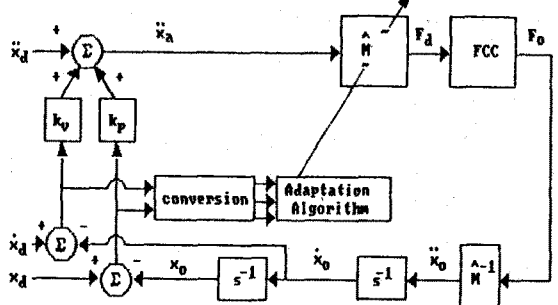


그림 2. 전체 제어 계통의 블록 선도

4. 시뮬레이션 및 결과

그림 3과 같이 2 자유도를 갖는 매니퓰레이터를 고려한다. 계산을 간단하게 하기 위하여 매니퓰레이터에 작용하는 마찰력과 점성이 없다고 가정한다. 물체의 무게가 변할 경우와 무게를 알지 못 할 경우, 그리고 물체의 무게가 불변이고 무게를 알고 있을 경우의 대한 각각의 임 수렴상태와 위치와 자세오차를 비교 제시한다. 위치 루우프의 sampling 시간을 5ms로 하고 FCC부분은 1ms로 한다.

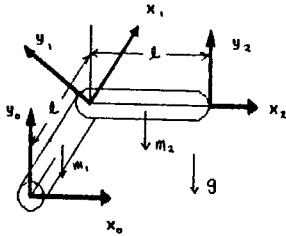


그림 8. 2링크 매니퓰레이터

5. 결론

이상으로서 종전의 RMFC방법에 적응 알고리즘을 이용하여 무게를 추정함으로써 매니퓰레이터의 작업 영역을 확장시켜 보았다. 동적방정식을 이용함으로써 발생하는 계산량은 물체의 무게에 연관되는 수식만을 사용할 수 있으므로 큰 부담이 없고, FCC에서 이용되는 stochastic방법으로 인한 초반에 발생하는 비교적 큰 오차를 어느정도 줄일 수 있다. 결과적으로 실제 산업현장에서 다양한 그리고 변화하는 작업대상에 폭 넓게 적용이 될 것이다.

6. 참고문헌

- 1) R.Paul, "Manipulator Cartesian Path Control," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-9, pp.702-716, Nov.1979
- 2) Chi-Haur Wu and R.Paul, "Resolved Motion Force Control of Robot Manipulator," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.SMC-12, No.3, pp.289-298, June.1982
- 3) J.J.Craig, P.Hau, and S.S.Sastry, "Adaptive Control of Mechanical Manipulators," Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp.190-195, 1986
- 4) G.Goodwin and K.S.Sin, "Adaptive Filtering, Prediction and Control," Prentice Hall, 1984
- 5) C.S.G.Lee and B.H.Lee, "Resolved Motion Adaptive Control for Mechanical Manipulators," Transactions of the ASME, Vol.106, pp.134-142, June.1984
- 6) R.Paul, "Modeling, Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm," Standard Artificial Intelligence Laboratory Memo AIM-77, Nov.1972