

적용 극점 배치에 의한 로보트 매니플레이터 제어

이승원 이종용 양태규 이상효
광운 대학 전자공학과

An Adaptive Pole-Placement Method for Robotic Manipulator Control

Seoung-Won Lee, Chong-Young Lee, Tae-Gyu Yang, Sang-Hyo Lee
Dept. of Electronics, Kwang Woon University

1. 서론

로보트 매니플레이터의 동특성은 각 관절간에 원심력, 마찰력, Coriolis력 등의 상호 결합을 갖고있는 비선형 방정식 이므로, 제어하기가 어렵고, 복잡하다. 특히 속도가 커지면 비선형항을 무시할 수 없음을 널리 알려져있다[1]. 과거 10여년동안, 매니플레이터에 대한 관절의 입력 토오크를 계산하기 위한 비선형 모델이 "Resolved rate control" [2], "Inverse problem technique" [3], "Resolved acceleration control" [4]에 사용되었으며, 이런 제어 방법은 계통의 매개 변수 변동과 부하 변동을 무시하였다.

특히 각 관절 입력 토오크는 순환형 Newton - Euler (RNE) 알고리즘의 개발에 의해 가장 효과적으로 계산된다[5]. 이 알고리즘은 CTM(Computed Torque Method), [6] RMAC (Resolved Motion Acceleration Control) [7] 등이 실현 가능한 것으로 보이나 순환형 알고리즘의 계산 시간이 많이 걸리며, 부하 변동과 모델링 오차등을 고려한 제어 방식이 필요하다. 또한 많은 비선형 보상 방식이 제안되었으나 실현이 복잡하다.

매니플레이터의 다른 제어 방식으로는 선형 계통 이론을 이용하는 선형화된 동특성 모델을 제안되었다. 이러한 방식은 매니플레이터의 전체 운동에 대한 적절한 선형화가 어렵고, 선형화와 비간섭(decoupling)에 의해 야기된 오차 보상은 계통을 복잡하게 만든다[1, 8].

위의 선형 계통 이론으로부터, 매니플레이터에 대한 여러 가지 적용 제어 방법이 필요하게 되었다. 이러한 적용 제어 방법은 크게 MRAC(Model reference adaptive control)과 STR(Self-tuning regulator)로 나눌 수 있다.

MRAC 방법은 Lyapunov 설계 기법과 Popov 초안정도 이론을 기초로한 것이다[9].

STR 방법은 이산 시간 모델과 추정 방법들을 기초로 하여 주어진 평가 함수를 만족하도록 제어기가 설계되었다. [10, 11]. 이러한 적용 제어 방법은 매니플레이터에 대한 정확한 동특성 모델을 필요로 하지 않으며, 부하 변동에 대해서도 잘 적용되었다.

본 논문에서는 원하는 경로에 대해서 극점 배치 자기 동조 제어 이론에 관부 편차를 제거하기 위한 항을 도입 하는 제어기를 제안하였다. 그리고 제어기의 제어값을 최적으로하기 위해 원하는 공칭 경로에 대해서 RNE 알고리즘을 도입하여 공칭 토오크를 계산하였다.

여기서 RNE 알고리즘 수명 시간과 제어기의 제어값 계산 시간의 차이로 인해 이중 샘플링 주기(Dual Sampling Rate)를 갖도록 하였다.

제안된 제어 방식의 효과를 보이기 위해서 3개의 자유도를 갖는 매니플레이터에 대해서, 부하 변동이 있는 경우를 설정하여 시뮬레이션하였다.

2. 본론

2.1 로보트 매니플레이터에 대한 모델의 표현

N개의 관절을 갖는 로보트 매니플레이터에 대한 동특성

방정식은 Lagrange 공식에 의해 유도된다.

$$D(q)\ddot{q} = Q(q, \dot{q}) + G(q) + Fv(t) \quad (1)$$

여기서 $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 는 각 관절의 위치, 속도 및 가속도를 나타내며, $u(t) \in R^n$ 는 계통 입력 벡터이고, $F \in R^n$ 는 대각선 행렬이다. $G(q) \in R^n$ 는 중력항 벡터이고, $Q(q, \dot{q}) \in R^n$ 는 Coriolis와 원심력 벡터, $D(q) \in R^{n \times n}$ 는 대칭 정지 관성 행렬이다.

제어기를 설계 하는데 있어 (1)식의 모델을 그대로 이용하거나 [2, 3, 4], 간략화를 통하여 얻어진 식 또는 이산 시간 계통으로 고려한다 [10, 11].

본 논문에서는 매니플레이터에 대한 (1)식으로부터 선형화되고 비간섭 이산 시간 차분 모델을 사용하여 분리 관절 제어(seperate joint control)를 고려한다.

$$A_i(z^{-1})y_i(k) = z^{-m}b_i(z^{-1})u_i(k) + h_i t_{e_i}(k) \quad (2)$$

여기서 k : 표본 구간 상수 $k=0, 1, 2, \dots$
 n : 계통 시간 지연 상수
 i : 관절의 수 $i=1, 2, \dots, N$
 h_i : 중력항에 의한 효과를 포함하는 1번째 관절의 상수
 y_i, u_i : 1번째 관절의 입력, 출력항
 t_{e_i} : 1번째 관절의 부하 변동 및 모델의 오차를 포함하는 외란항

$$A_i(z^{-1}) = 1 + \sum_{j=1}^m a_{ij}z^{-j} \quad (3)$$

$$B_i(z^{-1}) = \sum_{j=0}^{m-1} b_{ij}z^{-j} \quad (\text{단, } b_{i0} \neq 0)$$

여기서 n : 모델의 차수와 관련된되는 양의 정수
 z : 후향 이동 연산자, $z y(k) = y(k-1)$

2.2 모델의 매개변수 추정

주어진 모델의 (2)식에 대한 매개변수 추정으로는 일반적으로 널리쓰는 반복 최소 자승 추정 알고리즘에 망각인수(forgetting factor)가 변하는 알고리즘을 사용하였다[12]. (2)식을 다시 표현하면

$$y_i(k) = \theta_i \phi_i(k-1) + e_i(k) \quad (4)$$

여기서 $\theta_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}, b_{i0}, b_{i1}, \dots, b_{i,m-1}, h_i]$

$$\phi_i = [-y_i(k-1), \dots, -y_i(k-n), u_i(k-m), \dots, u_i(k-m+n-1), 1]$$

입출력 측정값으로부터 $\hat{\theta}_i$ 추정에 대한 RLS 알고리즘은 다음과 같다.

step 1: $\hat{y}(k) = \hat{\theta} \phi(k-1)$

step 2: $E(k) = y(k) - \hat{y}(k)$

step 3: $G(k) = P(k-1) \phi(k-1) / [1 + \phi(k-1) P(k-1) \phi(k-1)]$

step 4: $\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + G(k) E(k)$

step 5: $\lambda(k) = 1 - [1 - \phi(k-1)^T G(k)] E^2(k) / \Sigma_0$

step 6: $P(k) = [1 - G(k) \phi(k-1)] P(k-1) / \lambda(k)$

여기서 Σ_0 : 적용 속도 X 잡음 분산
 λ : 망각 인수

2.3 제어기의 설계

(2)식의 모델을 기초로한 제어기의 일반적 형태는 다음과 같다.

$$R(z^{-1})u(k) = I(z^{-1})y_d(k) - S(z^{-1})y(k) + u_0 + u_w \quad (5)$$

여기서 y_d 는 원하는 계통 응답이고 u_0 와 u_w 는 잔류 편차를 제거하기 위한 항(Bias Removal Term)이다. R, T, S의 다항식은 주어진 평가 기준을 만족하도록 결정된다. 또한 R, T, S는 추정된 매개변수의 함수이다.

2.4 극점 배치에 의한 매니플레이터의 적응 제어기 설계

이 제어기 설계의 목적은 폐경로 계통의 극점 배치를 통해서 원하는 과도 특성을 만족하면서, 각 관측의 폐경로 계통이 규정 경로 y_d 를 추종하도록 제어값 u 을 설계하는 것이다.

(5)식을 (2)식에 대입하여 아래와 같은 폐경로 계통식을 얻는다.

$$y(k) = \frac{z^m B T}{AR + z^m B S} y_d(k) + \frac{z^m B u + R h}{AR + z^m B S} + \frac{z^m B u + R e(k)}{AR + z^m B S} \quad (6)$$

각 관측에 대한 원하는 전달 함수를 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{y(k)}{y_d(k)} = G_0 \frac{B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} \quad (7)$$

여기서 G_0 는 상수이고, $A_m(z^{-1})$ 의 근은 미리 지정 되어야 한다.

제어기 설계를 위해서 다음과 같은 특성을 도입한다.

1. 점근적 서보 추종 특성 (Asymptotic servo tracking property)

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{y(k)}{y_d(k)} = 1$$

2. 점근적 조절기 특성 (Asymptotic regulator property)

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{y(k)}{e(k)} = 0$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{y(k)}{h} = 0$$

특성1로부터 (7)식의 G_0 는 다음과 같이 표현된다.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{y(k)}{y_d(k)} = \lim_{k \rightarrow \infty} G_0 \frac{B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} = G_0 \frac{B_m(1)}{A_m(1)} = 1$$

$$G_0 = \frac{A_m(1)}{B_m(1)} \quad (8)$$

(6), (7), (8)식으로부터 다음과 같은 Diophantus의 방정식을 얻는다.

$$G_0 B_m (AR + z^m B S) = z^m B T A_m \quad (9)$$

(9)식에서 Diophantus의 방정식의 유일해 조건과 (5)식의 제어기의 인과성(Causality) 조건을 통하여 R, T, S의 차수를 결정한다.

$$\deg(R) = \deg(A_m) - \deg(A) + \deg(A_0)$$

$$\deg(S) = \deg(A) - 1$$

$$\deg(A_0) \geq 2\deg(A) - \deg(A_m) - 1$$

$$(10)$$

$$\deg(T) = \deg(A_0) - 1$$

여기서 A_0 는 관측 다항식(observer polynomial)이다. 그리고 특성2와 (6)식으로부터 다음과 같은 표현을 얻는다.

$$u_0 = \frac{-R(1)}{B(1)} h$$

$$(11)$$

$$u_w = \frac{-R(1)}{B(1)} e(k)$$

(10)식과 (11)식에서 얻은 값으로 (5)식에서 제어값을 얻는다.

이 식에대한 블록 선도는 그림 1.과 같다.

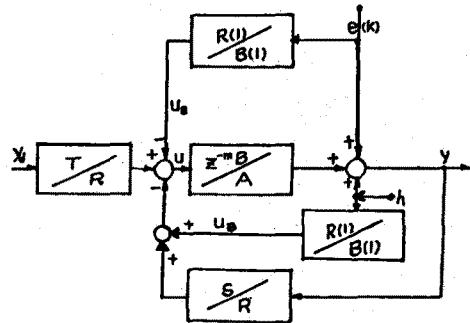


그림 1. 제어기의 블록 선도

2.5 시뮬레이션

시뮬레이션을 위해서 집중 질량 형태의 3개 자유도를 갖는 매니플레이터를 고려하였으며, 모델과 위치각은 그림 2.와 같다.

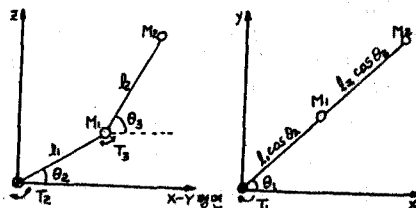


그림 2. 모델과 위치각 표현

기저 관성 모멘트 J 은 0.2 Kg m를 고려하고, 질량 M_1, M_2 는 각각 8Kg, 10Kg 이고, 길이 l_1, l_2 는 각각 0.5m, 0.5m이며, 이러한 물리적 추정치들은 1%의 오차를 갖는 것으로 가정하였고, 부하의 변동에 따라 M 의 실제 계통 값을 변화시키며 시뮬레이션하였다.

작업 수행 시간은 2초로 하고, 초기 위치 $q_1 = (-0.3, 0.4, 0.15)$ rad에서 출발하여 최종 목표지 $q_f = (-0.8, 1.1, -0.4)$ rad까지의 각 관절 속도를 파선 함수(Cycloid function)를 이용하여 원하는 규정 경로는 다음과 같다.

$$q_i(t) = q_i + (q_f - q_i)t/2 - (q_f - q_i)\sin(\pi t)/2 \quad [\text{rad}]$$

$$\dot{q}_i(t) = (q_f - q_i)/2 - (q_f - q_i)\cos(\pi t)/2 \quad [\text{rad/sec}]$$

$$\ddot{q}_i(t) = \pi(q_f - q_i)\sin(\pi t)/2 \quad [\text{rad/sec}^2]$$

그리고 제어값이 유계가 되는 상태를 고려하고자 규정 경로에 대해 RNE를 도입 한다. 이 중 샘플링 주기 T_r 과 t_r 은 각각, RNE 계산 시간 T_r , 계산 제어기(5)식을 계산하는 시간 t_r 과의 관계를 10배로 산정 하였다.

이와 같이 표현된 시뮬레이션 도식은 그림 3.과 같다.

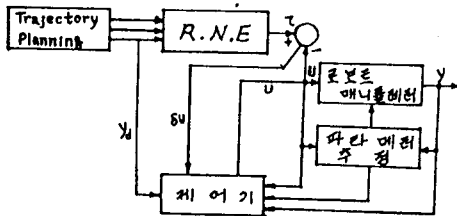


그림 3.

로봇 매니퓰레이터의 부하가 0Kg, 2Kg의 상수 부하, 그리고 3Kg의 상수 부하에 분산이 2Kg인 3가지 경우로 나누어 시뮬레이션하였고, 모델의 차수 $n=2$, 시간 지연 상수 $m=1$, 주어진 각 관절의 특성 다항식은 $1-1.98z^{-1} + 0.98z^{-2}$, $1-1.94z^{-1} + 0.99z^{-2}$, $1-1.78z^{-1} + 0.89z^{-2}$ 으로 고려하고, 계산을 간단히 하기 위해 $B_m = B$ 라고 설정하였다. 이렇게 고려된 R, S, T 다항식은 아래의 같이 표현된다.

$$T = G_0$$

$$S = s_0 + s_1 z$$

$$R = 1 + r_1 z$$

$$G_0 = (1 + a_{11}^* + a_{11}^*) / (b_0 + b_1)$$

$$r_1 = [(a_{11}^* - a_1) b_1^* - (a_{11}^* - a_2) b_0 b_1] / N \quad (12)$$

$$s_0 = [(a_{11}^* - a_1)(a_2 b_0 - a_0 b_1) + (a_{11}^* - a_2) b_1] / N$$

$$s_1 = -a_2 r_1 / b$$

$$N = b_1^* - a_1 b_0 b_1 + a_2 b_1^2$$

추정된 계통정수에 의해서 (12)식의 R, S, T 다항식 계수값이 결정된다. 시뮬레이션의 결과는 각 관절의 위치 오차를 무부하인 경우 그림 4-a, b, c, 2Kg의 부하인 경우 그림 5-a, b, c, 2Kg의 분산을 갖는 3kg의 상수 부하를 갖는 경우 그림 6-a, b, c 에 각각 나타냈다.

3. 결론

본 논문에서 제안한 로봇 매니퓰레이터에 대한 적용 제어 방법은 규정된 경로에 비교적 충실한 추종 상태를 보여주고 있다.

또한 제어값이 RNE에서 계산된 토오크값에 근사한 상태에서 유지되므로 최소한의 토오크로써 로봇 매니퓰레이터의 규정 경로를 강도롭게 제어되었다. 그리고 이 중 샘플링 주기의 사용으로 각 샘플링 구간(T_r)마다 원하는 규정 경로에 더욱 가깝게 추정되었음을 알수있다.

또한 부하 변동 및 모델의 매개 변수의 부정확성에도 불구하고 제어기는 강인한 특성(Robustness) 나타내며, 잔류 편차에 대한 오차를 작분기를 쓰지않고 제거할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 보였다.

그러나 제안된 알고리즘은 간접적 방법으로서의 타당성에 대한 지속적인 검토와, 직접적 방법으로 인한 적용 제어기의 설계 문제 와 안정도에 대해서 아직 연구 과제가 남아있다.

참고 문헌

- (1) M. Takegaki, S. Arimoto, "An Adaptive Trajectory Control of Manipulators", Int. J. of Con., v. 34, pp. 219-230
- (2) D. E. Whitney, "The Mathematics of Coordinates Control of Prosthetic Arms and Manipulators", Trans. ASME, Ser. G, v. 97, pp. 303-309, 1972
- (3) R. P. Paul, "Modeling, Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm", Ph.D. dissertation, Stanford Univ., 1972
- (4) J. Y. S. Luh, M. W. Walker, R. P. Paul, "Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators", IEEE Trans. AC-25, pp. 468-474, 1980
- (5) J. M. Hollerbach, "A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity", IEEE Trans. SMC-10, pp. 730-736, 1980
- (6) J. Y. S. Luh, C. S. Lin, "Scheduling of Parallel Computation for a Computer-Controlled Mechanical Manipulator", IEEE Trans. SMC-12, pp. 214-234, 1982
- (7) C. Lin, Y. Chen, "Multi-Processor Based Cartesian Space Control Techniques for a Mechanical Manipulators", IEEE J. of Rob. & Auto., RA-2, pp. 110-115, 1986
- (8) M. Yukobratovic, D. Stokic, "Contribution to Suboptimal Control of Manipulators", IEEE Trans. AC-28, pp. 981-985, 1981
- (9) A. Balestrino, G. De Maria, L. Sciavicco, "Adaptive Control of Manipulators in the Task Oriented-space", Proc. 13th ISIR, pp. 13-13, 13-28, 1983
- (10) A. J. Koivo, T. H. Gow, "Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulator", IEEE Trans. AC-28, pp. 162-171, 1983
- (11) C. S. G. Lee, M. J. Chung, "An Adaptive Control Strategy for Mechanical Manipulators", IEEE Trans. AC-29, pp. 837-840, 1984
- (12) T. R. Fortescue, L. S. Kershenbaum, "Implementation of Self-tuning Regulators with Variable Forgetting Factors", IFAC Automa. v. 17, pp. 831-836, 1981