

예측 알고리즘을 이용한 로봇트 매니플레이터의 경로 제어

윤원식 송창섭 양해원 서일홍 오재웅
한양대학교

Trajectory Control of Robot Manipulator based on the Preview Algorithm

Won-Sik Yun Chang-sub Song Hai-Won Yang Il-Hong Suh Jae-eung Oh
Hanyang University

< Abstract >

This paper proposes two types of the preview algorithms to predict the joint velocities and joint positions, and deals with a control approach using the preview algorithms for the precise trajectory control. Specifically, a predictor as the form of discrete time state equations is proposed based on the robot dynamics model linearized by the computed torque method. And another state predictor is proposed by the best line fitting in the least square sense, where present joint velocities and positions and several past positions are employed. Then computer simulations are performed for the SCARA robot with two d.o.f. to show the validities of the proposed algorithms.

1. 서론

로봇트 매니플레이터는 각 링크간의 결합이 비선형적이므로, 고속 및 정밀한 작업이 요구되는 곳에서는 로봇트 매니플레이터의 비선형 특성을 보상하여 선형제어가 가능한 제어기 설계방법이 많이 제시되어왔다. [1-4] 그러나, 비선형 특성을 갖는 마찰력이나 치차사이의 킥톱(Backlash), 비강체(Non-rigid body) 효과 등으로 인해서, 로봇트 매니플레이터를 정확히 모델링한다는 것은 불가능하다. 따라서, 위에서 제안한 제어 방법들은 불가피 하게 궤적 오차를 발생시키게 되므로 궤적 오차를 개선시킬 수 있는 새로운 제어 알고리즘이 요구된다. 상기 요구에 부응하는 한 방법으로서, 한 시점에서의 정보뿐만 아니라, 과거 또는 미래 시점들의 정보를 이용함으로써, 궤적 오차를 개선시키는 것을 생각할 수 있으며, 이에 관한 연구가 몇몇 진행 되어져왔다. Kondo[5]는 차의 현재 위치와 속도등의 정보를 이용해서, 미래 시점에서의 궤적 오차를 예측함으로써 핸들의 조정 각도와 차의 속도를 결정할 수 있다고 가정하여 차의 궤적 오차를 선형외삽법(Linear extrapolation)을 이용해서 예측할 수 있는 모델을 제시 하였으며, Yoshimoto[6]는 로봇트 매니플레이터의 관절 각도와, 관절 속도를 예측할 수 있는 Fast Time Model을 제안 하였으나, 링크 사이의 결합(Coupling)을 무시 하였으므로 비교적 큰 궤적 오차가 발생하였다. 또한, Tomizuka[7]는 궤적이 크게 변화하는 곳에서 용접용 로봇트를 제어하고자 할 때, 예측 제어 알고리즘을 이용하여 기존 궤적을 변화 시킴으로써 궤적 오차를 개선할 수 있음을 보였다.

본 논문에서는, 로봇트 매니플레이터의 동특성을 Computed Torque 방법으로 선형화 시킨후에, 관절 위치 및 속도를 예측할 수 있는 이산 시간 상태 변수 예측기를 제시하고, 현재 및 과거의 오차 경향이 최소자승법의 의미에 가장 잘부합되는 예측기를 제시하여, 이들 두 예측기로부터, 정보를 이용하여 제어 입력에 보정시켜 사용함으로써 궤적 오차를 줄일 수 있음을 2 자유도를 갖는 SCARA 로봇트를 대상으로 컴퓨터 모의 실험을 통하여 보이고자 한다.

2. 예측 알고리즘과 이를 이용한 제어기 설계

2.1. 선형 모델에 근거한 예측 알고리즘

보상기를 포함한 로봇트 매니플레이터의 예측모델을 제시하기 위하여 본 논문에서는 Lagrange-Euler 방법을 이용한 운동방정식과, Computed Torque 방법을 이용한 제어 방정식 사이의 관계를 이용한다.

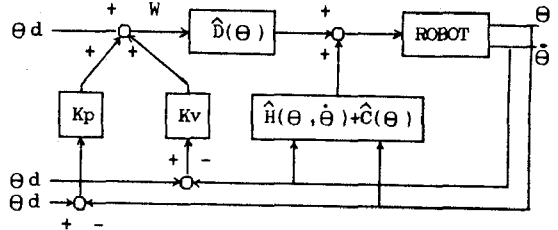


그림 1. Computed Torque 방법의 블록 선도

Computed Torque 방법은 로봇트 매니플레이터의 비선형 항을 극부 보상으로 제거한 후에, 상태 귀환을 통해서 P-D 제어를 하는 방법으로서 Computed Torque 방법에서의 제어 입력 τ 는 다음과 같다.

$$\tau = \hat{D}(\theta)W + \hat{H}(\theta, \dot{\theta}) + \hat{C}(\theta) \quad (1)$$

$$W = \ddot{\theta}d + K_v\dot{E} + K_pE \quad (2)$$

$$E = \theta_d - \theta \quad (3)$$

여기서, K_v 와 K_p 는 일정한값을 가지는 대각 행렬을 나타내고, $(\hat{\cdot})$ 는 모델링을 나타낸다. 만약, 모델링이 정확하다면 오차 방정식은 다음과 같고,

$$\ddot{E} + K_v\dot{E} + K_pE = 0 \quad (4)$$

한 축에 대해서 임계 감쇠가 되도록, 다음과 같이 이득 상수를 결정할 수 있다.

$$K_v i = 4K_p i = 0 \quad (5)$$

그러나, 모델링이 정확하지 못할 경우 오차 방정식은,

$$\ddot{E} + K_v\dot{E} + K_pE = \hat{D}^{-1} \{ (D - \hat{D})\ddot{\theta} + (H - \hat{H}) + (C - \hat{C}) \} \quad (6)$$

이 되므로 오차를 완전히 제거하지 못하며 이러한 단점을 보완하기 위해 예측 모델을 이용한 제어기를 구성할 수 있다. 이를 위해 (6)식의 우변을 X로 놓고, (1), (2)식으로부터 이산 시간 모델을 구하면,

$$\tau(k) = \hat{D}(\theta(k))W(k) + \hat{H}(\theta(k), \dot{\theta}(k)) + \hat{C}(\theta(k)) \quad (7)$$

$$\ddot{\theta}(k) = W(k) - X(k) \quad (8)$$

이고, 여기서 T는 샘플링 주기를 나타내고, k는 t=kT의 시점을 나타낸다.

(8)식의 양변을 적분하면,

$$\int_{kT}^t \ddot{\theta}(t') dt' = \int_{kT}^t W(t') dt' - \int_{kT}^t X(t') dt' \quad (9)$$

여기서, kT ≤ t ≤ (k+1)T 이므로,

$$\dot{\theta}(t) = \dot{\theta}(k) + \int_{kT}^t W(t') dt' - \int_{kT}^t X(t') dt' \quad (10)$$

으로 나타낼 수 있다.

또한, 샘플링 주기 T 사이에서 W(t)와 X(t)가 일정하다고 놓으면,

$$\dot{\theta}^*(k+1) = \dot{\theta}^*(k) + TW(k) - TX(k) \quad (11)$$

이고, t=(k+1)T 이다.

다음 시점의 관절 위치를 예측 하기위해 (10)식의 양변을 한번 더 적분하면,

$$\int_{kT}^{(k+1)T} \dot{\theta}(t) dt = \int_{kT}^{(k+1)T} \dot{\theta}^*(k) dt + \int_{kT}^{(k+1)T} \int_{kT}^t W(t') dt' dt - \int_{kT}^{(k+1)T} \int_{kT}^t X(t') dt' dt \quad (12)$$

양변을 정리하면 다음과 같다.

$$\theta^*(k+1) = \theta(k) + T\dot{\theta}^*(k) + \frac{T^2}{2}W(k) - \frac{T^2}{2}X(k) \quad (13)$$

(2) 식의 관계를 이용하면 (11), (13)식은 다음과 같다.

$$\theta^*(k+1) = (1 - \frac{T^2}{2}K_p)\theta(k) + (T - \frac{T^2}{2}K_v)\dot{\theta}^*(k) + \frac{T^2}{2}(\ddot{\theta}^*(k) + K_v\dot{\theta}^*(k) + K_p\theta^*(k)) - \frac{T^2}{2}X(k) \quad (14)$$

$$\dot{\theta}^*(k+1) = -TK_p\theta(k) + (1 - TK_v)\dot{\theta}^*(k) + T(\ddot{\theta}^*(k) + K_v\dot{\theta}^*(k) + K_p\theta^*(k)) - TX(k) \quad (15)$$

$\theta^*(k+2)$ 와 $\dot{\theta}^*(k+2)$ 는 (14), (15)식을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\theta^*(k+2) = (1 - \frac{T^2}{2}K_p)\theta^*(k+1) + (T - \frac{T^2}{2}K_v)\dot{\theta}^*(k+1) + \frac{T^2}{2}(\ddot{\theta}^*(k+1) + K_v\dot{\theta}^*(k+1) + K_p\theta^*(k+1)) - \frac{T^2}{2}X(k+1) \quad (16)$$

$$\dot{\theta}^*(k+2) = -TK_p\dot{\theta}^*(k+1) + (1 - TK_v)\dot{\theta}^*(k+1) + T(\ddot{\theta}^*(k+1) + K_v\dot{\theta}^*(k+1) + K_p\theta^*(k+1)) - TX(k+1) \quad (17)$$

2.2. Curve-Fitting 을 이용한 예측 알고리즘

미래의 정보뿐만 아니라 과거의 정보를 이용해서 궤적 오차를 개선시키는 것을 생각할 수 있으며, 이것은 현재의 시점에서 임의의 몇 시점 과거를 선택하여 그 사이의 오차 귀착을 Curve-Fitting 방법을 이용하여 구한 기울기에 일정한 이득상수를 곱해서 입력속으로 귀환 시킴으로써 가능하며, 오차의 경향을 직선으로 나타내기 위해, 오차 함수를 1차 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$L(t) = a + bt \quad (18)$$

만일, m개의 점을 통해서 오차의 자승을 최소로 하는 a와 b를 구하기 위해서는,

$$E(L) = \sum_{k=1}^m (a + bt_k - E_k)^2 \quad (19)$$

윗 식이 다음 관계를 만족하여야 한다.

$$\frac{\partial E(L)}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial E(L)}{\partial b} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial E(L)}{\partial a} = \sum_{k=1}^m 2(a + bt_k - E_k) \frac{\partial (a + bt_k - E_k)}{\partial a} \quad (21)$$

$$= 2(ma + b(\sum_{k=1}^m t_k) - \sum_{k=1}^m E_k) = 0 \quad (22)$$

마찬가지로,

$$\frac{\partial E(L)}{\partial b} = \sum_{k=1}^m 2(a + bt_k - E_k) E_k \quad (23)$$

$$= 2(a(\sum_{k=1}^m t_k) + b(\sum_{k=1}^m t_k^2) - \sum_{k=1}^m E_k t_k) = 0 \quad (24)$$

(22), (24)식을 행렬 형태로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} m & \sum t_k \\ \sum t_k & \sum t_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum E_k \\ \sum E_k t_k \end{bmatrix} \quad (25)$$

이므로, 오차의 자승을 최소로 하는 a와 b는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \frac{1}{m\sum t_k^2 - (\sum t_k)^2} \begin{bmatrix} \sum t_k^2 & -\sum t_k \\ -\sum t_k & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum E_k \\ \sum t_k E_k \end{bmatrix} \quad (26)$$

2.3. 예측 알고리즘을 이용한 제어기 설계

본 절에서는, 궤적 오차를 줄이기 위해서, 전절에서 제시한 두가지 형태의 예측정보를 이용하고자 하며, 한 시점후만을 고려하였을때, 이를 블록 선도로 나타내면 그림 2.와 같다.

그러면, 선형모델에 근거한 예측알고리즘과 Curve-Fitting을 이용한 예측알고리즘을 사용하여 제어기를 설계하는 방법을 다음 두 가지 경우로 분류하여 분석해 보자.

경우 1) $K_p \neq 0, K_v \neq 0, K_c = 0$ 인 경우, 단 $j=1, 2, \dots, m$ 제어 입력은 다음과 같다.

$$\tau = \hat{D}(\theta)W + \hat{H}(\theta, \dot{\theta}) + \hat{C}(\theta) \quad (27)$$

$$W = \hat{\Theta}^d(k) + K_v \dot{E}_k + K_p E_k + \sum_{j=1}^m K_{p,j} (\hat{\Theta}^d(k+j) - \hat{\Theta}^d(k+j)) \quad (28)$$

(27), (28)을 이용하여 제어 입력을 결정할 경우, 오차궤적을 최소로 하는 이득 상수를 결정하는데 많은 시행 착오가 존재 한다는 걸점이 있다.

경우 2) $K_{p,j} \neq 0$, $K_{v,j} \neq 0$, $K_c \neq 0$ 인 경우, 단 $j=1, 2, \dots, m$ 제어 입력은 다음과 같다.

$$\tau = \hat{D}(\theta)W + \hat{H}(\theta, \dot{\theta}) + \hat{C}(\theta) \quad (29)$$

$$W = \hat{\Theta}^d(k) + K_v \dot{E}_k + K_p E_k + K_c b + \sum_{j=1}^n K_{p,j} (\hat{\Theta}^d(k+j) - \hat{\Theta}^d(k+j))$$

$$\hat{\Theta}^d(k+j) + \sum_{j=1}^n K_{v,j} (\hat{\Theta}^d(k+j) - \hat{\Theta}^d(k+j)) \quad (30)$$

(29), (30)식은 전절에서 제시한 두가지 예측 알고리즘의 정보를 이용하여 제어를 설계한 경우로서, 컴퓨터 모의실험을 통해서 궤적 오차를 크게 개선시킬 수 있음을 입증하고자 한다.

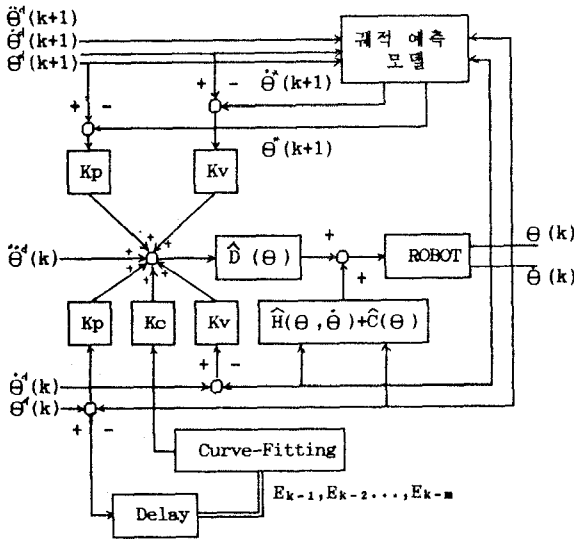


그림 2. 전체 제어기의 블록 선도

3. 컴퓨터 모의 실험 및 결과

로봇트 매니퓰레이터의 궤적 오차를 줄이기 위해서, 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 알아보기 위해서 컴퓨터 모의 실험을 하였다. 제어 대상은 3개의 자유도를 갖는 SCARA 로봇으로서, 모의 실험에서는 링크 1과 링크 2만을 고려하였다. 표 1.은 모의 실험에서 행한 각 링크의 제원을 나타낸다.

표 1. SCARA 로봇트의 제원

링크	무게	길이
1	3.3	1
2	4.4	1

무게의 중심이 링크의 한 가운데 있다고 가정하고, 모델링한 로봇트는 실제의 무게보다 10% 가볍게 했으며, 추적하여야 할 궤적은 원과 직선을 택하였다. 직선인 경우에는 공간 좌표계의 (-0.3, 0.5)인 점에서, (0.8, 0.5)m인 점까지 그리도록 하였고, 원인 경우에는 (0.5, 0.3)m인 점에서 출발하여, (0.7, 0.5)m인 점을 경유하여 (0.3, 0.5)m인 점까지 반시계 방향으로 그리도록 하였다. 또한, 마찰력은 무시하였으며 샘플링 시간은 10msec 로 하였고, 이득 상수를 고정시켰을 때 위치 오차를 비교하였다. K_p 와 K_v 는 각각, (225.0, 225.0)과 (30.0, 30.0)으로 하였으며, 한 시점 후를 예측한 경우와 두 시점 후를 예측했을 때의 이득 상수는 임계 감도가 되도록 표 2.와 같이 정하였다.

표 2. 예측 모델의 이득 상수

링크	원				직 선			
	K_{p1}	K_{p2}	K_{v1}	K_{v2}	K_{p1}	K_{p2}	K_{v1}	K_{v2}
1	225	400	30	40	400	225	40	30
2	225	400	30	40	400	225	40	30

또한, 로봇트 매니퓰레이터의 속도에 의한 영향을 알아 보기 위하여 원과 직선을 각각 2초와 3초 동안 그리도록 하였고, Curve-Fitting을 이용하여 오차의 경향을 직선으로 근사화 하는 데는 3개의 점을 이용하였으며, 이때 이득 상수 K_c 는 50.0을 선택하였다. 컴퓨터 모의실험에서도 알 수 있듯이, 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 제어 입력을 결정할 경우에, Computed Torque 방법보다 오차 궤적을 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 예측 알고리즘을 이용한 로봇트 매니퓰레이터의 경로 제어 방법을 제시하고, 컴퓨터 모의 실험을 통하여 그 효용성을 확인하였다. 제시된 방법은 비교적 간단 하면서도 궤적 오차를 상당히 개선시킬 수 있기 때문에, 고속 및 정밀한 작업 분야에 응용이 기대된다. 앞으로, 기존 궤적에 대한 수렴성의 증명과 아울러, 이득상수를 자기동조 (Auto-Tuning) 방법을 이용하여 결정하는 연구가 이루어져야 할 것이다. (본 연구는 1988년도 문고부 학술 조성 연구비의 지원에 의하여 이루어졌음.)

참 고 문 헌

1. J.Y.S.Luh, M.W.Walker, and R.P.C.Paul "Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators" IEEE Tans. on Automatic Control, vol.AC-25, No.3, June, 1980
2. Y.L.Gu, N.K.Loh "Dynamic Modeling and Control by Utilizing an Imaginary Robot Model" IEEE J. of Robotics and Automation, Vol4, No5, October, 1988
3. C.H.An, C.G.Atkeson, J.D.Griffiths, J.M.Hollerbach "Experimental Evaluation of Feedforward and Computed Torque Control" Proc. 1987 IEEE Int Conf. Robotics and Automation
4. E.Freund "Fast Nonlinear Control with Arbitrary Pole-Placement for Industrial Robots and Manipulators" Int J. Robotics Research. Vol.1, No.1, 1982
5. M.Kondo "Fundamental Relation between the Steerage and the Behavior of Automobiles" Tran. Japan Soc. Automobile Engineers No 5. 1958
6. Yoshimoto "Trajectory control of Robot Manipulator based on the Preview Tracking Control Algorithm" Int J. Robotics Research. 1985
7. M.Tomizuka, D.Dornfeld, M.Purcell "Application of Microcomputers to Automatic Weld Quality Control" ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 102, June 1980

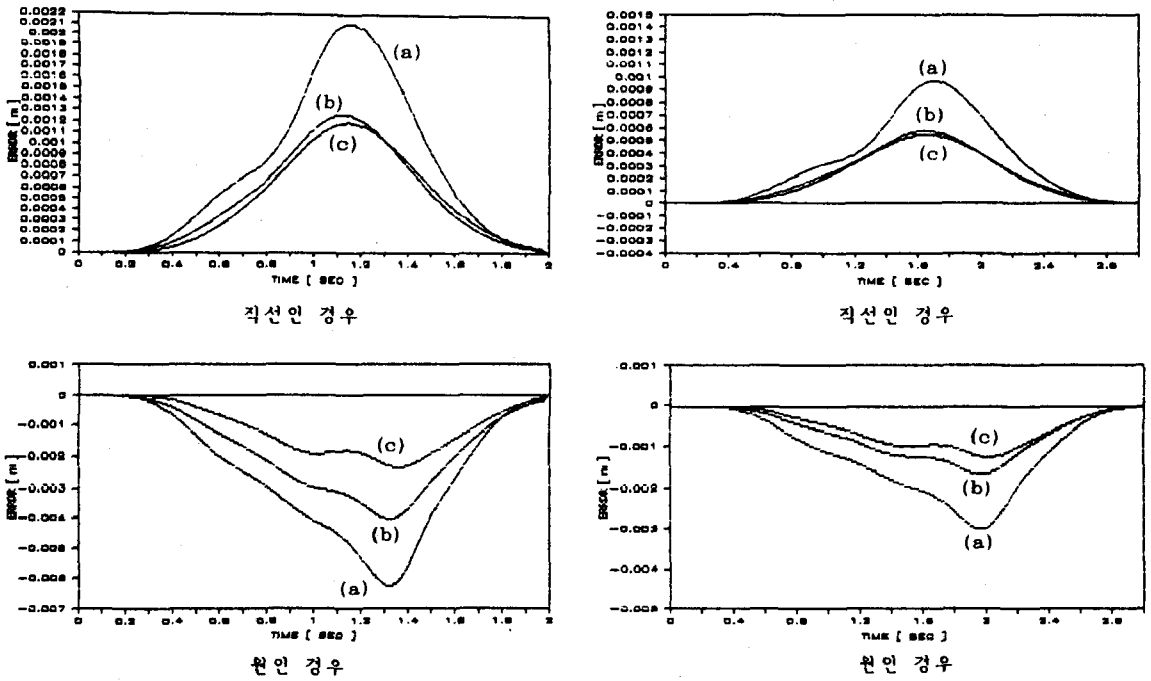


그림 3. 공간 좌표계에서의 오차 궤적
 (a) COMPUTED TORQUE 방법
 (b) ONE-STEP PREVIEW
 (c) TWO-STEP PREVIEW

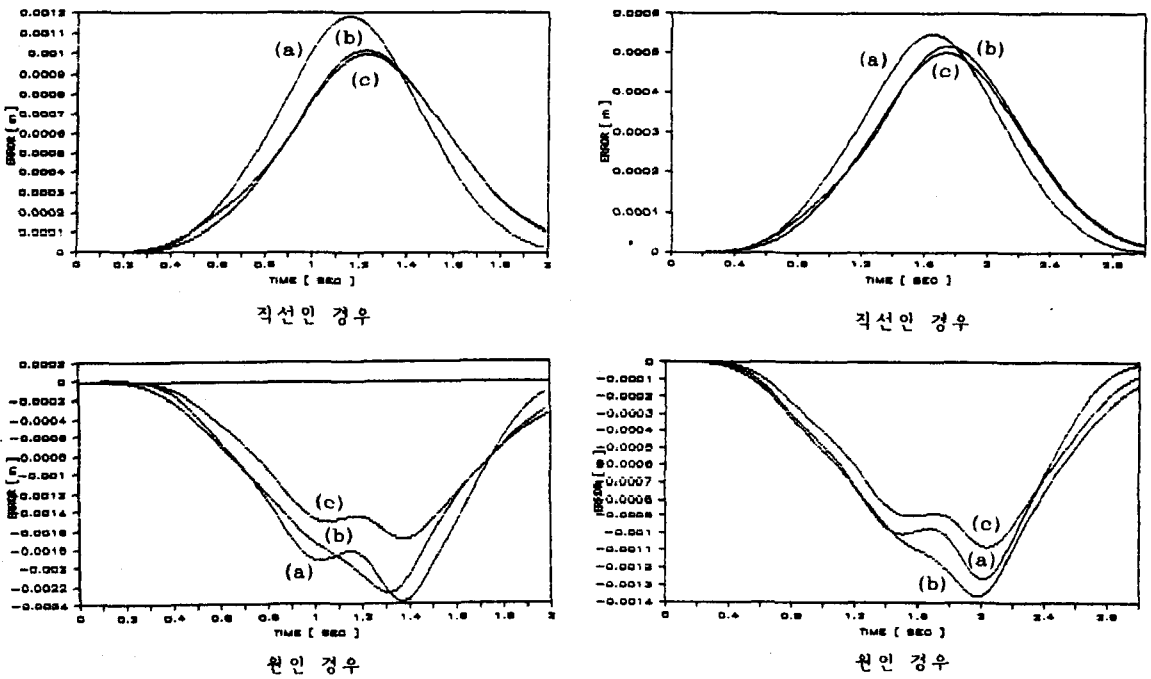


그림 4. 공간 좌표계에서의 오차 궤적
 (a) TWO-STEP PREVIEW
 (b) ONE-STEP PREVIEW + CURVE-FITTING
 (c) TWO-STEP PREVIEW + CURVE-FITTING