

## 적용제어에 의한 로봇 매니플레이터 설계

이 시 복\* 이 만 형\*\* 박 종 진\*\*\* 이 동 활\*\*\*

### On the Synthesis of Robot Manipulator using Adaptive Control

Si-bok Lee, Man-hyung Lee, Jong-jin Park, Dong-hwal Lee

#### ABSTRACT

Adaptive Model Following Control (AMFC) technique is applied to develop a robot manipulator control system, which can deal successfully with the complex dynamics of the manipulator.

Main concerns of this study are put on the problem reducing the chatter amplitude of control signal yielded by the unit vector control law that was proposed [10] previously for AMFC of the manipulator, and the effectiveness of the algorithm when implemented practically. To see the effectiveness of modified method, computer simulations using new and old control law are carried out and compared, and the modified one is implemented in RHINO XR-II robot system reconstructed partially to enable torque control.

#### 1. 서 론

한정된 용도로 개발 사용되기 시작한 로봇 매니플레이터는 최근 생산 시스템의 유연 자동화(Flexible Automation), 사람의 접근이 어려운 환경내 작업등에서 역할 범위가 급속히 넓어지고 있어 이를 뒷받침할 수 있는 성능 향상이 요구된다.

특히 생산 시스템에서 역할하는 산업용 로봇의 경우 생산성 관점에서 고속·정확 그리고 저에너지형 매니플레이터 개발에 대한 관심이 크다. 이를위해 로봇 시스템의 정확한 동특성 해석과 그에 근거하는 적절한 제어기법 개발이 요구된다. 로봇 시스템은, 특히 관절형 로봇의 경우, 큰 비선형성과 각 링크 사이의 연성, 그리고 시변 매개변수, 부하하중등에 의한 매개변수의 불확실등으로 특유의 복잡한 동특성을 나타낸다.

---

\*부산대학교 기계설계공학과 조교수

\*\*부산대학교 정밀기계공학과 부교수

\*\*\*부산대학교 대학원 기계공학과

현재 생산되고 있는 대부분의 산업용 로봇은 이러한 동특성을 고려하지 않고 기존 선형 서어보 제어 기법을 적용, 각 조인트를 독립 제어함으로써 고속운영시 정확성을 기대하기 어렵다.

개선된 제어 기법으로 매니플레이터의 운동 방정식을 이용, 적절한 조인트 입력 토크를 실시간내에 계산, 피이드 포워드 (Feed Forward) 또는 피이드 백 (Feedback) 시키는 동역학적 제어 (Dynamic Control) 기법들이 제안되고 있으나 [ 1 ~ 3 ] 정확한 운동방정식 모델이 요구되고, 부하하중 변화에 대척이 없는 한계를 갖고 있다. 토크 제어에 있어 이와 같은 매개변수 변화, 운동 방정식 모델의 부정확, 실시간 계산량 문제를 해결하기 위해 적용제어 기법들이 적용된 방법들이 제시되고 있다. [ 4 ~ 11 ]

이 중에서 매니플레이터의 비선형 운동 방정식을 그대로 이용하여 POPOV의 초안정 (Hyperstability) 이론에 의해 개발된 적용 모델 추종 제어 (AMFC) 기법은 [ 10 ] 제어측의 계산량이 적고, 광역에서 시스템 안정성이 보장된다는 측면에서 미지 다이내믹스를 갖는 비선형 시변계로서의 매니플레이터 제어에 유용한 방법으로 제시되었으나 단위 벡터 접근법에 의한 제어 신호의 고주파 진동과, 연속 시간 모델에 의한 해석으로 컴퓨터의 이산 제어시 작은 샘플링 시간을 요하는 문제가 있다.

한편 가변 구조 제어계 (VSS) 개념을 이용한 제어 기법에서도 이 제어신호 진동 문제를 해결하기 위한 방법이 제시되고 있다.

본 연구에서는 이 제어 기법의 개선을 위해 관성항 이외의 마찰력항까지를 포함하는 비선형상 및 연성항을 간단하게 계산, 보상해줌으로서 적용 제어 투우프의 부하를 줄여 마찰력과 같이 운동 방정식에 모델링되지 않은 미지 다이내믹스에도 불구하고 고주파 제어 신호 진동폭을 줄일 수 있는 방법을 제시하고 정확도의 열화없이 이산시간 제어 샘플링 간격을 늘이는 문제를 조사한다. 한편 이러한 적용제어 기법들의 실시스템 설치 실험에 대한 보고가 거의 되지않고 있다. 실험적 검토를 위해 교육용 로봇 RHINO XR-11를 로오크 제어 가능하도록 개작하여, IBM-PC/XT를 제어 컴퓨터로 이용, 두 팔 (Upper Arm, Forearm)만을 제어 대상으로, 개선된 적용 제어 기법

을 설치하는 문제를 다룬다.

## 2. 매니플레이터 운동방정식

매니플레이터의 동역학 운동 방정식 모델 유도에는 목적에 따라 Lagrange 식 또는 Newton - Euler 식의 두 접근 방법이 많이 쓰이고 있다. [ 12 ].

매니플레이터 설계 및 제어 법칙 개발을 위한 동특성의 물리적 이해를 위해서는 Lagrange 접근법에 의한 모델이 효과적이다.

Fig. 1에 주어진 n 자유도 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[D(\underline{q})]\ddot{\underline{q}} + \underline{c}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) + \underline{G}(\underline{q}) + \underline{F}(\dot{\underline{q}}) = \underline{M}(+)$$

여기서,

$$\underline{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T : \text{일반화좌표 벡터}$$

$$[D(\underline{q})] : (n \times n) \text{ 관성행렬}$$

$$\underline{c}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) : (n \times 1) \text{ 중력벡터}$$

$$\underline{F}(\dot{\underline{q}}) : (n \times 1) \text{ 점성감쇠벡터}$$

$$\underline{M}(t) : (n \times 1) \text{ 관절입력벡터}$$

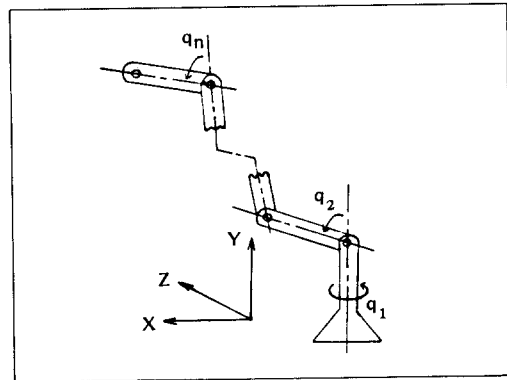


Fig. 1. n-link manipulator

제어측 개발을 위해 (1)식을 상태 변수 모델로 바꾸면

$$\dot{\underline{X}}_P = [A_P(\underline{X}_P)]\underline{X}_P + [B_P(\underline{X}_P)]\underline{U}_P \quad (2)$$

여기서,  $\underline{X}_P = \{ \underline{q}^T, \dot{\underline{q}}^{TT} \}$ ,  $\underline{U}_P = \underline{M}$

$$[A_P] = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \underline{(D)}^{-1} \underline{(G')} & -\underline{(D)}^{-1} \{ \underline{(C')} \underline{(Z)} + \underline{(F')} \} \end{bmatrix}$$

$$[B_P] = \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{(D)}^{-1} \end{bmatrix}, \quad \underline{C}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) = [C'(\underline{q})][Z(\dot{\underline{q}})] \begin{bmatrix} \dot{X}_{P1} \\ \vdots \\ \dot{X}_{Pn} \end{bmatrix}$$

$$\underline{G}(\underline{q}) = [G'(\underline{q})] \begin{bmatrix} X_{P1} \\ \vdots \\ X_{Pn} \end{bmatrix} \quad \underline{F}(\dot{\underline{q}}) = [F'] \begin{bmatrix} \dot{X}_{P1} \\ \vdots \\ \dot{X}_{Pn} \end{bmatrix}$$

### 3. 적용모델 추종 제어시스템 설계

매니플레이터의 복잡한 동특성을 결정하는 매개 변수 변화, 비선형성 그리고 변수간의 연성 및 모델 오차, 모델되지 않은 다이내믹스에 제어 성능 감도가 크지 않은 제어 시스템을 설계하기 위해 모델 기준 적응 제어 (MRAC) 이론에 근거한 방법들에 대한 연구가 이루어지고 있다. [ 4, 5, 10, 11 ]

이 중 비선형계 제어를 위해 개발된 단위 벡터 제어측을 매니플레이터 비선형 모델 식에 적용한 추종 제어 기법 [ 10 ]은 시스템의 정확한 모델이 필요없고 제어측 계산이 간단하며 시스템 안정성이 보장되는 입장에서 효과적인 방법으로 생각된다.

그러나 실시스템에 설치하는데는 가변 구조 시스템 (VSS) 이론을 이용한 제어 기법에서와 같이 단위 벡터 제어측으로부터 만들어 지는 입력 로오크 신호의 고주파 진동 문제와 오차를 적게 하기 위해서 샘플링간격을 짧게 잡아야 하는 문제들을 갖고있다.

본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해 고주파 입력 로오크신호 진동이, 적용 제어 루우프의 담당 부하가 큰것에 기인하고 있는 점을 고려하여 매니플레이터 관성력 이외의 속도 의존함, 중력, 마찰력등을 외란으로 처리, 이 외란을 간단히 추정 보상해줌으로서 적용 제어 루우프의 부하를 줄이

는 방법을 고려한다. 이 방법을 설치한 기준 모델 추종 적용 제어 시스템의 블록 선도는 Fig. 2 와 같다.

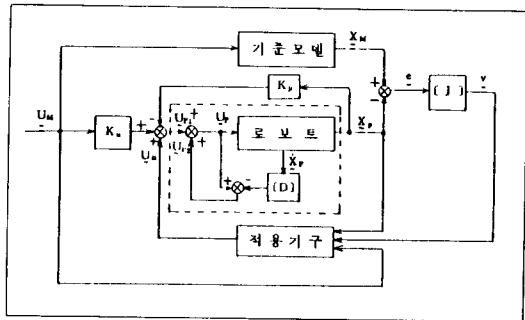


Fig. 2. Proposed AMFC System

그림에서 매니플레이터의 임의 상태에서 조인트 입력 토크  $\underline{U}_P$  는 관성력, 속도 의존력, 중력, 마찰력등을 모두 포함한 입력을 나타낸다. 이 입력이 매니플레이터 시스템을 통과하여 나온 과속도를 측정, 관성 행렬과 곱해서 계산된 관성력을  $\underline{U}_P$  에서 뺀 나머지  $\underline{U}_{P2}$  로 관성력 이외 사용된 모든 힘을 추정할 수 있다.

이 값을 다음 샘플링때 추정 외란으로 입력시킴으로서 적용제어 루우프에서는 관성력과 이 외란의 오차만을 보상하게 되므로 크게 부담을 줄일 수 있다.

(2)식의  $\underline{U}_P$  를

$$\underline{U}_P = \underline{U}_{P1} + \underline{U}_{P2}$$

로 나타내면 적응 모델 추종 제어 루우프에서는  $\underline{U}_{P1}$  만을 분담하게 된다.  $\underline{U}_{P2}$  가 완전하게 관상력 이외의 모든 다이내믹스를 정확하게 추정한 것으로 가정하면 (2)식은

$$\dot{\underline{X}}_p = [A_{pc}] \underline{X}_p + [B_p] \underline{U}_{p1} \quad (3)$$

여기서,

$$[A_{pc}] = \begin{pmatrix} 0 & \vdots & I \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & 0 \end{pmatrix}$$

로 쓸 수 있다. 적응 모델 추종 제어 시스템의(3)식을 이용하여 설계하게 된다.

### 3.1 기준 모델의 선정

매니플레이터의 각 관절 자유도가 연성된 비선형 2차 다이내믹스를 가짐으로 각 자유도에 대해 시불변, 선형 그리고 비연성된 2차 기준 모델을 부여함으로써 요구 성능 특성을 고유 진동수 ( $W_n$ )와 감쇠비 ( $\xi$ ) 두 매개변수로 간단하게 규정할 수 있으며 제어 루우프내에 있는 기준 모델의 응답도 애널로그 또는 디지털 컴퓨터로 쉽게 실시간 처리할 수 있다. 따라서 기준 모델 식을 다음과 같이 잡는다.

$$\dot{\underline{X}}_M = [A_M] \underline{X}_M + [B_M] \underline{U}_M$$

여기서,  $\underline{X}$ : 모델 상태 벡터

$\underline{U}$ : 모델 입력 신호 벡터

$$[A_M] = \begin{bmatrix} 0 & \vdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda 0 & \vdots & \Lambda 1 \end{bmatrix}$$

$$[\Lambda 0]_{(n \times n)} = - \begin{bmatrix} & & 0 \\ & a_{0i} & \\ 0 & & \end{bmatrix}$$

$$[\Lambda 1]_{(n \times n)} = - \begin{bmatrix} & & 0 \\ & a_{1i} & \\ 0 & & \end{bmatrix}$$

$$a_{0i}, a_{1i} > 0$$

### 3.2 적응 모델 추종 제어

적응 모델 추종 제어 시스템의 광역 접근 안정

성 (Globally Asymptotic Stability) 은 완전 모델 추종 조건 (Perfect Model Following Condition) 과 초안정 조건 (Hyperstability) 을 만족하는 제어측을 사용함으로써 얻을 수 있다. [13] 완전 모델 추종 조건은 다음과 같이 Erzberger 조건으로 주어진다.

$$(I - [B_p][B_p]^+)([A_M] - [A_{pc}]) = 0 \quad (5)$$

$$(I - [B_p][B_p]^+)B_M = 0 \quad (6)$$

여기서,

$$[B_p]^+ = ([B_p]^T [B_p])^{-1} [B_p]^T$$

$[A_M], [A_{pc}], [B_M], [B_p]$ 의 구조 특성만 이 조건의 만족 여부를 결정하게 되는데 식 (4)와 같이 선정된  $[A_M], [B_M]$ 는 이 조건을 만족시킨다.

초안정 이론을 적용하기 위해 Fig.2의 제어 시스템을 선형 피이드포워드와 비선형 피이드백 부분으로 나누어진 등가 식으로 나타낸다.

적용제어 루우프의 제어측을

$$\underline{U}_a = [\Phi(\underline{v}, \underline{x}_p)] \underline{x}_p + [\Psi(\underline{v}, \underline{u}_M)] \underline{u}_M \quad (7)$$

로 잡고 오차 상태 벡터를  $\underline{e} = \underline{X}_M - \underline{X}_p$  로 놓으면

$$\dot{\underline{e}} = [A_M] \underline{e} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} \underline{w}$$

$$\underline{v} = [J] \underline{e}$$

$$\underline{w} = [ [0 \ I] ([A_M] - [A_{pc}]) \quad (9)$$

$$+ [D]^{-1} ([K_p] - [\Phi]) ] \underline{x}_p$$

$$+ [ [B_M] - [D]^{-1} ([K_u] + [\Psi]) ] \underline{u}_M \quad (10)$$

이 시스템의 피이드 포워드 전달 함수

$$G(s) = [J] (sI - [A_M])^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} \quad (11)$$

가 양의 조건 (Positivity Condition) 을 만족하고 피이드 백 다이내믹스가 다음의 부등식

$$\int_0^T \underline{v}^T \underline{w} \, dt \leq r^2 \quad (12)$$

$r$ : 임의상수

을 항상 충족하면 이 시스템은 초안정이다. [13]

피이드 포워드 부분의 양의 조건은

$$[J] = [0 \ 1] [P] \text{로 놓고 } [P] \text{가}$$

다음과 같은 Lyapunov 식을 만족시키도록 선정함으로써 만족된다.

$$[A_M]^T [P] + [P][A_M] = -[H] \quad (13)$$

: [H] 정정행렬

본 연구에서는 적응제어 투우프 제어측으로서, 계산 측면에서 간단하게 설치할 수 있는 다음의 단위 벡터 제어측 [10]을 사용한다.

$$[\Phi] = P \prod_{\substack{v \\ \sim}} \frac{v}{|v|} (\text{sign } \underline{x}_p)^T \quad (14)$$

$$[\Psi] = q \prod_{\substack{v \\ \sim}} \frac{v}{|v|} (\text{sign } \underline{u}_M)^T \quad (15)$$

이 단위 벡터 제어측은 이득 p, q를 다음과 같이 선정함으로써 [10], [12]식을 만족시킬 수 있다.

$$p \geq \frac{[\text{Max } \lambda R R^T]^{1/2}}{\text{Min } \lambda D} \quad (16)$$

$$q \geq \frac{[\text{Max } \lambda S S^T]^{1/2}}{\text{Min } \lambda D} \quad (17)$$

여기서,

Min  $\lambda D$  : 모든  $\underline{x}_p$ 에서  $[D]^{-1}$ 의  
최소 고유값

Max  $\lambda x x^T$  : 모든  $\underline{x}_p$ 에서  $[X X^T]$ 의  
최대 고유값

$$[R] = [D]^{-1} \{ [B_p]^+ ([A_M] - [A_{p_c}]) + [K_p] \} \quad (18)$$

$$[S] = [D]^{-1} \{ [B_p]^+ [B_M] - [K_u] \} \quad (19)$$

(16), (17)식에서 [R], [S]가 [O] 되면 적응제어 투우프가 작동되지 않아도 완전 모델 추종이 가능함을 알 수 있다. 이를 위해

$$[K_p] = [B_p]^+ ([A_{p_c}] - [A_M]) \quad (20)$$

$$[K_u] = [B_p]^+ [B_M] \quad (21)$$

되도록  $[K_p]$ ,  $[K_u]$ 를 선정한다. 따라서  $[A_p]$ 의  $\underline{x}_p$  의존 때문에  $[K_p]$ ,  $[K_u]$ 를 적절한 상수로 잡았던 기존 방법 [10]보다 적응제어 투우프의 부담을 크게 줄일 수 있다.

그러나  $[B_p]^+$ 의 계산에 있어  $[D]^{-1}$ 이 매 샘플링 간격마다 계산되어야 하므로 계산량이 많아진다.

본 논문에서는 [D]에서 연성 관성항을 무시

하고 주관성항만을 고려한  $[D]$ 를 이용,  $[B_p]^+$  계산에 사용함으로써

$$[B_p]^+ \approx \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ [-D^{-1}] \end{bmatrix}$$

의해 계산량을 줄이도록 했다.

적응제어 투우프는 위 근사에 오차, 매개 변수 모델, 모델되지 않은 다이내믹스, 외란 추정 오차 등을 보상하게 된다.

여기서 미결정 선형 보상기 행렬 [J]를 결정하기 위해 (13)식의 [H]가 선정되어야 한다.

[H]는 상태 오차 다이내믹스, 즉 상태 오차 감소 속도를 지배하게 되는데 [H]와 상태 오차 다이내믹스 시정수는 일정관계를 갖는다. [10]

즉 [H]행렬과 기준 모델 매개 변수가 상태오차의 감소속도를 지배하게 됨으로 오차의 과도상태를 고려하여 선정하게 된다.

## 4. 적 응 예

### 4.1 컴퓨터 모의실험

개선된 새 제어 알고리즘의 효과를 조사하기 위해 본 실험실에서 보유하고 있는 교육용로봇 RHINO XR-11의 두 관절만을 감안 해체한 모델을 사용한다. RHINO XR-11의 2, 3번째 링크에 대한 운동방정식 모델의 계수행렬은 다음과 같다.

$$[D] = \begin{bmatrix} 0.031 + 0.013 \cos x_{p2} & 0.04 + 0.007 \cos x_{p2} \\ 0.004 + 0.007 \cos x_{p2} & 0.004 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} -0.013 \sin x_{p2} - 0.007 \sin x_{p2} \\ 0.007 \sin x_{p2} \end{bmatrix}$$

$$[G] = \begin{bmatrix} 1.465 \sin x_{p1} + 0.282 \sin(x_{p1} + x_{p2}) \\ 0.282 \sin(x_{p1} + x_{p2}) \end{bmatrix}$$

위 계수행렬의 수치는 질량 [kg], 길이 [m] 단위로 계량하여 얻어진 것이다. 기준 모델은 과도특성이  $\xi = 2$ ,  $W_n = 8$ 로 규정 되도록 각 관절에 대해  $a_{oi} = 64$ ,  $a_{1i} = 32$ 의 같은 값으로 취한다.

선형 보상 행렬 [H]는 상대오차 다이내믹스

를 고려하여

$$[H] = \begin{bmatrix} 36I & : & 0 \\ & \vdots & \\ \dots & \dots & \dots \\ & \vdots & \\ 0 & : & I \end{bmatrix}$$

로 잡고  $p, q$ 는 각각 0.005, 0.01의 값을 사용한다.

추종경로는 평면상의 일점 (0, 35, 0.1)에서 (0.1, 0.35)점까지 약 364 mm의 직선구간으로 그림 3과 같은 사다리꼴 속도를 갖도록 한다.

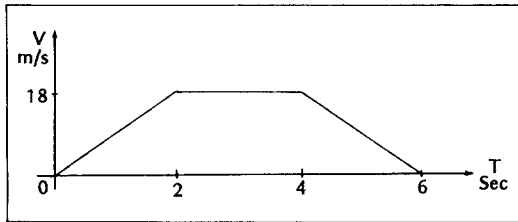


Fig. 3. Velocity profile

제어 알고리즘에서 추정외란  $\underline{u}_{p2}$ 를 계산하기 위해 각관절 가속도를 측정 해야 하는데 가속도수치적으로 미분하여 사용한다.

$$\ddot{q} = \frac{\dot{q}^t - \dot{q}^{t-1}}{\Delta t}$$

$t$  : 샘플링 시간  
 $\Delta t$  : 샘플링 간격

이 가속도를 이용하여 다음과 같이  $\underline{U}_{p2}$ 를 추정한다.

$$\underline{u}_{p2}^t = \underline{u}_p^{t-1} - [D(\underline{q}^{t-1})] \ddot{q}^{t-1}$$

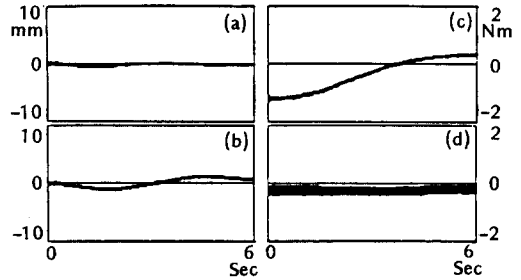
컴퓨터 모의 실험 결과를 Fig 4 ~ 7에 보여주고 있다. 각 그림에서 (a)는 x축 방향 경로오차, (b)는 y축 방향 경로 오차를 나타낸다.

Fig.4, Fig.6은 기존 알고리즘 [10]을 설치했을 경우의 결과이고 Fig.5, Fig.7은 본 논문에서 제시한 알고리즘에 의한 결과이다.

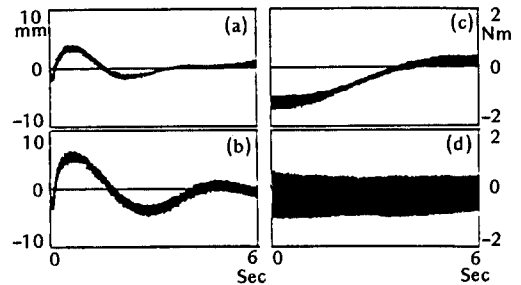
먼저 부하하중이 없는 경우를 보여 주고 있는 Fig.4, Fig.5에서 비교하여 보면 개선된 제어 방법에서 크게 작아진 경로 오차와 입력 토크 진동폭을 볼 수 있다.

부하하중 변화에 의한 매개 변수 변화에의 시스템 성능 감도를 조사하기 위해 부하하중을 0.1 kg 달았을때 결과를 Fig.6, Fig.7과 같이 얻었다.

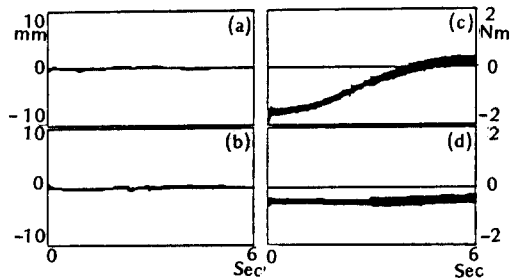
경로 오차에 있어서 기존 방법이 부하하중 변화에 보다 민감한 것을 볼 수 있다. 입력 토크도 관절경우 많이 커지고 있다.



4. Tracking error (a) in x direction (b) in y direction and torque history (c) at joint 1 (d) at joint 2 without payload using modified law



5. Tracking error (a) in x direction (b) in y direction and torque history (c) at joint 1 (d) at joint 2 without payload using old law



6. Tracking error (a) in x direction (b) in y direction and torque history (c) at joint 1 (d) at joint 2 with payload 0.1kg using modified law

한편 디지털 컴퓨터의 이산 제어 특성 때문에 연속 시간계 모델로 개발한 제어측의 설치될때 이산 제어 신호 샘플링 간격이 성능에 큰 영향을 갖게 된다. 샘플링 간격에 따른 최대 경로 오차를 Fig.8에 보여주고 있다. 새 방법이 비슷한 정도의

오차를 내는데 두 배 정도의 샘플 간격을 허용하고 있다.

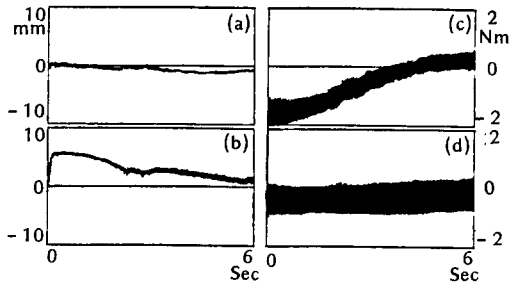


Fig. 7. Tracking error (a) in x direction (b) in y direction and torque history (c) at joint 1 (d) at joint 2 with payload 0.1kg using old law.

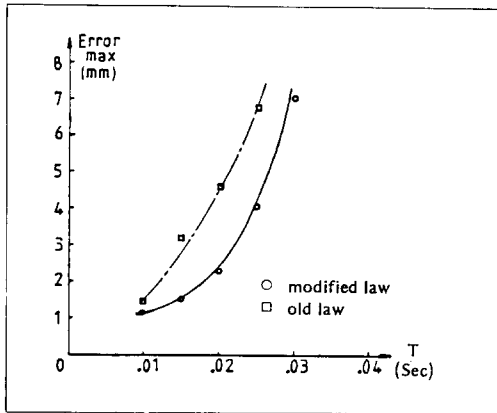


Fig. 8. Tracking error dependence on sampling period T

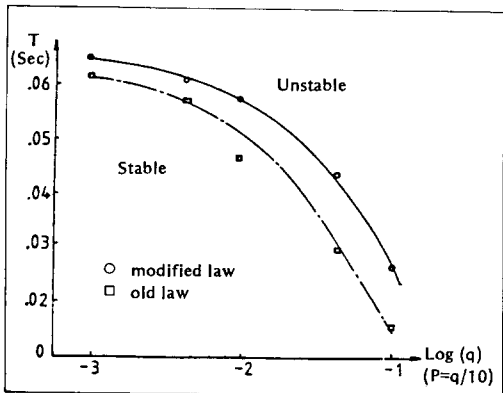


Fig. 9. Effect of sampling period T and adaptive loop gains p, q on the stability of error dynamics.

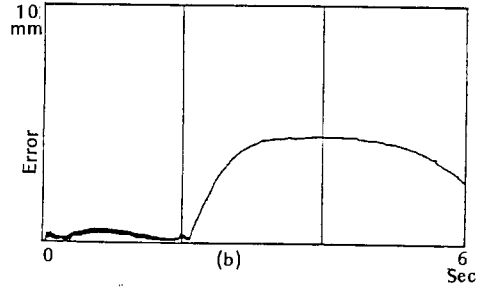
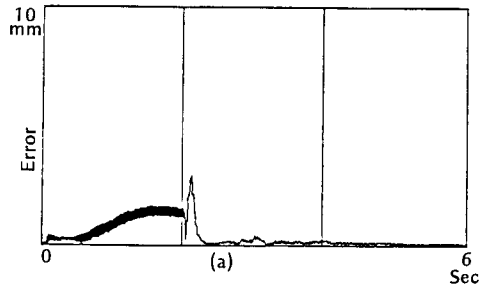


Fig. 10. Tracking error due to abrupt payload 0.1kg at t=2 sec using (a) modified law (b) old law.

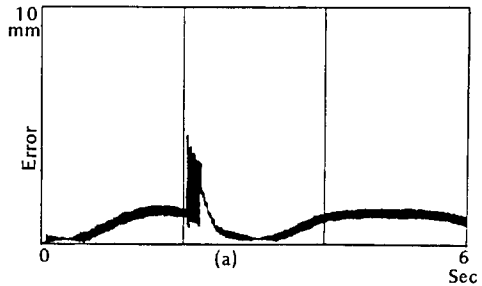
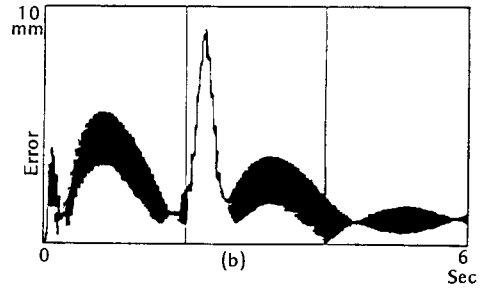


Fig. 11. Tracking error due to impulse torque 0.05Nm sec at t=2 sec using (a) modified law (b) old law.

Fig.9는 적응제어 투우프의 이득과 샘플 시간 간격이 시스템 안정성에 미치는 영향을 보여주고 있다. 같은 이득에 대해 새 방법이 보다 긴 샘플 간격에서 안정한 것을 알 수 있다. 따라서 실시간

제어 측면에서도 유리한 것으로 판단된다.

매니플레이터가 이동중 물체를 집을때 또는 관절부의 스틱션 (Stiction) 같은 충격부하가 발생하는 경우에 지령경로 추종능력을 조사하기 위하여 출발후 2 sec 위치에서 0.1 kg 질량을 팔 끝에 갑자기 부과하는 경우 그리고 같은 위치에서 0.1 sec 동안 각 관절부에 0.05Nm-sec의 외란 토크임펄스를 부과하는 경우에 대한 컴퓨터 모의실험 결과를 Fig.10, Fig.11에 각각 보여주고 있다. Fig.10에서 0.1 kg의 부하가 계단입력으로 주어지는 경우 기존방법은 거의 추종능력을 상실하고 있으나 새 방법은 즉시 추종능력을 회복하고 있음을 볼 수 있다. 충격부하에 대해서도 Fig.11에서 충격외란에 새 방법이 추종 오차에 있어 훨씬 둔감한 것을 볼 수 있다.

#### 4.2. 실험 장치 구성 및 실험결과

실험 목적으로 본 연구실에 보유하고 있는 교육용 로봇 RHINO XR-11를 토크 제어 가능하도록 개작하여 사용하였다.

이 로봇트가 갖고있는 DC-모터의 토크 용량을 고려하여 팔 질량, 관성에 비해 큰 비중을 갖는 그립퍼 (Gripper)를 해체하고 두 팔 (Upper Arm, Forearm)만을 제어 대상으로 잡는다.

개작된 내용은 표1과 같다.

개조부분	기존내용	개조내용
Encoder	6 C / T	5000 C / T
D / A	-	12 Bi:
Drive	Voltage	Current
Control - Computer	Intel - 8748	IBM-PC (8088)

실험 경로는 앞 절의 컴퓨터 앞 절의 컴퓨터 모의 실험에서의 같은 평면상의 직선 경로를 추종하도록 하였다. 제어 샘플링 간격은 15 m sec로 하였을때 추종 경로를 측정 한 결과를 Fig.10에 보여주고 있다.

Fig.10은 윗팔 (Upper Arm)과 앞팔 (Forearm)의 두 관절이 평면상에서 직선 경로를 추종한 응답을 측정한 결과이다.

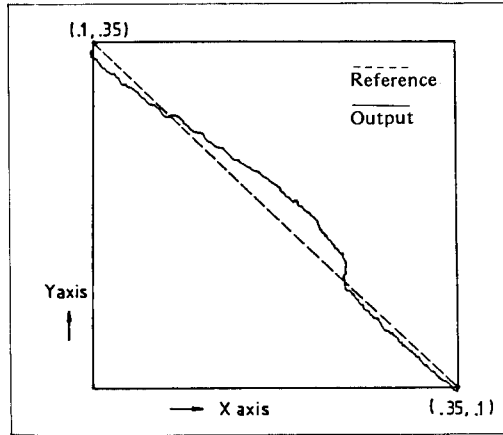


Fig. 12. Following trajectory when implemented in RHINO XR-II Robot.

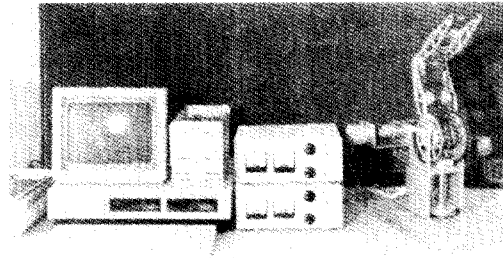


Fig. 13. RHINO XR-II Robot System restructured partially to enable torque control

측정은 앞팔의 끝점에 운동 평면에 수직 방향으로 펜을 달아 수행하였다. 직교 좌표계에서 직선케 적으로 계획한 것을 관절 좌표계로 역 변환한 결과를 매 샘플링 시간마다의 값을 미리 메모리에 저장시켜 두고 사용하였다.

위의 결과로 부터 적용제어한 오차 결과가 컴퓨터 모의 실험결과에 비해 상당히 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 원인은 먼저 디지털 장치구현과정에서 정량화 오차 및 검출 정보의 속도, 가속도를 수치 미분하여 사용한 영향이 크게 나타났다고 생각됨으로 앞으로 이 점을 개선시키기 위해서는 타코메터의 설치에 의해 측정속도로 부터 가속도를 계산하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

한편 RHINO 로봇트는 구조 특성상 동력 전달 과정에서 큰 마찰을 나타낸다. 이러한 모델되지 않은 다이내믹스 보상은 외란 추정 투우프에서 효과적으로 이루어지는 것으로 보인다. 구동부에서는



컴퓨터로 얻은 제어 입력을 재현시키는 과정에서 전류 구동 증폭기에서 나오는 전류치 만큼 구동 모터에서 실제로 구동 토크를 얻어내지 못한다. 본 알고리즘은 입력 신호 진동폭을 줄이도록 개선하는데 중점을 두었으나 위의 결과들을 고려하여 더욱 개선시키기 위한 연구가 아울러 필요하다고 생각한다.

## 5. 결 론

적응 모델추종 제어기법을 이용하여 로봇트 매니플레이터의 제어시스템을 설계하고, 그 효과를 컴퓨터 모의실험을 통해 확인하였다. 한편 제시한 제어기법을 두관절만에 대해 토크제어 가능하도록 IBM-PC/XT와 전류 구동 증폭기를 이용, 개작한 교육용 로봇트 RHINO XR-11에 실시시스템을 설치해 보았다.

기존의 단위벡터 제어치를 이용한 적응 모델추종 제어에서 입력토크 신호의 고주파 진동 문제가, 관성력의 다이내믹스 항을 외란으로 간주하여 간단한 외란추정 피드백 루우프를 설치해 줌으로서 마이크로 컴퓨터를 이용한 실시간제어에 유리하다.

실시시스템 설치결과, 컴퓨터 모의 실험 결과보다 상당히 큰오차를 나타낸다. 이것은 모의실험시에, 모터 다이내믹스를 고려하지 않은 것과 엔코더에서 측정된 변위만으로 속도, 가속도를 수치 미분에 의해 측정하는 것에 크게 기인하는 것으로 판단된다. 이와같이 제시된 외란 추정 방법은 가속도를 직접 측정하지 못함으로 해서 속도로 부터의 수치미분오차, 상태 검출기 잡음등이 제어 성능에 직접 큰 영향을 미치는 단점을 갖고 있다. 앞으로 이 문제에 대해 필터링 기법등을 이용한 개선 연구가 있어야 할 것으로 본다.

## 감사의 말

본 연구는 학술진흥재단의 연구비 지원을 받아 수행되었다. 학술진흥재단에 깊은 사의를 표한다.

## REFERENCES

1. D.E. Whitney, "Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses," IEEE Trans., Man Mach. Syst., Vol. MMS-10, No. 2, June 1969, pp. 47-53.
2. J.Y.S. Luh, M.W. Walker, and R. Paul, "Resolved acceleration control of mechanical manipulators," IEEE Trans., Auto. Contr., Vol. AC-25, No. 3, June 1980, pp. 468-474.
3. J.Y.S. Luh, M.W. Walker and R. Paul, "On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulator," ASME Trans., J. Dyn. Sys. Meas. Cont., Vol. 102, No. 2, Jun. 1980, pp. 69-76.
4. S. Nicosia and P. Tomei, "Model reference adaptive control algorithms for industrial robots," Automatica, Vol. 20, No. 5, 1984, pp. 635-644.
5. S. Dubowsky and D.T. Des Forges, "The application of model reference adaptive control to robotics manipulator", ASME Trans, J. Dyna. Sys. Meas. Cont., Vol. 101, No. 3, 1979, pp. 193-200.
6. A.J. Koivo and T.H. Guo, "Adaptive linear controller for Robotic manipulators," IEEE Trans., Auto. Contr., Vol. 28, No. 2, Feb. 1983, pp. 162-171.
7. C.S.G. Lee and B.H. Lee, "Resolved Motion Adaptive Control for Mechanical Manipulator," ASME Trans., J. Dyna. Syst. Meas. Cont., Vol. 106, Jun. 1984, pp. 135-142.

8. M. Takegaki and S. Arimoto, "An adaptive trajectory control of manipulator," *Int. J. of Contr.*, Vol. 34, No. 2, 1981, pp. 219-230.
9. R.P. Anex and Mont Hubbard, "Modelling and adaptive control of a mechanical manipulator," *ASME Trans., J. Dyna. Syst. Meas. Contr.*, Vol. 106, Sept. 1984, pp. 211-217.
10. A. Balestrino, G. De Maria and L. Sciavicco, "An Adaptive Model Following Control System for Robotic Manipulators," *ASME Trans. J. Dyna. Syst. Meas. Contr.*, Vol. 105, Sept. 1983, pp. 143-151.
11. 황원질 "로봇의 궤도제어에 관한 연구"에 대한 기계학회 논문집 Vol. 9, No. 4, 1985, pp. 509 - 517
12. J.M. Hollerbach, "A Recursive Lagrangian formulation of manipulator dynamics and a comparative study of dynamics formulation complexity," *IEEE Trans. Syst., Man, Cyber.*, Vol. 10, No. 11, Nov. 1980, pp. 730-736.
13. Y.D. Landau, "Adaptive Control—The model reference approach," Marcel Dekker, New York, 1979.