

로봇트 매니퓰레이터의 강인한 적응제어

(Robust Adaptive Control for Robot Manipulator)

李宅鍾*, 高明三**

(Taek Chong Yi and Myoung Sam Ko)

要 約

본 논문에서는 로봇트 매니퓰레이터의 기준모델 적응제어계 실제에 있어서 계통의 미지 파라미터에 대해 계통식이 선형화됨에 착안하고 Augmented 오차변수를 도입하여 파라미터 제어칙 및 제어입력을 제안하였고, 계통의 모델링 과정에서 불가피하게 도입되는 모델링 오차 및 미소한 시정수를 가진 기생요소(parasitics)들이 계통의 파라미터 동정 및 추종오차에 미치는 영향을 검토하였으며 개선책으로 저역 필터를 도입한 적응제어기를 구성하여 제안된 제어칙으로 별다른 가정없이 계통이 대국적으로 안정함을 밝혔다. 끝으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어기 구성법이 기생요소의 영향감소에 효과적이고 유용함을 밝혔다.

Abstract

An improved parameter adaptation and control law for robot manipulator are proposed based on a linearized parametric system equation and augmented error vectors. In view of the modelling error and parasitics with small time constants which inevitably introduced during modelling process, their effects on the robustness of the system performance are reviewed and as a countermeasure, adaptation mechanism with low pass filter is proposed.

Proposed parameter adaptation and control law assure the stability of the robot manipulator in the large without further assumption. Computer simulation shows its effectiveness of the proposed adaptation mechanism to improve the robustness of the system in presence of the parasitics in the system and superior performance for high speed operations make it an attractive option in application of the adaptive control field for robot manipulator.

I. 서 론

로봇트 매니퓰레이터에 대한 제어기법에 대해서는 여러 문헌에 나와있으며, 이들에는 resolved rate

control^[1] "Inverse problem"^[2] "Computed torque"^[3] 등이 있으며, 대부분 로봇트 매니퓰레이터의 동역학식을 이용하여 on-line으로 제어에 필요한 입력을 산출하는 것이다.

위의 방법은 로봇트 매니퓰레이터의 여러 파라미터 및 부하에 대한 정확한 예측이 필요하며, 수행에 있어서 산출속도가 빠르고 기억용량이 큰 계산기가 필요하다.

Doubowsky와 desforges^[4]은 적응제어 수법을 로

*正會員, 成均館大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Seongkyunkwan Univ.)

**正會員, 서울大學校 制御計測工學科
(Dept. of Cont. & Inst. Eng., Seoul Nat'l Univ.)

接受日字: 1990年 5月 12日

보트 제어에 적용하는 시도를 처음 행하였으며, 이들은 2차계의 부족제어된 기준모델의 제단입력에 대한 응답을 각 관절에 대한 MRAC(model reference adaptive control)로 사용하였으며, 실 시스템과 기준모델의 오차를 최소화하도록 최급강화법(steepest descent method)에 의해 국부적인 PD srev의 가변 이득을 조정하였다. 그러나 이들의 MRAC는 본질적으로 실 로봇계의 비선형성, 관절간의 상호작용, 간섭을 무시한 자유도 "1"의 단입력, 단출력에 대해서 설계되어 있고 실 시스템에 적용할 경우에 제어칙(control law)의 안정성도 보장되어 있지 않다.

Balestrino^[6]는 로봇의 동역학에 직접적으로 MRAC를 구성하고 popov의 초안정도 이론을 이용하여 적응칙의 안정성 및 수렴성을 입증하였으며 파라미터를 적절히 선정하여 적응속도를 조절할 수 있음을 보여주었다.

상기 기법은 적응칙이 간단하고 단순하며 대국적으로 접근안정성을 보장하나 적응제어 속도가 속도항과 같은 빠른 간섭항을 따르지 못하며 고성능의 로봇트 운행시, 추종오차의 한도에 대해서는 보장이 없다.

적응제어의 성공요소는 파라미터 계산시간의 단축과 파라미터 추종의 수렴속도 및 이들의 정확도에 달려있으며, 특히 로봇트 매니플레이터제와 같은 시변형 파라미터의 추정에 있어서 종래에 제시되었던 추정 알고리즘, 즉 파라미터의 변화속도가 대단히 완만하여 적응속도에 대하여 거의 고정된 파라미터로 간주하며 적용한 결과는, 추정된 파라미터치와 실제치와의 차가 커서 고성능 로봇트 매니플레이터의 제어기는 적용하기 어려운 난점이 제시되어 왔다.

이들 문제들을 해결하기 위하여 Slotine^[6]는 로봇트 매니플레이터계의 부하, 관절의 링크 크기와 질량 등이 운행에 독립된 파라미터임에 착안하여 매니플레이터 동역학 식을 이들 파라미터에 대한 선형식으로 풀이하여 좋은 추정속도 및 계통의 대국적 안정성을 입증하였다.

연이나 이경우 로봇트 매니플레이터에 사용된 모델식에서 불가피하게 빠진 모델링 되지 않은 동역학, 미소 시정수를 가진 기생요소(parasitics)항들이 파라미터의 동정 추종오차, 수렴성 및 안정도에 미치는 영향등에 대한 적절한 검토가 이루어져야 하는 문제들이 제기되었으며 이들에 대해 강인성(robustness)를 높임으로서 추종오차를 최소화할 수 있는대책이 필요하다. 일반적으로 선형연속계의 MRACS 설계에 있어서 미소시정수항 즉 기생요소가 파라미터동정 및 추종오차에 미치는 영향 및 이를 경감할

MRACS의 강인성 개선에 대한 연구들이 Pe-terson Ioannou^[10]에 의해 행해져 있으며 동정신호로서 플랜트의 dominant mode만을 자극하는 저주파신호의 사용이 필요함을 밝혔으나 아직 실행에 편리한 구성에 어려움이 있으며 이러한 논의를 전형적으로 비선형, 시변형인 로봇트 매니플레이터제어에 확장한 경우는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서 사용된 접근방식은 기준모델 적응제어 방식과 lyapunov의 안정성 이론에 기초를 두었으며 적응제어칙으로 slotine^[6]을 참고하여, 이를 제선보안한 적응제어칙을 제안하고 모델링오차 및 기생요소에 대한 강인성을 높이기 위하여 적절한 저역필터를 도입한 적응제어기를 구성하여 기생요소의 영향을 감소하고 오차신호의 high gain feedback을 인가하여 추종 오차를 줄이고 제안된 적응제어 칩으로 로봇트 매니플레이터의 대국적 접근 안정성이 보장됨을 입증하였으며, 끝으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제시된 알고리즘의 유용성을 보였다.

II. 적응제어기 구성

1. 매니플레이터 모델

마찰과 외란이 없을 경우 로봇트 매니플레이터의 동역학은 lagrange식에 의거 다음과 같이 표시된다.

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = M \quad (1)$$

여기서

- θ : $n \times 1$ 벡터 관절각 변위벡터
- $D(\theta)$: $n \times n$ 정칭대칭행렬 관성항
- $C(\theta, \dot{\theta})$: Coriolis 및 원심력항
- $G(\theta)$: $n \times 1$ 벡터 중력 Torque항
- $M(t)$: $n \times 1$ 벡터 입력 Torque항

여기서 D와 C행렬은 여러 자자에 의해 지적되었듯이 서로 독립이 아니며 적절히 정의된 C를 택하면 [14]에 기술한바와 같이 $(\dot{D}-2C)$ 행렬은 대칭 skew행렬이고 lagrange 식에 의해 풀이하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{D} = C + C^T \quad (2)$$

또한 좌변항은 그 내용에 있어서 구성요소인 파라미터 중, 부하등 적절히 선정된 파라미터에 대하여 선형화된다.

2. 적응 제어기의 구성

적응 제어기의 형태로서 MRACS의 여러가지 방

법중에서 기준 모델 적응추종제어(adaptive model following control)을 채택하였다. 제어의 목적은 적당한 제어기구를 통하여 제어대상인 로봇 매니플레이터의 은행제도 θ 가 기준제도인 θ_a 를 잘 추종하는데 있으며 이를 온라인으로 실시간으로 제어하기 위하여 다음 몇가지에 설계중점을 두었다.

첫째, 온라인 실시간 제어를 위한 제어칙 연산시간의 단축

둘째, 계통의 추종오차의 허용범위내 감소

셋째, 계통의 모델 불일치, Unmodelling dynamics, 기생요소등에 의한 계통의 강인성 개선

지금 a 를 동정대상인 $m \times 1$ 벡터로서 로봇 매니플레이터의 선택된 미지의 실제 파라미터 요소를 표시하며 \hat{a} 는 파라미터 a 의 추정시변항이며 \hat{D}, \hat{C} 및 \hat{G} 를 D, C 및 항에 실제치 a 대신에 \hat{a} 을 대입함으로써 얻어지는 추정행렬 이라고 한다. 그러면 계통의 동역학은 이 선택된 미지의 실제 파라미터 a 에 대하여 선형화식으로 [8]을 참고하여 다음과 같이 표시한다.

$$D(\theta)\ddot{\theta}_r + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}_r)a \quad (3)$$

여기서 $\tilde{a} = a - \hat{a}$, $\tilde{\theta}(t) = \theta_a(t) - \theta(t)$, $\tilde{D}(\theta) = D(\theta) - \hat{D}(\theta)$, $\tilde{C}(\theta, \dot{\theta}) = C(\theta, \dot{\theta}) - \hat{C}(\theta, \dot{\theta})$, $\tilde{G}(\theta) = G(\theta) - \hat{G}(\theta)$ 를 각각 파라미터 추종오차, 위치추종오차 및 각 행렬추종오차, θ_a 는 기준 관절각 벡터라고 하면 위 식은 다음과 같이 고쳐진다.

$$\tilde{D}(\theta)\ddot{\theta}_r + \tilde{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \tilde{G}(\theta) = Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}_r)\tilde{a} \quad (4)$$

여기서 Y 는 $n \times n$ 행렬로서 계통 파라메타 a 벡터와는 독립된 행렬이며 $\dot{\theta}_r$ 는 확장(augmented) 기준제도의 속도로서 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\theta}_r = \dot{\theta}_a + \Lambda \tilde{\theta}$$

여기서 Λ 는 정치행렬(positive definite matrix)이다. 이 θ_r 는 추종오차 $\tilde{\theta}$ 의 수렴성을 보장하기 위하여 도입되었으며^[8] 추종오차가 커질수록 이들도 역시 커진다. 계통의 제어입력과 파라메터의 제어칙은 [8]에 제시된 내용을 개선하여 행렬 C 의 선택폭을 넓히고 적용이 보다 쉽도록 다음과같이 제안하여 구성법 I이라 칭한다.

입력 제어칙은 다음과 같이 선택한다.

$$M(t) = \hat{D}(\theta)\ddot{\theta}_r + \hat{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \hat{G}(\theta) + K(t)\epsilon_a \quad (5)$$

파라미터 제어칙은 적분칙과 비례칙으로 구성하고, 추정 파라미터의 구성은 적분항과 비례항으로 구분하여 다음과 같이 표시한다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{a}} &= \hat{a}_1 + \hat{a}_p \\ \tilde{\hat{a}} &= a - \hat{a} = \tilde{a}_1 + \tilde{a}_p \\ \tilde{a}_1 &= a - \hat{a}_1, \quad \tilde{a}_p = -\hat{a}_p \end{aligned} \quad (6)$$

적분칙에 의한 부분은 아래와 같으며

$$\begin{aligned} \dot{\hat{a}}_1 &= \Gamma Y^T \epsilon_a \\ \dot{\tilde{a}}_1 &= -\Gamma Y^T \epsilon_a \end{aligned} \quad (7a)$$

비례칙에 의한 부분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{a}_p &= \Delta Y^T \epsilon_a \\ \tilde{a}_p &= -\Delta Y^T \epsilon_a \end{aligned} \quad (7b)$$

여기서 $\Gamma = \Gamma^T > 0$, $\Delta = \Delta^T > 0$, $K(t) > 0$ ϵ_a 는 추종오차의 한 측정기준이 되는 확장오차 벡터(augmented error vector)로서 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_a = \dot{\theta}_r - \dot{\theta} = \dot{\tilde{\theta}} + \Lambda \tilde{\theta} \quad (8)$$

한편 인용된 계통식에서 반영시키지 못한 미소시정수를 가진 기생요소가 존재할 경우 이들 기생요소의 영향은 미분성의 것으로^[11] 제어입력 $M(t)$ 에 고주파성분이 포함되어 있으면 이들이 강조되는 형태로 나타난다.

따라서 계통의 강인성의 개선을 위하여 저역 필터 $H^{-1}(s)$ 를 도입하여 기생요소에 영향을 주는 고주파성분을 저역 필터의 고역차단특성에 의거 적절히 제거시킴으로써 기생요소의 영향을 경감시킬 수 있을 것으로 기대된다.

이와같은 논리에서 구성법 I에서 로봇 매니플레이터의 입력단에 저역 필터를 삽입한 적응 제어기를 구성하여 구성법II라 칭한다.

기생요소의 영향은 등가적으로 입력항에 입력의 미분성향을 추가함으로써 표시할 수 있으며^[11] 이들 기생요소를 고려할 경우 로봇 매니플레이터의 계통 방정식 (1)식은 다음과 같이 고쳐쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) &= (1 + \Delta(s)\mu s)M(t) \\ &= M(t) - W_1(t) \\ D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + W_1(t) &= M(t) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 s 는 시간 미분연산자와 라플라스 연산자를 공용하는 것으로 하며 $\Delta(s)$ 는 기생요소, μ 는 미소한정의 스칼라, $w_1 = -\Delta(s)\mu s M(t)$ 은 기생요소의 영향의 크기를 나타낸다.

구성법II에서 사용되는 저역 필터가 입력 $M(t)$ 의 주파수성분을 적절히 여과하여 통과된 입력신호가 계통의 dominant mode 만을 효과적으로 자극하게끔 설계하는 것으로 한다. 필터 전달함수 $H(s)$ 로서

다음 접근 안정다항식을 고려하면

$$H(s) = s^v + \sum_{i=1}^v h_i s^{v-i}$$

이 경우 구성법II에 있어서 입력은

$$M_d(t) = H(s)^{-1}M(t) = \frac{M(t)}{H(t)}$$

제동에 $M_d(t)$ 입력을 가했을 경우 기생요소의 영향을 고려하면 (1)식은 (9)식을 참고하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) &= (1 + \Delta(s)\mu s)M_d(t) \\ &= \frac{(1 + \Delta(s)\mu s)M(t)}{H(s)} \\ &= \left(1 - \frac{D(\mu s)}{H(s)}\right)M(t) \\ &= M(t) - W_d(t) \end{aligned} \quad (10a)$$

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + W_d(t) = M(t) \quad (10b)$$

여기서 $W_d = D(\mu s)/H(s) M(t)$ 는 제동에 저역 필터 $H(s)$ 를 통한 제어입력 $M_d(t)$ 을 추가하였을 경우 생기는 기생요소의 크기를 나타내며 고주파 성분의 효과적으로 제거되었을 경우 구성법I의 W_1 보다 실질적으로 상당정도 경감되었을 것으로 판단된다.

구성법 I과 II에 의한 적응 제어기 구성은 그림1 및 그림2와 같다.

제어기의 구성은 크게 두 부분으로 되어 있으며 첫째부분은 제어칙에의해 추정된 파라미터에 의한 관성, 원심력, coriolis 및 중력항의 부분이고 둘째부분은 추종오차에 의한 PD feedback 항이며 이는 기본적으로 속도 및 위치오차에 의한 항들이다. 즉

$$K\epsilon_a = K\tilde{\theta} + K\Lambda\tilde{\theta}$$

제어입력 $M(t)$ 의 표현으로서 (5)식을 고쳐 다음과 같이 실행에 편리한 모양으로 고쳐쓴다.

K 를 정정치행렬 대신 $K(t) = \lambda D$ 을 취하고 $A = \lambda I$, λ 는 정정치를 취하면,

$$M(t) = D(\ddot{\theta}_r + 2\lambda\dot{\tilde{\theta}} + \lambda^2\tilde{\theta}) + \hat{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \hat{G}(\theta) \quad (11)$$

여기서 적응제어과정중 D 의 정정치행렬 됨을 보장하기 위하여 (4)식의 Y 행렬 정의를 다음과 고쳐 정의한다.

$$\begin{aligned} \tilde{D}(\ddot{\theta}_r + F\epsilon_a) + \tilde{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \tilde{G}(\theta) \\ = Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}_r)\tilde{a} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 F 는 정정치 행렬이며 이는 $V(t) \leq 0$ 을 보장하기 위함이다.

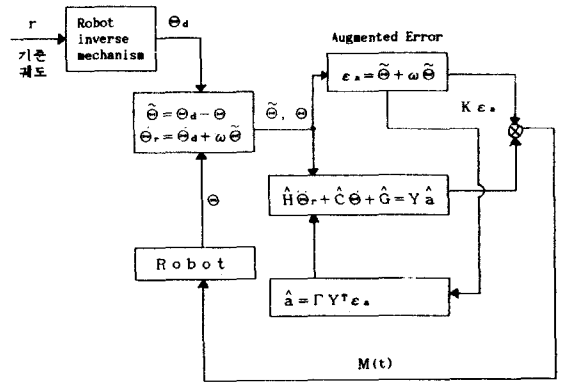


그림 1. 적응 제어기 구성(구성법I)
Fig. 1. Adaptive controller structure(structureI).

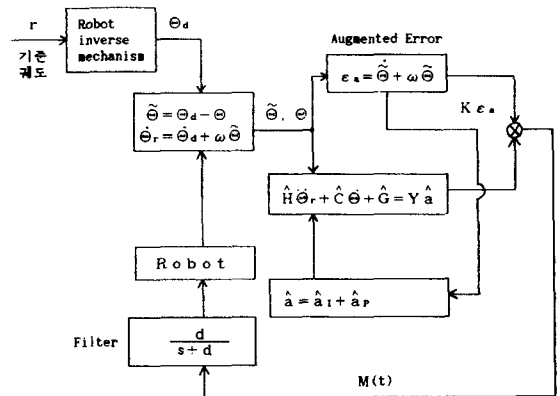


그림 2. 적응 제어기 구성(구성법II)
Fig. 2. Adaptive controller structure(structureII).

III. 안정성 해석 및 강인성 검토

1. 안정성 해석

구성법 I :

전술한 제어칙과 제어입력으로 기준궤도 $\theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d$ 및 기생요소 W_1 의 크기가 유계인 경우 시스템의 대국적인 안정이 보장됨을 다음과 같이 나타낼 수 있다. Lyapunov 함수로서 다음 $V(t)$ 를 고려하면

$$V(t) = \frac{1}{2}[\epsilon_a^T D \epsilon_a + \tilde{a}_1^T \Gamma^{-1} \tilde{a}_1] \quad (13)$$

이를 시간미분하여 (2), (7)식을 참조하면

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &= \epsilon_a^T (D\ddot{\theta}_r - D\ddot{\theta}) + \tilde{a}_1^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{a}}_1 + \frac{1}{2} \epsilon_a^T \dot{D} \epsilon_a \\
 &= \epsilon_a^T (D\ddot{\theta}_r + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) + W_1 - M) \\
 &\quad + \tilde{a}_1^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{a}}_1 + \frac{1}{3} \epsilon^T \dot{D} \epsilon_a \\
 &= \epsilon_a^T (\tilde{D}\ddot{\theta}_r + \tilde{C}(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + \tilde{G}(\theta) - K\epsilon_a + W_1) \\
 &\quad + \tilde{a}_1^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{a}}_1 + \epsilon_a^T C \epsilon_a \\
 &= \epsilon_a^T (Y(\tilde{a}_1 + \tilde{a}_p) - K\epsilon_a + W_1) - \tilde{a}_1^T Y^T \epsilon_a + \epsilon_a^T C \epsilon_a \\
 &= -\epsilon_a^T (K-C) \epsilon_a - \epsilon_a^T Y \Delta Y^T \epsilon_a + \epsilon_a^T W_1 \\
 &= -\epsilon_a^T K_d \epsilon_a - \epsilon_a^T Q \epsilon_a + \epsilon_a^T W_1 \tag{14}
 \end{aligned}$$

여기서

$$K-C=K_d, \quad Q=Y\Delta Y^T > 0 : \text{정치행렬임}$$

를 크게 취하면 $Z^T (K-C) Z = Z^T K_d Z > 0, \forall Z \in Z^n$ 가 되며

$$\begin{aligned}
 V(t) &= -\epsilon_a^T K_d \epsilon_a + \epsilon_a^T W_1 - \epsilon_a^T Q \epsilon_a \\
 &\leq -\lambda_{\min}(K_d) \|\epsilon_a\|^2 + \|W_1\| \|\epsilon_a\| - \lambda_{\min}(Q) \|\epsilon_a\|^2 \tag{15}
 \end{aligned}$$

이는 $V(t) < 0$ 인 한 감소함으로 $\|\epsilon_a\|$ 는 어느 시간 이후는

$$\sup_{t \geq t_1} \|\epsilon_a\| \leq \sup_{t \geq t_1} \frac{\|W_1\|}{\lambda_{\min}(K_d) + \lambda_{\min}(Q)} \equiv E_1 \tag{16}$$

기생요소 W_1 이 없을 경우 $t \rightarrow \infty, \epsilon_a \rightarrow 0$ 는 ϵ_a 의 구성요소인 독립상태 변수 $\tilde{\theta}$ 및 $\tilde{\theta}$ 가 $\tilde{\theta} \rightarrow 0, \tilde{\theta} \rightarrow 0$ 으로 수렴함을 뜻하며, 기생요소가 존재할 경우 이 추종오차항은 어느 한계에 머문다. 이는 계통에 대국적 안정성을 뜻하고 이 크기는 기생요소가 크면 클수록 커지고 속도, 위치오차, 제한이득 및 파라미터 제어척의 비례항 Δ 를 높임으로써 감소할 수 있음을 보여준다. Y로서 (12)식을 택할 경우 (14)식은

$$\dot{V}(t) = -\epsilon_a^T (K+F+Q-C) \epsilon_a + \epsilon_a^T W_1$$

이 되어 F를 크게 취하면 (11)에서 $K = \lambda \hat{D}$ 를 택하더라도 $K-C+F+Q = K_d+F+Q > 0$ 가 되어 안정성이 보장된다.

구성법 II :

Lyapunov 함수로서 다음 함수를 고려하면

$$V(t) = \frac{1}{2} (\epsilon_a^T D \epsilon_a + \tilde{a}_1^T \Gamma^{-1} \tilde{a}_1) \tag{17}$$

이를 시간미분하고 (10), (14)식을 참조하고 같은 요령으로

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &= -\epsilon_a^T Q \epsilon_a - \epsilon_a^T K_d \epsilon_a + \epsilon_a^T W_D \\
 &\leq -(\lambda_{\min}(Q) + \lambda_{\min}(K_d)) \|\epsilon_a\|^2 + \|W_D\| \|\epsilon_a\| \tag{18}
 \end{aligned}$$

여기서

$$Q = Y\Delta Y^T : \text{정치행렬, } K_d = K-C$$

이는 $V(t) < 0$ 로 인해 감소하므로 ϵ_a 는 어느시각이 후 다음 영역안으로 들어간다.

$$\|\epsilon_a\| \leq \frac{\|W_d\|}{\lambda_{\min}(Q) + \lambda_{\min}(K_d)} = E_2 \tag{19}$$

2. 구성법I과 구성법II의 강인성 비교

전술한 구성법의 특성상의 상의중 첫째점은 확장(augmented) 추종오차 $\epsilon_a(t)$ 가 정상상태에 있어서 들어가 같혀있을 E_1 와 E_2 의 크기의 차이이다.

일반적으로 기생요소를 포함한 계통의 동정에 있어서 입력 $M(t)$ 로서는 계통의 dominant mode를 효과적으로 자극할 수 있는 dominantly rich인 주파수 성분을 주체로한 신호가 사용되며 여기에 사용된 필터는 입력성분의 dominantly rich인 주파수 성분만을 효과적으로 통과시키겠끔 적절히 선정되어 구성한다. 기생요소의 영향 W 는 전술한 바와 같이 미분 성분인 것으로 입력에 고주파성분이 포함되어 있으면 W 에는 이들이 강조된 형태로 나타난다. 구성법II의 입력은 구성법I의 입력을 저역 필터로 처리하여 입력의 고주파 성분을 적절히 선정된 저역 필터 $H(s)$ 를 통하여 제거한 출력을 사용한 것으로, 결과적으로 고주파 성분에 기인하는 기생요소 W 의 크기는 W_1 보다 W_D 가 영향이 적은것으로 판단되어 $\|W_1\|$ 의 크기보다 $\|W_D\|$ 의 크기가 적은것이 될것이다.

따라서 확장오차 ϵ_a 의 구성요소인 추종오차 $\tilde{\theta}, \tilde{\theta}$ 의 크기도 구성법II가 적을것으로 판단된다.

둘째점은 파라미터 제어척의 유용성인데 파라미터 제어척은 계통의 안정도에는 별로 기여를 못하나 안정된 계통에서는 제안된 파라미터 제어척 (7a, b)를 사용함으로써 (15)과 (18)식에서 비례항 Δ 의 삽입으로 부치행렬(negative definite)이 추가되어 정상상태 및 과도응답특성이 타 구성에 비해 동정척의 수렴성이 보다 빠르고 결과적으로 오차가 적어져 제어특성이 보다 개선될 것으로 기대된다. 이러한 개선효과는 기생요소가 있는 상태에서 안정도가 보다 보장되는 구성법 II에서 그 효과가 두드러진다.

셋째점은 파라미터 a의 동정오차의 크기인데 (7)식에서 파라미터 동정 제어척의 Y와 ϵ_a 에 대한 기생요소의 영향의 크기를 고찰하면, 계통의 상태변수 $\theta, \dot{\theta}$ 가 구성법 II에서는 고주파 성분이 상당부분 제거된 입력에 의한 것임을 고려하면 구성법II의 편이 내부신호에 대한 기생요소의 영향이 적을 것으로 사료된다. 따라서 동정오차도 구성법 II가 적을것으로

사료된다. 이상의 고찰은 다분히 정상적인 것이므로 원칙적으로 그 영향의 크기에 대한 평가는 적절한 시뮬레이션 또는 실험을 통하여 밝혀야만 할 것이다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터에 의거 제안된 로봇 매니플레이터의 적응제어 기구의 유용성을 검토하기 위해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 대부분의 로봇 팔은 4개의 관절로 이루어진 2개의 부분으로 구성되어 있다. 첫 부분의 3개의 관절은 주로 매니플레이터의 위치운동에 관계하고, 나머지 부분은 물체를 잡는 문제에 관계한다. 본 연구에서는 수치 시뮬레이션에 있어서 매니플레이터 제어에 있어서 가장 어려운 과제를 일으키고 있는 비선형과 결합항이 있는 첫 부분의 제어 문제를 다루고자 한다.

시뮬레이션 모델은 결과의 비교를 위하여 [7]에서 인용하였으며, 2개의 링크와 3개의 관절로 구성되어 있으며 계통식은 (1)식과 같은 모델^[7]에 적용할 경우 내용 및 제원은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & D(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) = M(t) \\
 & d_{11} = 23.38 + (10.45 + L) \sin^2 \theta_2 \\
 & \quad + (7.9 + 2L) \sin \theta_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 & \quad + (3.7 + L) \sin^2(\theta_2 + \theta_3) \\
 & d_{12} = d_{13} = d_{21} = 0 \\
 & d_{22} = (84.9 + 2L) + (7.9 + 2L) \cos \theta_3 \\
 & d_{31} = 0 \\
 & d_{23} = d_{32} = (3.88 + L) + (3.95 + L) \cos \theta_3 \\
 & d_{33} = 27.03 \\
 & C_{12} = (10.46 + L) \sin(2\theta_2) \\
 & \quad + (3.7 + L) \sin[2(\theta_2 + \theta_3)] \\
 & \quad + (7.9 + 2L) \sin(2\theta_2 + \theta_3) \\
 & C_{13} = (3.7 + L) \sin[2(\theta_2 + \theta_3)] \\
 & \quad + (7.9 + 2L) \sin(\theta_2) \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
 & C_{21} = -C_{12}/2 \\
 & C_{22} = C_{23} = C_{24} = 0 \\
 & C_{23} = -7.9 \sin \theta_3 \\
 & C_{24} = C_{23}/2 \\
 & C_{31} = C_{13}/2 \\
 & C_{34} = -C_{23}/2, \text{ 다른 } C_{ij} = 0 \\
 & G_1 = 0 \\
 & G_2 = (213.67 + M_L g l_2) \sin(\theta_2) \\
 & \quad + (77.43 + M_L g l_3) \sin(\theta_2 + \theta_3) \\
 & G_3 = (77.43 + M_L g l_3) \sin(\theta_2 + \theta_3)
 \end{aligned} \tag{20}$$

여기서,

m_i : i 번 링크의 질량
 l_i : i 번 링크의 길이
 M_L : 부하의 질량

$L = M_L g l_2^2$
 G_i : i 번 링크의 중력
 g : 중력 가속도
 $m_2 = 30\text{kg}, m_3 = 15\text{kg}, l_2 = l_3 = 0.5\text{m}$
 $M_L = 10\text{kg}$

대부분의 매니플레이터의 기계적 공진주파수가 10Hz 임을 감안하면 sampling rate는 60Hz보다 높아야 적절한 것으로 제시되어 있다. 본 수치 시뮬레이션에서는 $d = 0.01$ 초를 택하였다.

위치 및 속도오차의 궤환 이득 λ 은 (11)식에서 샘플링 주기, d 를 감안하여 $\lambda = T/d; T = 0.2$ 로 설정하였다. 기생요소 전달함수 $\Delta(s)\mu s$ 는 가장 단순한 모양을 취하여 다음치를 택하였다.

$$\begin{aligned}
 & \Delta(s) = 1, \mu = 0.02 \\
 & H^{-1}(s) = \frac{d}{s+d}, d = 10 \sim 60
 \end{aligned}$$

1. 사례연구1 : 파라미터 동정

계통에 동정할 파라미터는 자유도 3인 로봇 매니플레이터인 경우 각 링크의 길이 질량, 중심위치 및 부하의 크기등 여러개 있으나 이중 부하항을 제외하면 선택된 특정 로봇 매니플레이터에서는 특정한 일정치를 지나고 있어 이들은 기지 또는 다른 실측에 의해 미리 알 수 있는 항들이다. 따라서 사례 시뮬레이션에서는 부하항만을 미지로 간주하여 동정 대상으로 하고 파라미터 제어칙을 식(7)을 사용해 제어칙의 유용성을 실험하였다.

시뮬레이션실험은 부하 10kg, 추정부하 영에서 시작하였으며 결과는 그림3, 그림6, 그림9에 표시된바 기생요소의 존재에 민감한 응답이 나타남을 알 수 있고 기생요소가 없거나 구성법 II에서 휠터를 사용했을 경우 단시간내에 잘 동정하고 있음을 보여주고 있어 이 파라미터 제어측 및 적응제어 구성의 유용성을 입증하였다.

또한 파라미터 동정치에 있어서 통상적으로 사용되는 적분항+비례항과 적분항만을 계통파라미터에 사용하는 면을 비교한 결과 동정결과는 계통이 안정 시 비례항이 있는편이 예견한 바와 같이 동정속도가 빠르고 제어특성 개선에 기여하였는데, 이는 그림6, 7, 8에서 비례항의 파라미터를 변화시킴으로서 확인되었다. 그리고 기생요소가 있으면 기생요소에 민감하게 영향받아 동정치에 변동이 많고, 발산하는 불안

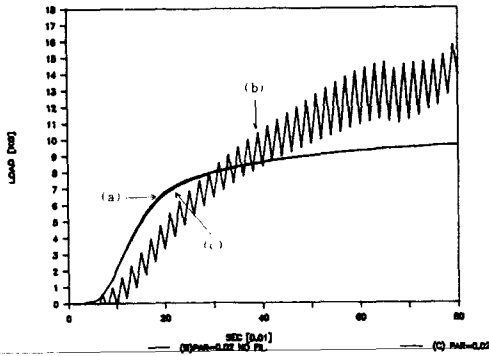


그림 3. 부하추정(원궤도)
 (a) 기생요소 유, Filter 무 (b) 기생요소 유
 (c) 기생요소 유, Filter 무
 Fig. 3. Load estimate(circle).

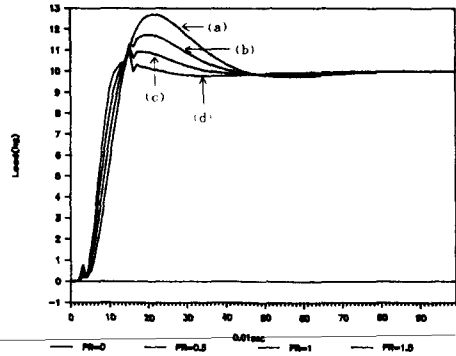


그림 6. 비례항 이득 변화에 따른 부하추정비교
 (원궤도)
 (a) Par(기생요소 μ)=0
 (b) Par=0.5 (c) Par=1.0
 (d) Par=1.5
 Fig. 6. Load estimate with proportional gain change(circle).

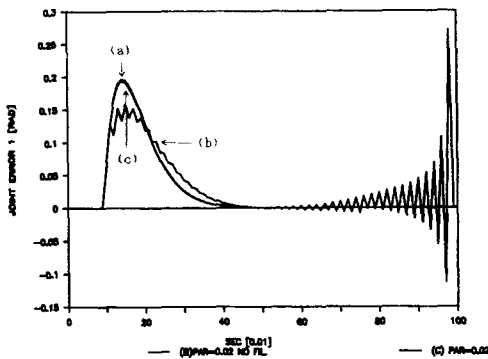


그림 4. 관절 1 각 오차(원궤도)
 (a) 기생요소 유, Filter 무 (b) 기생요소 유
 (c) 기생요소 유, Filter 무
 Fig. 4. Joint angle 1 error.

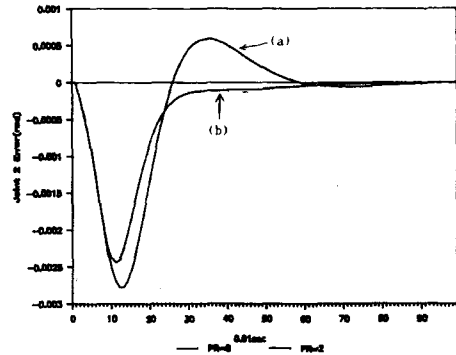


그림 7. 비례항 이득 변화에 따른 관절 2 각 오차비교
 (a) Par=0 (b) Par=2.0
 Fig. 7. Joint angle 2 errors with proportional gain change(circle).

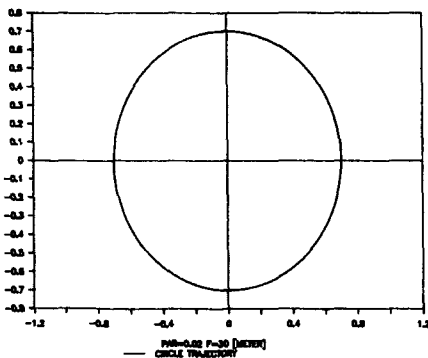


그림 5. 공간 원궤도 추종
 Fig. 5. Tracking result(circle), XY space.

한 경향을 보였는데 이 경우 구성법 II에서 적절한 저역 필터의 도입으로 파라미터 동정이 크게 개선되었음을 알 수 있다.

2. 사례연구2 : 원운동 궤도

사례 2에서는 매니퓰레이터가 중심(0.1, 0.4, 0.4) (m), 반지름(0.3) (m)인 원을 일정속도로 회전하는 것이다.

회전평면은 X, Y평면으로 직각좌표를 기술하였으

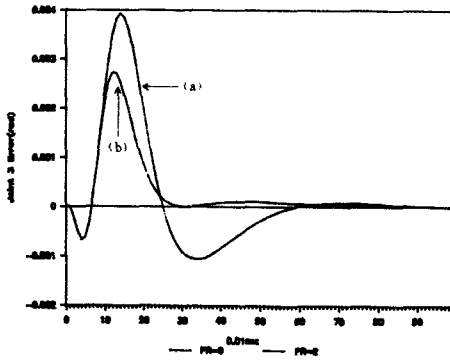


그림 8. 비례항 이득 변화에 따른 관절각 오차 비교
 (a) Par=0 (b) Par=2.0
 Fig. 8. Joint angle 3 errors with proportional gain change(circle).

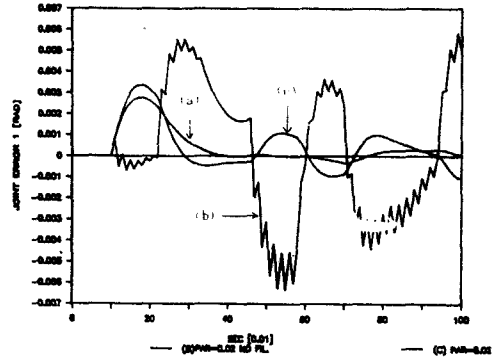


그림 10. 관절 1 각 오차(구형)
 (a) 기생요소 유, Filter 무 (b) 기생요소 유
 (c) 기생요소 유, Filter.
 Fig. 10. Joint angle 1 errors(square).

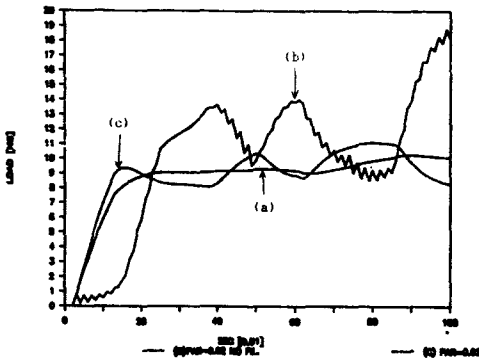


그림 9. 부하 추종(구형)
 (a) 기생요소 유, Filter 무 (b) 기생요소 유
 (c) 기생요소 유, Filter 무
 Fig. 9. Load estimate(square).

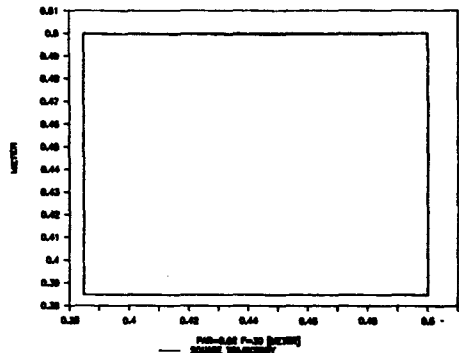


그림 11. 공간 구형 궤도 추종
 Fig. 11. Tracking result(square).

며 각속도는 360°/sec, 손끝 속도는 1.88m/sec를 유지하였다.

기생요소가 없을경우 원궤도에 있어 추종오차는 전 과정을 통하여 관절각오차 0.5도 이내에서 공간 좌표 1mm이내, 후반과정에서는 0.1mm 이내로 제어칙의 유용성을 입증하였으며, 기생요소가 있을 경우, 발산등 불안한 경향이 보였으나 저역 필터를 도입한 구성법II의 시뮬레이션 결과는 구성법II가 이미 예견한 바와같이 보다 좋은 추종특성을 보였으며, 처음에 짧은시간 제어과정을 거친 후 그림 5와 같이 주어진 기준궤적을 잘 추종하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 4, 7, 8에 표시되어 있으며 양 구성법 공히 공간 XY

좌표와 관절 각 오차로 표시 비교하였으며, 그림 7과 8에서 계수값을 변화시켜 파라미터 제어칙의 비례항의 크기가 과도응답 및 정상상태오차 크기의 개선에 효과적임을 보였다.

3. 사례연구3 : 구형 궤도

사례연구 3에서 로봇 매니플레이터를 공간좌표로 XY평면을 정점(0.5, 0.5), (0.35, 0.5), (0.35, 0.35), (8.5, 0.35) (m)을 통하는 정방형을 가속도(8m/sec²)로서 가속, 감속하여 이동하는 시뮬레이션을 행하였다. 구성법I과 구성법II에 있어서 정방형 궤도에서 급속한 속도변화로 생기는 입력신호가 갖는 고주파 성분이 기생요소에 미치는 영향이 추종오차에 전달

되는 현상이 구성법I에 두드러지게 나타나 발산등 불안한 경향을 보였으나 구성법II에서는 이를 경감시켜 좋은 효과를 거두었으며, 짧은 동안의 적응제어 과정을 거친 후 그림11와 같이 기준궤도를 잘 추종하여 제어입력치 및 제어기 구성의 유용성을 입증하였다. 시뮬레이션 결과는 그림9, 10, 11에 공간좌표및 Joint angle 오차로 표시되었다.

VI. 결 론

미지의 파라미터가 있는 비선형, 시변형 계통의 로봇의 MRACS에 있어서 기생요소 또는 외란의 크기가 유계인 경우 제안된 파라미터 제어치 및 제어 입력으로 다른 가정조건없이 계통의 대국적안정성 보장이 입증되었으며 또한 제안된 제어기 구성에서 저역 필터의 적절한 선택 도입으로 입력신호중고주파성분에 의해 강조되는 기생요소의 영향을 감소시켜 기생요소 및 파라미터의 불확실성등이 존재하는 고성능 로봇의 제어에 있어서 매우 유용한 전망을 보여주었으며 또한 계통이 파라미터 동정제어 칩에서 제안된 비례항의 삽입이 동정치의 수렴성을 높여, 결과적으로 계통의 과도 및 정상상태 제어 특성을 개선함에 기여함을 밝혔다. 결론적으로 본 논문에서 제안된 적응제어기 구성이 타 제어방식보다 강인성이 향상된 진일보된 로봇 매니퓰레이터의 적응제어 방식으로서 앞으로 고성능 로봇의 적응제어에 밝은 전망을 부여하는 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

- [1] J.Y.S. Luch and M.W Walker and R.P.C Paul, "Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators," *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-25, pp. 468-474, June. 1980.
- [2] R.P. Paul, "Modeling Trajectory Calculation and Servoing of a Computer controlled Arm," A.I. Memo. 177, *Stanford Artif. Intelligence Lab.*, Stanford University, Sept. 1972.
- [3] B.B Markiewicz, "Analysis of Computed Torque Drive Method and Comparison with Conventional Position Servo for Computer Controlled Manipulator," *Tech. Memo. 33-601, Jet Propulsion Lab*, Mar 1973.
- [4] S. Doubowsky and D.T. Desforges, "The Application of MRACS to Robotic Manipulators," *ASME Journal of Dynamics Sys. Measurement & Controlled* vol.. 101, pp. 193-200, Sep. 1979.
- [5] K.K.D. Young, "Controller Design for a Manipulator using Theory of Variable Structure System," *IEEE Trans, Sys. Man & Cybernetics* vol. SMC-8, pp. 101-108, Feb. 1978.
- [6] A. Belestrino and Maria, G. De, "An Adaptive Model Following Control for Robotic Manipulators," *AQSM Journal of Dynamics Sy Measurement & Control*, vol. 105, pp. 143-151, Sep. 1983.
- [7] A.J. Koive and T. Guo, "Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulator," *IEEE Trans. Aut. Control.*, AC-28, pp. 162-170 Feb. 1983.
- [8] J.J.E. Slotine and Li W., "Adaptive Manipulator Control: A Case Study," *IEEE Trans. Aut. Control*, AC-33, pp. 995-1003, Nov. 1988.
- [9] B.B. Peterson and K.S. Narendra, "Bounded Error Adaptive Control," *IEEE Trans.*, AC-27-6, 1161/1168 1982
- [10] R.A. Ioannou and P.V. Koktovic, "Adaptive Systems with Reduced Models," Springer-Verlag 1983
- [11] 大森, 佐野, "モデリング誤差を考慮した連続時間 MRACS," *計測自動制御學會論文集*, 22-4, 479/481(1986)
- [12] B.D.O. Anderson, "Adaptive Identification of Multiple-Output Plants," *Proc. IEEE CDC*. Phoenix, Az, 273/281 1974
- [13] 田中, 鈴木, "連続時間のMRACS寄生要素に對する安定ロバスト性," *電氣學會論文誌*, 107-C-2, 195/202(1987)
- [14] J.J.E. Slotine, "On The Adaptive Control of Manipulators," *INT. J. Robotics, Res.* vol. 6, no. 3, 1987.

著 者 紹 介

李 宅 鍾(正會員)

1931年 1月 5日生. 1954年 해
군사관학교 졸업. 이학학사 학위
취득. 1958年 U. S. Naval Post
Graduate School Electrical Eng.
1963年 서울대학교 대학원 전자
공학과 공학석사학위 취득. 1972

年~1974年 미국 Tacoma Company해군고속함건조기
술 연수. 1974年~1978年 Korea Tacoma 회사 기술부
장. 1983年~1984年 미국 Univ. of Maryland객원교수.
1990年 9月 서울대학교 제어계측공학과 공학박사학
위 취득. 1979年~현재 성균관대학교 전자공학과
교수. 주관심분야는 Adaptive Control, Robot Mani-
pulator Control, Learning Control 등임.

高 明 三 (正會員) 第26卷 第11號 參照

현재 서울대학교 제어계측공
학과 교수