

분산화 제어 기법을 이용한 로봇 매니플레이터의 강인 제어

Robust Control of Robot Manipulators Using a Decentralized Control Scheme

°최 현 철*, 한 상 완*, 홍 석 교*

*아주대학교 제어계측공학과 (Tel: 0331-219-2489; Fax: 0331-212-9531; E-mail: g9509009@madang.ajou.ac.kr)

Abstract This paper presents the robust control of robot manipulators using a decentralized control scheme. The control scheme decouples the coupling dynamics between the joints and compensates the joint variable errors without any computation of the dynamics. The performance of the control scheme is compared with that of other control schemes such as the computed torque scheme and the adaptive control scheme by simulation.

Keywords Robust control, Decentralized control, Time-delayed control, Decoupling, Robot manipulator

1. 서론

로봇 매니플레이터의 운동은 2차 비선형 미분방정식으로 표현된다. 따라서 로봇의 운동을 정확히 제어하기 위해서는 비선형 제어가 필요하다[8]. 일반적인 로봇 제어기의 설계에 있어서 요구되는 사항은 다음과 같다[4].

- (i) 모델 파라미터의 불확실성에 둔감할 것,
- (ii) 부하 변화에 둔감할 것,
- (iii) 각 축의 운동이 선형적이고 다른 축의 운동에 대해 독립적일 것,
- (iv) 제어 알고리즘의 온-라인 계산 시간이 짧을 것.

이러한 사항을 만족시키기 위해 여러가지 제어 기법들이 개발되었다. 로봇 매니플레이터의 제어를 위해 개발된 기법 중 널리 알려져 있는 기법으로 모델에 기준된 계산된 토크 제어(Computed Torque Control)기법[2,3,8]이 있다. 이 기법은 로봇 동역학에 근거하여 주어진 운동에 대응하는 토크를 계산하고 제어 입력을 가함으로써 동역학상 서로 간섭된 항들을 상쇄하여 로봇 매니플레이터의 각 축이 서로 독립적으로 제어되도록 하는 기법이다. 그러나 실제로 이 기법을 사용할 때 동역학을 완전히 알 수 없는 경우, 미지의 동역학 및 외란에 의해 시스템의 성능이 저하된다. 또한 이 기법은 구현하기가 복잡하고 동역학 계산에 많은 시간이 필요하다.

모델의 불확실성에 의한 성능 저하 문제를 해결하기 위해 여러가지 기법들이 제안되었다. 그 중 한 방법으로 적응 제어(Adaptive Control)기법[1,4,7]이 있는데, 이 기법은 시스템의 응답에 근거하여 제어기의 이득을 조정함으로써 로봇 매니플레이터의 운동을 주어진 모델의 운동에 근접하도록 한다. 또한 이 기법은 로봇 시스템처럼 비선형이면서 불확실성이 많은 시스템에 적합한 특성을 가지고 있기 때문에 지속적으로 연구가 진행되었다[4]. 그러나 복잡한 알고리즘에 의해 시스템이 불안정할 수 있고 계산량의 과다로 인해 실시간 구현에 어려움이 따른다.

불확실성에 대처하는 또 다른 제어 기법으로 가변 구조(Variable Structure) 제어 기법[10]과 같은 고이득의 강인 제어 기법이 있다. 이러한 기법은 정확한 모델이 요구되지 않고 다만

스위칭 평면을 적절히 정의하기만 하면 된다. 그러나 이 기법은 로봇의 동역학을 고려하지 않아 동역학을 고려한 제어기보다 더 우수한 성능을 보장할 수 없고, 스위칭에 의한 채터링 현상으로 고주파 대역의 진동을 유발할 수 있다[7].

이러한 비강인성, 복잡성 및 발전성 등의 단점을 극복하기 위한 방법으로 분산화 제어(Decentralized Control)기법[5,9]이 제안되었다. 이 기법은 간단하면서도 효과적인 로봇 제어기법으로, 로봇 매니플레이터의 각 축의 운동을 독립적으로 제어할 수 있도록 해준다. 또한 알고리즘 계산 시간이 짧기 때문에 로봇 매니플레이터의 고속 동작에 적합한 제어 기법이다[5].

본 논문에서는 불확실성에도 강인하고 로봇 동역학 계산이 필요하지 않은 분산화 제어 기법을 로봇 매니플레이터에 적용한다. 이 제어기는 간섭된 로봇 동역학을 비간섭화하는 시간 지연된 토크 제어기와 속도 오차, 위치 오차 등의 로봇 매니플레이터 변수 오차를 보상해주는 PD(Proportional-Derivative) 제어기로 구성된다. 모의 실험을 통해 계산된 토크 제어 기법 및 적응 제어 기법과의 성능 비교를 행하고, 이로써 분산화 제어 기법을 사용했을 때의 추종 능력 및 외란에 대한 강인성이 다른 제어 기법보다 우수함을 보인다.

2. 분산화 시간 지연 제어기

이 절에서는 Hsia *et al.*[5]의 분산화 시간 지연 제어 기법에 대해 알아본다.

로봇 매니플레이터의 운동방정식은 다음과 같은 비선형 미분방정식으로 나타낸다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + F = \tau \quad (1)$$

여기서, $D(q)$ 는 $n \times n$ 의 관성 행렬, n 은 로봇 매니플레이터의 축 수, q 는 $n \times 1$ 의 축 변수 벡터, $C(q, \dot{q})$ 는 $n \times 1$ 의 코리올리스(Coriolis)와 구심력 벡터, $G(q)$ 는 $n \times 1$ 의 중력 벡터, F 는 그 밖에 모델화 되지 않은 힘 즉, 마찰력 및 외란 등을 나타내고, τ 는 $n \times 1$ 의 축에 인가되는 토크 벡터를 나타낸다. 위의 식(1)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\bar{D}\ddot{q} + H(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \tau \quad (2)$$

여기서, \bar{D} 는 요소값이 상수인 $n \times n$ 대각 행렬을 나타내고,

$H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) = (\mathbf{D}(\mathbf{q}) - \bar{\mathbf{D}}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}$ (3)
 이다. 계산된 토크 기법의 접근 방법을 취하면 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau} = \bar{\mathbf{D}}\mathbf{u} + \hat{\mathbf{H}} \quad (4)$$

$$\mathbf{u} = \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_P \mathbf{e} \quad (5)$$

여기서, $\hat{\mathbf{H}}$ 는 H 의 추정값이고, $\ddot{\mathbf{q}}_d$ 는 축의 가속도 목표 궤적이고, $\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$ 는 위치 오차이고, \mathbf{K}_P , \mathbf{K}_D 는 대각 행렬로서 양의 PD 제어기 이득 변수를 나타낸다. 만약 $\hat{\mathbf{H}} \approx H$ 라고 가정한다면, 식(2)와 식(4)로부터 완전히 비간섭화되고 선형화된 다음과 같은 동력학 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{u} \quad (6)$$

위 식(6)은 다음과 같은 오차에 대한 미분 방정식을 내포한다.

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_P \mathbf{e} = 0 \quad (7)$$

또한, $H(t)$ 의 추정값 \hat{H} 를 구하기 위해 식(2)로부터 다음식을 유도한다.

$$\hat{H}(t) = \boldsymbol{\tau}(t) - \bar{\mathbf{D}} \ddot{\mathbf{q}}(t) \quad (8)$$

위 식에서는 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식이 시간에 따라 변화하므로 H 를 시간 함수로 보았다. 여기서 $H(t)$ 가 충분히 짧은 시간 λ 만큼 지연된 신호 $H(t-\lambda)$ 와 매우 근사하다고 가정하면, $\hat{H}(t)$ 는 다음의 관계에 의해 추정 할 수 있다.

$$\hat{H}(t) \approx H(t-\lambda) = \boldsymbol{\tau}(t-\lambda) - \bar{\mathbf{D}} \ddot{\mathbf{q}}(t-\lambda) \quad (9)$$

이 식을 보면 로봇 매니퓰레이터의 토크 입력을 다시 궤환하기 때문에 외란에 의한 토크 변화를 감지하고 대처할 수 있음을 알 수 있다.

식(4), (5), (9)를 종합하면 다음과 같은 제어 입력식을 얻게 된다.

$$\boldsymbol{\tau}(t) = \bar{\mathbf{D}}(\ddot{\mathbf{q}}_d(t) + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}}(t) + \mathbf{K}_P \mathbf{e}(t)) + \boldsymbol{\tau}(t-\lambda) - \bar{\mathbf{D}} \ddot{\mathbf{q}}(t-\lambda) \quad (10)$$

즉, 제어 입력은 변수 오차 보상 루프와 선형화 루프로 이루어져 있다. 여기서, $\bar{\mathbf{D}}$ 는 안정도 판별조건에 의해 결정된다. 안정도 판별은 참고문헌 [5]에 잘 설명되어 있으므로 본 논문에서는 생략한다.

그림 1에 전체 제어시스템의 구성도를 나타내었다.

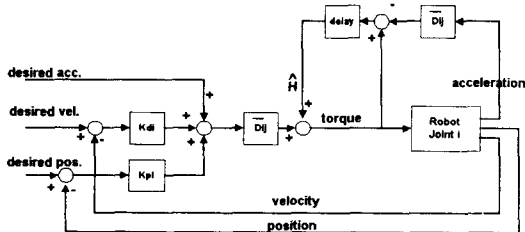


그림 1. 링크 i에 대한 제어 시스템의 구조
 Fig.1. Control system structure for link i

3. 모의 실험 결과

제시된 제어기의 성능을 알아보기 위해 2축 로봇 매니퓰레이터에 적용하여 모의 실험을 행하였다. 로봇 매니퓰레이터를 점질량으로 모델링하고, 계산된 토크 제어 기법, 적응 제어 기법 및 본 논문에서 제시하는 분산화 시간 지연 제어 기법의 성능을 비교하였다.

그림 2에 나타난 로봇 매니퓰레이터의 동력학식은 다음과 같다[6].

$$\begin{aligned} \tau_1 = & ((m_1 + m_2)a_1^2 + m_2 a_2^2 + 2m_2 a_1 a_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 \\ & + (m_2 a_2^2 + m_2 a_1 a_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_2 - m_2 a_1 a_2 (2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2 \\ & + (m_1 + m_2)g a_1 \cos \theta_1 + m_2 g a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & (m_2 a_2^2 + m_2 a_1 a_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + m_2 a_2^2 \ddot{\theta}_2 \\ & + m_2 a_1 a_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + m_2 g a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

여기서, τ_i 는 i 번째 축에 인가되는 토크, m_i 는 i 번째 링크의 질량, a_i 는 i 번째 링크의 길이이고, g 는 중력가속도이다.

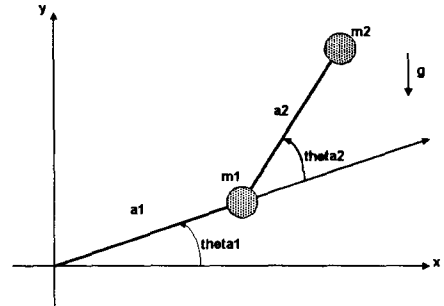


그림 2. 2축 로봇 매니퓰레이터
 Fig.2. Two-link robot manipulator

모의 실험을 위해 쓰여진 2축 로봇 매니퓰레이터의 질량은 1,2 링크 모두 1kg으로 하였고, 링크 길이는 모두 1m로 하였다. 또한 중력가속도는 9.8m/s²이다. 그리고 제어기의 표본시간은 2msec이다.

제시된 제어기에 의해 각 관절이 독립적으로 제어되는지 알아보기 위해 위치에 대한 단위 계단 응답을 알아보았다. 그림 3, 4에 이 응답을 도시하였다. 그림 3은 1축에 단위 계단 입력을 가하고, 2축에는 0을 가할 때의 응답을 나타낸다. 그림 4는 2축에 단위 계단 입력을 가하고, 1축에 0을 가할 때의 응답을 나타낸다. 두 응답에서 각 관절이 거의 독립적으로 제어됨을 알 수 있다.

추종 능력을 알아보기 위해 계산된 토크 제어, 적응 제어와 함께 성능을 비교하였다. 목표 궤적은 도함수와 본 함수의 초기값이 모두 0인 다음과 같은 함수를 사용하였다.

$$\begin{aligned} \theta_{1d}(t) &= -\cos(2\pi t/T) + 1 \\ \theta_{2d}(t) &= -\cos(2\pi t/T) + 1 \end{aligned} \quad (12)$$

그림 5는 식(12)의 목표 궤적을 나타낸다.

그림 6, 7에 무부하에서의 목표 궤적에 대한 3가지 제어기의 추종 오차를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 계산된 토크 제어 기법이 우수한 추종 성능을 나타냄을 알 수 있다. 또한 그림 8은 분산화 제어 기법에 의한 비간섭화 오차를 나타낸다. 초기 상태에서 완전한 비간섭화가 이루어지지 않기 때문에 오차가 생기나, 시간이 지남에 따라 오차가 0으로 수렴함을 알 수 있다.

제시된 제어기의 강인성을 알아보기 위해 5[Nm]의 외란 토크를 인가했을 때의 응답을 알아보았다. 그림 9,10은 3가지 제어기에 외란을 가할 때의 응답을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 계산된 토크 제어 기법은 고려하지 않은 외란에 의해 오차가 수렴하지 않는다. 또한 적응제어 기법은 오차가 주기성을 가지고 반복된다. 그러나 본 논문에서 제시한 분산화 제어 기법은 비록

오차가 수렴하지는 않지만 다른 제어 기법들 보다 적은 오차를 갖는다.

4. 결론

본 논문에서는 분산화 제어 기법을 도입하여 로봇 매니플레이터의 강인 제어를 수행하였다. 계산된 토크 제어 기법 및 적용 제어 기법과의 비교를 통해 제시된 제어 기법이 외란에 대하여 더 강인함을 확인하였다. 제시된 제어 기법은 로봇 매니플레이터의 동력학을 계산할 필요가 없으므로 고속 동작에 요구되는 실시간 제어에 적합하다.

그러나 일반적인 산업용 로봇 매니플레이터는 위치 센서인 광학 엔코더만 가진 것이 대부분이므로, 속도 및 가속도를 위치 정보만으로 추정하는 기법이 필요하다. 따라서 추후에 이를 이용한 제어기 구현 혹은 가속도 경로를 필요로 하지 않는 제어기 개발이 있기를 기대한다.

참고문헌

- [1] J.J. Craig, P. Hsu, and S.S. Sastry, "Adaptive Control of Mechanical Manipulators," *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, pp.190-195, 1986
- [2] O. Egeland, "On the Robustness of the Computed Torque Technique in Manipulator Control," *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1203-1208, 1986
- [3] E.G. Gilbert and I.J. Ha, "An Approach to Nonlinear Feedback Control with Applications to Robotics," *Proc. 22th IEEE Intern. Conf. on Decision and Control*, pp.134-138, 1983
- [4] T.C. Hsia, "Adaptive Control of Robot Manipulators - A Review," *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, pp.183-189, 1986
- [5] T.C. Hsia and L.S. Gao, "Robot Manipulator Control Using Decentralized Linear Time-Invariant Time-Delayed Joint Controllers," *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, pp.2070-2075, 1990
- [6] F.L. Lewis, C.T. Abdallah, and D.M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Pub., 1993
- [7] J.J. Slotine and W. Li, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators," *Intern. Journal of Robotics Research*, pp.49-59, 1987
- [8] T.J. Tarn, A.K. Bejczy, A. Isidori, and Y.L. Chen, "Non-linear Feedback in Robot Arm Control," *Proc. 23rd IEEE Intern. Conf. on Decision and Control*, pp.736-751, 1984
- [9] M. Tarokh, "A Decentralized Nonlinear Three-Term Controller for Manipulator Trajectory Tracking," *Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3683-3688, 1996
- [10] V.I. Utkin, "Variable Structure Systems with Siding Modes," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.AC-22, No.2, pp.212-222, 1977

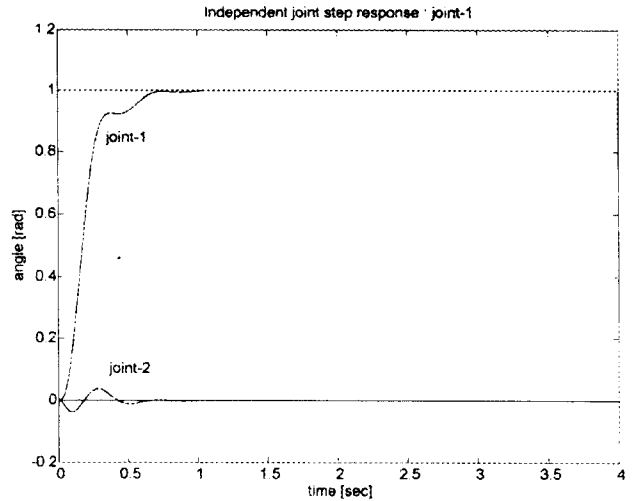


그림 3. 독립 관절 제어 : 1축
Fig.3. Independent joint control : joint-1

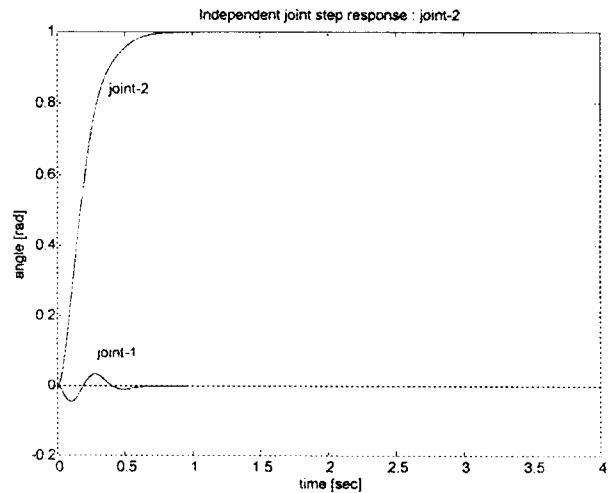


그림 4. 독립 관절 제어 : 2축
Fig.4. Independent joint control : joint-2

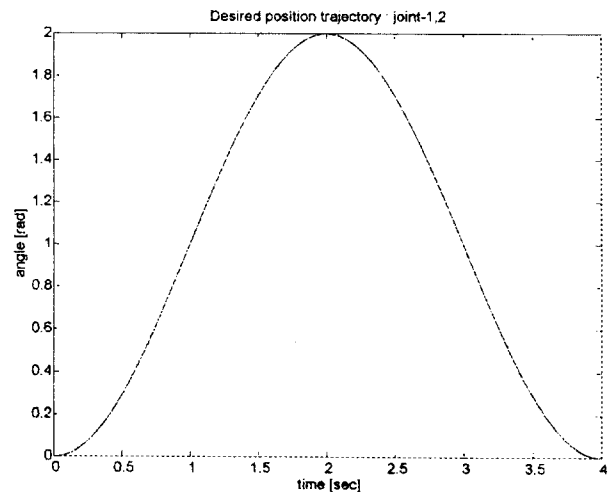


그림 5. 위치에 대한 목표 궤적 : 1,2축
Fig.5. Desired trajectory : joint-1,2

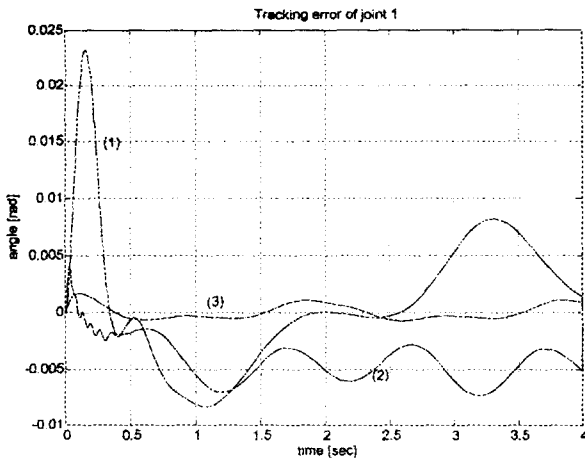


그림 6. 무부하에서의 추종 오차 - 링크 1
 (1)분산화 시간지연 제어 (2)적용제어 (3)계산된 토크 제어
 Fig.6. Tracking errors without payload - link 1
 (1) Decentralized (2) Adaptive (3) Computed torque

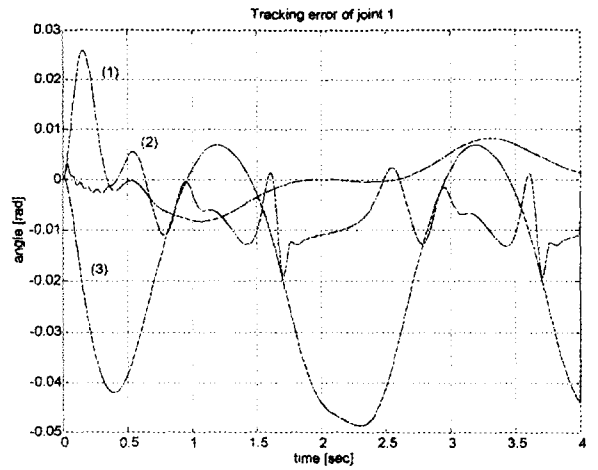


그림 9. 외란에서의 추종 오차 - 링크 1
 (1)분산화 시간지연 제어 (2)적용제어 (3)계산된 토크 제어
 Fig.9. Tracking errors with disturbance - link 1
 (1) Decentralized (2) Adaptive (3) Computed torque

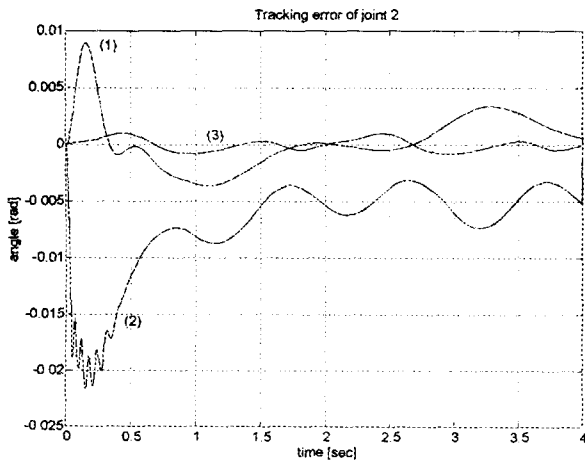


그림 7. 무부하에서의 추종 오차 - 링크 2
 (1)분산화 시간지연 제어 (2)적용제어 (3)계산된 토크 제어
 Fig.7. Tracking errors without payload - link 2
 (1) Decentralized (2) Adaptive (3) Computed torque

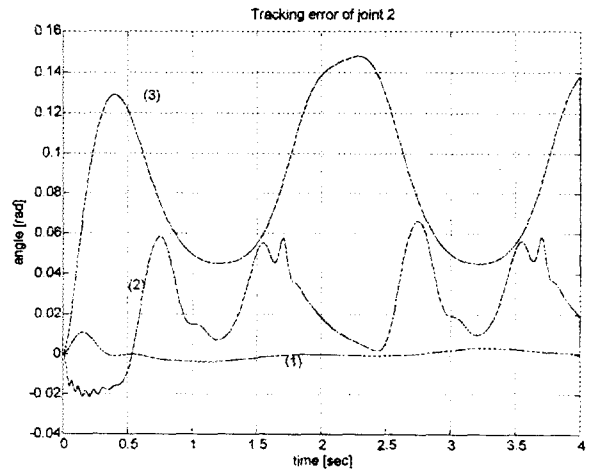


그림 10. 외란에서의 추종 오차 - 링크 2
 (1)분산화 시간지연 제어 (2)적용제어 (3)계산된 토크 제어
 Fig.10. Tracking errors with disturbance - link 2
 (1) Decentralized (2) Adaptive (3) Computed torque

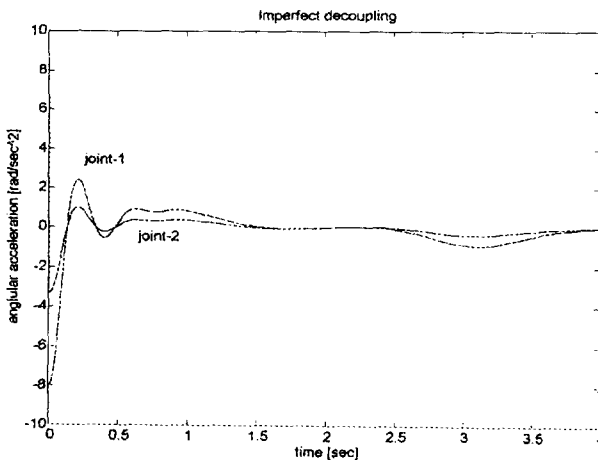


그림 8. 비간섭화 오차
 Fig.8. Decoupling error