

논문 2011-48SC-3-2

단일 링크 머니플레이터들에 대한 위치 동기화 제어

(Position Synchronization Control of Single Link Manipulators)

송 기 원*

(Ki-Won Song)

요 약

다중 구동기로 이루어진 실시간 분산제어시스템으로 전기자동차, 다중 로봇시스템 등을 들 수 있다. 이러한 시스템들에는 여러 개의 프로세서가 필수적으로 요구된다. 시스템 구성요소별로 프로세서를 내장한 제어 기기에는 모듈화, 소형화, 저전력화 및 상호운용가능성과 내고장성이 요구되며, 이를 위해서 제어시스템이 네트워크기반 실시간 분산제어시스템의 형태로 구현될 필요가 있다. 네트워크기반 실시간 분산제어시스템 구현 시 각 구동부간 동기화 문제에 의해 고속, 고정밀 및 고신뢰성을 갖는 것이 어렵다. 동기화 문제의 원인으로는 부하변동, 구동부간 동특성 불일치 및 구동부 제어기기간의 통신에 따른 시간지연을 들 수 있다. 본 연구에서는 연결 부하가 서로 다른 경우와 연결부하 뿐만 아니라 구동 모터의 동역학적 특성도 다른 경우의 단일 링크 머니플레이터에 대하여 외란관측기와 칼만 필터를 이용한 동기화 제어법과 목표치와 실측치 및 실측치들 사이의 에러 백터의 노름에 대한 스칼라 함수를 정의하고 이 함수의 기울기 백터를 최소화시키는 목표궤적을 이용한 동기화제어법을 제시하고 실험을 통하여 그 유용성을 확인한다.

Abstract

Electric vehicles and robots are real-time distributed control systems composed of multiple drive subsystems using micro controller units. Each control subsystem should be modular, compact, power saving, interoperable and fault tolerable in order to be incorporated into the networked real-time distributed control system. Under the networked real-time distributed control the synchronization problem can be occurred to the position and orientation tracking control due to the load variance, mismatch and time delay between the multiple drive subsystems. This paper suggests two types of position synchronization control of the single link manipulators. One of them is composed of cross controller, Kalman filter and disturbance observer, and the other uses the generation of target trajectories to minimize the gradient vector of the scalar function which is composed of the sum of square errors between the reference input vector and the output vectors. The availability of the proposed control schemes is shown through the control experiments.

Keywords : distributed control system, synchronization control, Kalman filter, disturbance observer.

I. 서 론

동기화 제어기술은 동시에 위치 또는 속력과 방향을 목표치와 일치시키는 기술로 휴먼-로봇 간의 인터페이스, 장애인 의료보조기구로서의 의수족 및 전기자동차

의 바퀴구동시스템에 필요한 기술이다. 동기화 제어기술은 양방향 제어방식으로 주-종 방식과 상호 동기식 방식으로 나눌 수 있다. 1990년대부터 Scattering matrix^[1]와 과동변수를 이용한 양방향 제어기법^[2]을 이용하여 통신 네트워크를 통한 양방향 제어 시 네트워크 채널의 수동성을 보장하여 양방향 제어시스템을 안정화시키는 양방향 제어방법이 개발되어 왔다. 주-종 제어방식으로 힘/토크와 위치를 동시에 제어하는 방법에 관한 연구가 활발히 진행되어 발표되었다.^[3] 그러나 주-종 제어방식의 경우는 위치와 힘을 상호간에 전달하는 4채널 방식이 위치와 위치 교환이나 위치와 힘 정보교환

* 평생회원, 가톨릭대학교 정보통신전자공학부
(School of Information, Communications, and Electronic Engineering, The Catholic University of Korea)

※ 본 연구는 한국연구재단의 2010년도 일반연구자지원사업(No. 2010-0012078)에 의하여 수행되었음.
접수일자: 2010년10월22일, 수정완료일: 2011년5월12일

방식에 비해 우수한 성능을 보인다고 알려져 있다.^[4] 주-종 제어방식은 주로 인간-머신 간의 인터페이스를 통한 원격제어에 주로 사용되는 방식이다. 반면 상호 동기식 제어방법은 각각의 목표치에 대한 오차뿐만 아니라 상호간의 실측치 간의 오차라는 개념을 동기화 오차라는 용어를 사용하여 기술하고 개별 목표치와 동기화 오차를 동시에 최소화하는 제어방식이다. 동기화 제어 방식은 주로 협력 작업을 필요로 하는 경우나 다중 구동부를 갖는 시스템을 제어하는 경우에 주로 사용되어져 왔다.

동기화 제어 기법에 관한 연구는 다양한 분야에서 진행되어져 왔다. 그 예로 마스크-패널 얼라인먼트 로봇 시스템 연구^[5], 다중로봇 조립작업을 위한 적응형 동기화 제어연구^[6], 자율주행로봇의 위치동기화 제어에 관한 연구들^[7~9]과, 3자유도 평면 병렬 머니플레이터에 관한 연구들^[10~11]이 수행되었으며, 주-종제어 기법으로 무인 차량의 원격조종에 관한 연구^[12]가 수행되었다.

본 논문에서는 상호간의 협력 작업을 필요로 하는 로봇시스템들이나, 두 개 이상의 모터 구동부를 가질 수 있는 전기자동차시스템과 같이 다중 구동 드라이브를 갖는 시스템에 대한 동기화제어 방법에 관한 연구의 일환으로 구동부하만 서로 다른 경우와 부하는 물론 서로 다른 구동부 동특성을 갖는 한 쌍의 모터 구동 회전 관절형 단일 링크 로봇 매니플레이터에 대하여 위치 동기화 제어법을 제시하고 실험을 통하여 제안된 제어법의 유용성을 보이고자 한다. 본 논문에서 제안한 제어법은 PID 제어기, 출력제한 선형화 기법과 칼만 필터를 이용한 외란관측기를 적용한 동기화 제어 방법^[13]과 상대방의 동적특성을 고려하지 않고도 간단히 목표치와 실측치의 오차에 관한 스칼라 함수를 이용하여 이것의 기울기 백터가 최소가 되도록 하는 기준치 결정법을 이용한 동기화 제어법을 제시하고 실제 실험을 통하여 그 유용성을 보이고자 한다. 따라서 본문에서는 동기화 제어시스템 구성을 위하여 제어시스템에 대한 모델링과 제어기 설계에 관하여 기술한다. 그리고, 개별제어방식과 동기화 제어방식에 의한 제어실험결과를 제시하고 고찰을 통해 성능을 비교 분석한다. 결론에서는 논문의 내용을 종합하고, 추후 과제에 관하여 논한다.

II. 본 론

동기화 제어 기술은 주로 상호 결합된 시스템에서 구

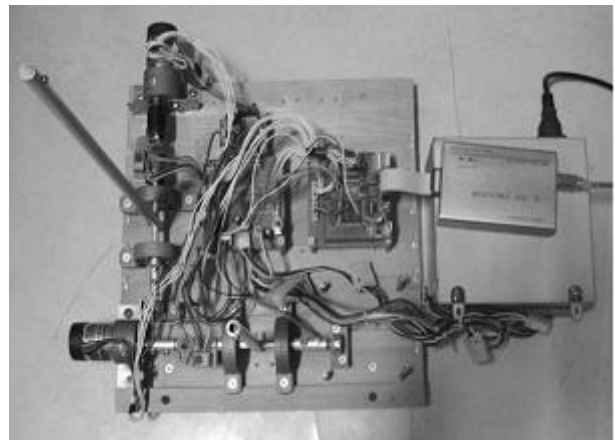


그림 1. 한 쌍의 단일링크 머니플레이터의 동기화제어 실험 장치

Fig. 1. Experimental setup of synchronization control of a pair of single link manipulators.

동부 간의 위치나 속도의 동기를 맞추거나 협력 작업을 하는 다중 로봇들 간의 위치나 속도제어에 주로 사용되었다. 부하가 다른 경우, 부하뿐만 아니라 구동부 간 서로 다른 동특성을 갖는 경우나 다중협력 작업을 하는 로봇들 간의 동기화 제어를 하는 경우에 서로 다른 형상에 따른 동기화 제어에 대한 연구를 진행할 필요가 있다.

협력 작업을 하는 로봇들 간의 형상이 다름에 따른 동기화 문제나 구동부 각각에 걸리는 부하의 차이에 따른 동기화 문제를 고려하기 위해 본 논문에서는 동일한 모터에 기어비가 서로 같고 부하만 다른 경우와 기어비와 연결된 부하가 서로 다른 단일 링크 머니플레이터를 제어 대상으로 하였다. 그림 1에 실험실에서 제작한 제어 대상을 나타내었다. 제시된 제어대상에 대하여 동기화 제어시스템을 구성하기 위하여 먼저 각 제어대상의 모델링을 수행하였다.

두 머니플레이터의 구동방식이 같고 구성부분의 연결방식이 같기 때문에 식 (1)의 간략한 모델로 기술하였다.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + f(e, \dot{\theta}, \tau) + mgl \sin\theta = \tau \quad (1)$$

PID제어기를 구현할 때, 비선형 항목인 중력의 영향항목과 정지-미끄럼 마찰력 항목은 출력 선형화 기법을 이용하여 보상하는 방법을 택하였다. 식(1)의 우변 항에 인가될 제어 입력 u 는 비선형 항목들에 대한 보상 항목들, 제어대상의 위치 입력과 목표 위치 및 목표속도를 포함한 형태로 구성되도록 식(2)의 형태로 결정하였다.

$$\hat{J}\ddot{\theta}_d + \hat{b}\dot{\theta}_d/\hat{J} + K_D\dot{e} + K_P e + K_I \int e + f(e, \theta, \tau) + mgl \sin \theta = u \quad (2)$$

(2)식에서 K_P 는 비례이득, K_D 는 미분이득, K_I 는 적분이득을 나타내며, θ_d 는 목표위치를, e 는 목표위치와 실측치간 오차이고, 매개변수에 ‘^’이 씌워진 것은 사전 실험을 통해 결정한 매개변수의 공칭값을 의미한다. 시스템의 매개변수를 정확하게 규명하는 것은 어렵지만 시스템 매개변수가 정확하다고 가정하면 오차 동력학은 식(3)의 형태가 될 것이다.

$$\ddot{e} + (b/J + K_D)\dot{e} + K_P e + K_I \int e = 0 \quad (3)$$

동기화 제어를 설계하기 전에 각각의 머니플레이터에 대하여 계단응답특성을 고려하여 각각의 공칭 파라미터 값들을 결정하였고, 정현과 추종응답 실험을 통해 PID제어를 설계하였다. 그 결과 표 1에 대략적인 등가의 매개변수와 PID제어기 이득을 표로 나타내었다.

이상과 같이 개별 머니플레이터의 제어를 설계하고 실험을 수행하게 되면 각각의 머니플레이터의 동특성이 완전히 일치하지 않기 때문에 동기화 오차 $\varepsilon = \theta_1 - \theta_2$ 가 존재하게 된다. 따라서 이를 동기화 제어에 반영할 필요가 있다.

동기화 오차를 100% 그대로 반영하게 될 경우, 기존 목표치 θ_d 에 상대편 머니플레이터의 실제 위치가 더해지게 되는데 이럴 경우 개별 머니플레이터 출력에 더해지는 센서 고주파 잡음이나 개별 제어 시 출력되는 감쇠 진동이 목표치에 부과되는 현상이 발생하여 상호간에 불필요한 진동을 야기하게 되고 이로 인해 제어시스템의 불안정성과 제어정밀도의 하락 및 제어 대상의 기계적인 손상을 초래할 수 있다. 이를 방지하기 위해 적절한 조치가 필요하게 되는데, 센서 잡음의 영향을 최소화하기 위해 칼만 필터를 이용하고,

표 1. 제어대상의 매개변수와 제어기 이득
Table 1. Parameters of the plant and gains of the controller.

매개변수	머니플레이터1	머니플레이터2
\hat{J}	0.31	0.13
\hat{b}	1.0	1.0
$\hat{m}gl$	170	17
K_P	24	40
K_D	3.2	4.8
K_I	0.1	0.1

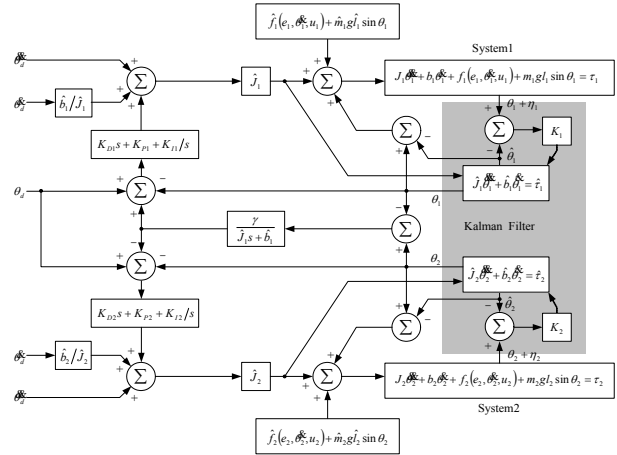


그림 2. 단일링크 머니플레이터들에 대한 동기화제어시스템 블록선도

Fig. 2. Block diagram of synchronization control system of the single link manipulators.

출력에 나타나는 감쇠 진동에 따른 영향을 줄이기 위해 이득계수 ($0 < \gamma < 1$)를 도입하면, 머니플레이터 1의 목표치 θ_{d1} 은 $\theta_d + \gamma \theta_2$ 로 대체 된다.

또한 실제 매개변수와 공칭 모델의 매개변수가 완벽히 일치하지 않고 비선형항목에 대한 정확한 보상이 이루어지기 어렵기 때문에 추가적으로 실제 제어대상과의 모델링 오차에 의한 결과를 외란으로 간주하고 이를 보상하는 방법으로 칼만 필터의 출력과 실제 출력과의 차이를 개별 머니플레이터의 공칭 대역폭과 비슷한 저역 통과 필터를 통과시켜 제어입력을 보상하는데 이용한다. 이에 대한 동기화 제어시스템의 블록선도를 그림 2에 제시하였다.

다른 방법으로 목표치를 변경하여 동기화 제어를 구현하는 방법을 생각해보면, 다음의 (4)식으로 표현되는 동기화 오차 벡터간의 관계로부터 추종오차와 동기화 오차 벡터에 관한 스칼라 함수는 (5)식으로 정의된다.

$$\mathbf{F} = (\mathbf{P} - \mathbf{b}_1) + (\mathbf{b}_2 - \mathbf{P}) + (\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2) = \mathbf{b} \quad (4)$$

$$f(r, \theta_1, \theta_2) = (r - \theta_1)^2 + (\theta_2 - r)^2 + (\theta_1 - \theta_2)^2 = |\mathbf{P} - \mathbf{b}_1|^2 + |\mathbf{b}_2 - \mathbf{P}|^2 + |\mathbf{b}_1 - \mathbf{b}_2|^2 \quad (5)$$

여기서, $r = \theta_d$ 이다.

(5)식으로 표현되는 스칼라 함수 f 의 기울기 ∇f 는 (6)식으로 표현될 수 있다.

$$\nabla f = 2\{(2r - \theta_1 - \theta_2)\mathbf{1}\}^T + \{-r + 2\theta_1 - \theta_2\}\mathbf{j}^T + \{-r - \theta_1 + 2\theta_2\}\mathbf{k}^T \quad (6)$$

∇f 는 각각의 목표치 추종오차와 동기화오차의 제곱에러의 합을 나타내는 스칼라 함수 f 의 최대 증가 방향을 의미하므로 ∇f 가 0 벡터가 되는 조건을 구하면 다음의 (7-9)식으로 표현된다.

$$r = 0.5(\theta_1 + \theta_2) \tag{7}$$

$$\theta_1 = 0.5(r + \theta_2) \tag{8}$$

$$\theta_2 = 0.5(r + \theta_1) \tag{9}$$

(7-9)식들 중 두 식이 만족되면 나머지 하나의 식은 당연히 만족된다. (8)식과 (9)식을 통해 θ_1 과 θ_2 의 목표치 θ_{d1} 과 θ_{d2} 는 (11)식과 (12)식으로 결정할 수 있다. 위와 같은 논리를 (7)식에 적용하면 목표치는 두 출력 값의 평균으로 결정되어야 한다. 그러나 출력변수의 초기값이 모두 0이면 목표치도 0이 되므로 제어기의 출력은 0이 되어 원하는 제어동작을 수행하지 않을 수 있다. 따라서 새로운 목표치 $_{new}r$ 를 결정하는 방법으로 원래의 목표치 r 에 이것과 각 구동기의 출력의 합을 평균한 것의 오차를 더하여 구하는 방법을 적용하면 새로운 목표치는 (10)식으로 표현된다.

$$_{new}r = 2r - 0.5(\theta_1 + \theta_2) \tag{10}$$

$$\theta_{d1} = 0.5(_{new}r + \theta_2) = r - 0.25\varepsilon \tag{11}$$

$$\theta_{d2} = 0.5(_{new}r + \theta_1) = r + 0.25\varepsilon \tag{12}$$

여기서 $\varepsilon = \theta_1 - \theta_2$ 이다.

위의 식 (10-12)들을 살펴보면 목표치와 자신 및 상대방 머니플레이터의 실측치에 가중치가 곱해져 반영되어 있음을 알 수 있다. 따라서 각각의 머니플레이터에 대하여 식(13)과 같은 마찰력과 중력의 영향을 보상한 PID 제어를 사용하여 제어실험이 수행될 수 있다.

$$\hat{J}_i(\ddot{\theta}_{di} + \hat{b}_i\dot{\theta}_{di}/\hat{J}_i + K_{Di}\dot{e}_i + K_{Pi}e_i + K_{Fi}\int e_i) + f_i(e_i, \dot{\theta}_i, \tau_i) + m_i g l_i \sin\theta_i = u_i \tag{13}$$

여기서, 아래첨자 i 는 머니플레이터에 임의로 붙여진 번호를 의미한다.

위와 같은 동기화 제어방법을 동일한 목표치 r 를 추종하는 $n(>1)$ 개의 머니플레이터에 대하여 확장하면 다

음의 식들로 표현될 수 있다.

$$_{new}r = 2r - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \tag{14}$$

$$\theta_{di} = 0.5_{new}r + \frac{1}{2(n-1)} \left(\sum_{l=1}^{i-1} \theta_l + \sum_{l=i+1}^n \theta_l \right) \tag{15}$$

위의 두 식으로 결정되는 기준치를 적용하면 복잡한 동기화제어 알고리즘을 도입하지 않고도 효과적인 동기화 제어가 가능하다.

III. 실험 및 고찰

동기화제어실험은 그림 2에 제시한 제어시스템과 식 (10-12)로 목표치가 주어지는 제어시스템의 성능을 평가하기 위해 개별적인 제어방법과 동기화제어방법을 적용한 실험을 수행하였다. 개별적인 제어방법으로 입출력선형화 기법을 적용하고 케환 출력에 칼만 필터를 이용한 PID 제어 실험을 수행하였다. 그림 2의 블록선에 제시된 동기화 제어방법으로 케환 출력에 칼만 필터 출력을 이용하고 동기화 제어를 병렬로 사용한 실험과 추가적으로 외란관측기까지 적용한 실험을 수행하였다. 또한 식(10-12)로 목표치가 주어지는 제어실험도 아울러 수행하였다. 제어기의 구현에 TMS320LF2406A DSP 칩을 사용하였으며 실험 수행에 사용한 서보율은 그림 3과 그림 4의 경우 50[Hz]로 하였다. 그림 2에 제시된 제어구조를 이용하여 동기화 제어 수행 시 이득계수는 $\gamma=0.5$ 로 하였다. 머니플레이터 제어 시 약간의 진동이라도 나타나는 경우 모터에 부착된 홀 센서의 펄스 출력만으로는 모터에 부착된 기어의 백래시에 의한 영향과 모터와 부하와의 연결커플링의 스프링효과를 측정하기 어렵기 때문에 부하 축에 가변저항을 연결하여 이 값을 AD변환한 후, 홀 센서 펄스출력과 평균하여 사용하였다. 가변저항으로부터의 위치출력에 잡음이 발생하는 경우를 대비하여 칼만 필터를 사용하였다.

그림 3-10에 실제 수행한 제어결과들을 나타내었다. 그림 3-5에는 기어비가 100:1과 30:1인 모터를 사용했을 때의 실험결과들을 나타낸 것이다. 그림 3은 개별제어 방식의 결과를 나타내었으며, 그림 4에 외란관측기 없는 경우의 제어실험 결과를 나타내었다. 그림 5에는 그림 2의 제어구조를 갖는 동기화제어 방식의 실험결과를 나타내었다. 그림 3과 4, 5를 비교하였을 때 오차의

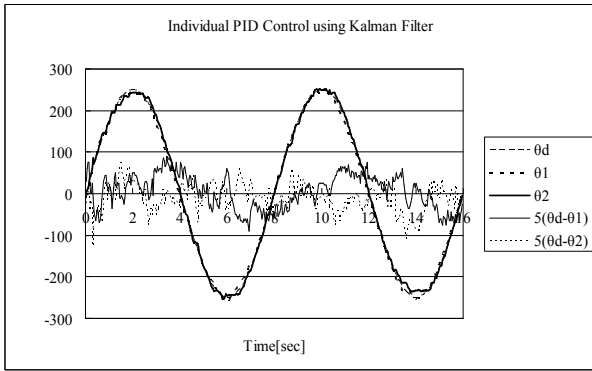


그림 3. Kalman filter를 사용한 개별 PID 제어 실험결과
Fig. 3. Experimental result of individual PID control using Kalman filter.

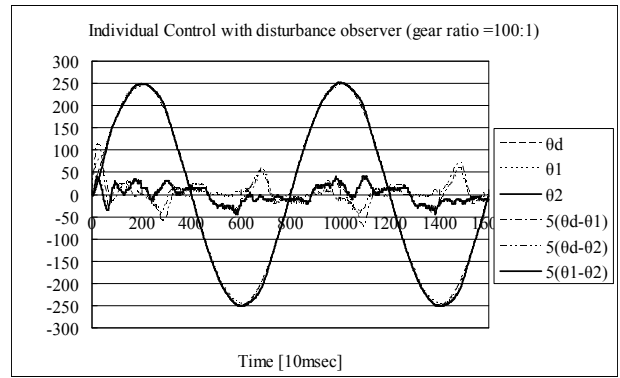


그림 6. 모터 기어비는 100:1로 같고 부하만 다른 경우 개별 PID 제어 실험결과
Fig. 6. Experimental result of individual PID control in the case of different load but the same motor gear ratio 100:1.

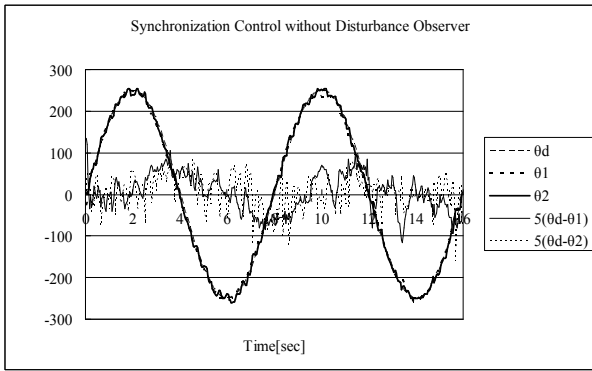


그림 4. 외란관측기가 없는 경우 동기화 제어 실험 결과
Fig. 4. Experimental result of synchronization control using Kalman filter without disturbance observer.

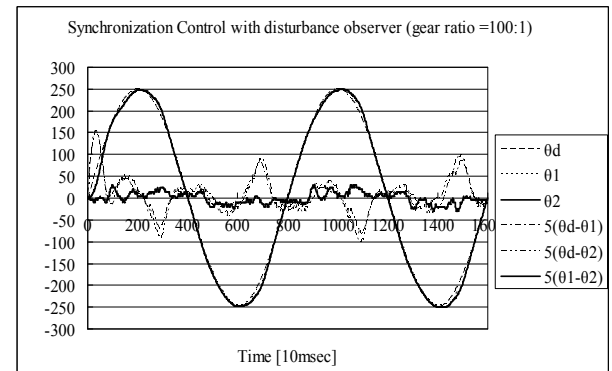


그림 7. 모터 기어비는 100:1로 같고 부하만 다른 경우 그림 2의 제어구조를 이용한 동기화 제어 실험 결과
Fig. 7. Experimental result of synchronization control with the control scheme Fig. 2 in the case of different load but the same motor gear ratio 100:1.

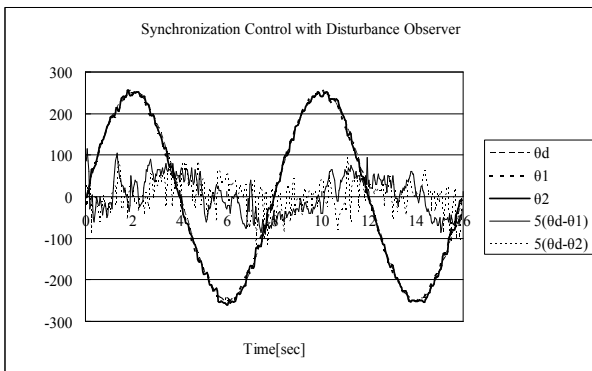


그림 5. 외란관측기를 이용한 동기화 제어 실험 결과
Fig. 5. Experimental result of synchronization control using Kalman filter with disturbance observer.

최대치에는 큰 차이가 없지만 개별제어방식보다 동기화 제어방식이 회전 방향이 바뀌는 부분에서 동기화 오차를 감소시키기 위해 관성이 작은 머니플레이터가 상대적으로 관성이 큰 머니플레이터 궤적을 추종하고 있음을 알 수 있다.

그림 4와 그림 5를 비교해 보면 동기화 제어기에 추가로 외란 관측기를 사용하면 외란관측기가 없을 때보다 향상된 동기화 제어 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 외란 관측기를 사용한 경우 마찰이나 중력항에 대한 보상의 부정확성과 시스템 매개변수의 부정확성에 의한 영향을 적절히 보상해주기 때문인 것으로 판단된다.

그림 6-10에 서보율을 100[Hz]로 높인 상태에서 부하조건만 다른 경우와 부하조건과 기어비가 모두 다른 경우에 대한 동기화제어 실험결과들을 나타내었다. 그림 6-8에는 모터에 연결된 링크 부하만 다른 경우의 실험결과를 나타내었다. 그림 8에 보이는 식(10-12)에 의한 동기화제어 결과가 그림 6의 개별제어 결과나 그림

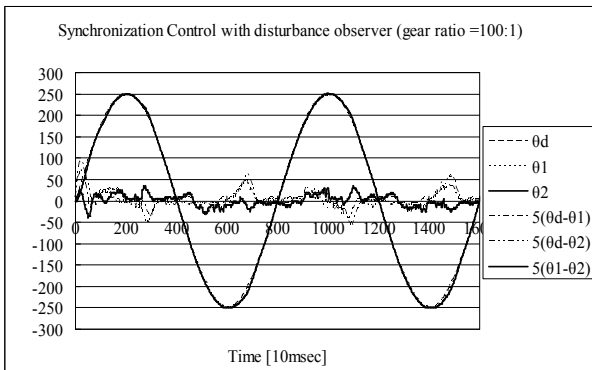


그림 8. 모터 기어비는 100:1로 같고 부하만 다른 경우 식(10-12)에 의한 동기화 제어실험 결과

Fig. 8. Experimental result of synchronization control with the equations (10-12) in the case of different load but the same motor gear ratio 100:1.

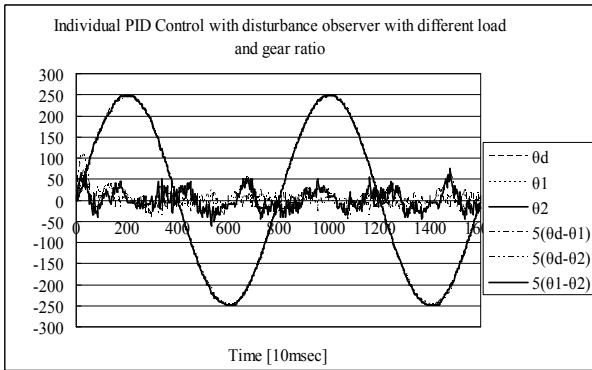


그림 9. 모터 기어비가 100:1, 30:1로 다르고 부하도 다른 경우 개별 PID 제어 실험결과

Fig. 9. Experimental result of individual PID control in the case of different load and motor gear ratio.

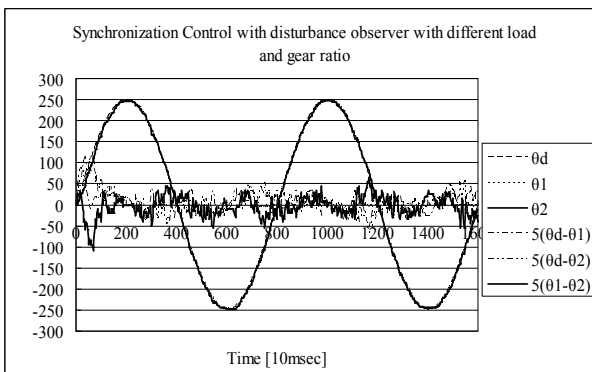


그림 10. 모터 기어비가 100:1, 30:1로 다르고 부하도 다른 경우 식(10-12)에 의한 동기화 제어실험 결과

Fig. 10. Experimental result of synchronization control with the equations (10-12) in the case of different load and different motor gear ratio.

7에 보이는 그림 2의 동기화제어 결과보다 동기화 제어 성능이 우수함을 나타내고 있다.

그림 9-10에는 링크 부하와 모터의 기어비가 모두 다른 경우의 실험결과를 나타내었다. 링크부하와 모터의 기어비가 모두 다른 경우에는 오차의 최대값 비교 관점에서 그림 10의 동기화제어 결과가 그림 9의 개별 제어결과에 비해 향상된 동기화 제어성능을 나타내지 못하였다. 이러한 결과가 나타나게 된 원인 중의 하나로 30:1 모터의 경우 엔코더의 해상도가 100:1 모터에 비해 1/3로 낮아서 개별제어 시 얻을 수 있는 추종제어 정밀도가 낮기 때문인 것으로 예상된다.

왜냐하면, 그림 6-8의 결과에서 보듯이 부하조건만 다르게 하고 동일한 100:1 기어비를 갖는 모터를 사용하여 제어실험을 수행했을 때는 에러벡터의 제곱노름 합으로 나타낸 스칼라함수의 기울기 벡터를 0벡터로 하는 목표치를 이용한 동기화제어방식의 동기화제어 결과가 그림 2에 제시된 제어방식과 개별제어방식 보다 향상된 동기화제어 성능을 나타내었으나 30:1 기어비를 갖는 모터를 사용한 경우의 실험결과 추종계적 Θ_2 는 서보유에 상관없이 기어비가 100:1인 모터를 사용한 머니플레이터의 경우에 비해 계적의 잔진동 진폭이 크고 발생빈도가 높으며, 개별제어에 비해 동기화제어의 성능향상이 두드러지게 나타나지 않았기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 부하만 다른 경우와 동역학 특성이 서로 다른 경우의 단일링크 머니플레이터의 위치동기화제어에 관하여 연구하였다. 동일한 목표치를 갖는 경우 목표치 추종오차와 개별 출력 사이의 동기화 오차 벡터들의 제곱노름 합으로 나타낸 스칼라함수의 기울기 벡터를 0벡터로 하는 목표치를 이용한 동기화제어법을 제시하였다. 출력 제한 선형화기법과 PID제어기를 이용한 개별제어방식보다 상대방의 출력을 활용하여 서로의 출력간의 오차를 동시에 제어하는 제안된 동기화 제어방식이 동기화 제어성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 개별 제어기가 안정하고 고장이 발생하지 않는다면 본 논문에서 제시한 오차 벡터들의 제곱노름 합으로 나타낸 스칼라함수의 기울기 벡터를 0벡터로 하는 목표치를 이용한 동기화제어법은 구동부 상호간의 동특성에 대한 파악과 이에 대한 복잡한 계산을 요구하지 않고 효율적인 동기화 제어를 수행할 수 있는 좋은 방법이 될 수

있으며, 특히 서로 같은 구동부를 갖고 부하만 변동하는 시스템의 속도 동기화 제어에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

한편, 일반적으로 동기화 제어에는 위치동기화 뿐만 아니라 힘이나 토크 그리고 속도와 위치를 동시에 동기화 제어해야 하는 경우가 많기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 다중 구동부를 갖는 응용 분야에 적용 시 여러 개의 제어기가 필요하게 되고 서로 분산되어 네트워크로 연결된 상태에서 동기화 제어되어야 하는 경우가 발생하게 되는데 이럴 경우 네트워크상에서 정보전달시 정보누락이나 시간지연에 의한 제어 문제를 해결해야 한다. 적용되는 네트워크의 전달특성에 따라 고정된 시간지연 문제로 될 수도 있고, 그렇지 않을 경우도 존재하기 때문에 이는 추후 연구과제로 한다.

참고 문헌

- [1] J. Edward Colgate, "Robust Impedance Shaping Telemanipulation", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 4, pp. 374-384, 1993.
- [2] Neal A. Tanner, Günter Niemeyer, "High-Frequency Acceleration Feedback in Wave Variable Telerobotics", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 11, no. 2, pp. 119-127, 2006.
- [3] 배영결, 최호진, 정슬, "원격제어 시스템의 종로봇인 이동 로봇의 제작과 힘 추종 제어 구현", *제어·로봇·시스템학회논문지*, 16권 7호, pp. 681-687, 2010.
- [4] Iñaki Aliaga, Ángel Rubio, Emilio Sánchez, "Experimental Quantitative Comparison of Different Control Architectures for Master-Slave Teleoperation", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 2-11, 2004.
- [5] 정해민, 권상주, 이상무, "여유 구동 병렬기구를 이용한 마스크-패널 얼라인 로봇 시스템", *제어·로봇·시스템학회논문지*, 15권 9호, pp. 887-893, 2009.
- [6] Dong Sun, James K. Mills, "Adaptive Synchronized Control for Coordination of Multirobot Assembly Tasks", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 4, pp. 498-510, 2002.
- [7] L. Feng, Y. Koren, J. Borenstein, "Cross-Coupling Motion Controller for Mobile Robots", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 6, no. 7, pp. 35-43, 1993.
- [8] L. Feng, Y. Koren, J. Borenstein, "A Model-Reference Adaptive Controller for a Differential-Drive Mobile Robot", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 3091-3096, 1994.
- [9] Dong Sun, Gang Feng, Chi Ming Lam, Haining Dong, "Orientation Control of a Differential Mobile Robot Through Wheel Synchronization", *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, vol. 10, no. 3, pp. 345-351, 2005.
- [10] Lu Ren, James K Mills, Dong Sun, "Experimental Comparison of Control Approaches on Trajectory Tracking Control of a 3-DOF Parallel Robot", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 5, pp. 982-988, 2007.
- [11] Lu Ren, James K. Mills, Dong Sun, "Trajectory Tracking Control for a 3-DOF Planar Parallel Manipulator Using the Convex Synchronized Control Method", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 613-623, 2008.
- [12] 이태곤, 유지환, "원격지 현장감을 향상시키기 위한 무인차량 원격조종에 관한 연구", *제어·로봇·시스템학회논문지*, 16권 6호, pp. 553-558, 2010.
- [13] 송기원, "단일링크 머니플레이터들에 대한 동기화제어", *2010 정보 및 제어 학술대회논문집*, pp. 89-90, 22 October, 2010.

저 자 소 개



송 기 원(평생회원)

1994년 서울시립대학교 제어계측 공학과 학사 졸업.

1996년 서울시립대학교 제어계측 공학과 석사 졸업.

2003년 서울시립대학교 전자전기 공학부 박사 졸업.

2004년~2005년 대한상의 전북인력개발원

2005년~2007년 청주대 전자정보공학부

2007년~2011년 가톨릭대 성심교정 정보통신전자 공학부

2011년~현재 기계연구원 로봇·메카트로닉스연구 센터

<주관심분야 : 메카트로닉스, 분산제어, 임베디드 시스템 응용>