

여유 자유도에 대한 조종력 배분을 통한 원격작업용 서보 매니플레이터의 내고장 제어

論 文
53D-4-5

Fault Tolerant Control of a Servo Manipulator for Teleoperation by Control Allocation to Redundant Joints

陳宰鉉* · 朴炳錫** · 安聖鎬** · 尹智燮**
(Jaehyun Jin · Byung-Suk Park · Sung-Ho Ahn · Ji Sup Yoon)

Abstract - In this paper, fault tolerant mechanisms are presented for a servo manipulator system designed to operate in a hot cell. A hot cell is a sealed and shielded room to handle radioactive materials, and it is dangerous for people to work in the hot cell. So, remote operations are necessary to handle the radioactive materials in the hot cell. KAERI has developed a servo manipulator system to perform such remote operations. However, since electric components such as servo motors may fail by radiation, fault tolerant mechanisms have to be considered. For fault tolerance of the servo manipulator system, duplication mechanism increasing the reliability of the transport's driving motors and reconfiguration algorithm accommodating the slave's motor failure have been presented. The reconfiguration algorithm recovering the end effector's motion in spite of one motor's failure is based on control allocation redistributing redundant axes. The constrained optimization method and pseudo inverse method have been adopted for control allocation. Simulation examples and real test results have been presented to verify the proposed methods.

Key Words : Fault tolerant control, servo manipulator, redundant joints, control allocation, pseudo inverse

1. 서 론

원격작업이란 사람이 작업하기 어려운 환경에 사람을 대신한 장비를 투입하여 필요한 작업을 수행하는 것을 의미하며, 우주, 해저, 및 원자력 분야 등에 적용되고 있다. 특히 원자력 분야에 있어서 차폐된 핫셀(hot cell)에서 방사능 물질을 취급하는 원격작업은 중요하면서도 일상적으로 이루어진다. 원격작업은 로봇 작업과 달리 작업자가 원격지에서 수행되는 작업을 육안 혹은 카메라로 모니터링 하면서 마스터 조작기(이하 마스터로 지칭)로 슬레이브 조작기(이하 슬레이브로 지칭)를 조종한다. 원자력 분야의 원격작업에는 1940년대부터 기계식 마스터/슬레이브 조작기(MSM, mechanical master slave manipulator)를 개발하여 사용해 왔으며, 현재에는 서보 제어기술을 이용한 서보 매니플레이터(servo manipulator)를 사용하고 있다. 기존의 MSM은 핫셀 콘크리트 벽에 고정되어 있기 때문에 슬레이브의 작업영역이 한정되어 있으며, 작업자는 반드시 핫셀 남 유리창 앞에서 마스터를 움직여 슬레이브를 조종하여야 한다. 그러나, 서보 매니플레이터는 멀리 떨어진 곳에서 카메라 모니터를 보면서 조종할 수 있으며, 슬레이브를 이송장치에 연결하면 작업영역을 크게 확장할 수 있다. 현재는 규모가 큰 핫셀에

서는 MSM과 서보 매니플레이터를 병행하여 사용하고 있으며, MSM의 설치가 불가능한 영역에서는 이동식의 서보 매니플레이터만을 사용하기도 한다(핵융합로의 유지보수, <http://www.jet.efda.org>). 한국원자력연구소에서는 핫셀내의 원격 작업용 서보 매니플레이터 시스템을 개발하여 시험중에 있다.

한편, 핫셀내의 방사능 물질은 방사선을 방출하는데, 여기에 오랫동안 노출되는 전기 부품은 열화되어 고장나게 된다 [1]. 따라서 전기 부품으로 구성된 서보 매니플레이터를 설계할 때는 항상 고장을 고려하여야 한다. 가장 중요한 전기 부품은 서보 모터이며, 이에 대한 내고장성은 반드시 고려되어야 한다. 매니플레이터의 모터 고장에 대응하는 내고장 설계는 오랫동안 연구되어 온 주제이며, 우주 및 극한 환경에서 사용되는 매니플레이터에는 필수적이다. Vinsky 등은 [2,3] 이와 관련하여 고장분석, 내고장 설계, 및 고장검출의 세 가지 범주로 구분하고 각각에 대한 기존의 연구내용을 소개하였다. 고장분석은 FTA(fault tree analysis)와 FMECA(failure mode, effect, and criticality analysis)를 이용하여 발생 가능한 고장에 대한 분석을 소개하였다. 고장의 형태에 따라 대응하는 방법과 알고리즘이 달라지기 때문에 정확한 고장분석은 중요한 첫걸음이다.

내고장 설계는 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법으로 구분할 수 있다. 하드웨어적인 방법은 부품 등의 이중화를 통해 시스템의 신뢰도를 높이는 것이다. Wu 등은 [4] 스페이스 셔틀에서 원격작업용으로 사용되는 매니플레이터의 내고장성을 위해 차동장치를 이용한 구동 모터의 이중화 방안을 제시하였다. Hooper 등은 [5] 4단계의 시스템 설계방

* 正 會 員 : 韓國原子力研究所 前任研究員 · 工博

** 正 會 員 : 韓國原子力研究所 責任研究員 · 工博

接受日字 : 2003年 12月 19日

最終完了 : 2004年 2月 10日

안을 제시하였는데, 각각 구동기 이중화(dual redundant actuators), 병렬구조 모듈(parallel structured modules), 직렬 여유 자유도(redundant serial manipulators), 복수 팔(multiple arm systems) 등이다. 한편 소프트웨어적인 방법은 고장 이후에 제어법칙의 적절한 조정을 통하여 계속적으로 양호한 제어 성능을 낼 수 있도록 한다. 참고문헌 [6-9]에서는 임의의 고장에 대해서도 dexterity를 최대화할 수 있도록 형상을 제어하는 방안을 제안하였다. 고장이 발생하여 관절이 정지한(locked) 상태에서 dexterity가 낮아질 수 있는데, 이를 사전에 방지할 수 있는 기법이다. Liu[10]는 구동기의 성능저하에 대해 적응제어 기법을 이용한 방법을 제안하였다. Shin 과 Lee[11]는 구동기 고장의 경우를 부족구동기(underactuated) 매니플레이터로 간주하였으며, 각각의 관절의 위치추종 제어를 설계하였다. Ting 등은[12] 여유 자유도 매니플레이터의 고장을 다루었으며, 토크를 재분배하는 방안을 제시하였다.

고장검출은 계속적으로 매니플레이터의 상태를 모니터링 하면서 고장의 발생여부를 판단하는 것이다. 고장검출을 위해서도 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법으로 분류할 수 있는데, 하드웨어적인 방법은 다중의 센서를 장착하여 각각의 센서값을 비교하는 것으로 센서의 고장검출에 많이 이용되고 있다. 소프트웨어적인 방법은 시스템의 운동방정식을 이용하는 해석적인 방법으로 운동방정식의 해와 실제 출력과의 parity를 체크하여 고장발생을 판단한다. 최근에는 매니플레이터 해석모델의 강인성 문제에 많은 연구가 수행되고 있다[13].

본 논문에서는 두 번째 범주에 속하는 서보 매니플레이터의 내고장 설계 문제를 다룬다. 제어 대상인 슬레이브는 이송장치에 부착되어 있기 때문에 이송장치의 자유도를 여분의 자유도로 간주할 수 있으며, 이를 이용하여 슬레이브의 모터 고장에 대응할 수 있도록 한다. 모터가 고장이 나면 그 모터는 고장난 위치에서 고정(lock)이 되고, 그에 대한 위치 혹은 속도 지령값은 나머지 모터들에게 적절히 재분배하여야 한다. 이를 위해서 제어법칙을 수정하여야 하는데 이를 재형상(reconfiguration)이라고 한다. 재형상의 대표적인 방법으로 의사 역행렬(pseudo inverse)을 많이 사용하는데[9], 쉽게 적용할 수 있으며 계산이 복잡하지 않다. 본 논문에서는 의사 역행렬을 적용할 때 속도 한계를 고려하여 각 축의 특성(능력)에 맞게 배분하는 방안을 고려하였다. 또한, 구속 최적화 기법(constrained optimization)을 고려하였다. 구속 조건으로는 각 관절의 속도 및 각도 제한이 되며, 최적화 함수는 마스터와 슬레이브 끝단의 속도차이가 된다. 이는 고장이 발생하더라도 작업자가 조종하는 마스터 끝단의 움직임을 추종하려는 것이며, 이때 관절의 허용 속도 및 각도 제한을 고려하여 최적의 관절속도를 구하는 것이다. 시물레이션을 통해서 의사 역행렬 기법과 최적화 기법을 비교하였으며, 실험을 통해서 의사 역행렬 기법을 구현하였다.

2. 서보 매니플레이터 시스템

2.1 기계 시스템 구성

서보 매니플레이터 시스템은 이송장치, 슬레이브, 마스터

로 구성되며, 전체적인 형상은 그림 1과 같다.

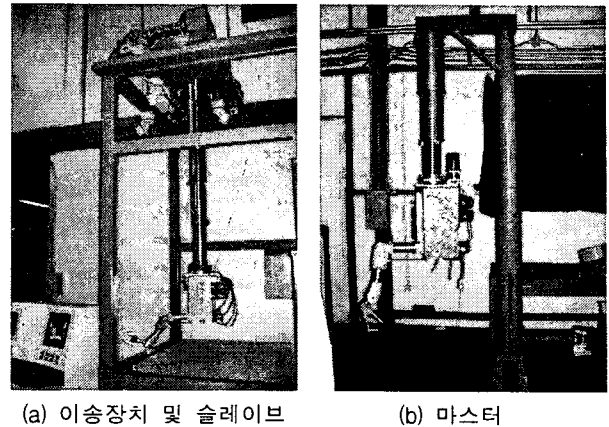


그림 1 서보 매니플레이터 시스템

Fig. 1 Servo manipulator system developed by KAERI

이송장치는 거더/트롤리/텔레스코픽 튜브로 구성되어 X, Y, Z의 3차원 운동을 하며, 튜브 하단에 부착된 슬레이브를 핫셀내 임의의 지점에 위치시킬 수 있다. 이송장치의 구동원은 서보모터이며, 구동모듈의 신뢰도를 높이기 위하여 이중화 구조를 택하였다. 이중화 방법은 그림 2와 같이 구동모터와 여유 모터를 같은 축으로 연결하였으며, 정상상태에서는 구동 모터로 운전하고 고장이 나면 여유 모터로 전환하게 된다.

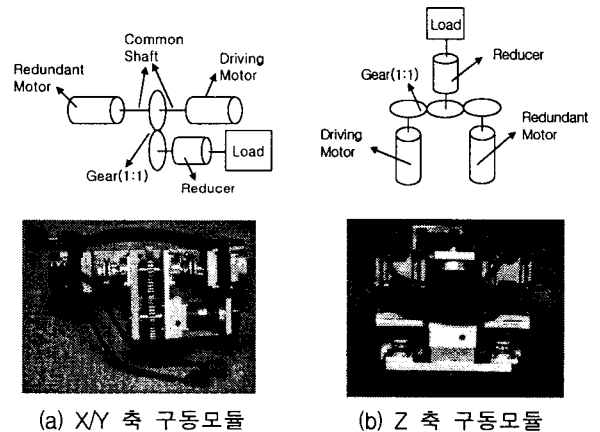


그림 2 구동 모듈의 이중화 개념도 및 실물

Fig. 2 Duplicated driving modules' concept and prototype

슬레이브는 작업자를 대신하여 방사성 물질을 직접 취급하거나 핫셀내에 설치된 장치를 유지보수하기 위한 것으로, 6자유도를 가지며 각 축은 서보모터에 의해 구동된다. 끝단은 그리퍼를 부착하여 물건을 잡을 수 있도록 하였다. 6축의 구성은 yaw-pitch-pitch-yaw-pitch-roll 로 되어 있다. 실제로 5축과 6축은 차동기어로 연결되어 있어서 개별적으로 움직이면 pitch-roll이 동시에 나타나게 된다.

마스터는 슬레이브를 움직이기 위한 입력장치로서, 슬레이브와 동일한 형상을 갖는다. 따라서, 마스터와 슬레이브의 각 축은 1:1 대응이고 마스터 축의 자세는 슬레이브의 해당

축에 대한 위치 지령이 된다. 또한, 마스터의 각 축은 힘반영(force reflection)을 위해 서보 모터를 장착하였다. 즉, 슬레이브가 작업도중에 힘을 받는 경우에 서보 모터를 이용하여 그 힘을 작업자에게 전달한다. 힘반영은 작업 성능에 영향을 미치는 중요한 기능이다.

2.2 제어 시스템 구성

제어 시스템은 그림 3과 같이 PC 기반에 모터 제어용 보드(MMC, multi motion controller) 및 모터 드라이버로 구성된다. MMC 보드는 3장(4축 1장, 8축 2장)이 장착되며 각각 이송장치, 슬레이브, 마스터 모터 드라이버와 연결된다. 이송장치의 모터 드라이버는 속도 지령모드이며, 슬레이브와 마스터는 토크 지령모드로 설정하였다. 이송장치는 MMC 보드에서 출력되는 전압이 속도 지령이 되고 모터 드라이버 자체의 속도 제어루프를 이용한다. 슬레이브와 마스터의 경우에는 위치 제어를 PC에서 수행한다.

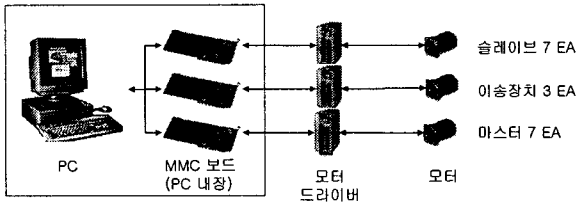


그림 3 제어시스템 구성개념도
Fig. 3 Schematic diagram of the control system

각 축의 제어는 그림 4와 같이 위치제어이며, 제어 법칙은 비례 제어를 적용하였다.

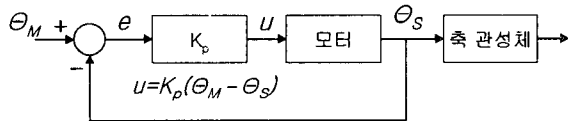


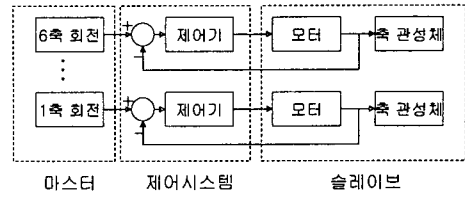
그림 4 슬레이브 축의 제어루프
Fig. 4 Control loop of a slave joint

2.3 시스템 고장 모델링

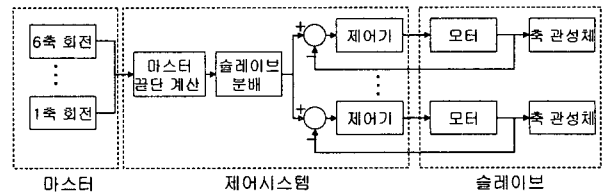
운전중에 발생할 수 있는 고장은 슬레이브에 장착된 서보 모터로 가정하였다. 이송장치에 장착된 모터는 방사선원로부터 멀리 떨어져있고 이중화하였기 때문에 고장 대상에서 제외하였다. 또한 고장은 한 개의 모터에 한정하였다. 동시에 여러 개가 고장나면 재형상만으로 대응하기는 어려워서 교체해야 하지만, 동시에 고장날 확률은 매우 작다고 가정한다. 실제적으로 모터에 고장이 발생하면 유지보수 구역으로 이동하여 고장난 모터를 교체하여야 하지만, 이러한 작업은 많은 시간을 요한다. 따라서, 간단한 작업이나 혹은 시급한 작업의 경우에는 제어법칙의 재형상을 통하여 계속적으로 수행하는 것이 유리하다.

각 모터에는 브레이크가 장착되어 있어서 모터가 오동작하면 브레이크가 작동하여 그 위치에서 고정된다. 또한 각 축의 1:1 대응은 더 이상 성립하지 않으며, 마스터 각축의

자세각이 위치명령이 되는 것이 아니고, 끝단의 속도 혹은 위치가 슬레이브에 대한 명령이 된다(그림 5 참고).



(a) 정상운전시 제어 개념도



(b) 모터 고장시 제어 개념도

그림 5 모터고장에 따른 대응방안
Fig. 5 A Strategy accommodating a motor's fault

3. 고장 대응 재형상 알고리즘

3.1 시스템 모델링

본 논문에서는 슬레이브의 평면(2차원) 운동만을 고려한다. 대상 작업물에 대해 적절한 방향을 잡으면 평면내에서의 작업이 많기 때문이다. 이에 대한 모델링은 그림 6과 같다. 이는 실제 3, 5, 6축에서 일어나는 yaw 및 roll 운동은 고려하지 않고 pitch 운동만 고려한 개념도이며, 축은 그림에서처럼 재정의 하여 사용한다.

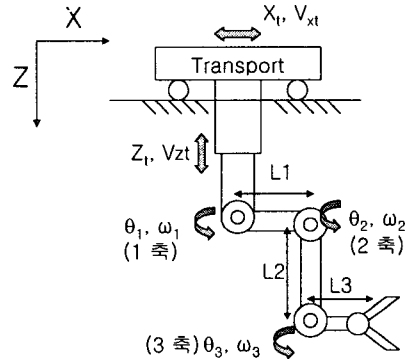


그림 6 이송장치 및 슬레이브 운동 모델
Fig. 6 Model of the transport and slave's motion

이송장치의 움직임(X, Z)은 정상작일 때는 고정되어 있지만, 슬레이브 모터에 고장이 발생했을 때는 여유 자유도의 역할을 수행할 수 있다. 강진구 등은[14] 이동 매니퓰레이터를 이동로봇과 작업로봇으로 구분하고, 협동제어를 통해서 작업 성능을 높일 수 있음을 보였다. 본 논문에서는 개별적으로 구분하지 않고, 1개의 시스템에 여유 자유도가 있는 것으로 생각하였다.

슬레이브 끝단의 위치와 속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_e &= x_t + L_1 c_1 + L_2 s_{12} + L_3 c_{123} \\ z_e &= z_t - L_1 s_1 + L_2 c_{12} - L_3 s_{123} \\ \theta_e &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} v_{xe} &= v_{xt} - w_1 L_1 s_1 + (w_1 + w_2) L_2 c_{12} - (w_1 + w_2 + w_3) L_3 s_{123} \\ v_{ze} &= v_{zt} - w_1 L_1 c_1 - (w_1 + w_2) L_2 s_{12} - (w_1 + w_2 + w_3) L_3 c_{123} \\ w_e &= w_1 + w_2 + w_3 \end{aligned} \quad (2)$$

이를 고쳐 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{S,E} &= A(\theta), \\ P_{S,E} &= [x_e \ z_e \ \theta_e]^T, \quad \theta = [x_t \ z_t \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \\ A &= \begin{bmatrix} x_t + L_1 c_1 + L_2 s_{12} + L_3 c_{123} \\ z_t - L_1 s_1 + L_2 c_{12} - L_3 s_{123} \\ \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{bmatrix} \\ V_{S,E} &= J_S \Omega_S, \\ V_{S,E} &= [v_{xe} \ v_{ze} \ w_e]^T, \quad \Omega_S = [v_{xt} \ v_{zt} \ w_1 \ w_2 \ w_3]^T \\ J_S &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_1 s_1 + L_2 c_{12} - L_3 s_{123} & L_2 c_{12} - L_3 s_{123} & -L_3 s_{123} \\ 0 & 1 & -L_1 c_1 - L_2 s_{12} - L_3 c_{123} & -L_2 s_{12} - L_3 c_{123} & -L_3 c_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, $c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $s_i = \sin \theta_i$, $c_i = \cos \theta_i$ 이다. 모터 고장이 발생하여 해당 모터가 고정되면, 자세값은 고정되며, 자코비안 행렬에서 해당 열이 삭제되고, 각속도 변수에서도 제외된다.

식 (4)를 살펴보면, 독립적인 출력변수는 3개이지만 입력변수는 5개이다. 즉, 여유 자유도가 있는 셈이다. 고장으로 인해 1개의 입력변수가 제외되더라도 출력에 대해 여유 자유도는 남아 있다. 이송장치의 자유도를 최대한 이용하는 것이 필요함을 알 수 있다. 고장이 발생했을 때, 자코비안과 입력변수를 J'_S , Ω'_S 라고 하면, 본 논문에서 다루고자 하는 내고장 제어 문제는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$V_{S,E} \rightarrow V_{M,E} \text{ with } \Omega'_S \quad (5)$$

즉, 슬레이브 끝단의 속도가 마스터 끝단의 속도를 추종할 수 있도록 한다. 이를 위해 다음의 두 가지 방안을 적용한다. 하나는 구속 최적화 방법이고, 다른 하나는 의사 역행렬 방법이다.

3.2 구속 최적화 방법

추종의 궁극적인 목표는 추종 오차가 영이 되는 것이다. 즉, $e_V (= V_{M,E} - V_{S,E}) \rightarrow 0$ 이 되도록 하는 것이다. 이를 최적화 문제로 전환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{minimize } PI &= \|V_{M,E} - V_{S,E}\|^2 = \|V_{M,E} - J'_S \Omega'_S\|^2 \text{ over } \Omega'_S \quad (6) \\ \text{subject to } &\Omega_{S,i,\min} < \Omega_{S,i} < \Omega_{S,i,\max}, \\ &\text{and } \theta_{S,i,\min} < \theta_{S,i} + \Omega_{S,i} \Delta t < \theta_{S,i,\max} \end{aligned}$$

하첨자 i 는 각각의 관절 혹은 가용한 자유도를 의미한다. 구속조건은 각각 관절의 속도와 각도 제한이다. 최대 및 최소로 움직일 수 있는 범위가 있기 때문에 이를 고려해 주어야 한다. 독립변수는 각 관절의 속도이다. Goel 등은[9] Ω'_S 를 속도와 자코비안으로 표시하여 자코비안 행렬을 독립변수로 두었다. 이는 최적의 성능을 갖는 형상을 구한다는 의미이다. 식 (6)의 문제는 최근 항공제어 분야에서 연구되고 있는 조종력 배분(control allocation)의 문제[15-17]와 유사하다. 여유 조종면이 있는 항공기의 최적 성능을 위해 식 (6)과 유사한 최적화 문제의 해를 구하는 것이다.

출력이 3개이며 최대 및 최소가 제한된 입력이 4개 이상인 경우, 실제로 가능한 출력은 그림 7과 같이 다면체(polyhedron) 형상을 갖는다. 그림 7은 식 (4)에서 세 번째 열을 제외했을 때(슬레이브 1축 모터의 고장을 가정), 나머지 축을 이용하여 얻을 수 있는 속도를 도시한 것이다. 원하는 속도 $V_{M,E}$ 이 다면체 외부의 값이면, $V_{M,E} - V_{S,E} = 0$ 를 만족하는 해가 존재하지 않으며, 식 (6)의 해는 $V_{M,E}$ 와 가장 가까운 다면체 표면 속도 값을 된다.

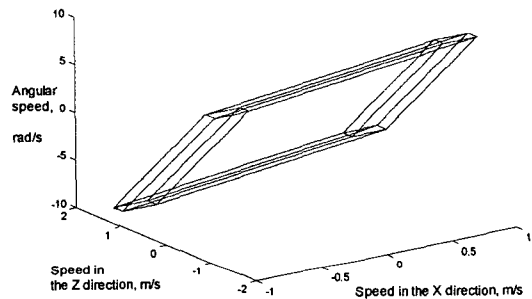


그림 7 출력 속도값의 다면체
Fig. 7 Polyhedron of the output speed

$V_{M,E}$ 이 다면체 내부의 값이면 $V_{M,E} - V_{S,E} = 0$ 이 되는 해가 존재하지만 복수의 해가 있을 수 있다. 이때에는 최소 노름(minimum norm)의 해를 선택하면 된다. 실제로 두 가지 최적화 문제를 설정할 수 있는데, 순차적인 방법(sequential least square)과 가중치 방법(weighted least square)이 있으며 다음과 같이 쓸 수 있다[17].

$$\begin{aligned} \Omega'_S &= \text{argmin}_u \{ u^T W_1 u : \\ u &\square \text{argmin}_{u_{\min} < u < u_{\max}} (V_{M,E} - J'_S u)^T W_2 (V_{M,E} - J'_S u) \} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\Omega'_S = \text{argmin}_{u_{\min} < u < u_{\max}} u^T W_1 u + \gamma (V_{M,E} - J'_S u)^T W_2 (V_{M,E} - J'_S u) \quad (8)$$

식 (6)의 각도 구속조건은 다음처럼 쓸 수 있다.

$$\theta_{s,i,min} < \theta_{s,i} + \Omega_{s,i} \Delta t < \theta_{s,i,max}$$

$$\rightarrow \frac{\theta_{s,i,min} - \theta_{s,i}}{\Delta t} < \Omega_{s,i} < \frac{\theta_{s,i,max} - \theta_{s,i}}{\Delta t} \quad (9)$$

이를 합하면 다음과 같이 한 개의 속도조건이 된다.

$$\max \left(\Omega_{s,i,max}, \frac{\theta_{s,i,min} - \theta_{s,i}}{\Delta t} \right) < \Omega_{s,i} < \min \left(\Omega_{s,i,max}, \frac{\theta_{s,i,max} - \theta_{s,i}}{\Delta t} \right) \quad (10)$$

만약에 일부의 관절이 각도 범위에 놓이면 더 이상 각도를 증가하는 방향으로의 속도 지령을 추종할 수 없게 되며, 이때에는 최적화의 독립변수에서 제외되어야 한다.

3.3 의사 역행렬 방법

최적화 방법에 비해서 의사 역행렬 방법은 간단하면서도 효과적이며, 계산시간도 짧다. 실제로 의사 역행렬은 불구속 최적화에 근거하고 있다. 즉, 다음과 같이 식 (6)에서 구속조건이 없을 때,

$$\text{minimize } PI = \frac{1}{2} (\Omega'_s)^T W \Omega'_s + \lambda^T (V_{M,E} - J'_s \Omega'_s) \text{ over } \Omega'_s \quad (11)$$

비용함수를 최소화하는 Ω'_s 는 다음과 같다.

$$\Omega'_s = W^{-1} (J'_s)^T (J'_s W^{-1} (J'_s)^T)^{-1} V_{M,E} \quad (12)$$

그러나, 이 해는 구속조건을 만족하지 않을 수 있기 때문에 속도 한계에 들어가도록 적절히 줄여 주어야 하며, 속도 한계는 식 (10)과 같다. 식 (11)에서 가중치 행렬 W 를 적절히 선택하면 최적해와 동일한 해를 구할 수 있지만, 매번 다르게 선택하여야 하며, 이 또한 새로운 최적화 문제가 되기 때문에 비효율적이다. 따라서, 실제적으로 의사 역행렬을 통해 구한 해는 최적화 방법에 비해서 접근할 수 있는 영역이 줄어드는 단점이 있다.

본 논문에서는 의사 역행렬을 구할 때 속도한계를 첨가하여 각 축의 속도특성에 맞게 배분할 수 있는 해를 구한다. 초기에 자코비안 행렬에 속도한계를 덧붙여서 의사 역행렬을 구하면 각각의 관절의 특성에 맞게 분배할 수 있다. 예를 들어, 자코비안 행렬과 속도한계를 각각 $J = [10 \ 10]$, $E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$ 이라고 가정할 때, 자코비안 행렬만 고려하면 균등하게 속도가 분배되지만 속도한계를 고려한 자코비안 행렬은 $J = [10 \ 1]$ 이 되고 10에 해당하는 축에 많이 배분되어, 나머지가 속도한계를 쉽게 벗어나지 않도록 한다. 속도 한계는 식 (10)을 고려하여 E 이라고 할 때, 새로운 자코비안 행렬을 $J'_s E$ 라고 두면 다음과 같이 배분이 구해진다.

$$\Omega'_s = E (J'_s E)^T (J'_s E E^T (J'_s)^T)^{-1} V_{M,E} \quad (13)$$

이는 식 (12)에서 $W^{-1} = EE^T$ 으로 한 것과 같은 결과이다. 그러나 이렇게 하더라도 원하는 속도값에 따라서는 속도한계를 벗어나는 관절이 발생할 수 있는데, 속도한계에 도달하지 않은 나머지의 관절을 재사용하도록 한다. 먼저, 식 (13)의 Ω'_s 를 다음처럼 한계를 고려한다.

$$\overline{\Omega'_s} = \begin{cases} \Omega'_{s,i} = \Omega_{s,i,max} & \text{if } \Omega_{s,i,max} < \Omega'_{s,i} \\ \Omega'_{s,i} = \Omega'_{s,i} & \text{if } \Omega_{s,i,min} < \Omega'_{s,i} < \Omega_{s,i,max} \\ \Omega'_{s,i} = \Omega_{s,i,min} & \text{if } \Omega'_{s,i} < \Omega_{s,i,min} \end{cases} \quad (14)$$

결국 속도 추종오차는 다음과 같다

$$e_2 = V_{M,E} - J'_s \overline{\Omega'_s} \quad (15)$$

이 오차를 제거하기 위하여, 한계에 도달하지 않은 축을 재사용하는 두 번째 문제를 다음과 같이 정의한다.

$$e = J_2 \Omega_2 \quad (16)$$

여기서 J_2 는 식 (14)에서 한계에 도달한 축은 제외한 자코비안 행렬이며, Ω_2 는 식 (15)에서 발생한 오차 e 를 제거하기 위한 추가적인 속도명령이 된다. 이렇게 가용한 모든 축이 한계에 도달할 때 까지 계속적으로 속도명령을 찾아가도록 한다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

시뮬레이션을 통해서 최적화 방법과 의사 역행렬 방법을 테스트 해본다. 개발한 서보 매니플레이터 시스템의 수치적인 사양은 다음과 같다.

표 1 서보 매니플레이터 수치 사양

Table 1 Numerical data of the servo manipulator

파라미터	수치 사양	단위
L_1, L_2, L_3	0.3, 0.3, 0.15	m
최대 V_{zt}, V_{xt}	0.06, 0.05	m/sec
최대 w_1, w_2, w_3	1.2, 1.2, 3.5	rad/sec
기준 각도 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$	0.0, 0.0, 0.0	degree
각도 제한 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$	30, 45, 60	degree

슬레이브 1축 모터의 고장을 가정하였으며, 나머지 축을 이용하여 실제 마스터의 움직임(그림 8 참고)을 추종하도록 하였다. 고장이 났을 때의 각 축의 위치는 편의상 기준 각도이고, 이송장치의 이송범위 제한은 없다고 가정하였다.

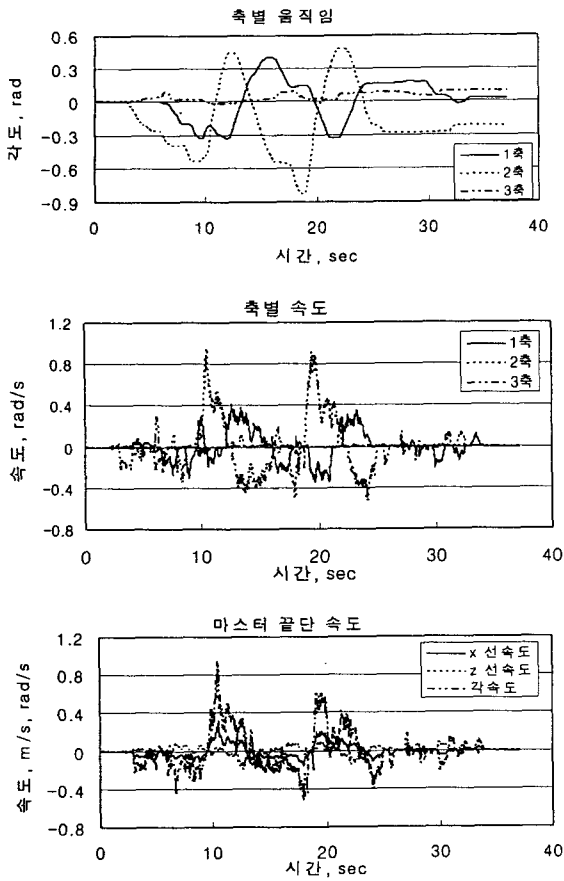


그림 8 마스터의 움직임
Fig. 8 Motions of the master arm

다음은 최적화를 이용하여 해를 구한 것이다. 각 시각마다 주어진 마스터의 움직임과 슬레이브의 속도한계를 고려하여 해를 구하였다. 최적화 프로그램은 MATLAB의 lsqin 모듈을 이용하였다. 그림 9는 마스터와 슬레이브 끝단의 속도 오차 및 오차의 2차 Norm(=||e||²)을 도시한 것이다.

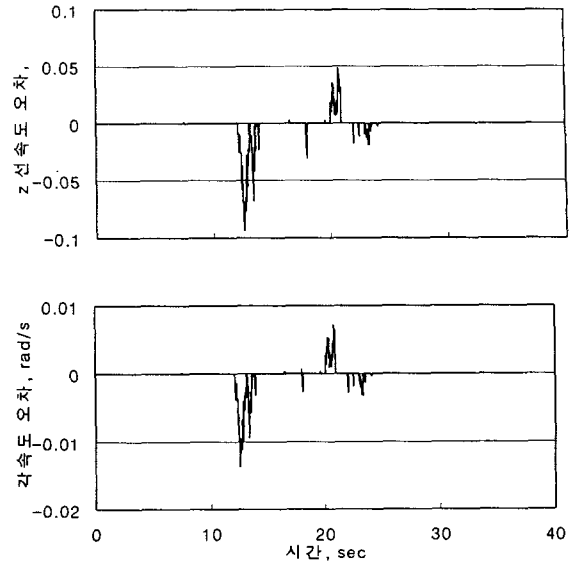
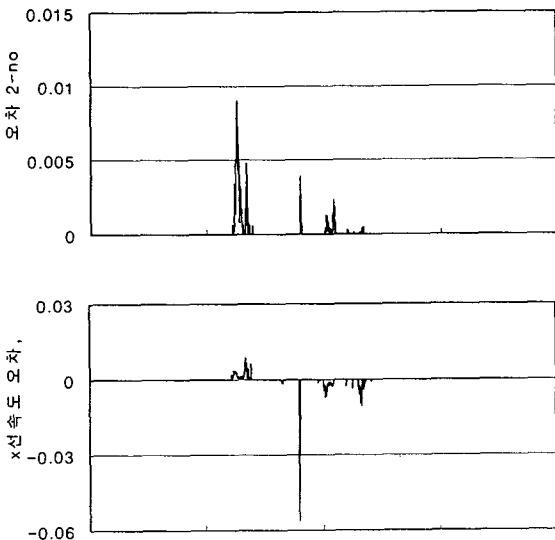


그림 9 마스터 슬레이브 속도 오차비교
Fig. 9 Speed error of the master and slave

그림 10은 슬레이브의 각 축의 속도를 도시한 것이다. 심한 채터링이 발생하고 있어서, 실제로 적용하기에는 부적합하다. 그림 11은 슬레이브의 축의 각도값을 도시한 것이다.

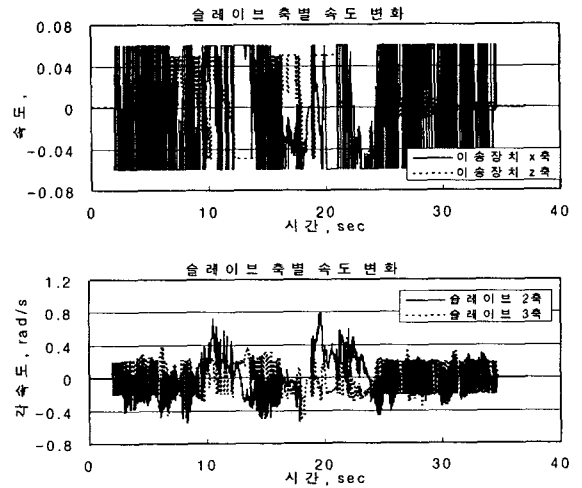


그림 10 슬레이브 축별 속도 변화
Fig. 10 History of the slave axes' speed

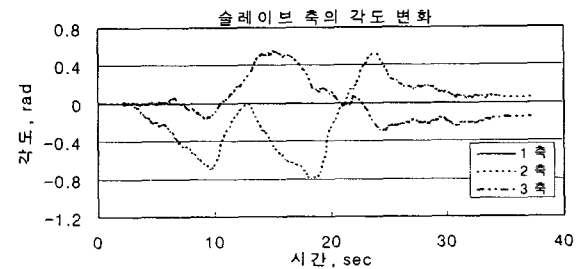


그림 11 슬레이브 축의 각도 변화
Fig. 11 History of the slave axes' angle

다음은 식 (12)의 일반적인 의사 역행렬 기법을 적용하여 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 방법은 앞에서와 같으며, 가중치 행렬은 단위행렬로 두었다. 식 (12)에서 얻어진 Ω'_s 는 식 (10)의 속도 한계 값과 비교하여 속도 한계를 벗어나지 않도록 하였다.

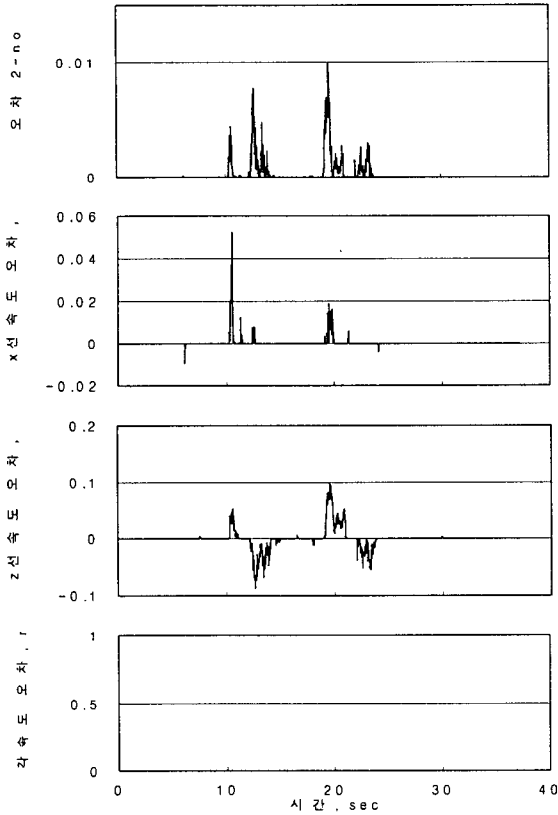


그림 12 마스터-슬레이브 속도 오차 비교
Fig. 12 Comparison of speed errors

그림 13은 슬레이브의 각 축의 속도를 도시한 것이다. 최적화의 결과와는 달리 채터링이 없다. 그림 14는 슬레이브의 각 축의 각도값을 도시한 것인데, 2축과 3축이 유사하게 움직인다. 이는 자코비안 행렬과 관련이 있는데, 각속도를 추종하기 위해서 2축과 3축이 동시에 같은 방향으로 움직이는 것이 유리하며, 이때 발생하는 선속도는 이송장치의 움직임으로 보상하게 된다.

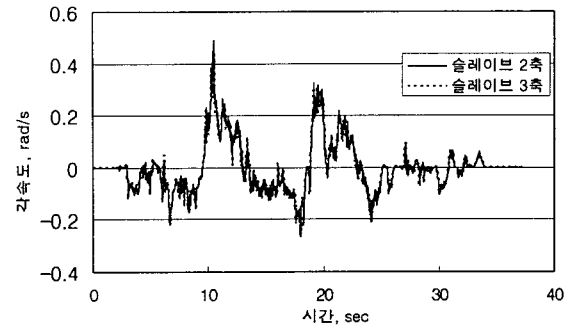
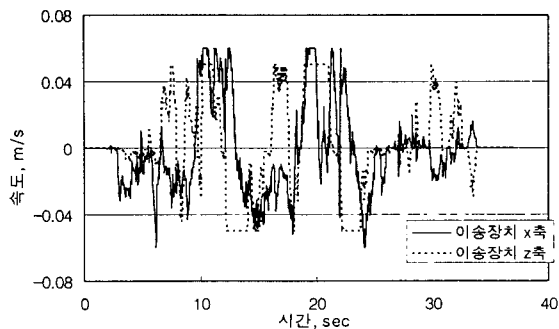


그림 13 슬레이브 축별 속도 변화
Fig. 13 History of the slave axes' speed

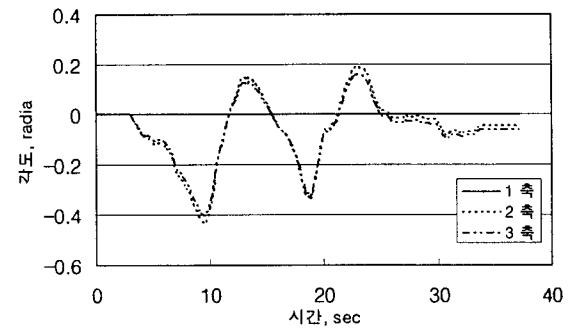
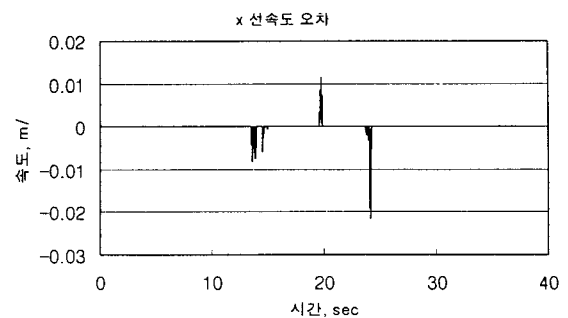
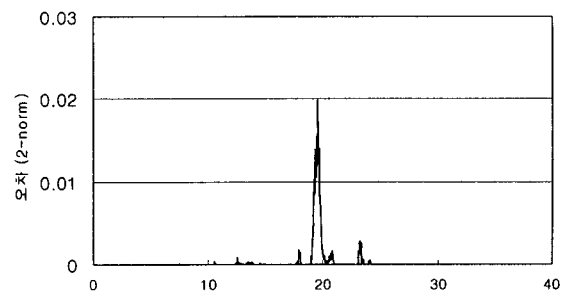


그림 14 슬레이브 축의 각도 변화
Fig. 14 History of the slave axes' angle

다음은 식 (13)의 의사 역행렬 기법을 적용하여 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 방법은 앞에서와 같으며, 속도 한계는 매 계산 때마다 식 (10)을 적용하였다. 그림 12와 마찬가지로 각속도는 정확하게 추종하고 있으며, 20 sec 부분을 제외하고는 대체적으로 더 좋은 추종 성능을 보인다.



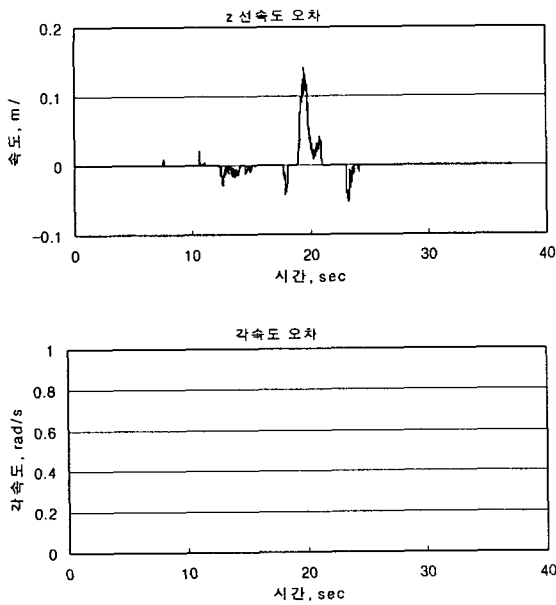


그림 15 마스터-슬레이브 속도 오차 비교
Fig. 15 Comparison of speed errors

그림 16은 슬레이브의 각 축의 속도를 도시한 것인데, 채터링이 없으며 그림 13에 비하여 이송장치의 자유도를 비교적 적게 이용하는데, 속도 한계를 추가한 결과이다. 그림 17은 슬레이브의 각 축의 각도값을 도시한 것이다.

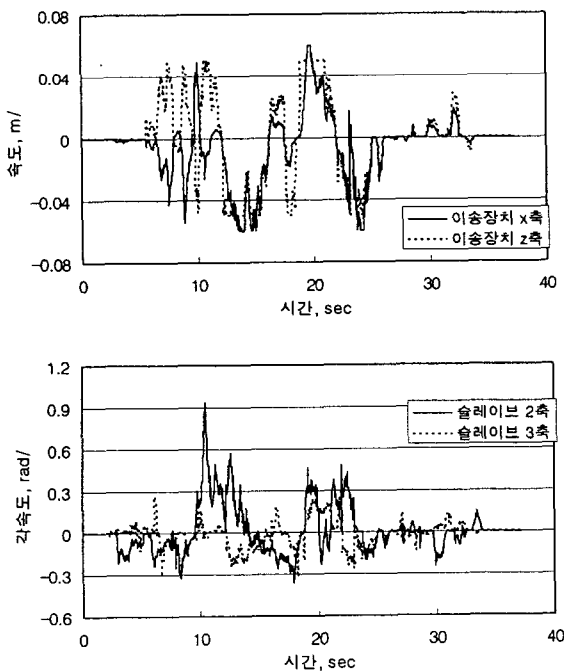


그림 16 슬레이브 축별 속도 변화
Fig. 16 History of the slave axes' speed

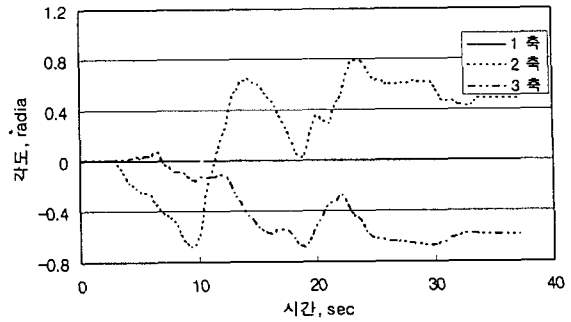


그림 17 슬레이브 축의 각도 변화
Fig. 17 History of the slave axes' angle

4.2 실험 적용

실제 서보 매니퓰레이터 시스템에 속도 한계를 고려한 의사 역행렬 방법을 적용하여 실험하였다. 고장이라고 가정한 슬레이브의 2축은 해당 모터를 브레이크 lock을 하지 않고, 편의상 위치 명령을 영으로 입력하여 고정시켰다. 그림 18은 슬레이브가 정상적일 때, 마스터와 슬레이브의 움직임을 비교한 것이다. 슬레이브가 마스터를 추종할 때, 기계적 마찰 등의 원인으로 약간의 추종 오차가 발생하지만, 원격 작업에서는 작업자가 슬레이브를 보면서 제어하기 때문에 이 정도의 오차는 중요하지 않다. 그림 19는 고장을 가정하고 재분배 없이 슬레이브의 움직임을 보인 것이다. 1축이 고정되어 움직이지 않고 2, 3축만 추종하고 있다. 이때 끝단의 Z 방향 선속도 및 각속도 오차가 크다. 그림 20은 고장을 가정했을 때, 슬레이브의 지령이 되는 마스터의 움직임(속도)을 도시한 것이며, 그림 21은 재분배를 적용하였을 때, 마스터와 슬레이브의 끝단 속도를 비교한 것이다. 2축이 고정되어 있음에도 대체적으로 마스터의 움직임을 추종하고 있다. 그림 22는 이때 슬레이브 및 이송장치의 속도를 도시한 것이다. 이송장치의 움직임이 속도 추종에 도움이 되는 것을 알 수 있다.

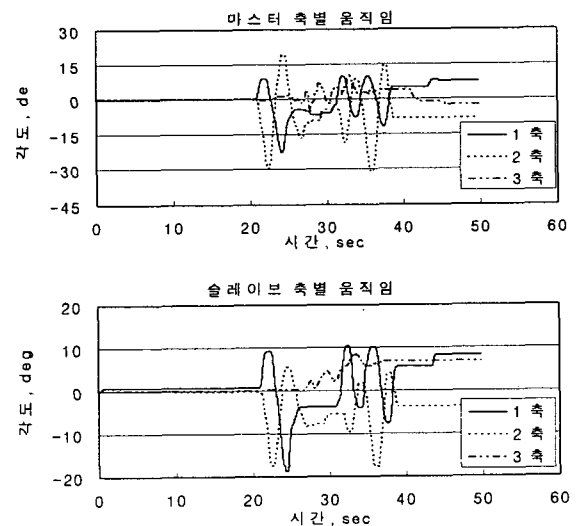


그림 18 마스터/슬레이브 끝단 추종 비교(정상상태)
Fig. 18 End effector trajectory following(Normal condition)

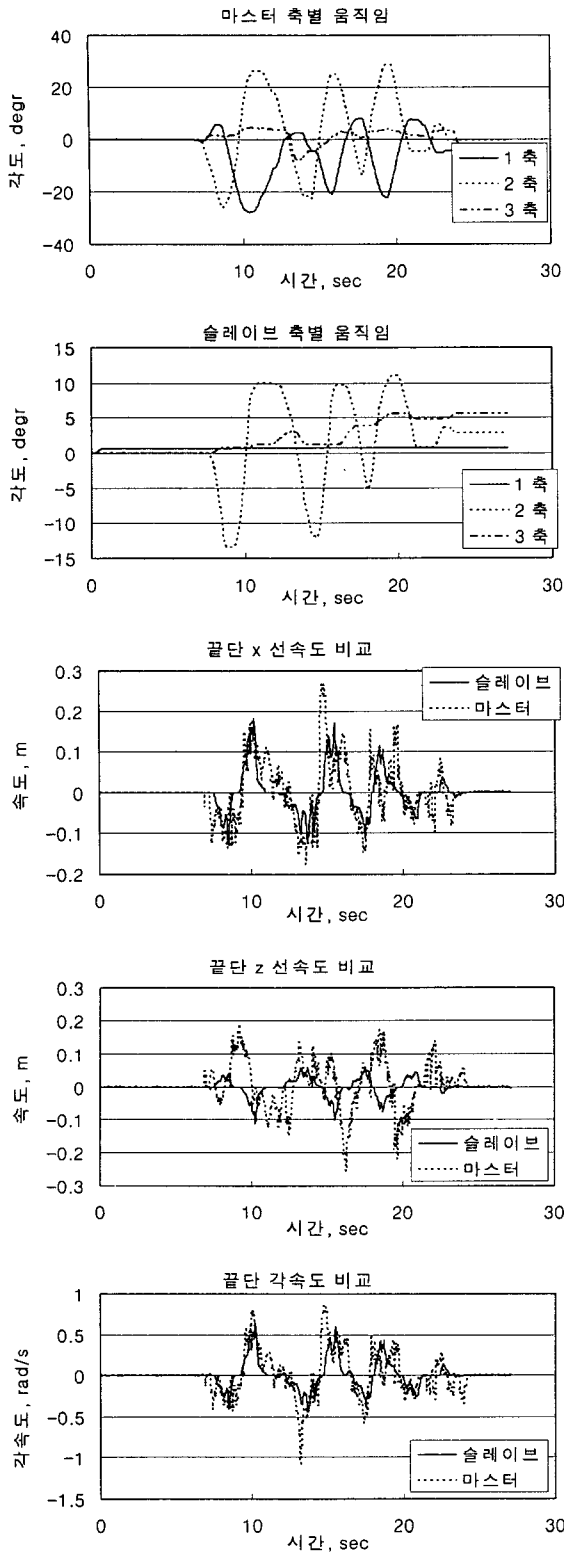


그림 19 마스터/슬레이브 끝단 추종 비교(슬레이브 1축 고정 및 재분배 없을 때)
 Fig. 19 End effector speed following(the 1st axis fixed and no redistribution)

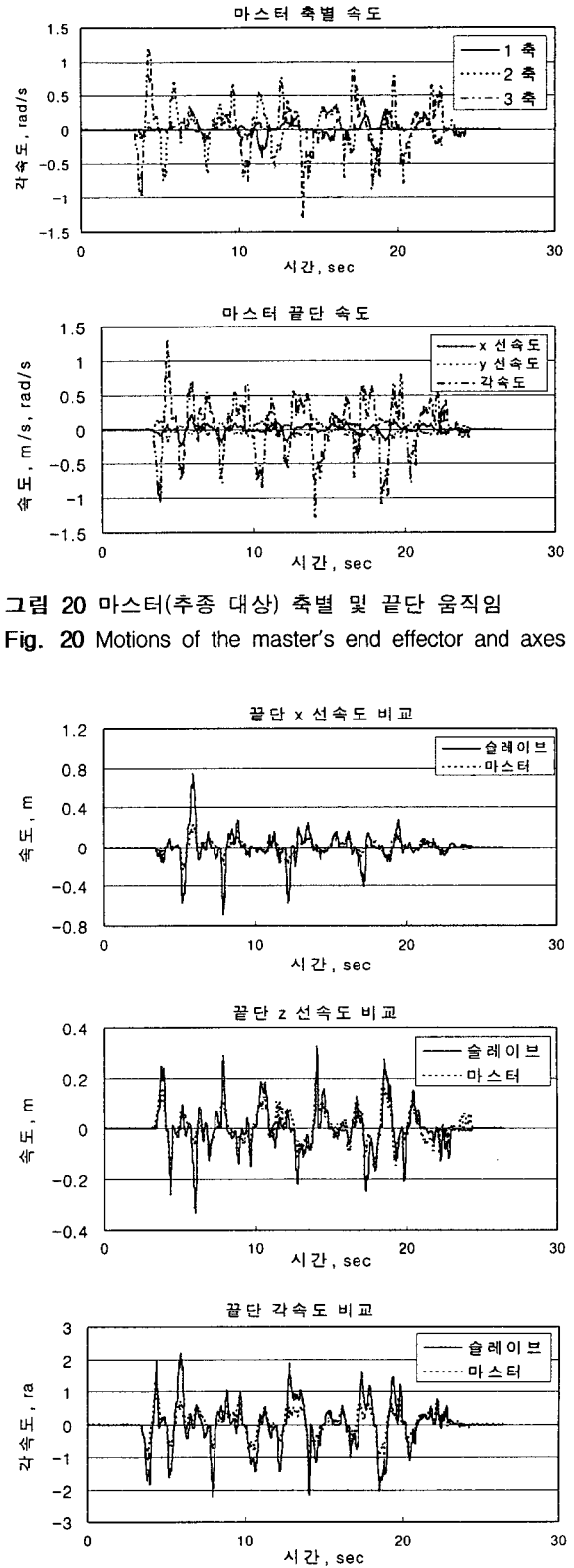


그림 20 마스터(추종 대상) 축별 및 끝단 움직임
 Fig. 20 Motions of the master's end effector and axes

그림 21 마스터/슬레이브 끝단 추종 비교(슬레이브 1축 고정 및 재분배 적용)
 Fig. 21 End effector speed following(the 1st axis fixed and redistribution)

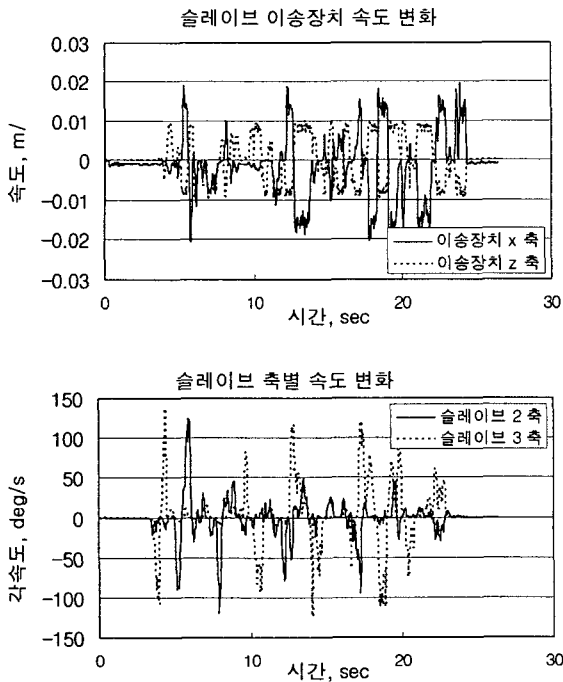


그림 22 슬레이브 축별 속도 변화
Fig. 22 History of the slave axes' speed

실험을 수행할 때, 이송장치의 속도 한계는 실제보다 더 작게 두었다(X 축 - 15 mm/s, Z 축 - 10 mm/s). 또한, 슬레이브의 속도 분배를 계산하여 이를 위치 명령으로 변환하여 슬레이브를 구동시켰다. 슬레이브는 기본적으로 위치 제어로 움직이기 때문이다. 이를 위해서 다음과 같이 속도 명령을 위치 명령으로 변환하였다.

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \alpha \Omega_s^2 \Delta t \quad (17)$$

여기에서 α 는 1 이어야 하지만, 구동 토크 값이 모터나 구조의 마찰보다 작아서 쉽게 움직이지 않아서 α 를 1 이상의 값으로 두었다(여기서는 50으로 조종). 이는 슬레이브의 P 계인을 증가시키는 것과 같은 효과를 가져온다. 슬레이브는 P 계인 제어로 구성되어 있는데, I 계인을 추가하면 역시 마찰에 의해 진동하는 결과가 발생하여 P 계인만 두었는데, 이 때문에도 쉽게 움직이지 않은 것 같다. 향후에는 구조적인 개선을 통해서 마찰을 줄이고 I 계인을 어느 정도 추가하면 쉽게 구동이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 서보 매니퓰레이터 시스템의 내고장 제어를 위해, 최적화와 의사 역행렬을 고려하였으며, 특히 속도 한계를 고려한 의사 역행렬을 제안하였다. 이는 일반적인 의사 역행렬에 비해 한계(또는 구속조건)에 쉽게 도달 하지 않도록 각 축의 속도 한계를 고려하여 배분하는 특성을 갖고 있음을 알 수 있었다. 각 방안에 대해 시뮬레이션을 통해서 살펴본 바는, 성능은 최적화가 가장 좋았지만 계산시간

이 오래 걸리며 또한 채터링 현상이 발생하여 실제 구현에는 적합하지 않지만, 초기조건 및 특정 구조에 적합한 최적화 방안을 고려한다면 시간과 채터링을 줄일 수 있을 것으로 생각하며 더 연구가 필요한 부분이다. 속도 한계를 고려한 의사 역행렬은 실제 구현에 적용하였으며, 슬레이브의 1개 축 고장에도 불구하고 대체적으로 양호하게 마스터의 속도를 추종하였으며, 결과적으로 제안한 방법의 유용함을 보였다. 결론적으로 본 논문에서 제안한 속도 한계를 고려한 의사 역행렬 기법은 일반적으로 여유자유도가 있는 제어 시스템의 조종력 분배 및 내고장 제어에 유용하게 사용될 수 있다.

향후의 추가적으로 수행할 연구내용으로는, 고장을 검출하고 고장의 모드를 진단하여 각 모드에 적절한 대응방안을 적용하는 것이다. 이는 각 요소의 고장분석 결과를 토대로 내고장 설계를 수행하고, 실시간으로 고장을 검출하고 대응하는 일련의 과정을 통합하는 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Vandergriff, "Testing of components for use in high-level gamma radiation environments," ORNL/TM-11507, 1991.
- [2] M. Vinsky, J. Cavallaro, and I. Walker, "Robotic fault detection and fault tolerance: A survey," Reliability Engineering and System Safety, vol.46, pp.139-158, 1994.
- [3] M. Vinsky, J. Cavallaro, and I. Walker, "A dynamic fault tolerance framework for remote robots," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.11, no.4, pp.477-490, 1995.
- [4] E. Wu, J. Hwang, and J. Chladek, "Fault tolerant joint development for the space shuttle remote manipulator system : Analysis and experiment," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.9, no.5, pp.675-684, 1993.
- [5] R. Hooper, D. Sreevijayan, D. Tesar, J. Geisinger, and C. Kapoor, "Implementation of a four level mechanical architecture for fault tolerant robots," Reliability Engineering and System Safety, vol. 53, pp.237-246, 1996.
- [6] C. Lewis and A. Maciejewski, "Dexterity optimization of kinematically redundant manipulators in the presence of failures," Computers & Electrical Engineering, vol. 20, no. 3, pp. 273-288, 1994.
- [7] C. Lewis and A. Maciejewski, "Fault tolerant operation of kinematically redundant manipulators for

locked joint failures," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.13, no.4, pp.622-629, 1997.

[8] K. Groom, A. Maciejewski, and V. Balakrishnan, "Real time failure tolerant control of kinematically redundant manipulators," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.15, no.6, pp.1109-1116, 1999.

[9] M. Goel, A. Maciejewski, and V. Balakrishnan, "The design of control strategies tolerant to unidentified failures in kinematically redundant manipulators," Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, pp. 867-873, 1999.

[10] G. Liu, "Control of robot manipulators with consideration of actuator performance degradation and failures," Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Seoul, Korea, pp. 2566-2571, 2001.

[11] J. Shin and J. Lee, "Fault detection and robust fault recovery control for robot manipulators with actuator failures," Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, pp. 861-866, 1999.

[12] Y. Ting, S. Tosunoglu, and R. Freeman, "Torque redistribution method for fault recovery in redundant serial manipulators," Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, pp. 1396-1401, 1994.

[13] W. Dixon, I. Walker, D. Dawson, and J. Hartranft, "Fault detection for robot manipulators with parametric uncertainty: A prediction error based approach," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.16, no.6, pp.689-699, 2000.

[14] 강진구, 허화라, 이장명, "이동매니퓰레이터의 최적자세를 고려한 협동제어에 관한 연구," 춘계 IEEK, KIEE, ICASE 5개 연구회 연합학술발표대회 논문지, pp. 100-106, 2002.

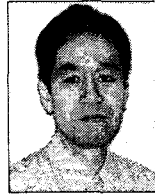
[15] W. Durham, "Constrained control allocation," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol.16, no.4, pp.717-725, 1993.

[16] M. Bodson, "Evaluation of optimization methods for control allocation," Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA 2001-4223, 2001.

[17] O. Härkegård, "Efficient active set algorithms for solving constrained least squares problems in aircraft control allocation," CDC 2002, Las Vegas, Nevada, 2002.

저 자 소 개

진재현 (陳宰鉉)



1968년 2월 29일생. 1990년 2월 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 1992년 2월 한국과학기술원 항공우주공학과(석사), 1997년 2월 동대학원(공학). 2001년 10월 ~ 현재, 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급실증장치개발과제 선임연구원. 관심분야는 내고장 제어, 원격로봇제어, 비행제어
Tel : 042-868-8085, Fax : 042-868-2854
E-mail : donworry@kaeri.re.kr

박병석 (朴炳錫)



1960년 3월 20일생. 1986년 2월 조선대학교 기계공학과 졸업. 1990년 8월 전남대학교 기계공학과(석사). 2002년 2월 충남대학교 기계설계공학과(공학). 1987년 5월~현재, 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급실증장치개발과제 책임연구원. 관심분야는 힘반영 제어, 원격로봇제어, 강인제어, 신호처리
Tel : 042-868-2596, Fax : 042-868-2854
E-mail : nbspark@kaeri.re.kr

안성호 (安聖鎬)



1964년 5월 9일생. 1986년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업. 1988년 8월 동대학원(석사). 2001년 2월 충남대학교 전자공학과(공학). 1990년 7월~현재, 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급실증장치개발과제 책임연구원. 관심분야는 힘반영 제어, 원격로봇제어, 강인제어, Anti windup 제어
Tel : 042-868-2518, Fax : 042-868-2854
E-mail : shahn2@kaeri.re.kr

윤지섭 (尹智燮)



1958년 2월 3일생. 1980년 2월 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 2월 한국과학기술원 기계공학과(석사). 1987년 2월 동대학원(공학). 1987년 3월~현재, 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급실증장치개발과제 책임연구원/과제책임자. 관심분야는 방사성물질 원격취급기술, 생산자동화, 계측제어, 원격로봇
Tel : 042-868-2855, Fax : 042-868-2854
E-mail : jsyoon@kaeri.re.kr