여유 자유도를 갖는 서보 매니퓰레이터의 내고장 제어를 위한 재형상 기법

Reconfiguration of Redundant Joints for Fault Tolerance of a Servo Manipulator

진 재 현*, 박 병 석, 안 성 호, 윤 지 섭
(Jaehyun Jin, Byungsuk Park, Sungho Ahn, and Jisup Yoon)

Abstract : In this paper, fault tolerant algorithm is presented for a servo manipulator system. For fault tolerance of a servo manipulator system, reconfiguration algorithm accommodating a motor's failure has been presented. The algorithm considers a transport's degree of freedoms as redundant joints of a servo manipulator. The reconfiguration algorithm recovers the end effector's motion in spite of one motor's failure. A modified pseudo inverse redistribution method has been proposed for the reconfiguration algorithm. Numerical examples and hardware tests have been presented to verify the proposed methods.

Keywords : servo manipulator, redundant joints, fault tolerance, modified pseudo inverse redistribution

I. 서론

여유 조종력(redundant controls)에 의한 내고장성(fault tolerance)을 갖춘 시스템은 일부의 조종력이 손상을 입더라도 나머지의 조종력을 이용해서 주어진 임무를 완수하거나 시스템을 안전하게 유지할 수 있다. 그래서 고장에 대해 쉽게 유지보수하기 어려운 환경에서 동작하는 시스템의 설계에는 내고장성을 고려하여야 한다. 사람을 대신하여 위험환경에서 작업하는 서보 매니퓰레이터(servo manipulator) 혹은 로봇은 오래 전부터 여러 분야에서 이용되어 왔는데, 방사선 환경, 해저 및 우주 공간에서의 작업 등이 있다[1-4]. 그러나 이러한 위험환경에서 작업하는 서보 매니퓰레이터가 고장을 일으킬 경우에 사람의 접근이 쉽지 않아서 유지보수가 어렵기 때문에, 임무기간 동안 원하는 작업을 계속 수행할 수 있도록 내고장 설계가 필요하다. 특히 방사선은 전자부품을 열화시켜 고장을 유발하므로[5] 원자력 분야에서 작업하는 시스템은 반드시 내고장성을 고려하여야 한다.

내고장 설계는 기본적으로 여유 조종력(혹은 자유도)을 고려하는 방법이다. Wu 등은[4] 스페이스 셔틀에서 원격작업용으로 사용되는 매니퓰레이터의 내고장성을 위해 차동장치를 이용한 구동 모터의 이중화 방안을 제시하였다. Hooper 등은[6] 네 단계의 시스템 설계방안을 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 여유 자유도가 있는 경우에 적절한 관리방안이 필요한데, 참고문헌[7-10]에서는 임의의 고장에 대해서도 능숙성(dexterity)를 최대화할 수 있도록 형상을 제어하는 방안을 제안하였다. 고장이 발생하여 관절이 정지한(locked) 상태에서 dexterity가 낮아질 수 있는데, 이를 사전에 방지하는 기법이다.

본 논문에서는 방사선 환경에서 작업하기 위해 개발한 서보 매니퓰레이터의 내고장 제어 방안을 다룬다. 고장 발생이 후에 관심을 두고 여유 자유도를 이용하여 고장에 대응하는 방안을 제시한다. 모터 등의 고장으로 일부 자유도 손실이 발생한 경우에 이송장치의 여유 자유도를 이용하여 재형상(reconfiguration)하는 방안으로, 수정된 의사 역행렬 재분배(modified pseudo inverse redistribution, MPIR) 기법을 제안한다. 재형상은 고장에 대응하기 위하여 나머지 조종력들을 재배치하는 것을 의미하며 의사 역행렬을 많이 사용하는데[11], 쉽게 적용할 수 있고 계산이 간단하며 구속조건이 없을 때는 최적해를 얻을 수 있다. 그러나 조종력 한계 등의 구속조건을 고려하면 경우에 따라서 한계를 벗어나는 해를 제공한다. 기존의 의사 역행렬 재분배(pseudo inverse redistribution, PIR) 기법은 조종력 한계를 벗어난 값을 한계 값으로 고정하고 나머지만을 이용해서 추가로 의사 역행렬을 구하는 기법으로 항공제어 분야의 조종력 할당(control allocation)에 많이 사용된다[12-14]. 본 논문에서는 기존의 PIR 기법의 성능을 향상시킬 수 있는 수정된 의사 역행렬 재분배 기법을 제안한다. 기존의 PIR 기법은 의사 역행렬 계산에서 포화가 일어나는 모든 자유도를 동시에 한계 값으로 설정하였지만, MPIR 기법은 하나의 자유도만을 한계 값으로 설정하고 재계산하는 방법이다. 실제 최적해를 찾아가는 평균은 MPIR 기법이 뛰어나다. 예제를 통하여 PIR 기법과 MPIR 기법을 비교하였으며, MPIR 기법은 실제 테스트를 수행하였다.

II. 서보 매니퓰레이터 시스템 제어

매니퓰레이터 끝단의 위치는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x = f(q) \tag{1}$$

여기서, x 와 q 는 끝단의 위치 및 조인트 각도 변수이다. 조인트 각도 변수의 작은 변화를 가정하고 (1)을 선형화 하

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2003. 5. 31., 채택확정 : 2004. 8. 31.
진재현, 박병석, 안성호, 윤지섭 : 한국원자력연구소 원격취급장치개발
(donworry@kaeri.re.kr/ nbspark@kaeri.re.kr /shahn2@kaeri.re.kr /jsyoon@kaeri.re.kr)
□ 본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

면 다음과 같다.

$$\Delta x = J(q)\Delta q \tag{2}$$

Δx 와 Δq 는 각각 끝단의 위치와 조인트 각도의 변동량이며, $J(q)$ 는 자코비안 행렬이다. 위치변환은 비선형이지만, 미소 위치 변동은 선형방정식 형태로 표현된다. 마스터를 통한 끝단의 위치 이동 명령을 Δx_d 라고 할 때, 이에 대한 슬레이브 끝단의 추종은 다음과 같이 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize } P = \frac{1}{2}(J\Delta q - \Delta x_d)^T (J\Delta q - \Delta x_d) \\ &\text{subject to } \Delta q_{\min} \le \Delta q \le \Delta q_{\max} \end{aligned} \tag{3}$$

경우에 따라 $J\Delta q - \Delta x_d = 0$ 이 되는 Δq 가 여러 개 있을 수 있는데, 이때에는 다음과 같은 추가적인 성능함수를 이용하여 최적해를 구하게 된다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize } P = \frac{1}{2}\Delta q^T \Delta q \\ &\text{subject to } \Delta q_{\min} \le \Delta q \le \Delta q_{\max},\ J\Delta q - \Delta x_d = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

Δx_d 에 따라서 $J\Delta q - \Delta x_d = 0$ 를 만족하거나 그렇지 못하는데, 만족하지 못하는 경우에는 오차를 최소화하는 Δq 를 찾으며, 만족하는 경우에는 최소의 크기를 갖는 Δq 를 구한다는 의미이다. 최적화 기법은 active set method[14,15], fixed point iteration[16] 등이 있다.

Δq 값에 대한 부등 구속조건이 없거나, 모든 구속조건이 inactive이면 (4)에 대한 최적해는 다음과 같이 의사 역행렬을 이용하여 구할 수 있다[17].

$$\Delta q = J^T (JJ^T)^{-1} \Delta x_d = J^+ \Delta x_d \tag{5}$$

의사 역행렬에 의한 해는, 조종력이 충분하여 $J\Delta q - \Delta x_d = 0$ 를 만족하는 경우에는 최소 놈 해가 되며, 반대로 조종력이 부족하여 $J\Delta q - \Delta x_d \ne 0$ 인 경우에는 최소제곱(least square) 해가 된다. 즉, (5)는 경우에 따라 (3) 혹은 (4)의 최적해가 된다. 그러나 일부의 요소가 한계를 넘어서면 (3) 혹은 (4)에서 얻어지는 최적해에 접근하기 위해서는 재계산이 필요한데, 최적화 기법과는 달리 임시적인(ad-hoc) 해결방법으로 의사 역행렬 재분배 기법이 있다[12-14, 18]. 이 방법은 한계를 넘어서지 않은 여유 조종력 만을 이용하여 의사 역행렬을 재계산하는 방법으로 주어진 Δx_d 에 따라 최적해를 얻을 수 있으며 알고리듬이 간단하다. 최적화 기법은 (3)의 해를 먼저 구하고 조종력이 충분하면 다시 (4)의 해를 구하는 단계적인 절차를 따르지만, 의사 역행렬 재분배 기법은 두 절차를 구분하지 않고 해를 찾는다. 본 논문에서는 기존의 방법에 비하여 더욱 효과적으로 최적해를 얻을 수 있는 수정된 기법을 제안하며, 다음 절에서 상세히 다룬다.

III. 수정된 의사 역행렬 재분배 기법

(5)의 결과에서 일부 요소가 한계 값을 벗어난 경우에, 나머지 조종력을 이용하여 재분배한다. 먼저, 한계를 벗어난 요소 중에서 초과비율이 가장 큰 조종력만을 한계값으로 지정한다. 나머지는 정해지지 않은 것으로 가정하고 (5)를 다음과 같이 재정리 한다.

$$\bar{\Delta q} = \begin{bmatrix} \Delta q_r \\ \Delta q_s \end{bmatrix}, \quad \bar{J} = \begin{bmatrix} J_r & J_s \end{bmatrix} \tag{6}$$

여기서 Δq_s 는 한계값으로 지정된 요소이며, Δq_r 은 새로이 재분배할 요소이다. $\bar{J}$ 는 이에 따라 적절히 변환된 자코비안 행렬이다. Δq_r 는 다음과 같이 새로이 구한다[18].

$$\Delta q_r = J_r^+ (\Delta x_d - J_s \Delta q_s) \tag{7}$$

새로이 구한 조종력 Δq_r 의 요소가 한계를 벗어나면 이를 다시 한계값으로 지정 및 추가하고 (6), (7)의 과정을 반복한다. Δq_r 이 한계내의 값이거나 더이상 이용 가능한 조종력이 남지 않을 때까지 이 과정을 수행한다. 두 번째 반복부터는 한계값을 초과하는 요소가 둘 이상일 때는, 구속조건을 고려하지 않고 구한 최적해 (4)의 부호와 일치하는 것을 Δq_s 로 지정한다. 초과량 보다는 초과비율이 더 중요하며, 부호의 일치성은 최적해인 (4)와 비슷한 방향을 유지하기 위해 필요하다. 수정된 의사 역행렬 재분배 알고리듬의 흐름도는 그림 1과 같다[19].

재분배 기법은 실제로 다음에 근거하고 있다.

Fact 1. (4)의 최적해(equality 구속조건을 만족한다고 가정)가 한계 내에 있으면, 즉, 모든 inequality 구속조건이 inactive 이면, 최적해는 (5)와 같다[17].

Fact 2. (4)의 최적해(equality 구속조건을 만족한다고 가정)의 일부 요소가 한계 값을 가지면, 즉, 일부 inequality 구속조건이 active 이면, 최적해는 (7)과 같다.

증명 : 최적해를 $\Delta q^* = [\Delta q_r^{*T} \quad \Delta q_s^{*T}]^T$ 라고 하면, $J\Delta q^* - \Delta x_d = 0$ 이며 최적화 함수 P와 equality 구속조건은

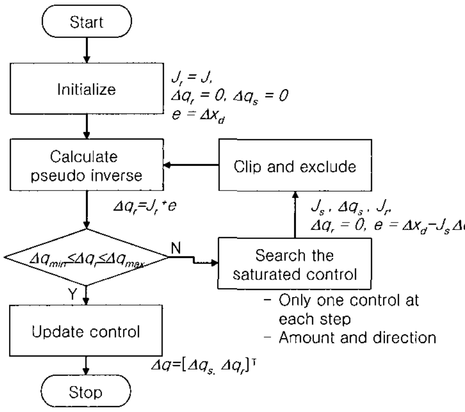


그림 1. 수정된 의사 역행렬 재분배 기법 흐름도.

Fig. 1. Flow chart of MPIR.

다음과 같다.

$$P^* = \frac{1}{2}\Delta q^{*T}\Delta q = \frac{1}{2}\left(\Delta q_r^{*T}\Delta q_r^* + \Delta q_s^{*T}\Delta q_s^*\right) \qquad (8)$$

$$J_r\Delta q_r^* - \left(\Delta x_d - J_s\Delta q_s^*\right) = 0 \qquad (9)$$

결과적으로 Δq_r^* 는 구속조건 (9)를 만족시키면서 $P_r = \frac{1}{2}\Delta q_r^T\Delta q_r$ 을 최소화하는 값이어야 한다. 이는 [17, 19]에 의해서 $\Delta q_r^* = J_r^+\left(\Delta x_d - J_s\Delta q_s^*\right)$이며 이는 (7)과 같다.

Fact 3. (3)의 최적해 $J\Delta q^* - \Delta x_d = 0$ 를 만족하지 못하는 경우)의 일부 요소가 한계 값을 가지면, 즉, 일부 부등 구속조건이 active이면, 최적해는 (7)과 같다. ∎

증명 : 최적해를 $\Delta q^* = \left[\Delta q_r^{*T} \quad \Delta q_s^{*T}\right]^T$ 라고 하면, 최적화 함수 P는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P^* &= \frac{1}{2}\left(J\Delta q^* - \Delta x_d\right)^T\left(J\Delta q^* - \Delta x_d\right) \\ &= \frac{1}{2}\left(J_r\Delta q_r^* - \left(\Delta x_d - J_s\Delta q_s^*\right)\right)^T\left(J_r\Delta q_r^* - \left(\Delta x_d - J_s\Delta q_s^*\right)\right) \end{aligned} \qquad (10)$$

결국 Δq_r^* 는 $P_r = \frac{1}{2}\left(J_r\Delta q_r - \left(\Delta x_d - J_s\Delta q_s^*\right)\right)^T\left(J_r\Delta q_r - \left(\Delta x_d - J_s\Delta q_s^*\right)\right)$ 을 최소화하는 값이어야 하며, 이는 $\Delta q_r^* = J_r^+\left(\Delta x_d - J_s\Delta q_s^*\right)$ 이며 least square solution이 된다[20]. ∎

위의 결과는 의사 역행렬을 이용해서 최적해를 구할 수 있음을 의미한다. 그러나 실제로 어떠한 요소가 Δq_s 에 해당되는지 알 수 없다. 결국 의사 역행렬 재분배는 Δq_s 를 찾는 문제로 귀결된다. 기존의 의사 역행렬 재분배 기법은 의사 역행렬 계산에서 포화가 일어나는 모든 조종력을 동시에 Δq_s 로 설정하였지만, 수정된 기법은 하나의 조종력만을 한계값으로 설정하고 재계산하는 방법이다. 한번에 하나씩 포화된 조종력을 재계산(혹은 재분배)에서 제외함으로써 기존의 방법에 비하여 자유도가 더 많이 남아 나머지 조종력을 더욱 효과적으로 사용하게 된다.

예제 1 : 다음의 예제 시스템을 고려하자. 주어진 Δx_{d1} 는 조종력이 충분하며, Δx_{d2} 와 Δx_{d3} 는 불충분한 경우에 해당된다.

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -.3 & 0 \\ 0 & 1 & .15 & .15 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (11)$$

$$\Delta q_{\max} = -\Delta q_{\min} = \left[.015 \quad .01 \quad 1.2 \quad 3.5\right]^T$$

$$\Delta x_{d1} = \left[-0.14 \quad 0.32 \quad 2.17\right]^T, \ \Delta x_{d2} = \left[-0.4 \quad 0.06 \quad 4.1\right]^T$$

$$\Delta x_{d3} = \left[-0.08 \quad 0.53 \quad 2.86\right]^T$$

최적화 및 의사 역행렬 재분배 기법을 적용한 결과는 표 1과 같다. Δx_{d1} 에 대해서는 기존(PIR) 및 수정된 방법(MPIR) 모두 최적해에 수렴했으며, Δx_{d2} 의 경우에는 두 방법 모두 수렴하지 못했으며, Δx_{d3} 의 경우에는 MPIR만 수렴했다.

표 1. 주어진 Δx_d 에 대한 각 방법의 계산결과.

Table 1. Results by optimization, PIR and MPIR for given.

	최적해	PIR	MPIR
Δx_{d1}	[0.015, -0.005, 0.52, 1.65]	[0.015, -0.005, 0.52, 1.65]	[0.015, -0.005, 0.52, 1.65]
Δx_{d2}	[-0.015, -0.01, 1.2, 2.82]	[0.015, -0.01, 1.2, 2.82]	[0.015, -0.01, 1.2, 2.82]
Δx_{d3}	[0.015, 0.01, 0.317, 2.557]	[0.015, 0.01, 1.2, 1.673]	[0.015, 0.01, 0.317, 2.557]

Δx_{d3} 에 대해 PIR 및 MPIR의 계산과정은 다음과 같이 비교된다.

PIR :

$$\Delta q = J^+\Delta x_{d3} = \left[0.334 \quad 0.101 \quad 1.38 \quad 1.48\right]^T$$

$$\Delta q_1 = \left[\Delta q_{1s}^T \quad q_{1r}^T\right]^T, \ \Delta q_{1s} = \left[0.015 \quad 0.01 \quad 1.2\right]^T$$

(10)

$$\Delta q_{1r} = \begin{bmatrix} 0 \\ .15 \\ 1 \end{bmatrix}^+ \left(\begin{bmatrix} -0.08 \\ 0.53 \\ 2.86 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & -.3 \\ 0 & 1 & .15 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} .015 \\ .01 \\ 1.2 \end{bmatrix}\right) = 1.6733$$

$$\Delta q_1 = \left[0.015 \quad 0.01 \quad 1.2 \quad 1.6733\right]^T$$

MPIR :

$$\Delta q = J^+\Delta x_{d3} = \left[0.334 \quad 0.101 \quad 1.38 \quad 1.48\right]^T$$

$$\Delta q_2 = \left[\Delta q_{2s}^T \quad q_{2r}^T\right]^T, \ \Delta q_{2s} = 0.015$$

$$\Delta q_{2r} = \begin{bmatrix} 0 & -.3 & 0 \\ 1 & .15 & .15 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^+ \left(\begin{bmatrix} -0.08 \\ 0.53 \\ 2.86 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times .015\right) = \begin{bmatrix} 0.101 \\ 0.317 \\ 2.543 \end{bmatrix}$$

$$\Delta q_{2s} = \left[0.015 \quad 0.01\right]^T$$

$$\Delta q_{2r} = \begin{bmatrix} -.3 & 0 \\ .15 & .15 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^+ \left(\begin{bmatrix} -0.08 \\ 0.53 \\ 2.86 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} .015 \\ .01 \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} 0.317 \\ 2.557 \end{bmatrix}$$

$$\Delta q_{2s} = \left[0.015 \quad 0.01 \quad 0.317 \quad 2.557\right]^T$$

예제 2 : 예제 1과 동일한 시스템에 대해, 적절한 범위(각 요소별로 접근 가능한 최대값의 1.5배 범위)의 값을 임의로 생성하고 이에 대하여 PIR, MPIR, 및 최적화 방법을 이용하여 해를 구하였다. 그리고 최적화 결과와 비교하여 동일한 ($\|J\Delta q - \Delta x_d\|$ 의 크기 기준으로) 해를 제시하는 비율을 비교하였다. 또한 이때 최적해와 PIR, MPIR 해의 오차분포를 비교하였다.

다음의 표 2는 결과를 정리한 것이다. PIR과 MPIR에 대하여 1000개의 임의의 Δx_d 값에 대한 결과이다. 표에서 수렴

표 2. MPIR 및 PIR에 의한 수렴 결과 비교.
Table 2. Comparison of the results by MPIR and PIR.

	수렴 평균(%)	오차 평균	오차의 표준편차
MPIR	93.0	0.0044	0.0066
PIR	55.4	0.0986	0.1251

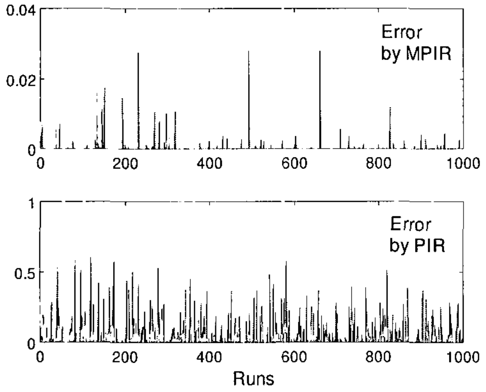


그림 2. MPIR 및 PIR의 오차결과 비교.
Fig. 2. Comparison of errors by MPIR and PIR.

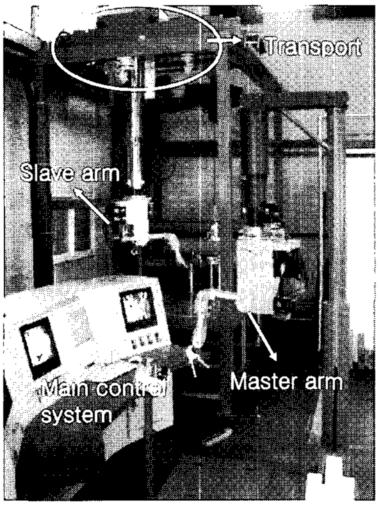


그림 3. 서보 매니퓰레이터 시스템.
Fig. 3. The servo manipulator developed by KAERI.

평균은 최적해와 동일한 값을 찾은 비율을 의미하며, 오차 평균은 최적해와의 오차 값에 대한 평균이며, 표준편차는 오차의 표준편차를 의미한다. 값은 임의로(randomly) 생성하였기 때문에 결과는 매회 조금씩 변동이 있으나 큰 차이는 나지 않으며, 비교기준인 오차는 $\|J\Delta q - \Delta x_d\| - \|J\Delta q^* - \Delta x_d\|$ 이다. 그림 2는 1000번의 결과에 대해 최적해와의 오차를 비교한 것이다. PIR에 비해 MPIR이 훨씬 좋은 결과를 제공함을 알 수 있다.

IV. 서보 매니퓰레이터 내고장 제어

한국원자력연구소에서 개발한 서보 매니퓰레이터 시스템은 이송장치, 슬레이브, 마스터, 및 제어시스템으로 구성되며, 전체적인 형상은 그림 3과 같다.

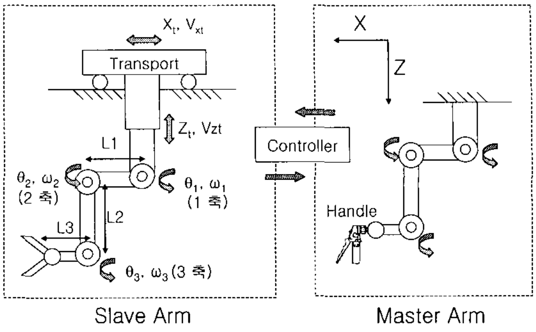


그림 4. 이송장치, 슬레이브 및 마스터의 운동 모델.
Fig. 4. Model of the transport, the slave, and the master.

이송장치는 거더/트롤리/텔레스코픽 튜브로 구성되어 X, Y, Z의 3차원 운동을 하며, 튜브 하단에 부착된 슬레이브를 핫셀내 임의의 지점에 위치시킬 수 있다. 슬레이브는 작업자를 대신하여 방사성 물질을 직접 취급하거나 핫셀내에 설치된 장치를 유지보수하기 위한 것으로, 6 자유도를 가지며 각 축은 서보모터에 의해 구동된다. 마스터는 슬레이브를 움직이기 위한 입력장치로서, 슬레이브와 동일한 형상을 갖는다. 따라서, 정상적인 상황에서는 마스터와 슬레이브의 각 축은 1:1 대응이고 마스터 축의 자세는 슬레이브의 해당 축에 대한 위치 지령이 된다.

운전 중에 발생할 수 있는 고장은 슬레이브에 장착된 서보모터로 가정하였다. 이송장치에 장착된 모터는 방사선원으로부터 멀리 떨어져있기 때문에 고장 대상에서 제외하였다. 또한 고장은 한 개의 모터에 한정하였다. 동시에 여러 개가 고장 나면 재형상만으로 대응하기는 어려워서 교체해야 하지만, 동시에 고장 날 확률은 매우 작다고 가정한다. 실제적으로 모터에 고장이 발생하면 유지보수 구역으로 이동하여 고장난 모터를 교체하여야 하지만, 이러한 작업은 많은 시간을 요한다. 따라서 간단한 작업 혹은 시급한 작업의 경우에는 제어법칙의 재형상을 통하여 계속적으로 수행하는 것이 유리하다. 각 모터에는 브레이크가 장착되어 있어서 모터가 오동작하면 브레이크가 작동하여 그 위치에서 고정된다. 이때 각 축의 1:1 대응은 더 이상 성립하지 않으며, 마스터 각축의 자세각이 위치명령이 되는 것이 아니고 끝단의 위치가 슬레이브 끝단에 대한 위치 명령이 된다.

1. 시스템 모델링

본 논문에서는 슬레이브의 평면(2차원) 운동만을 고려한다 (그림 4).

대상 작업물에 대해 적절한 방향을 잡으면 평면내의 작업이 많기 때문이다. 이에 대한 모델은 그림 4와 같다. 이는 실제 3, 5, 6축에서 일어나는 yaw 및 roll 운동은 고려하지 않고 pitch 운동만 고려한 개념도이며, 축은 그림 4에서처럼 재정의 하여 사용한다.

이송장치의 움직임(X, Z)은 정상적일 때는 고정되어 있지만, 슬레이브 모터에 고장이 발생했을 때는 여유 자유도의 역할을 수행한다.

표 3. 서보 매니퓰레이터 수치 사양.
Table 3. Numerical data of the servo manipulator.

파라미터	수치 사양	단위
L1, L2, L3	0.3, 0.3, 0.15	m
이송장치 속도	0.015, 0.01	m/sec
축별 각속도	1.2, 1.2, 3.5	rad/sec
기준 각도	0.0, 0.0, 0.0	degree
적분시간	0.025	sec

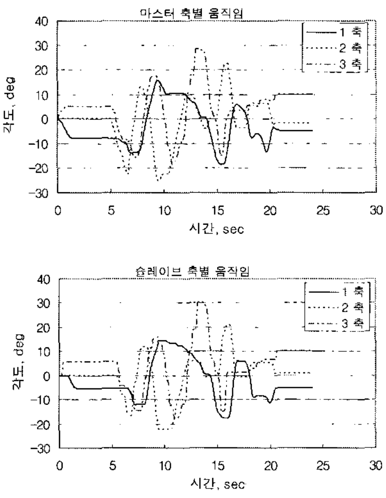


그림 5. 마스터/슬레이브 끝단 추종 비교(정상상태).
Fig. 5. End effector trajectories (normal condition).

슬레이브 끝단의 위치는 다음과 같다.

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

마스터 끝단의 위치는 (12)에서 이송장치의 움직임(x_t, z_t)을 제외한 형태가 되며, 끝단간의 위치 오차는 다음과 같이 표현된다.

$$e_p = J_S \Delta Q_S \tag{13}$$

$$e_p = \begin{bmatrix} x_e \\ z_e \\ \theta_e \end{bmatrix}_M - \begin{bmatrix} x_e \\ z_e \\ \theta_e \end{bmatrix}_S, \tag{14}$$

$$\Delta Q_S = \left[\Delta x_t \quad \Delta z_t \quad \Delta q_1 \quad \Delta q_2 \quad \Delta q_3 \right]^T,$$

$$J_S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_1 s_1 - L_2 c_{12} - L_3 s_{123} & -L_2 c_{12} - L_3 s_{123} & -L_3 s_{123} \\ 0 & 1 & L_1 c_1 - L_2 s_{12} + L_3 c_{123} & -L_2 s_{12} + L_3 c_{123} & L_3 c_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서, $s_{ijk} = \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$, $s_i = \sin\theta_i$, $c_{ijk} = \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $c_i = \cos\theta_i$ 이며, ΔQ_S 와 J_S 는 슬레이브 측의 변수이다. 모터 고장이 발생하여 고정되면, 해당 축의 자세값은 고정되며, 자코비안 행렬에서 해당 열이 삭제되고, 입력 변수에서도 제외된다.

(14)를 살펴보면, 독립적인 출력변수는 3개 이지만 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^f, ΔQ_S^f 라고 하면, 본 논문에서 다루고자 하는 내고장 제어 문제는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \frac{1}{2}\left(e_p - J_S^f \Delta Q_S^f\right)^T \left(e_p - J_S^f \Delta Q_S^f\right) \\ &\text{subject to } \Delta Q_{S,\min}^f \le \Delta Q_S^f \le \Delta Q_{S,\max}^f \end{aligned} \tag{15}$$

즉, 슬레이브 끝단의 위치가 마스터 끝단의 위치를 추종할 수 있도록 한다.

2. 실험적용

개발한 서보 매니퓰레이터의 수치적인 사양은 다음의 표 3과 같다. 본 논문에서는 속도한계에 적분시간을 곱한 값을 변위한계($\Delta q_{\max}$, $\Delta q_{\min}$)로 설정하였다.

그림 5는 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. 대체적으로 마스터 추종이 원활하게 이루어짐을 알 수 있다.

슬레이브의 1축과 2축 모터의 고장에 대해 제안한 기법을 적용하여 내고장 성능 테스트를 수행하였다. 실시간으로 대응하는 것은 아니며, 1축과 2축의 고장에 대응하는 프로그램을 사전에 작성하고 실제 고장이 발생하면 해당 프로그램을 적용하는 방식이다. 고장이 났을 때의 각 축의 위치는 편의상 표 3의 기준 각도로 가정하였다.

Case 1. 슬레이브 1축 모터 고장

고장이라고 가정한 슬레이브의 1축은 해당 모터에 대해 브레이크를 이용하여 고정하였다. 그림 6은 고장을 가정하고 재분배 없이 슬레이브의 움직임을 보인 것이다. 1 축이 고정되어 움직이지 않고 2, 3축만 조종할 때 끝단 위치 추종에 어려움이 있다. 그림 7은 고장에 대해 재분배(MPIR)를 적용하였을 때, 마스터와 슬레이브의 끝단 위치를 비교한 것이다. 2 축이 고정되어 있어도 대체적으로 마스터의 움직임을 추종하고 있지만, Z축 위치에 대한 추종은 다른 축에 비해 성능이 떨어진다. Z축 이송장치의 속도가 느려 쉽게 따라가지 못하기 때문이다. 그림 8은 이때 이송장치의 위치와 속도를 도시한 것이다. 그림 9는 의사 역행렬 재분배(MPIR)가 일어나는 시점을 보인 것인데, 초기의 0인 경우에는 의사 역행렬 (5) 만으로 추종이 가능한 경우이며, 1인 경우에는 MPIR이 수행된 부분이다.

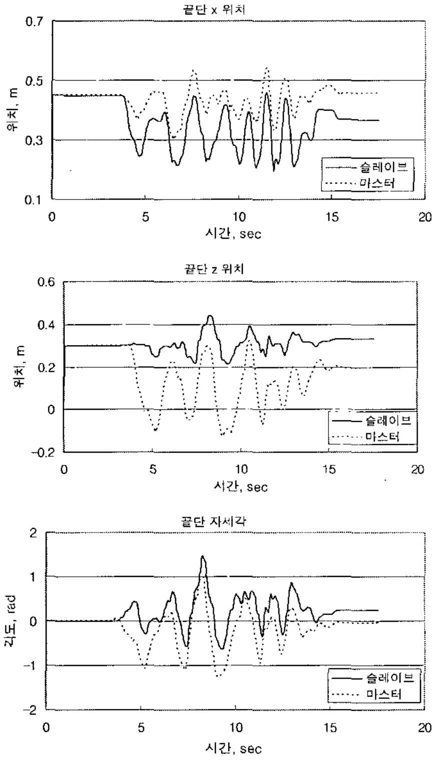


그림 6. 마스터/슬레이브 끝단 추종 비교(슬레이브 1축 고정 및 재분배 없을 때).

Fig. 6. End effector speed following(the 1st axis fixed and no redistribution).

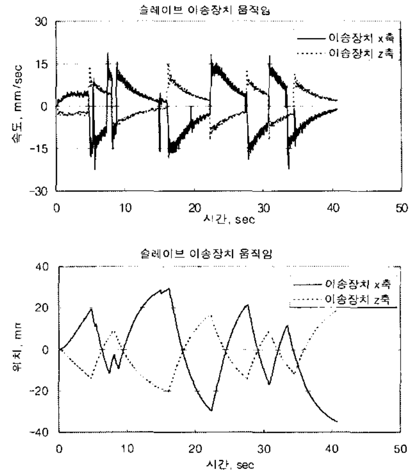


그림 8. 이송장치 축별 위치 및 속도 변화.

Fig. 8. History of the transport axes' position and speed.

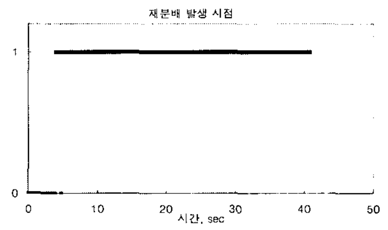


그림 9. MPIR 적용 시점 (0 - PI, 1 - MPIR).

Fig. 9. Point of MPIR (0 – PI only, 1 – MPIR adapted).

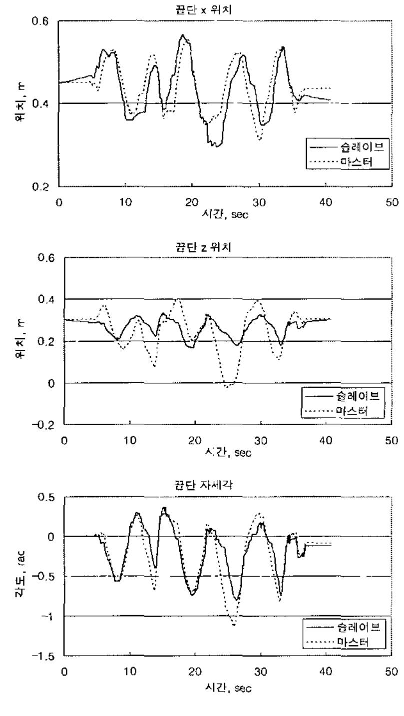


그림 7. 마스터/슬레이브 끝단 추종 비교(슬레이브 1축 고정 및 재분배 적용).

Fig. 7. End effector speed following(the 1st axis fixed and redistribution).

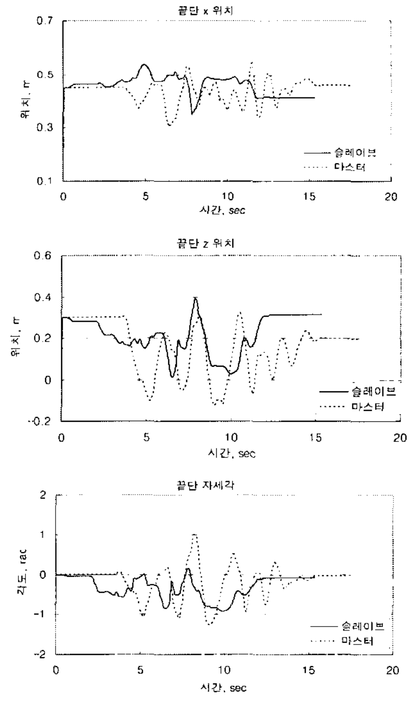


그림 10. 마스터/슬레이브 끝단 추종 비교(슬레이브 2축 고정 및 재분배 없을 때).

Fig. 10. End effector speed following(the 2nd axis fixed and no redistribution).

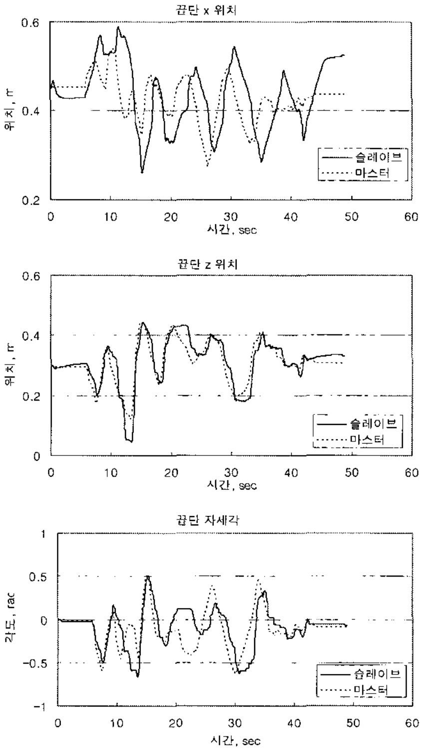


그림 11. 마스터/슬레이브 끝단 추종 비교(슬레이브 2축 고정 및 재분배 적용).

Fig. 11. End effector speed following(the 2nd axis fixed and redistribution).

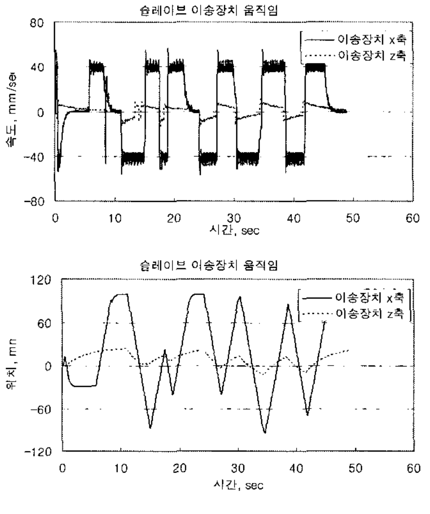


그림 12. 이송장치 축별 위치 및 속도 변화.

Fig. 12. History of the transport axes' position and speed.

Case 2. 슬레이브 2축 모터 고장

슬레이브 2축 모터 고장에 대해 테스트 하였다. Case 1과 마찬가지로 2축을 고정한 상태에서 마스터의 끝단을 추종하도록 하였다. 그림 10은 고장을 가정하고 재분배 없이 슬레이브의 움직임을 보인 것이다. 2 축이 고정되어 움직이지 않고 1, 3축만 조종할 때 끝단 위치 추종에 어려움이 있다.

Z축은 하중을 승강시키기 때문에 안전성과 직결되지만, X축은 수평이동이기 때문에 비교적 덜 위험하다. 그래서 속도 한계를 40 mm/s 로 높여서 테스트를 수행하였다.

그림 11은 고장에 대해 재분배를 적용하였을 때, 마스터와 슬레이브의 끝단 위치를 비교한 것이다. 2 축이 고정되어 있어도 대체적으로 마스터의 움직임을 추종하고 있다. X축 위치 추종의 경우 이송장치의 특성으로 지연은 있지만 추종은 이루어지고 있다. 그림 12를 보면 X축 위치 추종을 위해 이송장치가 최대 속도로 움직이는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 처음부터 MPIR이 적용이 되었다.

V. 결론

본 논문에서는 서보 매니퓰레이터 시스템의 내고장 제어를 위해, 의사 역행렬 재분배 기법을 이용하여 재형상하는 방법을 고려하였으며, 특히 수정된 의사 역행렬 재분배 기법을 제안하였다. 기존의 방법에 비해 최적해에 수렴하는 평균이 우수함을 알 수 있으며, 이를 실제 구현에 적용하여 슬레이브의 1개 축 고장에도 불구하고 양호하게 마스터의 위치를 추종하는 것을 보였다. 결론적으로 본 논문에서 제안한 수정된 의사 역행렬 재분배 기법은 일반적으로 여유자유도가 있는 제어 시스템의 조종력 분배 및 내고장 제어에 유용하게 사용될 수 있다.

참고문헌

[1] J. Brossard, "Ten years of life for the servo manipulator MA23M," *Proc. of the 39th Conference on Remote Systems Technology*, California, USA, pp. 112-115, 1991.

[2] R. Kress, J. Jansen, M. Noakes, and J. Herndon, "The evolution of teleoperated manipulators at ORNL," *Proc. of the ANS 79th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, Georgia, USA, pp. 623-631, 1997.

[3] R. Finotello, T. Grasso, A. Terribile, "State-of-art telerobotic system performs challenging manipulation task in underwater work sites," *Proc. of the ANS 79th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, Georgia, USA, pp. 638-645, 1997.

[4] E. Wu, J. Hwang, and J. Chladek, "Fault tolerant joint development for the space shuttle remote manipulator system : Analysis and experiment," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 5, pp. 675-684, 1993.

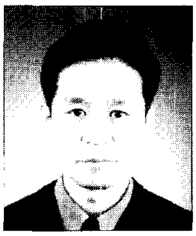
[5] K. Vandergriff, "Testing of components for use in high-level gamma radiation environments," *ORNL/TM-11507*, 1991.

[6] 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.

[7] 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.

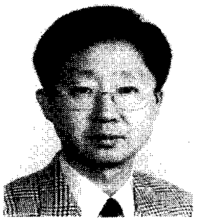
[8] C. Lewis and A. Maciejewski, "Fault tolerant operation of kinematically redundant manipulators for locked joint failures," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.

13, no. 4, pp. 622-629, 1997.
[9] K. Groom, A. Maciejewski, and V. Balakrishnan, "Real time failure tolerant control of kinematically redundant manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 6, pp. 1109-1116, 1999.
[10] M. Goel, A. Maciejewski, and V. Balakrishnan, "The design of control strategies tolerant to unidentified failures in kinematically redundant manipulators," *Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Michigan, pp. 867-873, 1999.
[11] G. Liu, "Control of robot manipulators with consideration of actuator performance degradation and failures," *Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Korea, pp. 2566-2571, 2001.
[12] W. Durham, "Constrained control allocation," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 16, no. 4, pp. 717-725, 1993.
[13] M. Bodson, "Evaluation of optimization methods for control allocation," *Proc. of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, AIAA 2001-4223, 2001.
[14] O. Härkegård, "Efficient active set algorithms for solving constrained least squares problems in aircraft control allocation," CDC 2002, Las Vegas, Nevada, 2002.
[15] R. Fletcher, Practical Methods of Optimization, John Wiley & Sons, 2000.
[16] J. Burken, P. Lu, Z. Wu, and C. Bahm, "Two reconfigurable flight control design methods : Robust servomechanism and control allocation," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 24, no. 3, pp. 482-493, 2001.
[17] L. Sciavicco and B. Siciliano, Modeling and Control of Robot Manipulators, McGraw Hill, pp. 90-94, 1996.
[18] J. Virnig and D. Bodden, "Multivariable control allocation and control law conditioning when control effectors limit," AIAA-94-3609-CP, 1994.
[19] 진재현, 유창선, 류혁, 탁민제, "수정된 의사 역행렬 재분배 기법을 이용한 여유 조종력 할당", 한국항공우주학회지 (게재확정), vol. 32, no. 9, 2004.
[20] E. Chong and S. Żak, An Introduction to Optimization, John Wiley & Sons, pp. 187-217, 2001.



진 재 현

1968년 2월 29일생. 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업(1990). 한국과학기술원 항공우주공학과 석사(1990) 및 박사(1997). 2001년~현재 한국원자력연구소 원격취급장치개발과제 선임연구원. 관심분야 내고장 제어, 원격로봇제어, 비행제어.

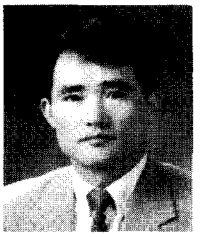


박 병 석

1960년 3월 20일생. 조선대학교 기계공학과 졸업(1986). 전남대학교 기계공학과 석사(1990). 충남대학교 기계설계공학과 박사(2002). 1987년~현재, 한국원자력연구소 원격취급실증장치개발과제 책임연구원. 관심분야 힘반영 및 원격로봇제어, 강인제어, 신호처리.

안 성 호

1964년 5월 9일생. 영남대학교 전자공학과 졸업(1986). 동대학원 석사(1988). 충남대학교 전자공학과 박사(2001). 1990년~현재, 한국원자력연구소 원격취급장치개발과제 책임연구원. 관심분야 힘반영 제어, 원격로봇제어, 강인제어, Anti windup 제어.



윤 지 섭

1958년 2월 3일생. 서울대학교 기계공학과 졸업(1980). 한국과학기술원 기계공학과 석사(1982) 및 박사(1987). 1987년~현재, 한국원자력연구소 사용후핵연료 원격취급실증장치개발과제 책임연구원/과제책임자. 관심분야는 방사성물질 원격취급기술, 생산자동화, 계측제어, 원격로봇.