

마스터 로봇의 동역학적 설계 Dynamic Design of Master Robots

* 김창호* 조국훈* 이병주* 한창수**

*한양대학교 제어계측공학과 (Tel: +82-345-400-5218; Fax: 0345-400-6639; E-mail: bj@hyunpl.hanyang.ac.kr)

**한양대학교 기계공학과 (Tel: +82-345-400-5247; Fax: 0345-406-6242; E-mail: cnrlab@email.hanyang.ac.kr)

Abstracts We investigate a design methodology for master arm which is employed in remote-site control. Though counter-balancing has been employed for the purpose of lessening the actuator loads, it results in the increase of dynamic load at the task position. Therefore, there exist a trade-off between counter-balancing and dynamic performance. The concept of a composite index is introduced to simultaneously consider those two effects in the design of master arms. Several alternative designs of master arms are suggested.

keyword: Master robot design, Dynamic performance, Counter-balancing.

1. 서론

"원격 제어기(teleoperator)"는 원격 제어(teleoperation)시에 사용되는 로봇이나 시스템의 통칭으로, 마스터-슬레이브 시스템이라고 불린다[9]. 마스터-슬레이브 시스템은 실제 핵발전소에서의 독성이나 방사선 물질의 처리처럼 인간 조작자로는 할 수 없는 다양한 작업을 수행하는데 사용된다.

마스터-슬레이브 시스템은 인간 조작자에서 제어되는 마스터암과 마스터암의 움직임을 모사하는 슬레이브 암으로 구성되어 있다[3]. 마스터암의 큰 두 가지 형태로는 직렬 구조와 병렬형 구조가 고려되고 있다.[7].

직렬형 구조는 기하학적으로 단순하고 넓은 작업 구간을 갖고 있으므로 대부분의 현존 로봇 시스템이나 힘반영 원격 조정기들은 이러한 구조를 갖고 있다. 그러나, 단점은 링크에 분산된 액츄에이터의 중량으로 인한 많은 정적 및 동적 처짐을 유발하여 시스템의 적재 하중 용량의 축소를 야기시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 카운터 밸런싱을 고려해 오고 있다. 카운터 밸런싱은 매니플레이터의 링크들의 무게 중심을 액츄에이터 부근으로 옮겨서 하중 토크를 줄이고자 하는 노력으로써 링크의 뒤에 추가로 물체를 부착하는 작업이다. 그러나, 카운터 밸런싱을 할 경우 조작자가 마스터암을 조작하는데 있어서 더 많은 inertia를 운반해야 하는 부담을 느끼게 된다. 본 논문에서는 조작자의 운동성과 카운터 밸런싱을 동시에 고려하는 설계 방식을 제안한다.

2. 설정 모델의 조건

시뮬레이션으로 고려하는 대상은 2자유도를 지니는 로봇이며 카운터 밸런싱을 고려하여 링크 길이의 왼쪽에서 1/4지점에 회전관절을 위치시킨다(그림 1). 매니플레이터의 운동 영역은 다음과 같다.

$$-90^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ, \quad 10^\circ \leq \theta_2 \leq 85^\circ \quad (1)$$

링크1의 무게는 10 kg, 링크2는 5 kg로 하며, 균일한 물질로서

가정한다.

각 링크는 평면형으로, 링크의 좌우 단면에서 두 개의 변수가 존재하고 있고 길이 방향으로 대칭으로 두 개의 변수를 바꾸어 줌으로서 무게중심의 위치가 변하게 된다. 각 링크의 길이 변수로 l_1, l_2 라고 정의하였고, 시뮬레이션에서는 1m로 정한다. 각 링크의 변수는 두 개로 r_1, r_2 와 r_3, r_4 라 하고 다음과 같은 구속 관계식을 갖는다(그림 2).

$$\begin{aligned} r_1 + r_2 &= 0.6 \quad (0.05m \leq r_1 \leq 0.55m), \\ r_3 + r_4 &= 0.6 \quad (0.05m \leq r_3 \leq 0.55m). \end{aligned} \quad (2)$$

3. 마스터암 디자인의 성능 해석

3.1 동역학식

일반적인 직렬 로봇에 대한 조인트 좌표계에서의 동역학식은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) \quad (3)$$

\mathbf{r} : $n \times 1$ joint torque,

$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$: $n \times n$ mass matrix of the manipulator,

$\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$: $n \times 1$ vector of centrifugal and Coriolis term,

$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$: $n \times 1$ vector of gravity term.

식 (3)에 대한 카티션(Cartesian) 좌표계에서의 동역학 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta}) \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}_x(\boldsymbol{\theta}) \quad (4)$$

($m \times 1$ force-torque vector acting on the end-effector of robot)

여기서,

$$\mathbf{M}_x(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}), \quad (5)$$

($m \times m$ Cartesian mass matrix of the manipulator)

$$\mathbf{V}_x(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}) (\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) - \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\theta}) \dot{\boldsymbol{\theta}}),$$

($m \times 1$ vector of centrifugal and Coriolis term)

$$G_x(\Theta) = J^T(\Theta)G(\Theta),$$

($m \times 1$ vector of gravity term)

J : 자코비안 (1차 기구학적 영향 계수).

각 링크의 중력을 지지하는 액츄에이터에 힘 벡터는 다음과 같이 정의되며

$$G(\Theta) = \begin{pmatrix} \tau_{g1} \\ \tau_{g2} \\ \vdots \\ \tau_{gn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

각 요소들은 아래와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \tau_{g1} &= P_{C1} \cos(\theta_1) M_1 g + \\ &\quad \left(\frac{3}{4} l_1 \cos(\theta_1) + P_{C2} * \cos(\theta_{1+2}) \right) M_2 g, \\ \tau_{g2} &= P_{C2} * \cos(\theta_{1+2}) M_2 g. \end{aligned} \quad (7)$$

P_{C1} , P_{C2} 는 각 힌지 위치에서 각 링크의 무게중심까지의 거리이다.

3.2 설정 모델

그림 2로부터 x축 상의 링크의 무게중심은 다음과 같이 정의되고

$$x_{c1} = \left(\frac{1}{3} + \frac{5}{9} r_2 \right) l_1, \quad (8)$$

$$x_{c2} = \left(\frac{1}{3} + \frac{5}{9} r_4 \right) l_2. \quad (9)$$

힌지 위치에서 무게 중심까지의 거리는 다음과 같이 구해진다.

$$P_{C1} = x_{c1} - \frac{1}{4} l_1, \quad (10)$$

$$P_{C2} = x_{c2} - \frac{1}{4} l_2. \quad (11)$$

이 때의 각 링크의 질량에 대한 수직 방향의 관성 질량 모멘트는

$$I_1 = \frac{-5r_2^2 + 3r_2 + 0.9}{54}, \quad (12)$$

$$I_2 = \frac{-5r_4^2 + 3r_4 + 0.9}{54}. \quad (13)$$

Iterative Newton-Euler방식[2]을 이용하여 관절 공간에서의 관절 질량 행렬은 아래와 같이 구해지고

$$M(\Theta) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} M_{11} &= I_1 + I_2 + 2m_2 P_{C2} \cos(\theta_2) l_1 + m_2 (l_1^2 + P_{C2}^2) \\ &\quad + m_1 P_{C1}^2, \end{aligned}$$

$$M_{12} = m_2 P_{C2}^2 + I_2 + m_2 P_{C2} \cos(\theta_2) l_1,$$

$$M_{21} = M_{12},$$

$$M_{22} = m_2 P_{C2}^2 + I_2.$$

4. 최적화

식 (4)의 첫 번째 항을 SVD기법을 이용하여 다음과 같은 형태로 표현하면,

$$M_x(\Theta) \dot{X} = U D V^T \dot{X}. \quad (15)$$

여기서 U는 출력 공간에 관련된 직교 벡터로 구성된 $m \times m$ 행렬을, 그리고 V는 입력 공간에 관련된 직교 벡터로 구성된 $m \times m$ 행렬을 의미한다. $D(m \times m)$ 는 다음과 같은 대각 행렬로 이루어져 있다.

$$D = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_m \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 $\sigma_i (i=1, \dots, m)$ 는 $M_x(\Theta)$ 의 특이 값을 나타낸다. 최대값(σ_{\max})은 σ_1 가 되고 최소값(σ_{\min})은 σ_m 으로 정의한다.

$M_x(\Theta)$ 행렬의 동력학적 등방성비(isotropic index)는 다음과 같이 정의하며

$$w_r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}, \quad (17)$$

링크의 하중에 의한 액츄에이터 부담을 나타내는 토크 높음 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_m = \sqrt{\tau_{g1}^2 + \tau_{g2}^2}. \quad (18)$$

다음으로는 여러 설계 지수들을 하나의 지수로 포함시키는 방법을 설명한다. 여러 개의 전역 설계 지수들을 하나로 묶어 주기 위해서는 설계 지수들의 크기를 상대적으로 같게 만들어주는 설계 지수의 무차원화가 필요하다. 이들을 각각 GPI_{\max} , GPI_{\min} 이라 하면, 설계 지수를 최대화시키려는 경우, 무차원화된 설계 지수는

$$\widehat{GPI} = \frac{GPI - GPI_{\min}}{GPI_{\max} - GPI_{\min}} \quad (19)$$

으로 정의되고, 최소화시키려는 경우는

$$\widehat{GPI} = \frac{GPI_{\max} - GPI}{GPI_{\max} - GPI_{\min}} \quad (20)$$

로 정의된다. “”는 무차원화되어 그 값이 0과 1사이에 존재한다는 것을 의미한다. 동력학적 복합 설계 지수(Dynamic Composite Design Index)는 다음과 같이 주어진다.

$$DGPI = \min \{ \widehat{GPI}_1^\alpha, \widehat{GPI}_2^\beta, \dots \}. \quad (21)$$

여기서 α, β 는 가중치들로 1보다 큰 값을 가진다. 상대적으로 중요한 설계 지수에 대하여 큰 가중치를 주어 다른 설계 지수보다 더 많이 최적화시킬 수 있다. 이렇게 구하여진 복합 설계 지수의 최대 값을 구하면 그때의 설계 인자의 값들이 우리가 구하고자 하는 최적화 문제의 해이다.

최적 설계 사용한 두 개의 설계 지수 즉, 등방성비(w_r)와 하중 토크 높음(τ_m)은 설계 인자의 구속 조건을 만족하는 범위 내에서 최대 값과 최소 값을 가지는데 이 값을 사용하여 다음과 같이 무차원화한다.

$$\widehat{W} = \frac{W_r - W_{rMin}}{W_{rMax} - W_{rMin}}, \quad (22)$$

$$\widehat{CI} = \frac{\tau_{rMax} - \tau_r}{\tau_{rMax} - \tau_{rMin}} \quad (23)$$

여기서, 동역학적 복합 설계 지수 DCDI(Dynamic Composite Design Index)는 다음과 같이 구해진다.

$$DCDI = \min\{\widehat{WP}, \widehat{CI}\} \quad (24)$$

DCDI의 값이 최대일 때의 설계 인자의 값이 우리가 원하는 최적 설계의 해이다.

식 (24)에 대하여 w_r 와 τ_m 의 비중을 같게 두어 a를 1로 b를 1로 하여 최적화 되는 경우에는 r_1 은 0.55m, 그리고 r_3 은 0.35m로 구해진다(그림 3~5).

두 번째로 운동성의 등방성비(w_r)에 비중을 두어 a를 2로 b를 1로 하여 최적화 되는 경우에는 r_1 은 0.55m, 그리고 r_3 은 0.3m로 구해진다(그림 6~8).

세 번째로 하중에 의한 토크(τ_m)에 비중을 두어 a를 1로 b를 2로 하여 최적화 되는 경우에는 r_1 은 0.55m, 그리고 r_3 은 0.4m로 구해진다(그림 9~12).

각각의 결과에 대한 매니플레이터의 형태는 그림 3, 6, 그리고 9에 보여지며, 제한 영역 x-y평면에서의 w_r 와 τ_m 는 그림 4, 7, 그리고 10과 그림 5, 8, 그리고 11에서 보여준다. 시뮬레이션 결과를 해석해 보면 링크 1의 카운터 밸런싱은 운동성에 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

그림 3~11의 데이터를 간략히 그림 12, 그림 13을 통하여 비교 분석하면, 그림 12가 그림 13보다 세 가지 경우에(균등한 가중치를 가진 경우, 하중 토크에 큰 가중치를 준 경우, 등방성비에 큰 가중치를 준 경우)에 있어서 주어진 활동 구간 안에서 점유하는 영역의 차이가 현저함을 살펴볼 수 있다. 즉, 하중 토크는 설계 목적에 따라서 크게 변화가 없지만 등방성비는 현저한 변화가 있는 것을 살펴볼 수 있다. 따라서, 링크 2의 설계에 따라서 시스템의 운동성을 향상시킬 수 있음을 제시해 준다.

5. 결론

본 논문에서는 마스터암의 설계에 있어서 카운터 밸런싱은 하중 토크를 줄일 수 있으나 이와 상반되게 작업자의 운동성이 격감할 수 있다는 사실에 근거하여 운동성과 카운터 밸런싱 효과를 동시에 고려하는 복합 설계 방식을 제안하였다. 추후 과제로는 공간형 마스터암에 관한 동역학적 설계를 고려하고자 한다.

6. 후기

본 연구는 학술진흥재단 대학부설연구소 지원과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Yi, B.J., Lee, S.H., and Kwak, Y.K., "Optimal Dynamic

Design Anthropomorphic Robot Module with Redundant Actuators", KSME, Vol. 10, No. 3, pp. 265-276, 1996.

[2] Craig, J.J., "Introduction to Robotics", Addison Wesley, 2nd ed, pp. 200 pp. 211-212, 1989.

[3] Furuta, K. and Kosuge, K., "Master-Slave Manipulator based on Virtual Internal model following control concept", IEEE R&A, vol 1, pp. 567-572, 1987.

[4] Beer, F.P. and Jonson, E.R., "Vector Mechanics for engineers Dynamics", McGraw-Hill, 2nd edition, pp. 1000-1005, 1990.

[5] Strang, G., "Linear Algebra and Its Applications", Harcourt Brace Jovanovict, Publishshers, 1st ed, 1980.

[6] Ulrich, N. and Kumar, V., "Passive Mechanical Gravity Compensation for Robot Manipulators," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 1536-1541, 1991

[7] 김희국, 이병주, "병렬 3자유도 구형 모듈의 해석과 힘반영 원격조종기의 구현", 대한 기계 학회, 제10권, pp. 2501-2513, 1994.

[8] 김기호, 김승호, "범용 매스터/슬레이브 조작용 위한 동적 혼련 시뮬레이터", 제어계측·자동화·로보틱스연구회 학술대회, pp. 54-57, 1996.

[9] 손재범, 정완규, 염영일, "원격제어시스템", 제어·자동화·시스템 공학 학회지, 제2권 제3호, pp. 42-60, 1996.

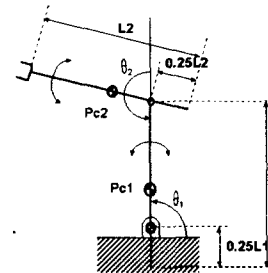


그림 1. 평면 2 자유도 매니플레이터

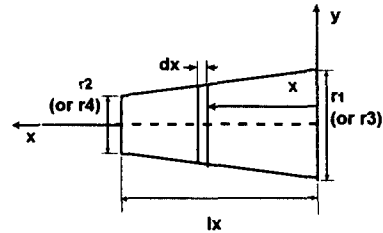


그림 2. 링크 모양

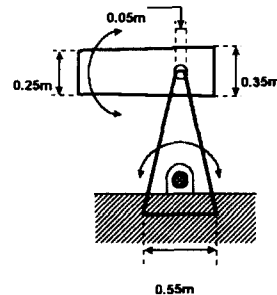


그림 3. 균일한 가중치의 최적화 결과의 매니플레이터

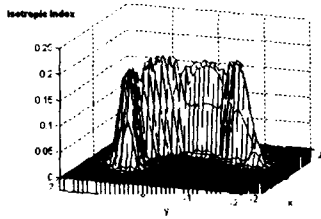


그림 4. 균일한 가중치에서의 등방성비

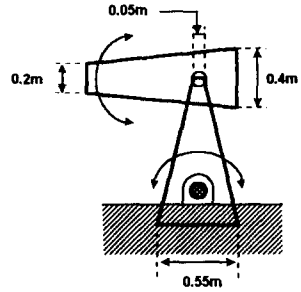


그림 9. 하중 토크에 대해 큰 가중치를 준 경우의 매니플레이터

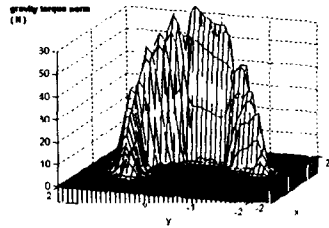


그림 5. 균일한 가중치에서의 하중 토크

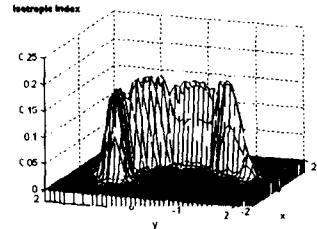


그림 10. 하중 토크에 대해 큰 가중치를 준 경우의 등방성비

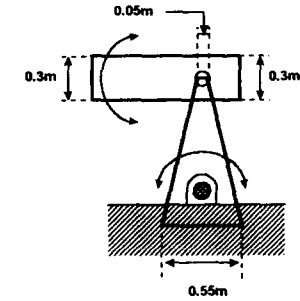


그림 6. 등방성비에 큰 가중치를 준 경우의 매니플레이터

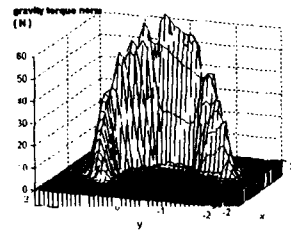


그림 11. 하중 토크에 대해 큰 가중치를 준 경우의 하중 토크

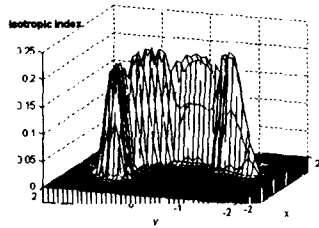


그림 7. 등방성비에 큰 가중치를 준 경우의 등방성비

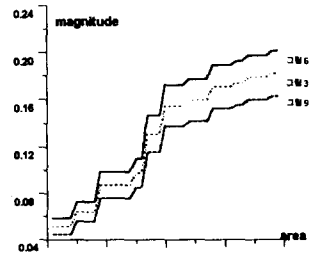


그림 12. 세 가지 경우에 대한 등방성비 비교

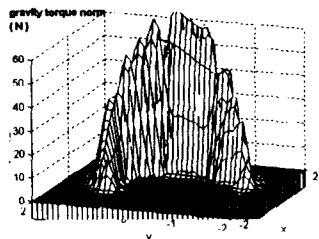


그림 8. 등방성비에 큰 가중치를 준 경우의 하중 토크

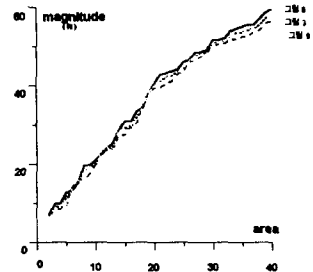


그림 13. 세 가지 경우에 대한 하중 토크 비교