

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단 대학부설 연구소 연구과제 연구비에 의하여 연구되었음.

IMS를 위한 Human Interface 시스템 개발 : 마스터 로봇의 동역학적 설계

김창호*, 이병주*, 한창수**

Development of Human Interface System for IMS : Dynamic Design of Master Robots

Changho Kim*, Byung-Ju Yi*, Changsoo Han**

ABSTRACT

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 exists 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.

Key Words : master robot design(마스터 로봇 설계), master-slave system(마스터 슬레이브 시스템), composite design index(복합설계지수).

1. 서론

지적 생산 시스템(IMS: intelligent manufacturing system)의 목적은 생산성 및 품질을 획기적으로 향상시키고 향후 산업구조의 고도화를 유도하며 기술, 경제적 파급효과를 극대화하는 것이다. 이러한 IMS의 설계를 위한 핵심 요소기술에는 IMS를 위한 로봇군 제어기술, IMS 요소기기용 제어기술, IMS를 위한 고기능 Human-Interface 시스템 기술, IMS감시용 Vision 시스템 기술, IMS의 효율적인 운용을 위한 모델링 및 지적 일정계획 기술 등을 포함한다.

IMS는 여러 개의 요소기기로 이루어진 매우 방대한 시

스템이므로 모든 요소기기의 동작을 가시적으로 관찰할 수 없으며 실제적으로는 모든 요소기기의 동작은 현장에 인접한 제어기에서 작업자에 의하여 운용되어야 한다. 따라서, 작업자가 데이터 모니터링에만 의존하는 것보다 손쉽게 시스템의 동작을 파악하고 능동적으로 시스템을 운용하기 위하여 IMS현장의 각 요소기기의 동작을 쉽게 제어하며 관찰할 수 있는 하드웨어 및 소프트웨어의 개발이 필요하다. 더욱이 IMS의 역할이 바뀌거나 일부 변동사항이 발생하는 경우에는 각 요소기기의 동작을 재조정 해야 하므로 그래픽 애니메이션 시스템의 구현을 통하여 원격리에서 실제의 요소기기들의 동작 및 제어방식을 가르치는 원격제어시스템(tele-operating system)은 지능형

* 한양대학교 제어측공학과
** 한양대학교 정밀기계공학과

생산시스템에 있어서 매우 중요한 요소이다⁽¹⁻²⁾.

심해, 우주공간, 방사능지역 등과 같이 인간이 직접 접근하여 작업을 수행할 수 없는 극한 작업환경에서 인간의 선택과 판단에 따라 인간을 대신하여 로봇이 작업을 수행하도록 하는 것을 마스터-슬레이브 시스템(master-slave system)이라 하며, 마스터-슬레이브 시스템은 조작자(operator), 마스터 로봇(master robot), 통신블록(communication block), 슬레이브 로봇(slave robot), 작업환경(environment)으로 구성된다⁽³⁻⁶⁾. Human interface 시스템은 이러한 환경 하에서 인간의 판단과 지능적인 능력을 손쉽게 기계에 interface함으로써 작업의 편리성 및 유연성을 향상시키는 것을 목적으로 한다.

본 논문에서는 특별히 human interface 시스템의 일환인 마스터 로봇의 동역학적인 설계에 초점을 맞추고자 한다. 마스터 로봇의 형태는 크게 분류하여 직렬형과 병렬형 구조가 고려되고 있다. 이중 직렬형 구조는 기하학적으로 단순하고 넓은 작업 구간을 지니므로 대부분의 현존 로봇 시스템이나 힘반영 원격 조정기에서 채택되고 있다⁽²⁾. 기존의 일반적인 로봇설계에 있어서는 링크의 중량으로 인한 많은 정적 및 동적 처짐 그리고 액츄에이터의 부담을 해결하기 위하여 링크의 뒤쪽 말단에 무게 추를 부착하는 카운터 밸런싱(counter balancing)을 고려하고 있다^(3, 7-8). 그러나, 마스터 로봇의 설계에 있어서는 카운터 밸런싱은 마스터 로봇을 조작하는데 있어서 더 많은 관성(inertia)을 운반해야 하는 부담을 주게 된다. 이러한 부담은 조작자에게 있어 작업시 실재감을 떨어뜨리는 원인이 되며, 장시간 사용할 때 피로를 가중시킴으로 조작성을 격감시키게 된다. 따라서, 본 논문에서는 조작자를 위한 운동성과 액츄에이터의 부담을 줄이기 위한 카운터 밸런싱을 동시에 고려하는 설계방식을 제안하고 하나의 마스터 로봇 모델에 대한 모의시험을 통하여 마스터 로봇의 성능을 향상시킬 수 있음을 제시하고자 한다.

2. 마스터 암의 모델링

2.1 마스터 암의 구조

본 논문에서 설계대상으로 삼은 마스터 로봇의 형태는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 직렬 3자유도 공간형 마스터 로봇이며, 카운터밸런싱을 고려하여 두 번째와 세 번째 관절의 부착지점을 각 링크 전체 길이의 1/4지점으로 정하였다.

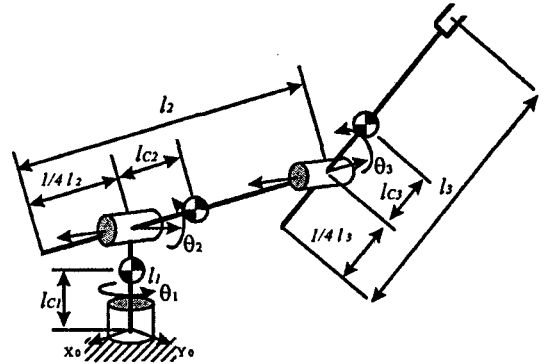


Fig. 1 3 DOF Master Arm

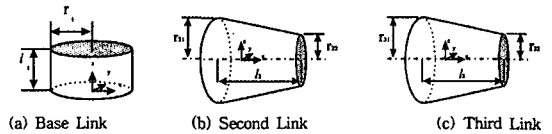


Fig. 2 Link Model

Fig. 2는 각 링크의 형태를 나타낸다. 베이스링크는 반지름이 r_1 인 원기둥이며, 링크 2와 링크 3은 각각 양 끝 단 면의 반지름이 r_{21} , r_{22} 와 r_{31} , r_{32} 인 직원뿔대의 형태를 지닌다. 원기둥형태의 베이스 링크에 대한 관성질량 모멘트는 국부좌표계에 대하여

$$I_{x1} = I_{y1} = \frac{1}{12}(3r_1^2 + 4l_1^2)m_1, \quad (1)$$

$$I_{z1} = \frac{1}{2}m_1r_1^2, \quad (2)$$

으로 표현된다. 또한, 직원뿔대형태의 링크 2의 국부좌표계에 대한 관성질량모멘트(inertia)는

$$I_{x2} = \frac{3m_2(r_{22}^5 - r_{21}^5)}{10(r_{22} - r_{21})(r_{21}^2 + r_{21}r_{22} + r_{22}^2)}, \quad (3)$$

$$I_{y2} = I_{z2} = \frac{3m_2}{(r_{21}^2 + r_{21}r_{22} + r_{22}^2)} \left\{ \frac{(r_{22}^5 - r_{21}^5)}{20(r_{22} - r_{21})} + \frac{l_2^2(r_{21}^2 + 3r_{21}r_{22} + 6r_{22}^2)}{30} \right\} - m_2(\bar{x}_2)^2 \quad (4)$$

으로 유도되며, 동일한 직원뿔대형태인 링크 3의 국부좌표계에 대한 관성질량모멘트도 마찬가지로 방식으로 다음과 같이 주어진다.

$$I_{x3} = \frac{3m_3(r_{32}^5 - r_{31}^5)}{10(r_{32} - r_{31})(r_{31}^2 + r_{31}r_{32} + r_{32}^2)}, \quad (5)$$

$$I_{y3} = I_{z3} = \frac{3m_3}{(r_{31}^2 + r_{31}r_{32} + r_{32}^2)} \left\{ \frac{(r_{32}^5 - r_{31}^5)}{20(r_{32} - r_{31})} + \frac{l_3^2(r_{31}^2 + 3r_{31}r_{32} + 6r_{32}^2)}{30} \right\} - m_3(\bar{x}^3)^2. \quad (6)$$

직원빨대 형태의 링크 2의 무게중심은 링크 국부 좌표계에 대하여

$$\bar{x}_2 = \frac{l_2(r_{21}^2 + 2r_{21}r_{22} + 3r_{22}^2)}{4(r_{21} - r_{22})^2 + 12r_{21}r_{22}}, \quad (7)$$

$$\bar{y}_2 = \bar{z}_2 = 0 \quad (8)$$

으로 표현되며, 링크 3의 무게중심도 동일한 방식으로 다음 식으로 표현된다.

$$\bar{x}_3 = \frac{l_3(r_{31}^2 + 2r_{31}r_{32} + 3r_{32}^2)}{4(r_{31} - r_{32})^2 + 12r_{31}r_{32}}, \quad (9)$$

$$\bar{y}_3 = \bar{z}_3 = 0. \quad (10)$$

링크 2와 링크 3은 양 끝단면 반지름의 비에 따라 링크의 무게 중심 위치가 변화됨을 살펴볼 수 있다.

2.2 마스터 암의 동역학 모델링

본 논문에서 대상으로 하는 마스터 암의 동역학식은 다음과 같이 표현할 수 있다⁽⁹⁾.

$$T_\phi^i = [I_{\phi\phi}^*] \ddot{\phi} + \dot{\phi}^T [P_{\phi\phi}^*] \dot{\phi} + Q. \quad (11)$$

여기서, T_ϕ^i 는 관절 액추에이터의 토크벡터(torque vector)이며, $[I_{\phi\phi}^*]$ 는 관절공간에서 표현된 관성행렬(inertia matrix)로서 마스터 로봇의 가속도에 관계된 항이고, $[P_{\phi\phi}^*]$ 는 관성률 어레이(inertial power array)로서 속도에 관계되며, Q 는 중력 토크 벡터(gravity torque vector)로서 마스터 로봇의 질량에 의한 중력 가속도의 영향을 나타낸다.

관절공간에 기준을 둔 관성행렬은

$$[I_{\phi\phi}^*] = \sum_{j=1}^{N_m} (m_j [{}^j G_\phi^c]^T [{}^j G_\phi^c] + [G_\phi^j]^T [J^j] [G_\phi^j]) \quad (12)$$

으로 정의되고, $[J^j] = [I^{jx} : I^{jy} : I^{jz}]$ 는 기준좌표계(reference coordinate frame)에 대하여 표현된 매니플레이터의 링크 j 에 대한 관성행렬(inertia matrix)이다. m_j 는 매니플레이터의 링크 j 의 질량이고, N_m 은 링크의 개수이며, $[{}^j G_\phi^c]$ 는 매니플레이터의 링크 j 의 질량 중심의 선형 속도에 대한 일차 기구학적 영향계수(KIC : Kinematic Influence Coefficient)이고, $[G_\phi^j]$ 는 매니플레이터의 링크 j 의 회전 속도에 대한 일차 KIC로 각각 정의된다⁽⁶⁾.

본 논문에서 대상으로 하는 3 자유도 공간형 마스터 로봇의 경우, 관절공간에서의 관성행렬은

$$[I_{\phi\phi}^*] = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

여기서,

$$q_{11} = I_{z1} + m_2 l^2 c_2 c_2^2 + I_{x2} s_2^2 + I_{y2} c_2^2 + m_3 (l_2 c_2 + l_{c3} c_{23})^2 + I_{x3} s_{23}^2 + I_{y3} c_{23}^2, \quad (13.a)$$

$$q_{22} = m_2 l^2 c_2 + I_{z2} + m_3 (l_2^2 + 2l_2 l_{c3} c_3 + l_{c3}^2) + I_{z3}, \quad (13.b)$$

$$q_{23} = q_{32} = m_3 l_2 l_{c3} c_3 + l_{c3}^2 + I_{z3}, \quad (13.c)$$

$$q_{33} = m_3 l_{c3}^2 + I_{z3}, \quad (13.d)$$

$$q_{12} = q_{13} = q_{21} = q_{31} = 0. \quad (13.e)$$

한편, 식 (11)에서 정의된 관절공간에서의 관성률 어레이는 다음과 같이 정의되며

$$[P_{\phi\phi}^*] = \sum_{j=1}^{N_m} \{ m_j ([{}^j G_\phi^c]^T \circ [{}^j H_\phi^c]) + ([G_\phi^j]^T [J^j]) \circ [H_\phi^j] + [G_\phi^j]^T ([G_\phi^j]^T \circ [\Sigma^j]) [G_\phi^j] \}. \quad (14)$$

여기서, $[{}^j H_\phi^c]$ 는 $3 \times 3 \times 3$ 행렬로서 매니플레이터의 링크 j 의 질량 중심의 선형 가속도에 대한 이차 KIC이고, $[H_\phi^j]$ 는 $3 \times 3 \times 3$ 행렬로서 매니플레이터의 링크 j 의 회전 가속도에 대한 이차 KIC이다. $[\Sigma^j]$ 는 $3 \times 3 \times 3$ 행렬로서 식 (12)의 $[J^j]$ 로부터 아래와 같이 정의된다.

$$[\Sigma^j] = \begin{bmatrix} 0 & : & I_z^j & : & -I_y^j \\ -I_z^j & : & 0 & : & I_x^j \\ I_y^j & : & -I_x^j & : & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

또한 식 14)에서 사용된 'o'는 일반화된 스칼라 돛 프로덕트(generalized scalar dot product)로서 행렬과 삼차원 어레이 간의 오퍼레이터로 정의된다⁶⁾.

마스터 암의 작업공간에서 정의되는 동력학식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_u^i = [I_{uu}^*] \ddot{u} + \dot{u}^T [P_{uuu}^*] \dot{u} \quad (16)$$

여기서, $[I_{uu}^*]$ 와 $[P_{uuu}^*]$ 는 각각 작업공간에서 정의되는 관성행렬과 관성률 어레이를 각각 나타내며 다음과 같이 주어진다⁶⁾.

$$[I_{uu}^*] = [G_u^*]^T [I_{\phi\phi}^*] [G_u^*] \quad (17)$$

$$[P_{uuu}^*] = \{ \{ [G_u^*]^T [I_{\phi\phi}^*] \} \circ [H_{uu}^*] + [G_u^*]^T \{ \{ [G_u^*]^T \circ [P_{\phi\phi\phi}^*] \} \} [G_u^*] \} \quad (18)$$

각 링크의 중력 가속도에 의한 하중을 지지하는 관절 액츄에이터의 토크를 나타내는 벡터는 식 (11)의 마지막 항으로서

$$Q = \begin{bmatrix} \tau_{q1} \\ \tau_{q2} \\ \tau_{q3} \end{bmatrix} \quad (19)$$

로 정의되며, 각 요소는 다음과 같다.

$$\tau_{q1} = 0, \quad (20)$$

$$\tau_{q2} = l_{c2} \cos(\theta_2) m_2 g + \left(\frac{3}{4}\right) l_2 \cos(\theta_2) + l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) m_3 g, \quad (21)$$

$$\tau_{q3} = l_{c3} \cos(\theta_2 + \theta_3) m_3 g. \quad (22)$$

3. 최적설계지수

본 논문에서는 마스터 로봇의 설계지수로 작업 공간에서의 가속도에 관련된 운동성을 나타내는 가속도 등방성

비(acceleration isotropy)와 속도에 의한 운동성을 나타내는 속도지수(velocity index) 및 링크 하중에 의한 액츄에이터에 대한 부담을 의미하는 중력 토크 놈(gravity torque norm)을 사용한다. 다음에서는 각각의 설계지수를 소개하고 정의된 지수를 통합적으로 최적화에 반영하는 방법에 관하여 기술한다.

3.1 가속도 등방성비

작업 공간에서의 마스터 로봇의 가속도에 의한 운동성을 나타내는 등방성비는 식 (17)의 관성행렬로부터 얻을 수 있는데, SVD(Singular Value Decomposition)방법을 사용하여

$$[I_{uu}^*] = U D V^T \quad (23)$$

로 표현할 수 있다. 여기서, U 는 출력공간에 관련된 직교 벡터로 구성된 3×3 행렬, D 는 대각 요소가 특이값들로 이루어진 3×3 대각행렬, V 는 입력공간에 관련된 직교 벡터로 구성된 3×3 행렬이 된다. 대각 행렬을 구성하는 특이값들 중 최대 특이값 (σ_{max})과 최소 특이값 (σ_{min})의 비는 가속도 등방성비를 나타내며 다음 식과 같이 정의된다⁷⁾.

$$\sigma_I = \frac{\sigma_{min}^i}{\sigma_{max}^i} \quad (24)$$

가속도 등방성비는 1에 가까울수록 작업공간에서의 모든 방향으로 동일한 가속도 운동특성을 가짐을 의미한다. 작업공간 전역에 분포된 동력학적 등방성비의 평균값을 전역 가속도 등방성비(global acceleration isotropy)라 하며 다음 식과 같이 정의하며

$$\Sigma_I = \frac{\int_V \sigma_I dv}{\int_V dv}, \quad (25)$$

여기서, 분모 항은 대상작업공간의 체적을 의미한다.

3.2 속도지수

작업 공간에서의 마스터 로봇의 속도에 관련된 운동성을 나타내는 속도지수는 관성률 어레이 $[P_{uuu}^*]$ 로부터 얻을 수 있다. 식 (18)로부터 유도된 작업공간에서의 관성률 어레이는 $3 \times 3 \times 3$ 의 행렬이며, 이를 구성하는 세 개의 3×3 행렬에 대하여 가속도 등방성비에서와 동일한 방

식으로 SVD 방법을 사용하여 대각행렬을 구한다. 각 행렬은 순서적으로 x , y 그리고 z 방향의 속도특성에 관련되며 이러한 각 행렬에 대한 특이값들 중 최대 특이값 (σ_{\max})의 역수들의 평균을 속도지수(velocity index)로 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_p = AVG \left\{ \frac{1}{\sigma_{1 \max}^p} + \frac{1}{\sigma_{2 \max}^p} + \frac{1}{\sigma_{3 \max}^p} \right\} \quad (26)$$

여기서, $\sigma_{i \max}^p$ 는 i 번째 행렬의 대각행렬의 특이값들 중 최대값을 의미한다. 작업공간의 모든 방향으로 고른 속도 특성을 지니기 위하여 각 방향으로의 최대속도를 최소로 하는 방법이 고려될 수 있다. 정의된 σ_p 를 최소화함은 이러한 목적을 만족시키는 특성을 지닌다. 즉, 속도지수가 클수록 작업공간에서의 모든 방향으로 동일한 속도 운동특성을 가짐을 의미한다. 작업공간 전역에 분포된 속도지수의 평균값을 전역속도지수(global velocity index)라 하며 다음 식과 같이 정의한다.

$$\Sigma_p = \frac{\int_v \sigma_p dv}{\int_v dv} \quad (27)$$

3.3 중력토크

링크 하중에 의한 액츄에이터에 대한 부담을 의미하는 중력토크 놈(gravity torque norm)은 식 (20) - 식 (22)로부터 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_\tau = \sqrt{\tau_{q1}^2 + \tau_{q2}^2 + \tau_{q3}^2} \quad (28)$$

이 값이 클수록 관절에 링크 하중으로 인한 액츄에이터의 부담이 큰 것을 의미한다. 작업공간 전역에 분포된 중력토크의 평균값을 전역 중력토크 놈(global gravity torque norm)이라 하며,

$$\Sigma_\tau = \frac{\int_v \sigma_\tau dv}{\int_v dv} \quad (29)$$

으로 정의한다.

3.4 복합설계지수

앞의 두 절에서 설명한 세 가지 설계지수를 하나의 설계지수로 통합시키는 방법을 기술한다. 크기와 단위가 서로

다른 여러 개의 전역설계지수(global design index)들을 하나의 복합지수로 묶어 주기 위해서는 전역설계지수들의 크기를 상대적으로 같게 만들어주는 무차원화가 필요하다. 주어진 설계영역에서 예측되는 전역설계지수의 최대, 최소값을 각각 GDI_{\max} , GDI_{\min} 이라 하면, 설계지수를 최대화시키려는 경우의 무차원화된 설계지수는

$$G\hat{D}I = \frac{GDI - GDI_{\min}}{GDI_{\max} - GDI_{\min}} \quad (30)$$

으로 정의되며, 최소화시키려는 경우의 무차원화된 설계지수는

$$G\hat{D}I = \frac{GDI_{\max} - GDI}{GDI_{\max} - GDI_{\min}} \quad (31)$$

으로 정의된다. 'v' 은 무차원화되어 그 값이 0과 1사이에 존재한다는 것을 의미한다.

복합설계지수(composite global design index)는 다음과 같이 정의된다.

$$CGDI = \min\{G\hat{D}I_1^\alpha, G\hat{D}I_2^\beta\} \quad (32)$$

여기서, α 와 β 는 가중치들로서 1보다 큰 값을 지닌다. 각각의 $G\hat{D}I$ 는 0과 1 사이의 값이므로 가중치를 취하면 더욱 작은 값이 되며 이 중에서 최소값을 취함은 상대적으로 중요한 설계지수에 대하여 큰 가중치를 부여함으로써 다른 설계지수보다 더 많이 최적화에 참여함을 의미한다. 설계영역의 각 지점에서 이러한 방식으로 구해진 CGDI 중에서 최대값을 만족시키는 설계인자의 값들이 구하고자 하는 최적화 문제의 해가 된다⁽⁵⁾.

3.5 동력학적 전역복합설계지수(DCGDI : dynamic composite global design index)

본 논문에서는 가속도 등방성비와 속도지수 및 중력토크 놈의 세 가지 설계지수를 동시에 고려하고자 하므로 앞절에서 기술한 복합설계지수 방식에 의하여 하나의 설계지수로 통합하여 설계하는 방식을 제안하고자 한다. 마스터 암의 가속도 등방성비와 속도지수 및 중력토크 놈의 동력학적 특성을 동시에 반영하는 설계지수를 '동력학적 전역복합설계지수(DCGDI : dynamic composite global design index)' 로 정의한다.

복합설계지수에서 가속도 등방성비를 반영하는 무차원화된 설계지수는 가속도 등방성비를 최대화시키기 위하여 다음 식을 사용하여 나타낼 수 있으며,

$$\hat{\Sigma}_I = \frac{\Sigma_I - \Sigma_{I_{\min}}}{\Sigma_{I_{\max}} - \Sigma_{I_{\min}}}, \quad (33)$$

속도지수를 반영하는 무차원화된 설계지수는 그 값을 최대화시키기 위하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{\Sigma}_P = \frac{\Sigma_P - \Sigma_{P_{\min}}}{\Sigma_{P_{\max}} - \Sigma_{P_{\min}}}, \quad (34)$$

복합설계지수에서 중력토크 높을 반영하는 무차원화된 설계지수는 그 값을 최소화시키기 위하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{\Sigma}_\tau = \frac{\Sigma_{\tau_{\max}} - \Sigma_\tau}{\Sigma_{\tau_{\max}} - \Sigma_{\tau_{\min}}}. \quad (35)$$

따라서, 식 (33), (34), (35)로부터 동력학적 전역복합설계지수(dynamic composite global design index)는

$$DCGDI = \min\{\hat{\Sigma}_I^\alpha, \hat{\Sigma}_P^\beta, \hat{\Sigma}_\tau^\gamma\} \quad (36)$$

으로 정의된다. DCGDI의 값이 최대일 때의 설계인자의 값을 최적설계의 해로 정한다. 이 때의 α , β 그리고 γ 는 각각 가속도 등방성지수와 속도지수, 그리고 중력토크 높의 가중치로 보다 많이 최적화하고자 하는 지수에 더 많은 가중치를 부여함으로써 다른 설계지수보다 더 많이 최적화된 해를 구할 수 있다.

4. 최적설계

4.1 최적설계조건

본 논문에서 설정한 마스터 로봇의 각 링크에 대한 길이와 질량은 다음과 같다.

$$l_1 = 0.1m, l_2 = 0.5m, l_3 = 0.5m, \quad (37)$$

$$m_1 = 3kg, m_2 = 5kg, m_3 = 3kg. \quad (38)$$

링크의 형태의 변화에 따라 중력토크 높과 가속도 등방성지수 및 속도지수의 설계지수가 달라지므로 다음의 설계구속조건을 설정하였으며, (Fig. 2 참조)

$$r_{21} + r_{22} = 0.3m, \quad (39)$$

$$r_{31} + r_{32} = 0.3m, \quad (40)$$

다음에 정의한 범위 내에서 각 링크의 반지름 길이를 변화시킨다.

$$0.1m \leq r_1 \leq 0.2m, \quad (41)$$

$$0.05m \leq r_{21} \leq 0.25m, \quad (42)$$

$$0.05m \leq r_{31} \leq 0.25m. \quad (43)$$

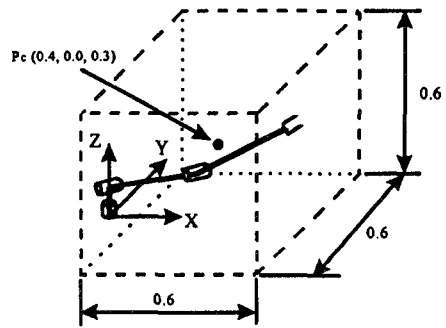


Fig. 3 Workspace

대상작업공간은 마스터 암의 작업특성을 고려하여 그림 3과 같이 중심의 위치가 $P_c(0.4, 0.0, 0.3)$ 이며 한 변의 길이가 0.6m인 정육면체의 내부공간으로 정의한다.

4.2 민감도 해석

최적설계를 수행하기에 앞서 설계변수들이 설계지수들에 영향을 미치는 민감도 해석(sensitivity analysis)을 수행하도록 한다.

가속도 등방성비에 대한 영향은 Fig. 4와 같다. r_1 과 r_{31} 이 작을수록, 그리고 r_{21} 이 클수록 등방성비가 높아지는 향상을 보이지만 상대적으로 r_{21} 과 r_{31} 의 영향에 비하여 r_1 에 의한 영향이 적음을 알 수 있다. Fig. 5는 속도지수에 대한 영향을 나타내는데, 등방성비의 경우와 같이 r_{21} 과 r_{31} 의 영향에 비하여 r_1 에 의한 변화가 적으나 r_1 과 r_{31} 가 작아질수록, 그리고 r_{21} 이 클수록 성능이 향상됨을 보인다. Fig. 6은 중력토크 높에 대한 변화이며, r_{21} 과 r_{31} 이 모두 클수록 중력토크 높이가 작아지는 성능의 향상을 보인다.

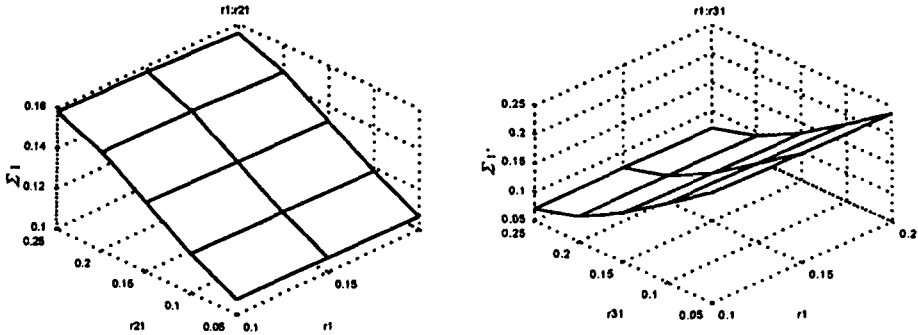


Fig. 4 Trend of Acceleration Isotropy w.r.t. Radii of Two Links

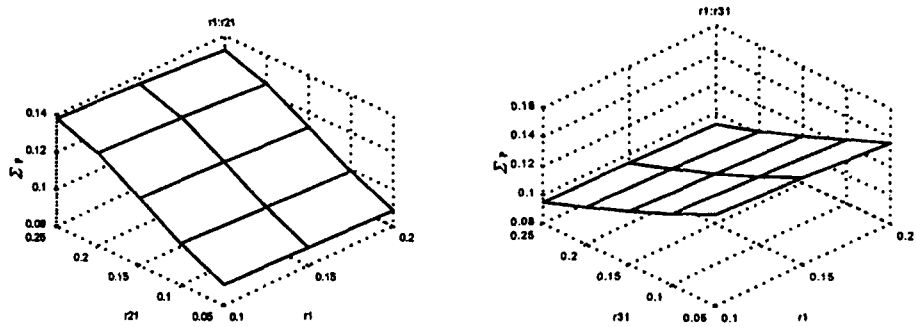


Fig. 5 Trend of Velocity Index w.r.t. Radii of Two Links

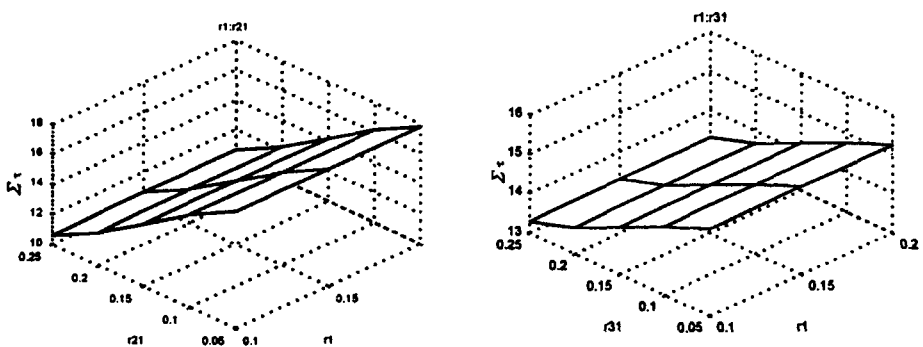


Fig. 6 Trend of Gravity Torque Norm w.r.t. Radii of Two Links

각 링크의 변수에 대한 설계지수의 변화 추이로부터 링크 1의 설계변수에 의한 설계지수에 대한 영향이 매우 작음을 알 수 있으며, 다음에 도시한 Fig. 7의 결과로부터 링크 1의 질량의 변화에 대한 설계지수들의 영향 또한 매우 적음을 살펴볼 수 있다.

이상의 민감도 해석결과를 살펴보면 링크 1의 설계변수들은 설계지수들에 미치는 영향이 매우 적지만 반지름 r_1 과 m_1 이 작을수록 미약하게 가속도 등방성비와 속도지수가 커지는 현상을 살펴볼 수 있었다. 링크 2와 링크 3에 대하여는 등방성비와 속도지수에 있어서 반지름 r_{21} 이 증

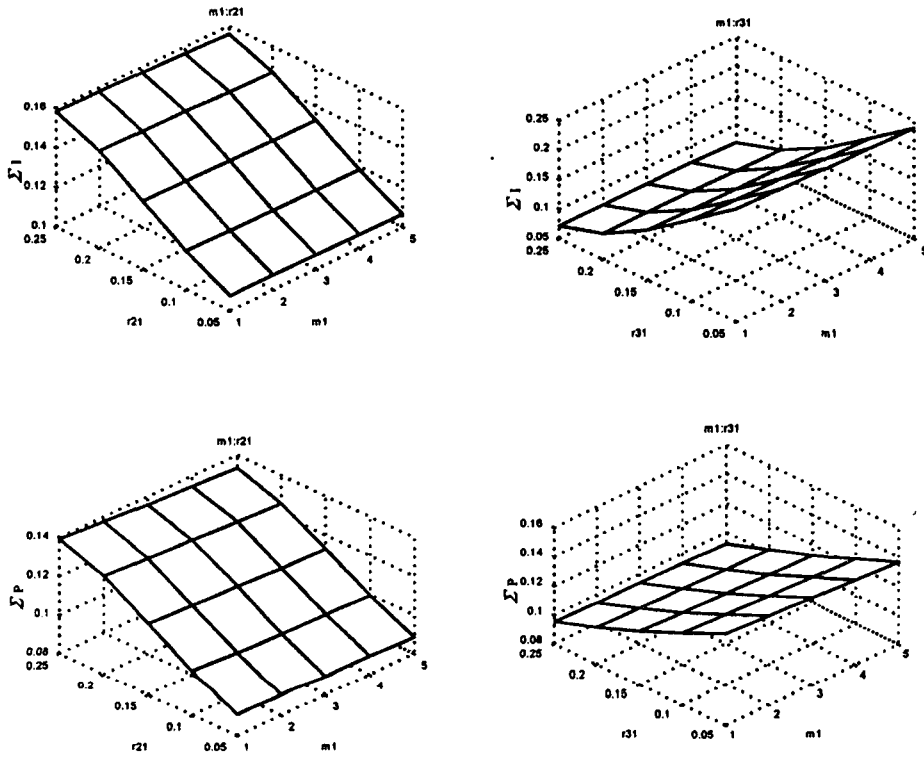


Fig. 7 Trends of Acceleration Isotropy and Velocity Index w.r.t. m_1 and Radius of Each Link

가함에 따라, 그리고 r_{31} 이 감소함에 따라 그 값이 증가하며, 중력토크 높은 이와 달리 반지름 r_{21} 과 r_{31} 이 모두 증가함에 따라 그 값이 감소하는 결과를 보였다.

4.3 최적설계결과

본 연구에서 설정한 설계변수는 각 링크의 양쪽 끝단면의 반지름인 r_1, r_{21}, r_{31} 이다. 각 링크의 형태가 끝단면의 반지름에 따라 변화하며, 이들 변수를 4.1절에서 기술한 구속조건과 설계조건에 따라 다음의 몇 가지 경우에 대하여 최적화를 수행하였다. 민감도 해석의 결과로부터 링크 1의 반지름 대하여는 $r_1 = 0.1m$ 로 정하였다. 식 (36)의 세 가중치에 대하여 각각

- (i) $(\alpha, \beta, \gamma) = (1, 1, 1)$ 로 가중치가 동일한 경우,
- (ii) $(\alpha, \beta, \gamma) = (3, 1, 1)$ 의 가중치로 가속도 등방성비를 더 많이 최적화 한 경우,
- (iii) $(\alpha, \beta, \gamma) = (1, 3, 1)$ 의 가중치로 속도지수를 더 많이 최적화 한 경우,
- (iv) $(\alpha, \beta, \gamma) = (1, 1, 3)$ 의 가중치로 중력토크 높음

더 많이 최적화 한 경우의 네 가지에 대하여 최적화를 수행하였다.

Fig. 8은 가중치가 동일한 경우(i)에 있어서 r_{21} 과 r_{31} 의 변화에 따른 DCGDI값의 분포를 나타낸 것이다. r_{21} 이 0.25m로 최대일 때와 r_{31} 이 0.15m일 때에 DCGDI가 최대값을 지니므로 최적해임을 알 수 있다.

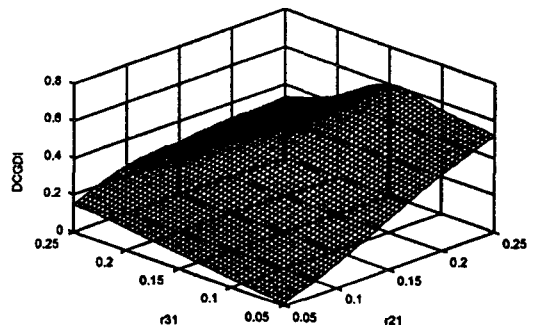


Fig. 8 DCGDI w.r.t. r_{21} and r_{31} for the Case (i)

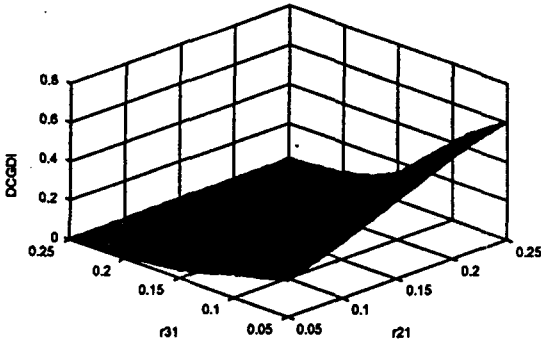


Fig. 9 DCGDI w.r.t. r_{21} and r_{31} for the Case (ii)

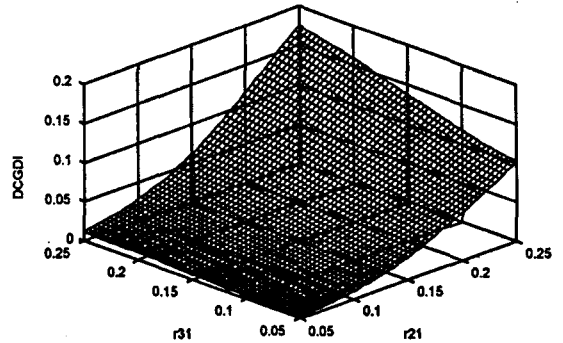


Fig. 11 DCGDI w.r.t. r_{21} and r_{31} for the Case (iv)

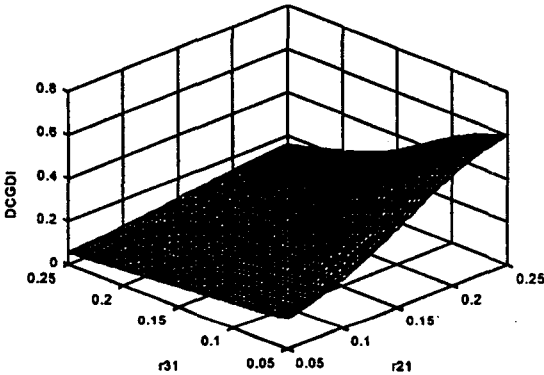


Fig. 10 DCGDI w.r.t. r_{21} and r_{31} for the Case (iii)

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 가속도 등방성비와 속도지수에 가중치를 부여한 경우(ii와 iii의 경우)에 있어서 r_{21} 과 r_{31} 의 변화에 따른 DCGDI값의 분포를 나타낸 것이다. 가속도 등방성비와 속도지수는 공통적으로 r_{21} 이 0.25m로 최대일 때와 r_{31} 이 0.05m로 최소일 때에 최적 해를 지님을 살펴볼 수 있다.

Fig. 11은 중력토크 높에 가중치를 부여한 경우(iv)에 있어서 r_{21} 과 r_{31} 의 변화에 따른 DCGDI값의 분포를 나타낸 것이다. r_{21} 이 0.25m로 최대일 때와 r_{31} 이 0.25m로 최대일 때에 DCGDI가 최대값을 지니므로 최적해 임을 알 수 있다.

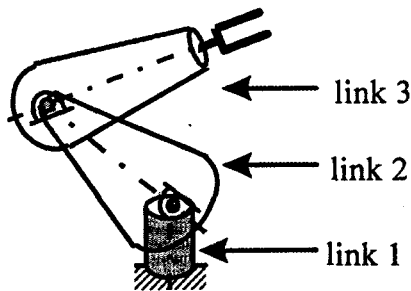
표 1은 최적화 결과 결정된 각 링크의 반지름 길이를 나타내며, Fig. 12는 최적화된 마스터 로봇의 형태들을 도시하고 있다. 각 경우 모두 링크 1은 반지름이 작은 가는 원통형을 이루며, 링크 2는 무게중심이 관절 쪽으로 치우쳐 아랫부분이 두꺼운 직원뿔대 형태를 형성한다. 가

Table 1 Optimization Result

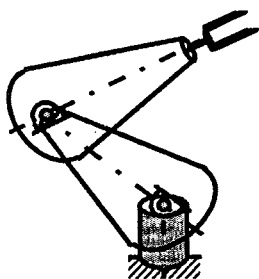
case	weighting			r_1	r_{21}	r_{31}
	α	β	γ			
i	1	1	1	0.1m	0.25m	0.15m
ii	3	1	1	0.1m	0.25m	0.05m
iii	1	3	1	0.1m	0.25m	0.05m
iv	1	1	3	0.1m	0.25m	0.25m

중치에 따라 링크 3의 형태가 다르게 나타난다. Fig. 12(b)는 중력토크 높에 가중치를 준 경우이며 링크 2는 최적화 결과 링크 3과 같은 형태를 나타낸다. Fig. 12(c)는 가속도 등방성비 또는 속도지수에 가중치를 준 경우로서 무게중심이 말단 쪽으로 치우쳐 바깥쪽이 두껍고 관절 쪽이 가는 직원뿔대를 형성한다. Fig. 12(a)는 고른 가중치를 준 경우의 최적화된 형태를 나타내는데 Fig. 12(a)는 링크 3의 형태가 Fig. 12(b)와 흡사하나 보다 원기둥에 가까운 모양을 나타낸다.

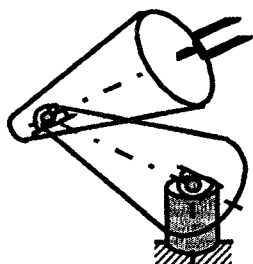
앞에서 설정한 네 가지 경우에 대하여 최적화에 의해 변화하는 마스터 로봇의 작업공간에서의 성능지수 분포를 살펴보도록 한다. Fig. 13(a), Fig. 13(b), Fig. 13(c)는 $y=0$ 인 $x-z$ 평면에서(즉, 중력방향) 네 가지 경우에 대한 작업공간에서의 가속도 등방성비 분포를 나타낸다. 표 1로부터 가속도 등방성비와 속도지수에 가중치를 둔 경우의 최적화 결과는 동일하므로 작업영역에서의 성능지수들은 동일하게 취급하도록 한다. Fig. 13(c)의 중력토크 높(iv)에 가중치를 준 경우에 비하여 Fig. 13(b)의 가속도 등방성비(ii) 또는 속도지수(iii)에 가중치를 준 경우의 가속도 등방성비 분포가 향상되었음을 알 수 있다. 각 경우에 있어서 속도지수의 분포를 Fig. 14(a), Fig. 14(b), Fig. 14(c)에 나타내었으며, 가속도



(a) Optimized Configuration of Master Robot for the Case (i)



(b) Optimized Configuration of Master Robot for the Case (iv)

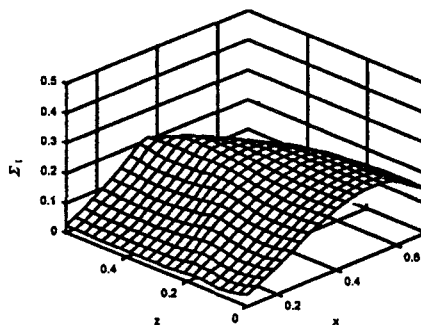


(c) Optimized Configuration of Master Robot for the Cases (ii) and (iii)

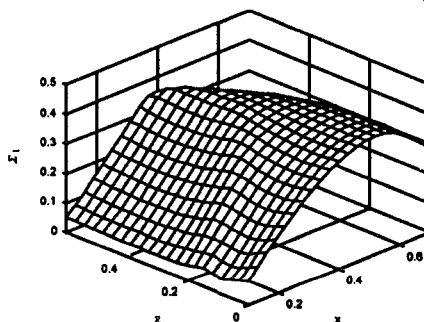
Fig. 12 Optimized Configuration of Master Robot

등방성비의 경우와 같이 경우 (ii) 또는 (iii)에서 속도지수가 가장 높은 분포를 지닐 수 있다. 그리고, 중력토크 높의 작업공간에서의 성능분포는 Fig. 15(a), Fig. 15(b), Fig. 15(c)에 나타내었으며, 경우 (iv)에 대한 성능분포를 도시한 Fig. 15(c)가 가장 낮은 중력토크 높의 분포를 보인다.

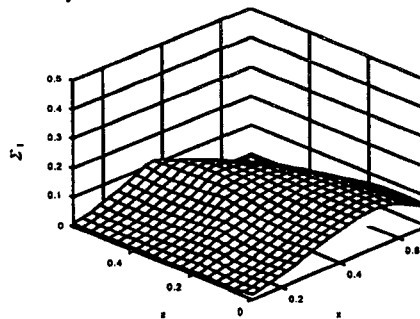
Fig. 16, Fig. 17, 그리고 Fig. 18은 표1에 나타난 네 가지 최적화 결과에 따른 가속도 등방성비, 속도지수, 중력토크 높의 설계지수값을 비교하기 위한 것으로써, 가로축은 작업공간에서 각 설계지수의 분포값(세로축)에 해당



(a) Identical Weighting



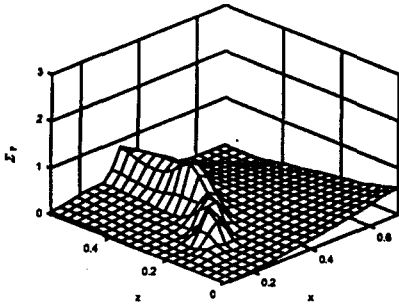
(b) Large Weighting Given to Acceleration Isotropy and Velocity Index



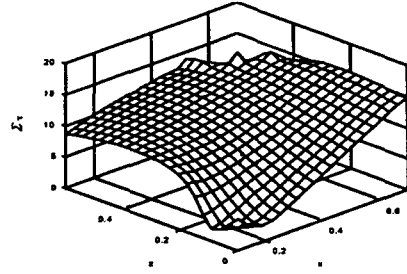
(c) Large Weight Given to Gravity Torque Norm

Fig. 13 Trend of Acceleration Isotropy According to Weighting Given to Different Indices

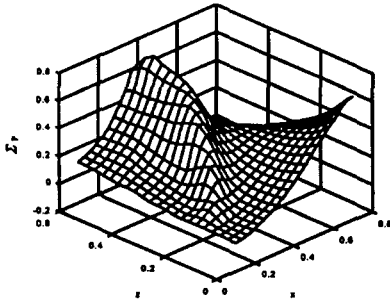
하는 체적을 나타낸다. 각 지수에 가중치를 부여함에 따라 등방성비들은 높아지며 중력 토크 높은 작아지는 성능지수의 향상을 보이지만, 가속도 등방성비에 비하여 속도지수와 중력 토크 높의 성능변화는 크지 않음을 살펴볼 수 있다. 가속도 등방성비의 영향이 가장 민감한 것은 가속도 지수에 가중치를 둔 설계는 속도지수나 중력 토크 높에 가중치를 둔 설계보다 성능의 향상이 현저하다는 의



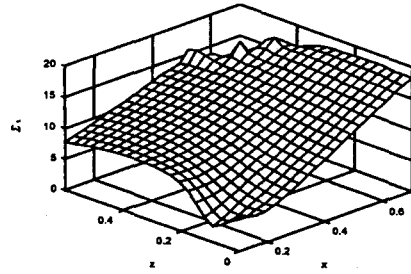
(a) Identical Weighting



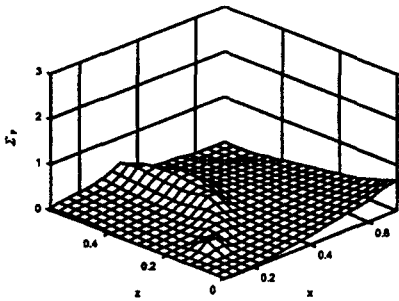
(a) Identical Weighting



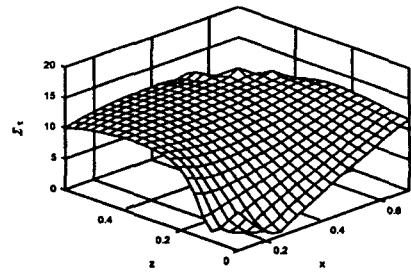
(b) Large Weighting Given to Acceleration Isotropy and Velocity Index



(b) Large Weighting Given to Acceleration Isotropy and Velocity Index



(c) Large Weight Given to Gravity Torque Norm



(c) Large Weight Given to Gravity Torque Norm

Fig. 14 Trend of Velocity Index According to Weighting Given to Different Indices

Fig. 15 Trend of Gravity Torque Norm According to Weighting Given to Different Indices

미이며, 동작시 급격한 가속속이 요구되는 응용에서는 counter-balancing 만을 고려한 설계와 가속도를 고려한 설계의 성능에 현격한 차이가 있음을 나타낸다.

각 링크의 질량에 의한 영향을 알아보기 위하여 링크 1의 질량을 1.5kg 으로 감소시킨 경우와 링크 3의 질량을 5kg으로 증가시킨 경우에 대한 최적화 이후의 성능지수의

변화를 Fig. 19와 Fig. 20에서 살펴보았다. 두 경우 모두 표 1과 같은 가중치를 주었을 때 r_{21} 과 r_{31} 의 변화에 의한 최적화 성향은 질량을 변화시키기 이전과 동일한 경향을 나타내었다. 링크 3의 질량을 5kg으로 증가시켰을 때는 Fig. 16과 Fig. 18에 비하여 Fig. 19는 전반적으로 중력토크 값이 크게 증가하며 가속도 등방성비가 아주 미

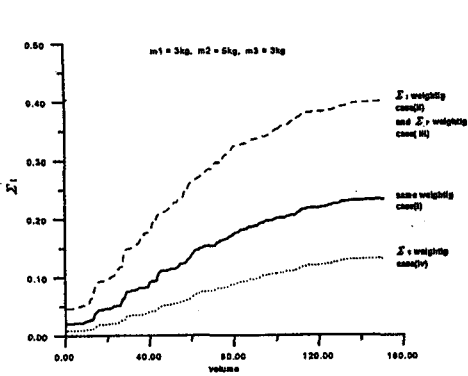
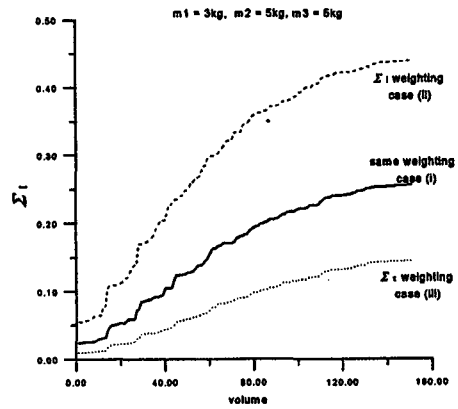


Fig. 16 Comparison of Acceleration Isotropy for the Four Cases



(a) Acceleration Isotropy

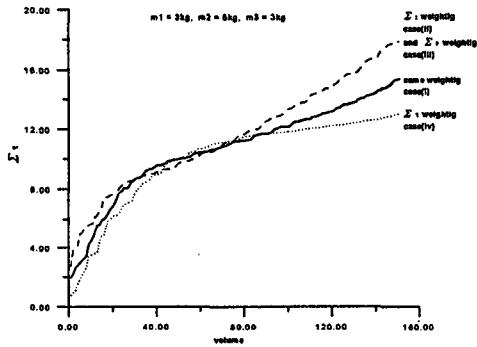
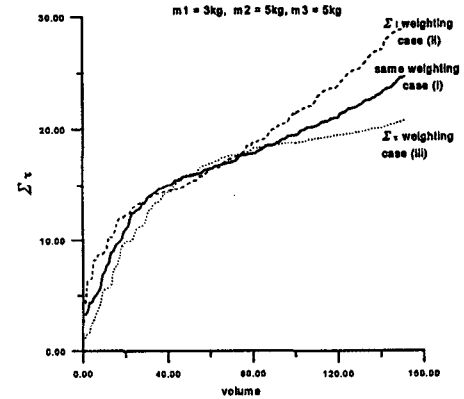


Fig. 17 Comparison of Velocity Index for the Four Cases



(b) Gravity Torque Norm

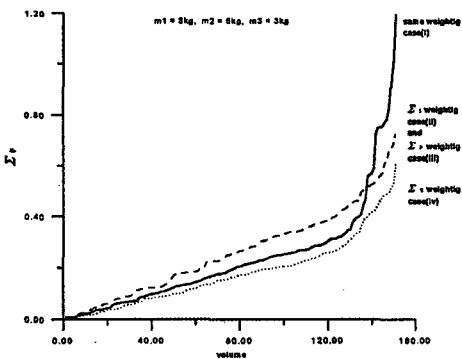
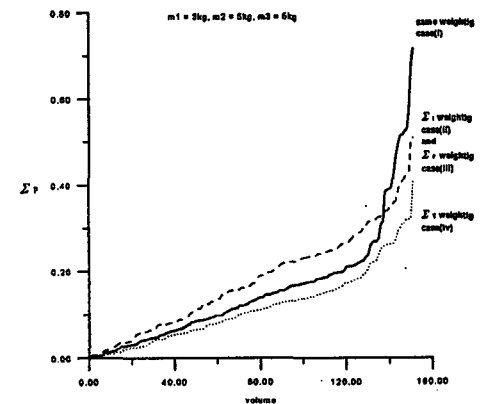


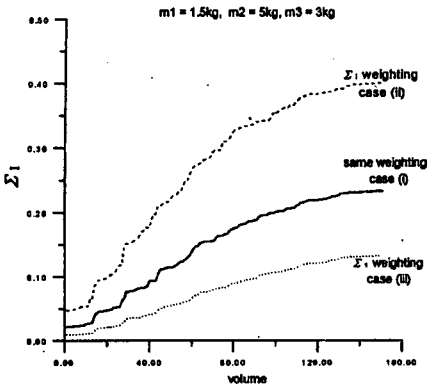
Fig. 18 Comparison of Gravity Torque Norm for the Four Cases



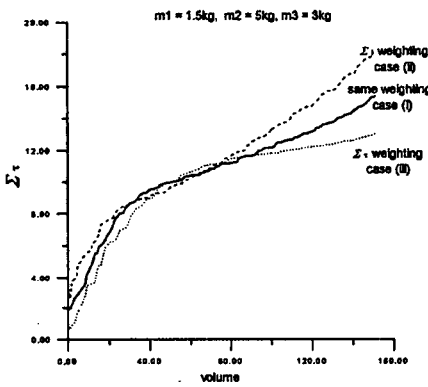
(c) Velocity Index

약하게 증가됨을 보였다. 이에 반하여 링크 1의 질량을 1.5kg으로 감소시켰을 때는 Fig. 16과 Fig. 18에 비하여 Fig. 20은 가속도 등방성비와 중력토크 norms의 변화가 거의 없으므로 민감도 해석의 결과와 같이 링크 1의 질량에

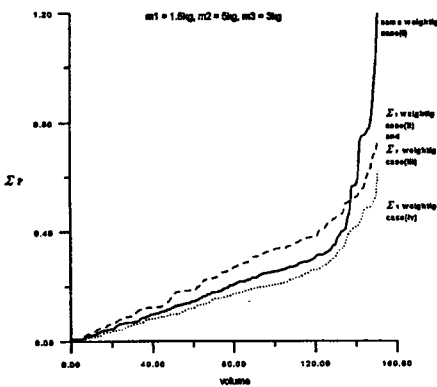
Fig. 19 Comparison of Each Design Index For the Increase of m_3



(a) Acceleration Isotropy



(b) Gravity Torque Norm



(c) Velocity Index

Fig. 20 Comparison of Each Design Index For the Increase of m_1

대한 영향이 매우 미약함을 나타내었다.

이상에서의 시뮬레이션 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 링크 1의 질량과 반지름이 작을수록 가속도 등방성비와 속도지수가 향상되나 상대적으로 다른 링크의 설계 변수들에 비하여 그 영향이 적다.

(2) 링크 2는 질량중심이 두 번째 관절에 가까울수록 즉, 링크의 안쪽이 두껍고 바깥쪽이 가는 형태일 때 정의된 모든 설계지수들의 값이 향상된다.

(3) 링크 3은 가중치에 따라 다른 형태를 지니게 된다. 가속도 등방성비 또는 속도지수에 가중치를 부여하였을 때는 링크 바깥쪽이 두껍고, 중력토크 높에 가중치를 부여하였을 때는 반대로 링크 안쪽이 두꺼운 형태를 지닌다.

(4) 질량에 대한 영향으로는 링크 1의 경우에 질량의 영향이 매우 미약하나 그 값이 작을 때 가속도 등방성비가 향상되며, 링크 3의 경우에는 그 값이 커질수록 가속도 등방성비에 비하여 중력토크 높에 상대적으로 크게 증가함으로써 액츄에이터의 부담을 줄이기 위해 가볍게 설계하는 것이 바람직하다.

(5) 동역학적 측면을 고려한 마스터 로봇의 최적설계를 수행한 결과 가속도 등방성지수가 가장 민감한 경향을 지니는 현상을 파악할 수 있었다. 특별히 슬래브 로봇이 운동을 시작하거나 갑자기 멈추는 상황 또는 고장으로 인하여 급제동을 하는 경우에 있어서는 이러한 가속도 특성이 고려되는 마스터 로봇의 설계가 매우 중요하다고 판단된다. 또한 노약자를 위한 마스터 로봇 설계 등에 있어서도 마스터 기구의 동역학을 고려한 설계는 조작자의 부담을 격감시키기 위하여 반드시 고려되어야 한다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 마스터 로봇을 설계함에 있어서 카운터 밸런싱은 액츄에이터에 대한 링크 하중으로 인한 부담을 줄여 하중용량을 증대시키는 효과를 얻을 수 있으나 이와 상반되게 작업자의 운동성을 격감시킬 수 있다는 사실에 근거하여 운동성과 카운터밸런싱 효과를 동시에 고려하는 복합설계방식을 제안하였고 3자유도 공간형 마스터 로봇의 설계에 적용하여 모의 실험을 수행하였다. 본 논문에서 제안한 마스터 로봇의 동역학적 방식은 일반적인 로봇의 동역학적 설계에도 유용하게 적용되리라 판단된다.

Reference

1. 김기호, 김승호, "범용 마스터/슬레이브 조작을 위한 동적 훈련 시뮬레이터," 제어계측·자동화·시스템 공학회지, 제2권 제3호, pp. 42-60, 1996.
2. Martin, H.L. and Hamel, W.R., "Joining Teleoperation with Robotics for Remote Manipulation in Hostile Environment," RI/SME Robotics Conf., pp. 3-18, 1984.
3. 손재범, 정완규, 염영일, "원격제어시스템," 제어·자동화·시스템 공학회지, 제2권, 제3호, pp. 42-60, 1996.
4. Raju, G.J., Verghese, G.C., and Sheridan, T.B., "Design Issues in 2-Port Network Models of Bilateral Remote Manipulation," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1764-1767, 1989.
5. Furuta, K. and Kosuge, K., "Master-Slave Manipulator based on Virtual Internal model following control concept," Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 567-572, 1987.
6. 김희국, 이병주, "병렬 3자유도 구형 모듈의 해석과 힘반영 원격조정기의 구현," 대한기계학회논문집, 제 10권, pp. 2501-25113, 1994.
7. Chung, W.K. and Cho, H.S., "On the Dynamic Characteristics of Balanced PUMA-760 robot," IEEE Trans. of Industrial Electronics, Vol. 35, No. 2, pp. 222-230, 1987.
8. Park, H.S. and Cho, H.S., "General Design Conditions for an Ideal Robotic Manipulator Having Simple Dynamics," International Journal of Robotics research, Vol. 10, No. 1, pp. 21-29, 1991.
9. Freeman, R.A. and Tesar, D., "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms/Robotic Systems," Proc. of ASME Biennial Mechanism Conf., Kissimmee, FL, DE-Vol. 15-2, pp. 7-21, 1988.