

〈論 文〉

고장에 강인한 구형 3자유도 모듈에 관한 기구학적 해석

이병주* · 김희국**

(1994년 1월 17일 접수)

Kinematic Analysis of Fault-Tolerant 3 Degree-of-Freedom Spherical Modules

Byung-Ju Lee and Whee-Kuk Kim

Key Words: Redundant Actuation(잉여구동), Spherical Module(구형 모듈), Parallel Mechanism(병렬형 메카니즘), Fault-Tolerant Mechanism(고장에 강인한 메카니즘)

Abstract

This work deals with kinematic analysis of fault-tolerant 3 degree-of-freedom spherical modules which have force redundancies in its parallel structure. The performance of a redundantly actuated four-legged module with no actuator failure, a single actuator failure, partial and half failure of dual actuator are compared to that of a three-legged module, in terms of maximum force transmission ratio, isotropic characteristics, and fault-tolerant capability. Additionally, a system with an excess number of small floating actuators is considered, and the contribution of these small actuators to the force transmission and fault-tolerant capability is evaluated. This study illustrates that the redundant actuation mode allows significant saving of input actuation effort, and also delivers a fault tolerance.

I. 서 론

모듈러 로봇의 개념은 일반 로봇시스템 설계에 있어서 매우 중요시 되고 있다.⁽⁹⁾ 이것은 모듈의 개념은 고기능 로봇시스템의 설계과정을 고도화시키며 작업환경 변화에 대처하여 신속히 그 구조형상을 변화시킬 수 있기 때문이다. 실제적으로 모듈의 선택과 배열은 원하는 작업기준을 만족시키는 최적화 과정을 통하여 결정된다. 이에 연관된 연구과제들은 최적 기구학적/동력학적 파라메터들, 링크재료, 베어링, 그리고 필요되는 액추에이터들의 선정 등을 들 수 있다. 이와 더불어, 각 모듈 요소들에 관한 전반적인 연구는 모듈러 로봇구조 설계에 있어서 반드시 필요하다.

병렬형 모듈(parallel module)들은 로봇제작에 있어서 직렬형 모듈(serial module)들 보다도 그 활용도가 제한되어 왔다. 이것은 고가의 제작비 그리고 제작상에 있어서의 어려움 때문이 있다고 사료된다. 그러나, 병렬형 메카니즘은 구조적으로 여러 개의 폐쇄체인을 지니고 있으므로 지반으로 힘을 여러 개의 지지대를 통해 분산시킨다. 따라서, 이러한 메카니즘은 직렬형 메카니즘에 비해 더 큰 가변하중과 강성을 지닌다. 또한 병렬형 메카니즘에 있어서 여분의 잠재적인 구동위치는 잉여구동(redundant actuation)을 가능하게 한다. 이러한 잉여구동은 힘분배와 에너지 소비에 있어서 절약을 가능케 한다.^(4,6,13) 또한 잉여구동은 시스템의 임의의 구동기기에 고장이 발생할 때 이에 대처할 수 있는 잠재력(fault tolerance)을 가지고 있다.⁽⁸⁾

병렬형 모듈 중 한 종류로서, 세 개의 다리를 가지는 구형(spherical) 3자유도 모듈에 관한 전반적

*정회원, 한국기술교육대학 제어기계공학과

**정회원, 고려대학교 제어계측공학과

인 연구가 수행 되어져 왔다. Cox와 Tesar⁽¹⁾는 이러한 시스템에 대한 기구학적 해석을 수행하였다. Marco와 Tesar⁽⁵⁾ 그리고 Torfason⁽¹¹⁾은 입출력 간의 좋은 전달 특성을 갖도록 하기 위한 최적의 기하학적 파라미터들에 관한 연구를 하였다. 최근에는 이 구조를 이용한 시스템이 원격조종기로서 구현되었다.⁽¹²⁾ Gosselin과 Angeles⁽³⁾는 구조적으로 간단한 구형 메카니즘에 관한 기구학적 최적설계를 수행하였다. Kurtz와 Hayward⁽⁴⁾는 잉여구동을 지니는 구형 메카니즘에 있어서 여러 가지 목적함수에 대한 기구학적 최적설계를 수행하였다. Sreevijayan, et. al.⁽⁸⁾은 로봇시스템 설계에 있어서 기계 구조의 고장에 견디는 네 가지 단계들을 제시하는데,⁽⁹⁾ 첫번째 단계로는 한 관절에 이중 액추에이터를 적용함으로서 얻어지는 fault tolerance이며, 병렬 메카니즘의 구조내에 잉여구동을 적용하는 두 번째 단계의 fault tolerance가 고려되었다. 직렬 메카니즘에 있어서의 여유자유도는 고장에 견디는 세 번째 단계의 fault tolerance로서 고려되었다. 여유자유도 메카니즘에 있어서 관절공간에서의 여분의 자유도는 임의의 다른 관절의 고장을 보완하도록 활용될 수 있다. 두 개 또는 그 이상이 직렬 메카니즘을 이용한 작업들은 고장에 견디는 네 번째 단계로 고려되었다. 이러한 작업에 있어서 각각의 직렬 메카니즘은 잠정적으로 고장에 견디는 세 가지 단계를 지니고 있다.

이러한 기존의 연구들에 이어서 본 연구에서는 네 단계의 fault tolerance 중, 두 가지 단계에 관하여 실제적인 시스템을 대상으로 연구한다. 우선 두 번째 fault tolerance 단계로서 네 개의 다리를 가지고 잉여구동되는 구형 3자유도 병렬 시스템에 관하여 조사할 것이며, 이 시스템의 성능을 기준의 세 개의 다리를 갖는 시스템과 최대 토크 norm과 동방성비, 그리고 고장에 견디는 능력 등을 기준으로 하여 비교할 것이다. 다음으로 첫 번째 fault tolerance 단계로서 하나의 구동축이 이중의 액추에이터(dual prime mover)로 설계된 시스템에서의 고장 그리고 하나의 액추에이터에서 발생하는 부분 고장에 대한 성능분석이 수행될 것이다. 그리고 유동관절(floating joint)에 부착된 소형의 액추에이터를 사용하는 경우에 대해서도 고려될 것이다. 전반적으로 이러한 형태의 시스템들은 고장에 견디는 기능을 향상시키고 관절 액추에이터에 고장이 발생하였을 경우에도 좋은 힘전달 성능을 유지함을 보여준다.

2. 구형 3자유도 모듈의 구조

본 절에서는 세 개 그리고 네 개의 다리를 지니는 구형 모듈들의 구조와 기구학적 파라미터들 그리고 그들의 해석에 필요되는 좌표계들이 소개될 것이다.

2.1 기구학적 파라미터들의 묘사

Fig. 1 그리고 Fig. 2는 각각 세 개 그리고 네 개의 다리를 지니는 구형 3자유도 모듈을 나타낸다. 상판과 하판은 각각 세 개의 직렬 부속체인(dyad)의 양끝에 연결되어 있다. 각 직렬 부속체인은 두 개의 이원링크(binary link)가 세 개의 회전관절들

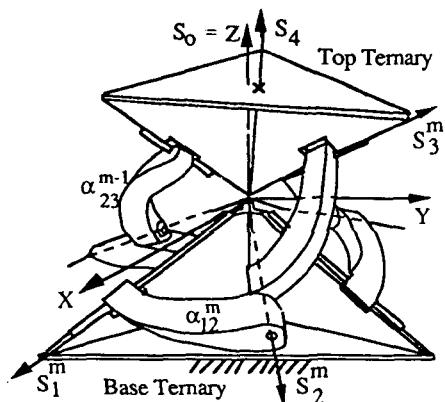


Fig. 1 Three DOF three-legged spherical shoulder module

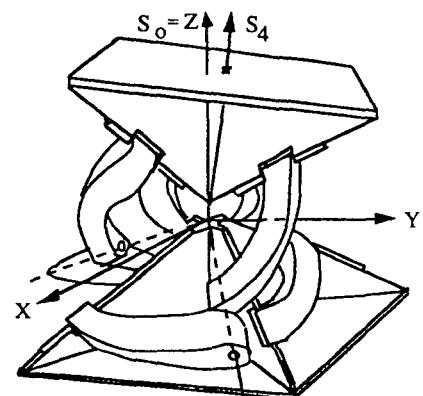


Fig. 2 Three DOF four-legged spherical shoulder module

로 연결되어 있는데 각 체인들의 모든 회전관절들은 모두 공통 교차점을 지난다. 이것은 구형 3자 유도 시스템 운동에 있어서 기하학적 구속조건은 모든 관절축들이 공통 교차점을 갖는다는 조건에 의해 만족되기 때문이다. 각 부속체인과 연관된 관절축의 방향여현들은 S_n^m 로 표현된다. 여기서, 위첨자 ‘ m ’은 관련 부속체인을 나타내고 아래첨자 ‘ n ’은 관련 부속체인의 해당 관절을 나타낸다. 예를 들면 S_1^2 는 두번째 체인의 첫번째 관절을 의미한다. 하판과 상판에 수직한(기준 좌표계의 Z 방향) 방향의 단위벡터들은 각각 S_0 과 S_4 로 나타낸다.

벡터 a_{jk}^m 는 두 연속적인 관절축들의 공통 수직선 방향으로의 단위벡터를 의미하며 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

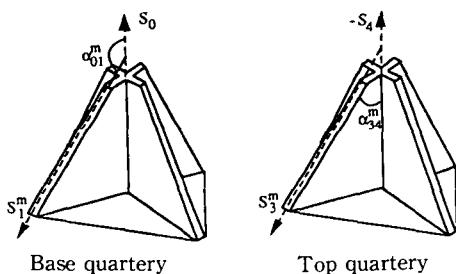


Fig. 3 Apex angle

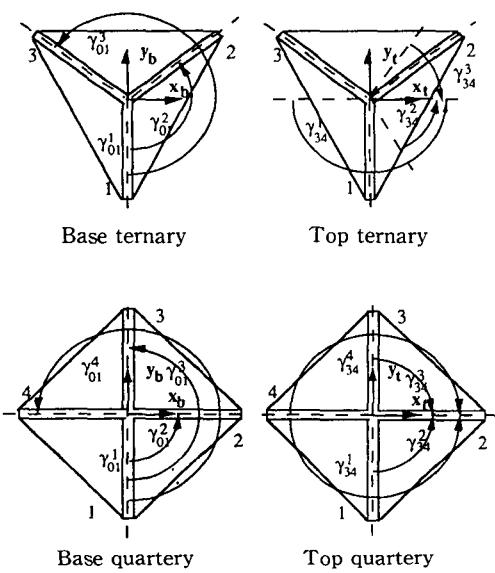


Fig. 4 Edge displacement angles

$$a_{jk}^m = S_j^m \times S_k^m \quad (1)$$

여기서, ‘ \times ’는 벡터외적을 의미한다. 비틀림각 α_{jk}^m 은 공통 수직선들에 관한 두 개의 연속된 관절축들의 비틀림각도를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_{jk}^m = \cos^{-1}(S_j^m \cdot S_k^m) \quad (2)$$

여기서, ‘ \cdot ’는 내적을 나타낸다. Fig. 3에서와 같이 Apex각들은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_{01}^m = \cos^{-1}(S_0 \cdot S_1^m) \quad (3)$$

$$\alpha_{34}^m = \cos^{-1}(S_3 \cdot S_4^m) \quad (4)$$

모서리 변위각(edge displacement angle)은 하판(상판) 좌표계의 Z 축에 관하여 하판(상판) 기준 좌표계와 해당 국부 좌표계 사이의 각을 나타내며, γ_{01}^m (γ_{34}^m)로 표현된다. Fig. 4는 세 개와 네 개의 다리를 갖는 시스템 모듈들의 모서리 변위각들을 보여주고 있다.

Marco와 Tesar⁽⁵⁾는 좋은 입출력 전달비를 갖는 최적의 파라미터 값들을 Fig. 1과 같은 세 개의 다리를 갖는 시스템에 대하여 조사를 하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 또한 Fig. 2와 같은 네 개의 다리를 갖는 시스템에서도 Table 1에서의 최적 파라미터 값을 보였다. 본 연구에서는 이러한 파라미터 값들이 사용될 것이다.

2.2 좌표계

좌표계는 입출력의 관계를 나타내기 위해서 정의한다. 하판에 고정된 좌표계는 지구기준 좌표계 (X, Y, Z)라고 하자. 지구기준 좌표계의 X 축은 a_{01}^m 의 방향으로 정의되고, Z 축은 S_0 의 방향으로

Table 1 Kinematic parameters of the shoulder module with R legs

Subchain m				
Joint i	S_{ii}^m	ϕ_i^m	a_{ij}^m	α_{ij}^m
0(b)	0	$\gamma_{01}^m = 0^\circ$	0	$\alpha_{01}^m = 130^\circ$
1	0	ϕ_1^m	0	$\alpha_{12}^m = 90^\circ$
2	0	ϕ_2^m	0	$\alpha_{23}^m = 90^\circ$
3	0	ϕ_3^m	0	$\alpha_{34}^m = 50^\circ$
4(t)	0	γ_{34}^m	0	0

$$\left(\text{Here, } \gamma_{01}^m = \frac{2\pi(m-1)}{R}, \gamma_{34}^m = \frac{2\pi(m-1)}{R} \right)$$

정의된다. (Fig. 1) $(^{(1)}x, ^{(1)}y, ^{(1)}z)$ 는 상판에 고정되어 있는 국부이동 좌표계이다. 이 이동 좌표계의 x 축은 a_{34}^1 의 방향을 향하고 Z 축은 S_4 방향을 향한다. 상판의 출력위치는 고정좌표계에 대하여 S_4 와 a_{34}^1 의 방향여현으로 표현된다. 또한 동등하게 지구기준 좌표계에 대한 상판의 국부 좌표계의 회전행렬 ($[R_b^t] = [a_{34}^1 \ S_4 \times a_{34}^1 \ S_4]$)으로서도 표현된다. 여기서, t 와 b 는 각각 상판과 하판을 나타내며 이 회전행렬은 좌표계 b 에 대한 좌표계 t 의 방향여현을 나타낸다. 이동 상판의 방위각을 정의하기 위하여 이동링크의 각 x, y, z 축에 대하여 연속적인 회전을 나타내는 Euler각이 사용된다. 지구 좌표계와 이동 좌표계는 공통원점을 가지며 시스템의 기준위치에서는 일치된다. 상판의 출력위치는 Fig 5와 같은 세 개의 Euler각에 관해서 정의된다. Euler각들로 인한 회전행렬은 다음과 같다.

$$[R_b^t] = \begin{bmatrix} C_2C_3 & -C_2C_3 & S_2 \\ (C_1S_3 + S_1S_2C_3) & (C_1C_3 - S_1S_2S_3) & -S_1C_2 \\ (S_1S_3 - C_1S_2C_3) & (S_1S_3 + C_1S_2S_3) & C_1C_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $C_1 = \cos\mu_1$ 그리고 $S_1 = \sin\mu_1$ 등으로 나타내어 진다. 다시 말해서 이러한 회전행렬은 다음과 같이 이동 상판과 고정된 하판의 관계를 나타내는 변환이다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = [R_b^t] \begin{pmatrix} ^{(1)}X \\ ^{(1)}Y \\ ^{(1)}Z \end{pmatrix} \quad (6)$$

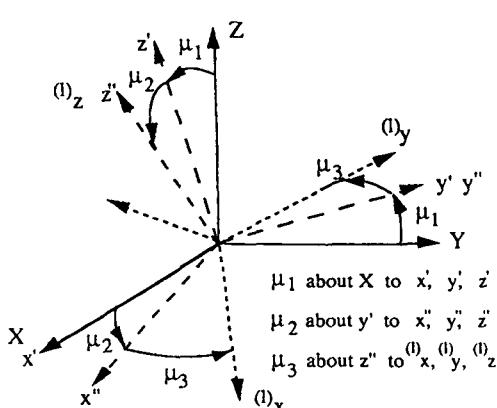


Fig. 5 Successive rotations by three Euler angles

역위치 해석에서는 출력 링크의 주어진 위치(세 개의 Euler각)에 대하여 입력 관절들의 변위가 구하여 진다.⁽¹⁾

3. 구형 3자유도 모듈의 기구학

구형 3자유도 모듈의 각 체인에 대한 기구학은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\dot{u} = [{}_mG_u^{\phi}]_m \dot{\phi} \quad (7)$$

여기서, \dot{u} 는 출력을 나타내는 속도벡터를 의미하고, ${}_m\dot{\phi}$ 는 m 번째 체인의 입력을 나타내는 속도벡터를 의미한다. $[{}_mG_u^{\phi}]$ 는 m 번째 체인의 시스템 입력과 출력과의 관계를 나타내어 주는 자코비안이며 구형 3자유도 모듈에서 그 차원은 3×3 이다. 여기서 G 의 좌측 아래 위에 부착된 지수 ' m '은 독립변수 ϕ 가 m 번째 체인의 변수라는 것을 나타내기 위한 것이다. 식(7)의 역기구학적 표현은 다음과 같이 나타내어 진다.

$${}_m\dot{\phi} = [{}^mG_u^{\phi}] \dot{u} \quad (8)$$

여기서, $[{}^mG_u^{\phi}]$ 는 역자코비안을 의미한다. 구형 3자유도 모듈은 각각의 베이스 관절 부분에 액추에이터를 부착시키는데 이것은 액추에이터 하중으로 인한 관성력을 최소화하기 위해서이다. 따라서, 실질적인 입력과 출력 간의 역자코비안은 식(8)에서 정의된 각 직렬 부속체인의 역자코비안으로부터 첫번째 행 $[{}^mG_u^{\phi}]_1$: ($m=1, 2, \dots, M$)을 모아서 아래와 같이 구한다.⁽²⁾

$$[G_u^{\phi}] = \begin{bmatrix} [{}^1G_u^{\phi}]_1 \\ [{}^2G_u^{\phi}]_1 \\ \vdots \\ [{}^M G_u^{\phi}]_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, G 의 위첨자 a 는 실질적인 입력 관절들을 나타내며, 다리가 세 개인 경우는 이 행렬의 차원이 3×3 이 되고 네 개인 경우는 4×3 이 된다.

4. 힘전달 능력에 대한 평가

본 절에서는 임여구동된 경우와 비임여구동된 경우의 성능을 최대 토크 norm, 등방성비, 그리고 고장에 견디는 정도에 근거하여 비교한다. 작업공간에서의 운동이 정의되면 관절에서의 기구학식은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_a = [G_u^a] \dot{u} \quad (10)$$

힘 관계식을 정의하기 위해서는 가상일의 정리 (virtual work)가 사용된다. 평형상태의 시스템에서 가상된 미소의 변위에 의하여 행하여진 가상 일은 0이 되며 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\delta W = (T_a)^T \delta \phi_a + (T_u)^T \delta u = 0 \quad (11)$$

여기서, T_a 와 T_u 는 각각 구동축의 토크벡터 그리고 로봇 끝점에 가해진 힘벡터를 나타낸다. 기하학적으로 미소변위의 관계는 다음과 같이 주어지므로

$$\delta \phi_a = [G_u^a] \delta u \quad (12)$$

식(12)를 식(11)에 대입하여 정리하면

$$((T_u)^T + (T_a)^T [G_u^a]) \delta \phi_a = 0 \quad (13)$$

이 되고, T_u 와 T_a 사이의 힘 평형관계식은

$$T_u = -[G_u^a]^T T_a \quad (14)$$

와 같이 나타내어 진다. 그러므로, 효과적인 힘 (effective force) 관계식은 아래와 같이 표현된다.

$$T_u = [G_u^a]^T T_a \quad (15)$$

위의 관계식들에서 입력 힘벡터와 출력 힘벡터는 각각 다음과 같이 나타내어 진다.

$$T_a = ({}_1 T_1, {}_2 T_1, \dots, {}_R T_1)^T \quad (16)$$

$$T_u = (M_{\theta_x}, M_{\theta_y}, M_{\theta_z})^T \quad (17)$$

여기서, ${}_i T_i$ 는 i 번쨰 다리의 첫번째 관절 액추에이터에서의 토크를 의미하며, M_{θ_x} , M_{θ_y} , M_{θ_z} 는 각각

기준 X , Y , Z 축에 관한 작업공간에서의 토크를 나타낸다.

힘 전달비의 극한범위 (extreme bound)는 시스템 액추에이터의 용량을 결정하기 위하여 조사된다. 조사된 범위를 통하여 네 개의 다리로 이루어진 모듈에 적용된 임여구동의 경우가 세 개의 다리로 이루어진 비임여구동의 경우와 비교하여 얼마나 구동량을 줄일 수 있는가에 관한 정량적인 분석을 수행한다. 임여구동의 경우에, 출력 (T_u)과 구동력 (T_a)과의 비는 다음과 같이 나타내어 진다.⁽⁷⁾

$$\frac{\|T_u\|}{\|T_a\|} = \left(\frac{T_a^T [G_u^a] [G_u^a]^T T_a}{T_a^T T_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

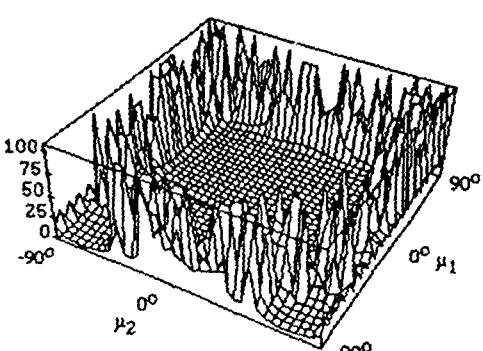
Rayleigh quotient⁽⁷⁾에 근거하여, 구동력에 관한 출력의 범위는 아래와 같이 주어지며

$$\sigma_{\min} \|T_a\| \leq \|T_u\| \leq \sigma_{\max} \|T_a\| \quad (19)$$

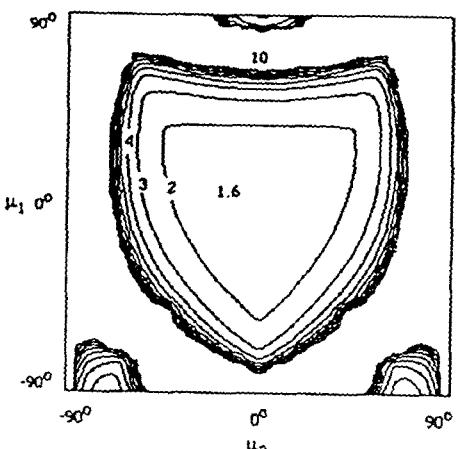
여기서, σ_{\min} 과 σ_{\max} 는 각각 $[G_u^a][G_u^a]^T$ 의 최소, 최대 특이값 (singular value)의 제곱근 값이다. $[G_u^a][G_u^a]^T$ 는 차원이 4×4 이고 rank가 3이기 때문에 하나의 특이값은 0이다. 따라서 0이 아닌 나머지 세 개의 특이값만을 참고로 한다. 식(19)를 $\|T_a\|$ 에 대한 범위로 표현하면

$$\sigma_{\min}^F \|T_u\| = \frac{\|T_u\|}{\sigma_{\max}} \leq \|T_a\| \leq \frac{\|T_u\|}{\sigma_{\min}} = \sigma_{\max}^F \|T_u\| \quad (20)$$

와 같이 나타내어지며, 여기서, $\sigma_{\min}^F \left(= \frac{1}{\sigma_{\max}}\right)$ 과 $\sigma_{\max}^F \left(= \frac{1}{\sigma_{\min}}\right)$ 은 각각 최소, 최대 힘전달비를 나타



(a) Three dimensional plot



(b) Contour plot

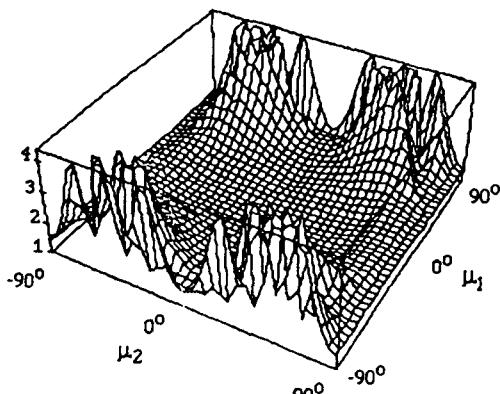
Fig. 6 σ_{\max}^F plot of three-legged module

내며 σ 의 윗첨자 F 는 힘전달에 관련된 것임을 의미한다.

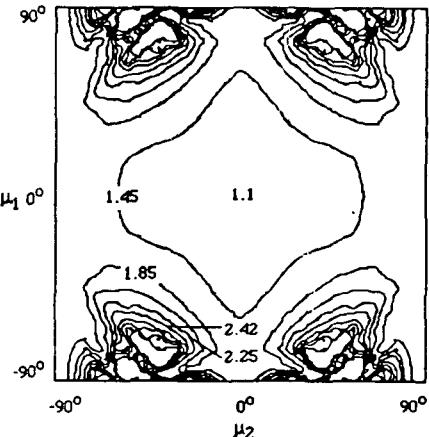
위에서 구해진 식(20)에 근거하여 단위 크기의 T_u (즉, $\|T_u\|=1$)에 대하여 필요로 되는 구동토크 norm $\|T_a\| (= T_a^T T_a)$ 를 계산한다. 여기서, $\|T_a\|$ 의 분포는 삼차원 그림 또는 등고선 그림(contour plot) 등으로 나타내어 지는데, 출력위치 파라미터들인 세 개의 Euler각 μ_1 , μ_2 , μ_3 에 관한 최소 또는 최대 힘전달비로 각각 나타낼 수 있다. 각 파라미터들의 범위는 -90° 에서 90° 에 이른다. μ_1 과 μ_2 를 고정시켜 놓고 μ_3 를 그 범위 안에서 변화시키면서 최대, 최소 특이값을 분별하여 각 μ_1 과 μ_2 의 위치에 대하여 삼차원 그림의 높이으로 사용한다. Fig. 6는 세 개의 다리를 지니고 있는 구형 메카니즘에

대한 최대 $\|T_a\|$ 의 등고선 그림을 나타내며, Fig. 7은 네 개의 다리를 지니고 있는 잉여구동된 구형 메카니즘에서의 최대 $\|T_a\|$ 의 등고선 그림을 나타낸다. 네 개의 다리를 지니고 한 개의 잉여구동을 지니고 있는 경우를 원래 세 개의 다리로 구성된 경우와 비교할 때, 구동력의 크기를 상당히 줄일 수 있음을 보여주고 있다. 잉여구동된 경우에 있어서는 최대 $\|T_a\|$ 는 대략적으로 1에서 4에 걸쳐서 분포되어 있다. 반면에 세 개의 다리로 구성되어 있는 경우는 중앙의 작업구간에서만 1부터 10까지 분포되어 있다.

다른 하나의 비교기준으로서 등방성비($s = \sigma_{\min}^F / \sigma_{\max}^F$)를 들 수 있는데, Fig. 8은 잉여구동이 경우와 비잉여구동의 경우에 있어서의 등방성비의 그림을

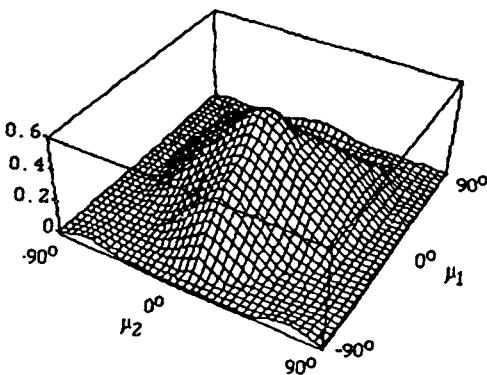


(a) Three dimensional plot

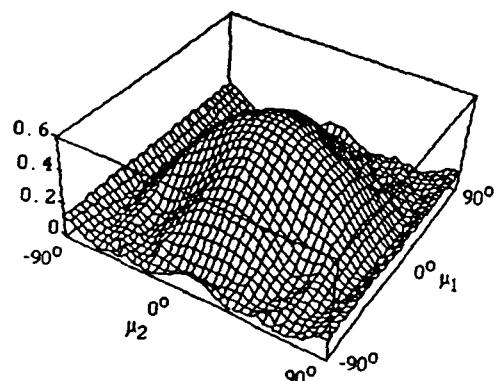


(b) Contour plot

Fig. 7 σ_{\max}^F plot of four-legged module



(a) Three-legged module



(b) Four-legged module

Fig. 8 Isotropic index plot

보여주고 있다. 잉여구동된 경우는 비잉여구동된 경우에 비하여 더 넓고 균일한 등방성의 성질을 가지고 있음을 보여주고 있다.

이상에서 살펴본 바에 의하면 잉여구동을 통하여 입력/출력 간의 힘전달 효율 뿐만 아니라 등방성의 성질도 향상시킬 수 있었음을 살펴볼 수 있었다.

5. 잉여구동된 구형 메카니즘의 고장에 대한 견실성 분석

5.1 하나의 액추에이터에서의 고장발생 경우

Fig. 9는 잉여구동된 네 개의 다리를 지닌 구형 메카니즘에서 첫번째 다리의 베이스 액추에이터가 고장이 일어났을 때의 최대 $\|T_a\|$ 를 보여준다. Marco 와 Tesar⁽⁵⁾는 세 개의 다리를 지닌 구형 메카니즘에서의 입출력 간의 힘전달비에 대한 분석을 수행하였는데 대략적으로 $\|T_a\|$ 의 값이 10까지를 수용 가능한 범위라고 지정하였다. 이것은 1의 출력을 내기 위해 최대한 10배의 액추에이터 사이즈까지 사용 가능함을 의미한다. Fig. 6과 Fig. 9에 있어서 10안에 속하는 면적을 비교해 보면, 하나의 액추에이터가 고장이 일어났을 경우는 고장이 없는 원래의 세 개의 다리로 구성된 모듈의 43%임을 나타내어 주고 있다. 기하학적으로 힘 균형을 잃은 결과 최대 $\|T_a\|$ 의 값들이 증가되어, 힘전달 능력의 저하가 있음을 알 수 있다. 그러나, 특정한 작업구간(중앙부분)에 있어서는 수용 가능함을 나타내고 있다.

Sreevijayan et. al⁽⁸⁾은 여유자유도(kinematically redundant) 매니퓰레이터에 있어서 고장에 견디는 작업구간의 개념을 소개하였다. 여기서, 고장에 견디는 작업구간이란 어느 관절에서 고장이 발생하였을 경우에도 쓰일 수 있는 작업구간을 의미한다. 잉여구동의 경우에도 이러한 개념이 적용될 수 있다. 즉, 잉여구동된 시스템에서의 고장에 견디는 작업구간(fault-tolerant workspace : FW)은 각각의 베이스 액추에이터가 고장이 났을 때 생성되는 작업구간의 공통구간으로 정의되며 다음과 같이 표현된다.

$$FW = FW_1 \cap FW_2 \cap FW_3 \cap FW_4 \quad (21)$$

여기서, $FW_i (i=1, 2, 3, 4)$ 는 i 번째 체인의 베이스 관절에 고장이 발생하였을 때의 작업구간을 나타낸다.

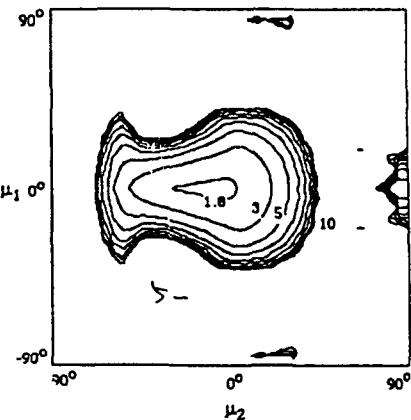


Fig. 9 σ_{\max} plot of four-legged module with one leg failed at ϕ

FW 의 사이즈는 주어진 기구학 파라미터에 따라 변할 것이다. 그러므로 FW 의 사이즈를 최대화시키기 위한 최적설계가 행하여질 수 있다.

5.2 이중 액추에이터에서의 고장발생 경우

이 절에서는 각각의 베이스 액추에이터가 이중 액추에이터(dual actuator)로 구성되어 있을 때의 고장에 견디는 능력에 대하여 살펴보기로 하겠다. 여기서의 이중 액추에이터는 대칭으로 구성되어 있으며 각기 독립적으로 제어되는 경우를 나타낸다. 현재 텍사스 주립대에서 제작 중에 있으며, 자기 독립적으로 제어되는 경우를 나타낸다. 이 모듈은 현재 텍사스 주립대에서 제작 중에 있으며, 간결한 구조, 높은 강성, 경량, 그리고 시스템 제어기와의 최소한의 인터페이스를 갖도록 제작되어 있다. 이 베이스 액추에이터의 한쪽에 고장이 발생했을 때, 다른 한쪽이 전체 힘을 내도록 설계되고 있다. 이와 같이 액추에이터 단계에서의 이중성은 한쪽에서의 고장을 다른 한쪽의 출력을 즉시 두 배로 가동시킴으로서 고장을 극복하는 장점을 지니고 있다. Fig. 10는 여러 종류의 고장이 일어난 경우를 나타내어 준다. 다음의 분석에 있어서 이중 액추에이터의 총 용량은 하나로 된 베이스 액추에이터의 용량과 일치한다고 가정한다.

우선 부분적으로 고장이 일어났을 경우의 힘전달비의 관계를 유도하기로 한다. 식(15)를 달리 표현하면 다음과 같이 나타내어 진다.

$$T_u = [G_u^a]^T T_a = [G_u^a]^T [S] T_a^f \quad (22)$$

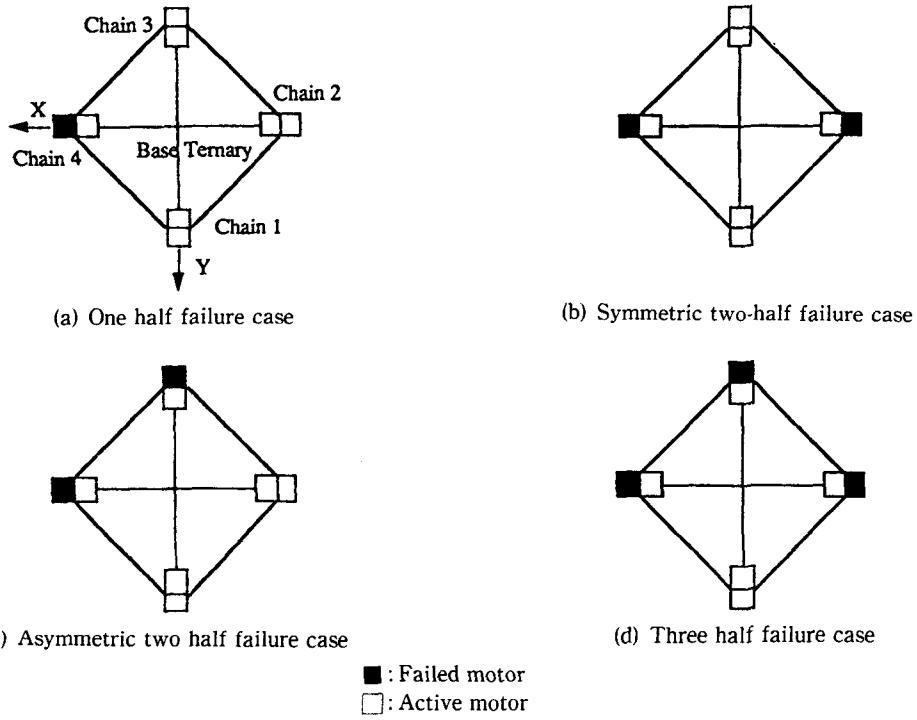


Fig. 10 Distributed failure cases

여기서, 가중행렬 $[S]$ 와 T_a^F 은 각각

$$[S] = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$T_a^F = \left(\frac{T_1}{a}, \frac{2T_1}{b}, \frac{3T_1}{c}, \frac{4T_1}{d} \right)^T \quad (24)$$

로 정의된다. 여기서, a , b , c , d 는 0이 아닌 1 이하의 수이다. 이러한 값들은 액추에이터 고장 또는 상대적인 액추에이터 용량에 관련된 정보를 제공한다. T_a^F 의 해는 식(22)의 제한조건 하에 $(T_a^F)^T T_a^F$ 을 최소화 함으로써 얻어진다.

네번째 체인의 베이스 액추에이터의 반이 고장이 났다고 가정을 하면, $[S]$ 행렬의 a , b , c 의 값은 1 그리고 d 의 값은 0.5가 된다. 물리적으로 이러한 가중행렬은 고장난 네번째 축의 구동량을 다른 축들에 비해 두 배 만큼 가중시킨다. 그러므로 네번째 축의 구동 토크량을 다른 축들의 구동 토크량의 50%가 되도록 제한을 하는 효과를 준다.

위에서와 같은 부분적 고장의 정보를 함유하는 경우에는 T_u 와 T_a 사이의 새로운 힘 관계식이 유

도된다. 우선 T_u 와 T_a^F 간의 힘 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\|T_u\|}{\|T_a^F\|} = \left(\frac{(T_a^F)^T [S]^T [G_u^a] [G_u^a]^T [S] T_a^F}{(T_a^F)^T T_a^F} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

또한, Rayleigh quotient에 근거하여 구동력에 대한 출력의 범위는 아래와 같이 주어지고

$$\sigma_{\min}^F \|T_a^F\| \leq \|T_u\| \leq \sigma_{\max}^F \|T_a^F\| \quad (26)$$

여기서, σ_{\min}^F , σ_{\max}^F 는 각각 $[S]^T [G_u^a] [G_u^a]^T [S]$ 의 최소, 최대 특이값의 제곱근을 나타낸다. 단지 0이 아닌 특이값만 힘전달비를 결정하는 데에 쓰인다. 식(26)은 다음과 같은 표현으로 나타내어질 수 있다.

$$\frac{\|T_u\|}{\sigma_{\min}^F} \leq \|T_a^F\| \leq \frac{\|T_u\|}{\sigma_{\max}^F} \quad (27)$$

두번째 단계로서 T_a 와 T_a^F 사이의 힘전달비가 고려된다. 이 관계식은 다음과 같이 주어지는데

$$\frac{\|T_a\|}{\|T_a^F\|} = \left(\frac{(T_a^F)^T [S]^T [S] T_a^F}{(T_a^F)^T T_a^F} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

여기서, T_a^F 에 관한 T_a 의 범위는

$$\sigma_{\min}^W \|T_a\| \leq \|T_a\| \leq \sigma_{\max}^W \|T_a\| \quad (29)$$

와 같이 주어지고, σ_{\min}^W 와 σ_{\max}^W 는 각각 $[S]^T [S]$ 의 최소, 최대 특이값의 제곱근이다. 네번째 체인의 베이스 액추에이터의 반이 고장난 경우, σ_{\min}^W 와 σ_{\max}^W 는 각각 0.5와 1이다. σ_{\min}^W 는 어느 형태의 고장 이든 항상 1이다. 그러므로, $\|T_a\|$ 는 항상 $\|T_a\|$ 와 같거나 크다.

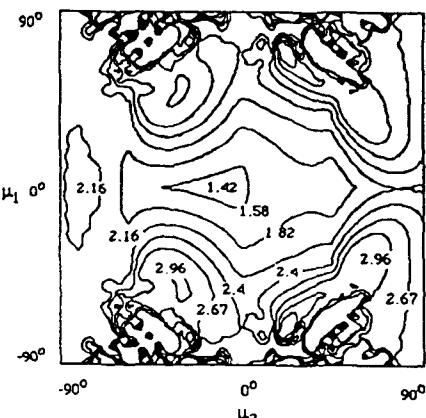
식(27)과 식(29)의 결과를 결합하면 다음과 같이 $\|T_u\|$ 에 관한 $\|T_a\|$ 의 범위가 구해진다.

$$\frac{\sigma_{\min}^W}{\sigma_{\max}^F} \|T_u\| \leq \|T_a\| \leq \frac{\sigma_{\max}^W}{\sigma_{\min}^F} \|T_u\| \quad (30)$$

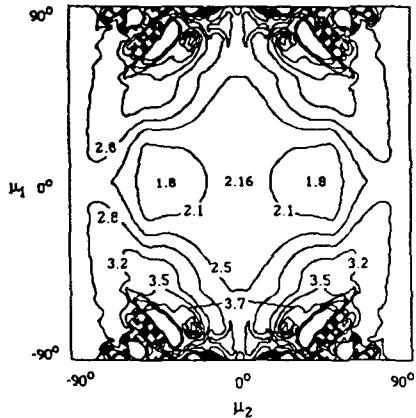
여기서, σ_{\max}^W 의 값은 한 개, 두 개, 세 개의 액추에이터에서 반고장이 생겼을 때 1이 된다.

처음으로 하나의 액추에이터에서 반고장이 발생

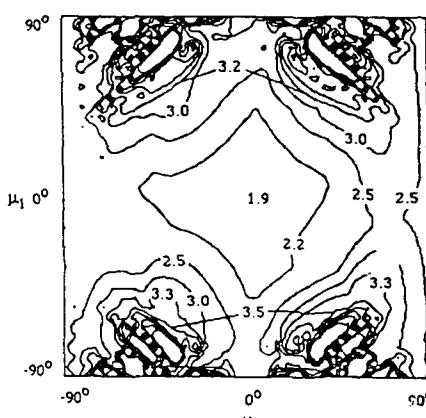
했을 경우를 고려해 본다. 고려되는 구형 메카니즘은 기하학적으로 대칭이기 때문에 반고장이 발생했을 경우, 임의의 형태(Fig. 10(a))를 통한 분석이 가능하다. Fig. 11(a)는 네번째 액추에이터에서 절반의 고장이 발생하였을 때, 최대 $\|T_a\|$ 의 분포를 보여주고 있다. 고장이 없는 경우와 비교하여 볼 때 다소 힘전달의 성능이 저하되었으나 아직도 비교적 작은 최대 $\|T_a\|$ 의 분포를 지니고 있음을 보여주고 있다. Fig. 11(b), Fig. 11(c), 그리고 Fig. 11(d)는 각각 두 개의 대칭된 절반 고장이 일어났을 경우, 비대칭의 절반 고장이 일어났을 경우, 그리고 세 개의 절반 고장이 일어났을 경우의 최대 $\|T_a\|$ 의 분포를 나타내어 준다. 최대 $\|T_a\|$ 에는 반고장의 빈도가 늘어남에 따라 증가됨을 보여주고 있다.



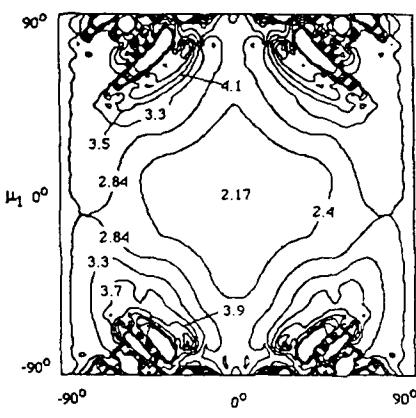
(a) One, half failure at ${}_4\phi_1$



(b) Symmetric, two, half failures at ${}_2\phi_1$ and ${}_4\phi_1$



(c) Asymmetric, two, half failures at ${}_3\phi_1$ and ${}_4\phi_1$



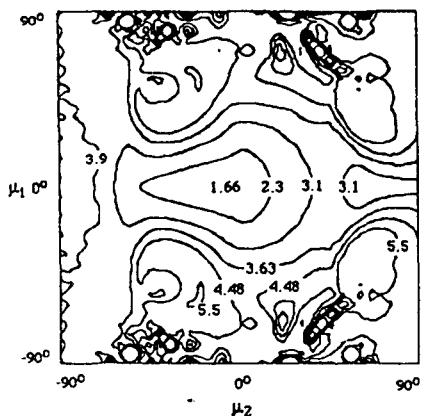
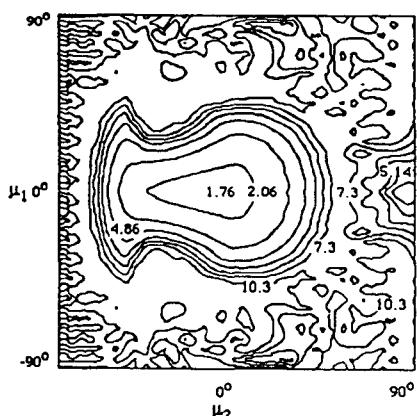
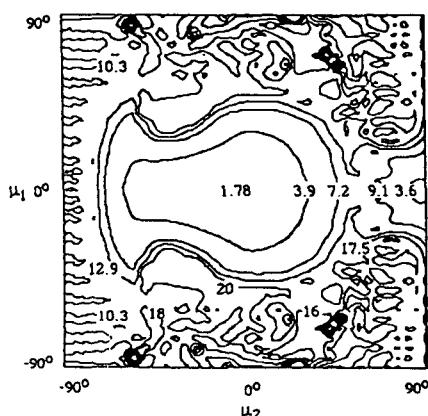
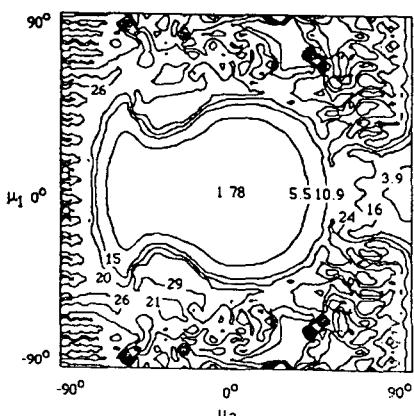
(d) Three, half failures at ${}_2\phi_1$, ${}_3\phi_1$ and ${}_4\phi_1$

Fig. 11 Maximum force transmission ratio plots of four-legged module with distributed failure

5.3 부분적 고장발생 경우

이 절에서는 한 개의 액추에이터 또는 이중 액추에이터 모듈에서 어느 정도의 부분 고장이 발생하였을 경우에 고장이 없는 원래 세 개의 다리로 구성된 모듈과 성능상 비교할 수 있는가에 대하여 알아본다. 네 개의 다리로 구성된 잉여구동된 모듈의 네번째 베이스 액추에이터에서 75%, 90%, 95%, 99%의 고장이 일어났을 경우의 최대 $\|T_a\|$ 의 분포는 각각 Fig. 12(a)~(d)에 나타내어진다. 고장의 정도가 증가함에 따라서, 최대 $\|T_a\|$ 의 분포가 Fig. 9(한 개 액추에이터가 완전히 고장난 경우)의 경우에 접근하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 90%의 고장 경우까지는 시스템은 고장이 없는 원래 세 개의 다리를 지니고 있는 모듈보다 작은 최대 $\|T_a\|$ 의 분포를 지니고 있음을 알 수 있다.

이 절에서 소개된 부분 고장의 경우는 작은 용량의 액추에이터로도 해석되어질 수 있다. 그리하여, 90%의 고장이 있는 경우는 하니의 액추에이터가 다른 액추에이터들의 10%의 용량을 지니고 있는 것으로 해석되어질 수 있다. Fig. 13은 네 개의 다리로 구성되어 있는 모듈의 네번째 베이스 액추에이터가 다른 액추에이터의 10% 용량을 지니고 있는 경우의 최대 $\|T_a\|$ 의 분포를 나타내어 주고 있으며, Fig. 14는 세 개의 다리로 구성된 모듈에 있어서, 첫번째 체인의 두번째 축 위치에 역시 다른 액추에이터의 10% 용량의 액추에이터를 부착하였을 때의 최대 $\|T_a\|$ 의 분포를 나타낸다. 두 경우에 있어서 비잉여구동 시와 비교하여 볼 때 작은 최대 $\|T_a\|$ 의 분포를 지니므로 힘전달 능력에 있어서 상당한 향상이 있음을 알 수 있다.

(a) 75% Failure at ϕ_1 (b) 90% Failure at ϕ_1 (c) 95% Failure at ϕ_1 (d) 99% Failure at ϕ_1 Fig. 12 σ_{\max}^f plots of four-legged module with partial failure at one base axis

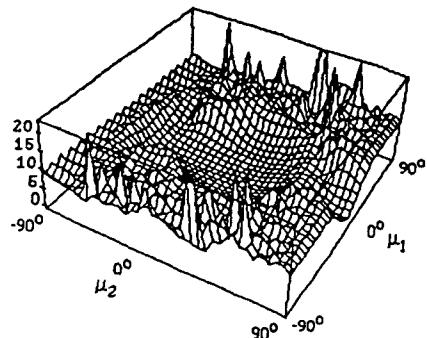


Fig. 13 Maximum force transmission ratio plots of four-legged module with one 10% base actuator (or 90% failure) at ${}_4\phi_1$

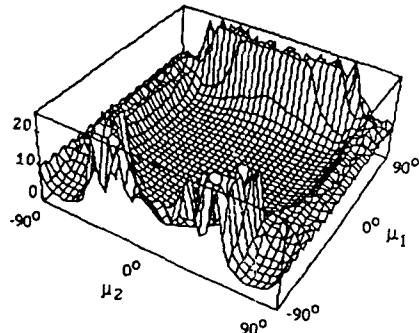
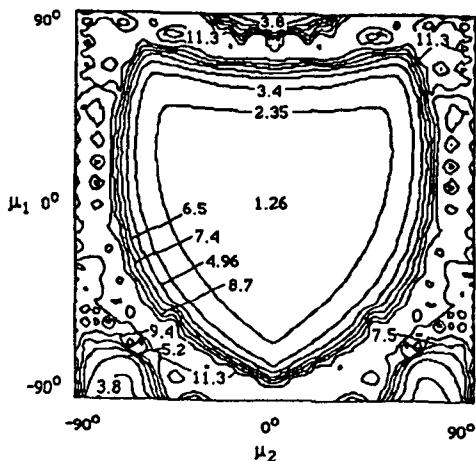
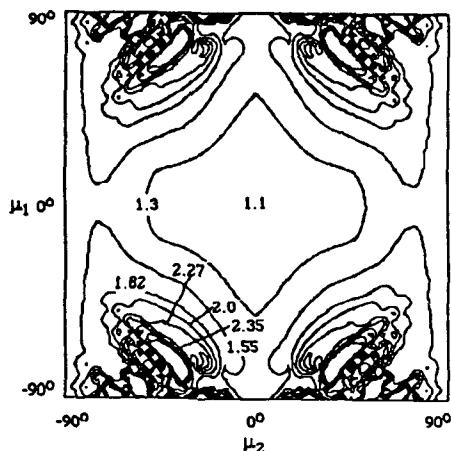


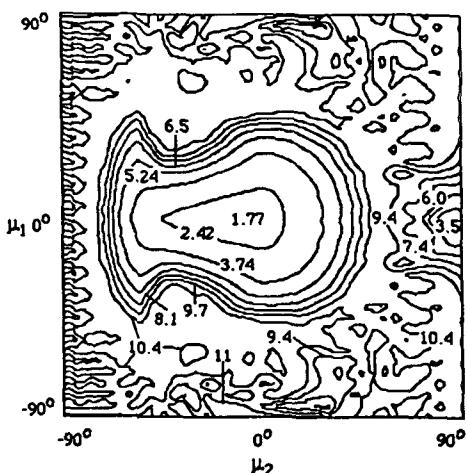
Fig. 14 Maximum force transmission ratio plots of three-legged module with one 10% floating actuator at ${}_1\phi_2$



(a) 6 additional small actuators(5%) for the three-legged shoulder



(b) 8 additional small actuators(5%) for the four-legged shoulder



(c) 8 additional small actuators(5%) with a single complete failure on the base axis of the 4th chain of the four-legged shoulder

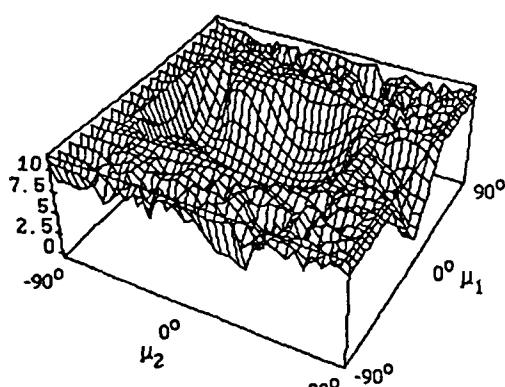


Fig. 15 Maximum force transmission ratio plots of hyper-redundant actuation case with small floating actuators

5.4 작은 용량의 과다 임여구동의 경우

이 절에서는 시스템에 과다의 작은 용량의 임여 구동이 있는 경우, 힘전달 능력에 미치는 영향과 고장에 견디는 능력에 대하여 살펴보기로 하겠다.

가상적으로 원래 액추에이터 사이즈의 5% 되는 작은 액추에이터들을 모든 유동관절(floating joint) 들에 부착하였을 경우를 생각하자. M 개의 다리를 지니고 있는 경우에 이러한 시스템의 자코비안은

$$[G_u^a]^T = [[^1G_u^a]^T; [^2G_u^a]^T; \dots; [^M G_u^a]^T] \quad (31)$$

와 같다. Fig. 13(a)을 살펴보면 세 개의 다리로 구성된 모듈의 유동관절에 작은 사이즈의 과다 임여구동(여섯 개)이 적용되었을 때, 최대 $\|T_a\|$ 의 분포는 비임여구동의 경우와 비교할 때 상당한 감소가 있음을 보여주고 있다. 반면에 네 개의 다리로 구성된 모듈의 베이스에 하나의 임여구동과 유동관절들에 작은 사이즈의 과다 임여구동(여덟 개)이 적용되었을 경우의 최대 $\|T_a\|$ 의 분포는 Fig. 15(b)에서와 같으나 베이스에서의 한 개의 임여구동이 있는 경우(Fig. 7)와 비교하여 보면 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이것은 액추에이터에서의 임여구동으로 인한 영향이 힘전달 능력에 있어서 이미 큰 영향을 미치고 있음을 의미한다. Fig. 13(c)는 Fig. 15(b)의 경우에 있어서 베이스 액추에이터 중, 하나가 완전히 고장났을 때의 최대 $\|T_a\|$ 의 분포를 나타내어 주고 있는데, 전체의 모습은 하나의 베이스 액추에이터가 완전히 고장났을 때의 최대 $\|T_a\|$ 의 분포와 비슷하나 외곽에서는 10에 근접한 작은 값들을 지니고 있음을 보여주고 있으므로 이 경우 역시 과다 임여구동으로 인한 힘전달 능력의 큰 향상이 있음을 말해준다.

이상에서는 구형 모듈의 유동관절에 적은 용량의 액추에이터들을 부착하였을 때, 시스템의 고장에 견디는 능력이 향상됨은 물론 힘전달 능력 또한 현저히 향상됨을 보여주었다. 본 연구에서 조사된 시스템의 최대 $\|T_a\|$ 의 분포는 매카니즘 설계에 있어서 필요되는 액추에이터 용량에 관한 긴요한 정보를 제공한다. 실제 메카니즘의 구현 및 실제동작에 있어서는 설정된 액추에이터 용량의 한계를 고려하며 작업 목적을 실현하는 다양한 힘분배 기법들이 사용되어야 하겠다. 또한 본 논문에서는 임여구동으로 인한 성능 향상 판단기준으로 최대 힘전달비, 등방성비, 그리고 고장에 견디는 능력 등을 사용하였으나 이 밖에 로봇 꿈점에서의 최대 속도, 최대

가속도 등을 기준으로 한 성능분석^(10,14)이 행하여질 수 있다.

6. 결론 및 당면 연구과제

시스템의 작동 중에 임의의 어떤 요소의 고장은 심각한 결과를 초래할 수 있다. 특별히 시스템의 기계 요소들이나 구조물들의 고장은 시스템 작동에 있어서 가장 심각한 문제점들 중의 하나일 것이다. 현재까지 fault tolerance에 관한 연구는 여러분야에서 활발하게 진행되어 오고 있으나 fault tolerance를 고려한 로봇구조에 대한 해석 및 설계에 관한 연구는 미진하였다. 본 연구에서는 구형 3자유도 병렬 메카니즘의 예를 통하여 임여구동을 도입함으로서 시스템이 고장에 견디는 기능을 증진시킬 수 있을 뿐만 아니라 구동력을 상당히 줄일 수 있음을 제시하였는데, 그 결과는 아래와 같이 요약된다.

(1) 네 다리로 구성되며 베이스에 추가의 구동을 지닌 구형 모듈은 세 다리의 경우와 비교해 볼 때, 힘전달특성 뿐만 아니라 등방성에서도 현저한 향상이 있음을 살펴볼 수 있었다.

(2) 네 다리 모듈의 한 액추에이터가 완전히 고장난 경우에도 힘전달성능은 세 다리 모듈 보다는 다소 감소하지만 비교적 만족할 만한 성능을 유지함을 알 수 있었다.

(3) 이중 액추에이터 모듈의 반쪽에 고장이 발생하였을 경우와 고장이 없는 세 다리 모듈의 성능을 비교해 본 결과 이중 액추에이터를 사용함으로써 fault tolerance에 큰 향상을 가져옴을 알 수 있었다.

(4) 한 개의 작은 임여 액추에이터(10%)를 세 다리의 모듈 그리고 네 다리의 모듈의 관절에 부착하였을 경우 Fault tolerance 능력 뿐만 아니라 힘전달 능력을 증진시킴을 살펴보았는데 이러한 성능들을 한층 더 향상시키기 위해서는 임여 액추에이터의 적절한 부착 위치에 대한 심도 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

(5) 가상적으로 원래 액추에이터 사이즈의 5% 되는 작은 액추에이터들을 모든 유동관절(floating joint) 들에 부착하였을 경우, 힘전달 특성을 조사한 결과, 세 다리의 경우에는 유동관절들에 부착된 작은 액추에이터들이 힘절달 능력을 향상시킴을 살펴볼 수 있었고 이와는 달리 네 다리 모듈의 경우

에는 추가된 체인의 베이스 관절에 잉여로 부착된 액추에이터의 영향으로 말미암아 유동 관절들에 부착된 작은 액추에이터들은 힘전달 능력에 큰 영향을 주지 않음을 보여 주었다.

(6) 실제로 잉여구동은 사람 몸의 구조를 비롯하여 여러가지 동물의 구조에 존재함을 살펴볼 수 있으며 이러한 시스템들에서는 작고 큰 인체형 액추에이터들이 복잡한 폐쇄체인을 형성하고 있는데 각각의 액추에이터들의 기능에 대한 연구 그리고 fault tolerance 성능에 대한 분석은 실제로 잉여구동을 고려한 로봇 메카니즘의 설계 및 운용에 있어서 좋은 자료가 되리라 기대된다. 이러한 점들에 근거하여 본 연구에서는 구형 3자유도에 대한 기초적인 연구를 수행하였다.

결론적으로 본 연구에서는 로봇 메카니즘의 여러 가지 작업성능들 뿐만 아니라 fault tolerance 성능을 향상시키기 위해서는 잉여구동에 적합한 메카니즘의 구조에 대한 고찰, 잉여구동의 부착위치, 액추에이터 사이즈 등에 관한 심도있는 분석이 뒤따라야 한다는 것을 제시하였다. 당면 연구과제로는 fault tolerance에 적합한 메카니즘 형태에 대한 최적설계(기구학적/동력학적), 잉여구동원의 활용, 효과적으로 활용 가능한 구조로의 배치, 고장에 의한 성능변화에 대한 분석, 그리고 마지막으로 이러한 고정에서 발생될 다양한 장단점들에 대한 연구 등이다.

후 기

본 연구는 '93년도 학술진흥재단 지방대 육성과제 학술연구 조성비의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Cox, D. J., 1989, "The Dynamic Model of a Three Degree of Freedom Parallel Multi-Parameter Robotic Devices," *Proc. of 4th International Conference on Advanced Robotics*, Columbus, Ohio, pp. 475~487.
- (2) Freeman, R. A. and Tesar, D., 1988, "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms/Robotic Systems, Part I-Methodology, Part II-Applications," *Trends and Developments in Mechanisms, Machine, and Robotics 20th. Biennial Mechanisms, Transmission, and Design*, Vol. 111, No. 2, pp. 202~207.
- (4) Kurtz, R. and Hatwoard, W., 1992, "Multiple-Goal Kinematic Optimization of a Parallel Spherical Mechanism with Actuator Redundancy," *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 5, pp. 644~651.
- (5) Marco, D. and Tesar, D., 1987, "Computer Simulations and Design of a Three Degree of Freedom Shoulder Module," Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin.
- (6) Ropponen, T. and Nakamura, Y., 1990, "Singularity-Free Parameterization and Performance Analysis of Actuator Redundancy," *Proc. on IEEE Robotics and Automation Conf.*, pp. 806~811.
- (7) Strang, G., 1980, *Linear Algebra and its Applications*, 1st ed., Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, San Diego.
- (8) Sreevijayan, D., Tesar, D. and Price, C., 1991, "On the Design of Fault-Tolerant Robotic manipulator Systems," JSC Report, Department of Mechanical Engineering, The University of Texas at Austin.
- (9) Tesar, D. and Butler, M., 1989, "A Generalized Modular Architecture for Robotic Structures," *ASME Manufacturing Review*, Vol. 2, No. 2, pp. 91~117.
- (10) Thomas, M., Yuan-Chou, H. A., and Tesar, D., 1985, "Optimal Actuator Stiffness Distribution for Robotic Manipulators Based on Local Dynamic Criteria," *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automations*, St. Louis, MO., pp. 275~281.
- (11) Torfason, L., 1983, "Design of the Florida Shoulder," Internal Report, Center for Intelligent Machines and Robotics, The University of Florida, Gainesville, FL.
- (12) 김희국, 이병주, 1994, "병렬형 3자유도 구형 모듈의 해석과 힘반영 원격조종기로의 구현," 대 한기계학회논문집, 제18권, 제10호, pp. 1501~1513.
- (13) 이상현, 이병주, 곽윤근, 1993, "잉여구동을

- 활용한 고성능 로봇 모듈에 관한 연구," 대한기
계학회, 추계학술대회논문집, pp. 304~309.
(14) Yuan-Chou, Chien, 1985, "Computer-Aided
Optimization in the Dynamic Analysis and Par-

ametric Design of Robotic Manipulators," Ph. D
Dissertation, Department of Mechanical Engi-
neering, The University of Florida, Gainsville.