

스튜어트 플랫폼의 조작성 연구

(Study on the Manipulability of a Stewart Platform)

김 한 성*, 최 용 제**

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계설계학과

ABSTRACT

In designing and evaluating manipulators, it is important to understand the capability of kinematic and static performances. Both workspace and manipulability can be considered as such performance measures. In general, the measure of manipulability is related to the kinematics for serial type manipulators. However, in case of parallel manipulators such as Stewart Platform, the manipulability can be interpreted as the static capability of transforming the input forces of actuators to the wrench of the end-effector. In this paper, the mathematical and physical meanings of manipulability suggested in some research works have been examined, and more meaningful measure of manipulability using the absolute minimum eigenvalues of $J^T \Delta J$ has been suggested, which has been applied to a Stewart Platform in order to investigate the manipulability of this mechanism.

1. 서론

로봇의 설계에 있어서 고려해야 할 사항들 중에서도 로봇의 운동학적 성능을 정량적으로 나타낼 수 있는 척도인 작업영역(workspace)과 조작지수(manipulability measure)는 중요한 문제가 된다. 특히, 조작지수로부터 로봇의 운동제어에 관련한 중요한 정보를 얻을 수 있으므로 많은 연구가 되어 오고 있다.^[1, 2]

먼저, 로봇의 운동학적 성능을 나타낼 수 있는 작업영역은 로봇 손(end effector)이 다다를 수 있는 공간을 나타내는 반면, 조작지수는 로봇이 작업영역내의 주어진 점에서 임의의 방향으로 속도 또는 힘을 전달시킬 수 있는 능력을 나타낸다. 여기서, 조작지수는 구동부(actuator)와 로봇 순간의 속도 및 힘을 변환시키는 자코비안 행렬에 관련되어 있는데, 직렬구조(serial type) 로봇의 조작지수는 로봇이 임의의 위치에서 갖는 기하학적 형상에 의하여 설정되는 속도변환행렬인 자코비안 J 의 특이성(singularity)에 대한 척도로 사용되며, 이 자코비안은 로봇이 특이점에서의 위치와 자세를 갖게 되면 J^{-1} 의 수치적 계산이 불가능하여 실제 제어에서 필요로 하는 구동부의 속도 명령치를 계산할 수 없게 된다. 한편, 평행구조(parallel type) 로봇의 조작지수는 로봇이 임의의 위치에서 갖는 기하학적 형상에 의하여 설정되는 정역학적 힘변환행렬인 자코비안 J 의 특이성에 대한 척도로 사용될 수 있으며, 마찬가지로 로봇이 특이점에서의 위치와 자세를 가질 때는 J^{-1} 의 계산이 불가능하여 구동부의 힘명령치를 계산할 수 없게 된다. 따라서, 직렬 또는 평행구조

로봇 모두 특이점에서는 운동제어가 불가능하므로 로봇이 이러한 기하학적인 형상(configuration)을 갖는 경우를 피하도록 하여야 한다.

기존의 조작지수에 관한 연구는 주로 직렬구조 로봇의 경우에 대하여 진행되어 왔는데, Yoshikawa는 로봇의 자세(posture)가 특이점(singular point)에 얼마나 가까운가를 나타내는 척도로서의 조작 지수를 $\sqrt{\det(JJ^T)}$ 와 같이 정의하였고^[1,3,4] Salisbury와 Craig 및 Togai는 조건수(condition number)를 조작지수로 사용할 것을 제안하였다.^[2,3,4] 한편, Pittens 등은 평행구조 로봇의 최적구성 및 자세를 구하는 데 조건수를 사용하였다.^[5,6] 이러한 조작지수에 의한 로봇의 특이점에 대한 근접도의 판정은 그 사용하는 정의에 따라서 다소의 차이를 나타낼 수 있으나, 보다 근본적으로는 사용되고 있는 조작지수의 수학적 또는 물리적 의미의 적합성이 검토되어야 할 필요성이 있다.

따라서, 본 연구에서는 특히 평행구조 로봇의 일종인 스튜어트 플랫폼을 대상으로 하여 수학적 또는 물리적 의미의 적합성을 갖춘 조작지수의 정의를 제안하고자 한다. 이를 위하여, 먼저 2절에서 직렬 및 평행로봇의 속도 및 정역학 관계를 살펴보고, 3절에서는 Yoshikawa의 조작 지수와 Salisbury와 Craig 및 Togai가 제안한 조건수의 의미를 재검토하며, 4절에서 이러한 성능지수의 문제점을 해결하고 특히 평행구조 로봇인 스튜어트 플랫폼(Stewart Platform)^[8,9]에 적용이 적합한 새로운 조작지수를 제안하고자 한다.

2. 직렬 및 평행구조 로봇의 속도 및 정역학

2.1 직렬구조 로봇의 속도 및 정역학

먼저, n개의 구동기(actuator)에 의해 구동되는 직렬구조 로봇 손의 순간적인 운동을 플뤼커의 축좌표(axis coord.)^[11,12]로 표현된 트위스트(twist) \hat{t} 로 표현하면 다음과 같다.

$$\therefore \hat{t} = J\dot{\theta} \quad (1)$$

여기서, 트위스트는 $\hat{t} = [\underline{v}, \underline{\omega}]^T$ 이고, \underline{v} 와 $\underline{\omega}$ 는 각각 로봇 손의 선속도 및 각속도이며 구동부의 속도는 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_n]^T$ 이다. 따라서, J는 직렬로봇의 자코비안 행렬로서 식 (2)로 표현된다.

$$J = \begin{bmatrix} L_1 \times s_1 & \cdots & L_n \times s_n \\ s_1 & \cdots & s_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, s_i 는 i번째 조인트의 단위방향벡터이고, L_i 는 로봇 손에서 i번째 구동축까지의 벡터이다.

한편, 직렬구조 로봇의 운동학적 관계로부터 가상일의 원리(principle of virtual work)를 이용하여 정역학 관계를 구하면 식 (3)으로 표현된다.

$$\therefore \tau = J^T \hat{w} \quad (3)$$

여기서, \hat{w} 는 플뤼커의 방사 좌표(ray coord.)로 표현된 로봇 손의 웨н치(wrench)이고, 로봇 손의 힘과 모멘트를 각각 \underline{f} 와 \underline{m} 이라 하면, $\hat{w} = [\underline{f}, \underline{m}]^T$ 가 되며, 구동부의 힘은 $\underline{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ 이다.

2.3 스튜어트 플랫폼의 속도 및 정역학 관계

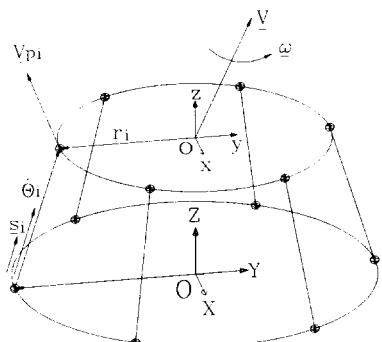


Fig. 1 General geometric configuration of a Stewart Platform

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 스튜어트 플랫폼의 속도 관계를 살펴보면 다음과 같다. 즉, i번째 선형 구동부와 만나는 상판상의 점의 속도를 \underline{v}_{pi} 라 하면, $\underline{v}_{pi} = \underline{v} + \underline{\omega} \times \underline{L}_i$ 로

표현되며, 여기서, \underline{v} 와 $\underline{\omega}$ 는 각각 상판의 중앙에 위치한 이동좌표계(oxyz)의 선속도 및 각속도이다. i번째 선형 구동부의 속도 $\dot{\theta}_i$ 는 선형 구동부의 단위방향벡터 s_i 에 \underline{v}_{pi} 를 투영함으로서 얻을 수 있으며 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i &= \underline{s}_i^T \cdot \underline{v}_{pi} \\ &= \underline{s}_i^T \cdot (\underline{v} + \underline{\omega} \times \underline{L}_i) \\ &= \underline{s}_i^T \cdot \underline{v} + (\underline{L}_i \times \underline{s}_i)^T \cdot \underline{\omega} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 6개의 선형 구동기에 모두 적용하면 다음의 식 (5)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \cdots & \underline{s}_6 \\ \underline{L}_1 \times \underline{s}_1 & \cdots & \underline{L}_6 \times \underline{s}_6 \end{bmatrix}^T \begin{pmatrix} \underline{v} \\ \underline{\omega} \end{pmatrix} \\ \therefore \dot{\theta} &= J^T \hat{t} \end{aligned} \quad (5)$$

따라서, 평행구조 로봇의 자코비안 행렬은 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$J = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \cdots & \underline{s}_6 \\ \underline{L}_1 \times \underline{s}_1 & \cdots & \underline{L}_6 \times \underline{s}_6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

또한, 식 (5)를 이용하여 직렬로봇의 경우와 마찬가지로 정역학적 관계를 구해보면 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\therefore \hat{w} = J \underline{\tau} \quad (7)$$

3. 제안된 조작 지수의 검토

기존에 제안된 조작성에 관한 연구는 주로 직렬로봇에 대하여 적용되었고, 직렬로봇의 운동학적 관계는 식 (1)로 표현되며, 스튜어트 플랫폼의 경우는 식 (7)에서와 같이 정역학적 관계를 나타내는데, 각각의 경우에 대하여 $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ($m \leq n$)일 때, $\text{rank}(J) < m$ 이면, J는 특이해(singular)이고, J^{-1} 의 수치적인 계산이 불가능하므로 직렬로봇의 경우는 속도입력치를, 그리고 스튜어트 플랫폼의 경우에는 구동부의 입력에 필요한 힘을 계산할 수 없어 제어가 불가능하며, 만약, 구동부에 속도 또는 힘을 입력하더라도 출력되는 로봇 손의 트위스트 또는 웨н치의 표현이 제한된다. 따라서, 로봇의 자세가 특이한 정도를 정량적으로 나타낼 수 있는 조작지수를 사용하게 되며, 본 절에서는 기존에 제안된 조작지수들을 검토해 보도록 한다.

3.1 조작 지수(manipulability measure)

Yoshikawa가 제안한 조작 지수(manipulability measure) w 는 다음과 같다.^[11]

$$w \triangleq \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (8)$$

$J \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ($m \leq n$)를 특이값 분해(singular value decom-

P_{ref} 를 고정좌표계의 원점으로부터 상판의 기준점까지의 위치벡터라 하고, 먼저, 스튜어트 플랫폼의 자세가 $P_{ref} = [0, 0, 1/r_b]^T$ 일 때 조건수 $\text{cond}(J)$ 로부터 구한 M^{-1} 값을, 스케일링 변수 r_b 의 단위를 각각 meter와 millimeter를 사용하여 계산한 경우에 대하여 m_{11} , m_{12} 라 한다. 또한, $P_{ref} = [0, y/r_b, 1]^T$ 에 대하여 같은 방법으로 계산한 M^{-1} 의 값을 m_{21} , m_{22} 라 하면, 단위에 따른 M^{-1} 의 민감도는 $S_{\text{unit}} = (m_{22}/m_{12})/(m_{21}/m_{11})$ 로 표현할 수 있으며, 이러한 민감도는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 조건수를 사용할 경우 단위 또는 스케일링의 변화에 따라 상대적인 값이 달라진다.

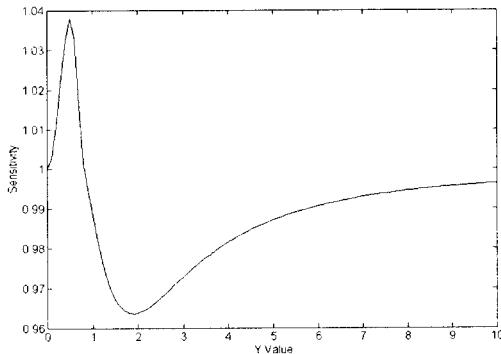


Fig. 3 Scale Sensitivity of $1/\text{cond}(J)$

4. 스튜어트 플랫폼의 조작 지수

4.1 스튜어트 플랫폼의 조작 지수 정의

Table 1 Duality between Serial and Parallel Manipulators

	Serial Manipulators	Parallel Manipulators
Kinematics	$\hat{\underline{\theta}} = J \hat{\underline{\varphi}}$ ($\hat{\underline{\varphi}} = J^{-1} \hat{\underline{\theta}}$)	$\hat{\underline{\theta}} = J^T \hat{\underline{\tau}}$
Statics	$\hat{\underline{\tau}} = J^T \hat{\underline{w}}$	$\hat{\underline{w}} = J \hat{\underline{\tau}}$ ($\hat{\underline{\tau}} = J^{-1} \hat{\underline{w}}$)

직렬로봇과 평행로봇은 각각 Table 1에서 보는 바와 같이 운동학과 정역학적 관계에서 이원성(duality)을 갖고 있으며, 조작지수를 다룰 경우에도 이원성은 유지되어야 한다. 따라서, 평행구조 로봇의 일종인 스튜어트 플랫폼의 특이한 상태의 정도를 정량적으로 나타내는 지수의 사용은 근본적으로 정역학적 관계에 기초하고 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서 제안하는 조작 지수는 자코비안 행렬의 크기

및 스케일링 인자의 영향을 받지 않고 이원 벡터의 Euclidean norm을 취하지 않는 지수를 만들기 위하여 나선의 역곱(reciprocal product)을 행하는 조작 지수를 제안한다. 단, 자코비안 행렬의 크기가 $J \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 인 6자유도 공간기구(spatial mechanism)이고 비여자유도(nonredundant)인 경우에 한정한다.

$$A \triangleq J^T \Delta J \quad (13)$$

$$= \begin{bmatrix} 2S_1^T S_{01} & S_1^T S_{02} + S_2^T S_{01} & \dots \\ S_2^T S_{01} + S_1^T S_{02} & 2S_2^T S_{02} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

여기서, 행렬 A 는 대칭 행렬(symmetric matrix)이므로 대각화(diagonalizable)할 수 있고 이는 식 (14)와 같다.

$$A = VDV^T \quad (14)$$

여기서, $V \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 의 열벡터는 행렬 A 의 고유벡터(eigenvector)로 이루어지며, $D \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 의 대각원소는 행렬 A 의 고유치(eigenvalue)로 이루어진다.

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_6 \end{bmatrix} \quad (15)$$

이제, $U = J V$ 라 하면, $U \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 는 이원행렬(dual matrix)이고 U 의 열벡터는 서로 역(reciprocal)인 관계에 있다. 따라서, J 는 수정 특이값 분해(modified singular value decomposition)^[10]에 의하여 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = UV^T \quad (16)$$

만약, 자코비안 행렬이 특이(singular)해질 때($\text{rank}(J)=r<6$), 자코비안 행렬 J 는 식 (17)과 같이 분해될 수 있다.

$$J = [U_1 \mid U_2] V^T \quad (17)$$

$J^T \Delta J = V D V^T$ 이므로 $U^T \Delta U = D$ 이고, 따라서, 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} U_1^T \\ U_2^T \end{bmatrix} \Delta [U_1 \mid U_2] = \begin{bmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$U_1^T \Delta U_1 = D_1, \quad U_2^T \Delta U_2 = 0$$

여기서, $U_1 \in \mathbb{R}^{6 \times r}$, $U_2 \in \mathbb{R}^{6 \times (6-r)}$, $D_1 \in \mathbb{R}^{(6-r) \times (6-r)}$ 이다. 즉, 로봇의 자세(posture)가 특이해(singular)질 때, 즉 자코비안 행렬이 차수(rank)를 잃을 때는 $|d|_{\min} = 0$ 이 되고, 로봇의 자세가 특이점에 가까워 질 때는 $|d|_{\min} \cong 0$ 이 되므로, $|d|_{\min}$ 를 로봇이 특이점에 근접하는 정도, 즉,

position)^[13]를 하면 $J = U \Sigma V^T$ 이고, 여기서, $U \in R^{m \times m}$ 와 $V \in R^{n \times n}$ 은 직교행렬(orthogonal matrix)이며, Σ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & 0 & | & 0 \\ & \sigma_2 & & | & 0 \\ & . & & | & 0 \\ 0 & & \sigma_m & | & 0 \end{bmatrix} \in R^{m \times n},$$

여기서, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_m$ 이다. 따라서, 조작 지수 w 는 $w = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_m$ 가 된다. 만약, 자코비안 행렬이 특이해질 때는 최소특이값인 σ_m 이 0이 되므로 조작 지수 $w=0$ 이 된다. 따라서, 조작 지수 w 는 특이점까지의 거리를 나타낸다. 그러나, 자코비안 행렬이 특이점에 매우 가까워 σ_{min} 가 매우 작을 경우에도 σ_{max} 의 값이 크면 조작 지수 w 가 클 수 있고, 또한, 조작 지수는 자코비안 행렬의 특이값들의 곱이므로 자코비안 행렬의 크기 m 및 스케일링에 따라 좌우되므로 특이점까지의 거리를 나타내는 척도로 사용하기 부적당하다.^[12]

3.2 조건수(condition number)

Salisbury와 Craig 및 Togai가 조작 지수로 제안한 조건수 (condition number)^[2,3,4]는 아래와 같다.

$$M \triangleq \text{cond}(J) = \|J\| \cdot \|J^{-1}\| = \frac{\sigma_1}{\sigma_m} \quad (9)$$

여기서, $\|\cdot\|$ 는 Euclidean norm이고, σ_1, σ_m 은 각각 자코비안 행렬 J 의 특이값(singular value)의 최대값 및 최소값이다. 이것은 자코비안 행렬이 특이점에 가까이 갈 때 σ_m 이 0에 가까운 값을 가지므로 특이점에서는 조건수 M 은 무한 값을 갖는다. 따라서, 조건수는 조작기가 특이점근처에서 매우 민감하다고 할 수 있다. 또한 조건수는 특이점을 나타내는 척도뿐만 아니라 조작기가 얼마나 정밀도를 갖고 움직일 수 있는 가를 나타내는 척도가 된다.^[13,14]

로봇의 조작지수로 사용되는 조건수 적용의 정당성을 검토하기 위해 평행로봇의 힘변환행렬 J 의 Euclidean norm을 나타내면, 식 (10)으로 표현될 수 있다.

$$\|J\| = \max_{\tau \neq 0} \sqrt{\frac{\tau^T J^T J \tau}{\tau^T \tau}} \quad (10)$$

만약, τ 를 단위 입력힘이라 하고, 평행로봇의 정역학관계인 식 (7)을 식 (10)에 대입하면, $\|J\| = \max(\|\hat{w}\|)$ 로 표현된다. 그러나, 여기서 방사좌표(ray coord.)로 표현된 웨치 \hat{w} 는 이원벡터(dual vector)이고, 이원벡터의 크기는 나선이론^[7]에 의하면,

$$\begin{aligned} \hat{w} &= (\underline{f}; \underline{m}) = \underline{f} + \varepsilon \underline{m} \\ &= (\lambda + \varepsilon \lambda_0) \hat{e} \end{aligned} \quad (11)$$

로 표현할 수 있으며, 여기서, $\varepsilon^2 = 0$, $\lambda = \sqrt{\underline{f}^T \cdot \underline{f}}$.

$\lambda_0 = \frac{\underline{f}^T \cdot \underline{m}}{\underline{f}^T \cdot \underline{f}} \lambda$ 이고, \hat{e} 는 단위 나선벡터(unit screw)로서 $\hat{e} = (\underline{e} + \varepsilon \underline{e}_0)$ 로 표현된다. 따라서, 웨치의 크기는 다음의 식 (12)과 같이 표현되어야 한다.

$$|\hat{w}| = \text{mag}(\hat{w}) \triangleq \lambda + \varepsilon \lambda_0 \quad (12)$$

즉, 이원벡터인 웨치의 크기는 일반벡터의 크기를 다루는 것처럼 취급할 수 없으며, 식 (12)과 같이 이원수(dual number)로 표현되어야 하므로, 이원벡터인 웨치 \hat{w} 에 Euclidean norm을 취하는 것은 부적당하다.

3.3 조건수 검토의 예제

(1) 이원벡터의 Euclidean Norm

두개의 서로 다른 웨치($\hat{w} = [\underline{f}, \underline{m}]^T$)의 크기를 Euclidean norm으로 비교해 보면, 먼저, \underline{f} 와 \underline{m} 의 단위가 각각 N, Nmm 일 때,

$$\hat{w}_1 = [1, 0, 0, 2, 0, 0]^T, \quad \hat{w}_2 = [4, 0, 0, 1, 0, 0]^T$$

되어 $\|\hat{w}_1\| < \|\hat{w}_2\|$ 와 같이 표현할 수 있으나, \underline{f} 와 \underline{m} 의 단위가 각각 N, Nmm 일 경우에는

$$\hat{w}_1 = [1, 0, 0, 2000, 0, 0]^T, \quad \hat{w}_2 = [4, 0, 0, 1000, 0, 0]^T$$

로 되어 $\|\hat{w}_1\| > \|\hat{w}_2\|$ 와 같이 표현할 수 있으므로 같은 물리량에 대한 일관성을 잃게 된다.

(2) $M^{-1} = 1/\text{cond}(J)$ 의 스케일링에 따른 변화

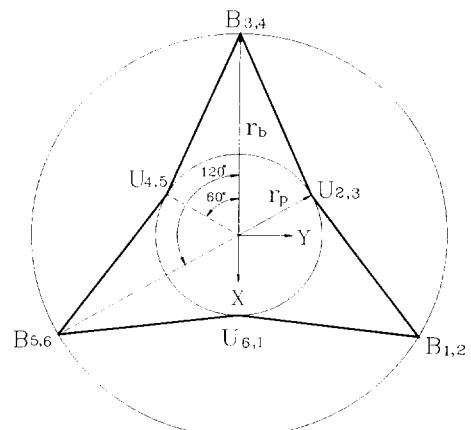


Fig. 2 Typical Geometric Dimensions of a Stewart Platform

Fig. 2에서 보는 바와 같은 3-3형 스튜어트 플랫폼의 경우에 대한 조작지수로서 조건수의 사용 적합성을 검토하기 위하여 상하판의 크기가 같고($r_p/r_b=1.0$), 상판이 하판과 평행하게 고정된 경우($\alpha=\beta=\gamma=0$, 여기서, α, β, γ 는 각각 고정좌표계의 고정축 X, Y, Z축에 대한 회전 각도이다)에 대하여 살펴보도록 한다.

조작 지수(DI, dexterity index)로 나타낼 수 있으며, 식 (19)와 같이 정의한다.

$$\therefore DI = |d|_{\min} \quad (19)$$

여기서, 절대값을 취한 이유는 행렬 A가 양의 한정(positive definite)행렬이 아니기 때문이다.

4.2 스튜어트 플랫폼의 특이점에서 조작 지수 비교

Fig. 4는 $r_p/r_b=0.5$, $P_{ref}=[0, 0, 1]^T$, $\alpha=\gamma=0$, $\beta=63.5^\circ$ 일 때, 스튜어트 플랫폼의 자세를 나타내고 있으며, 이 그림에서 보는 바와 같이 선형구동기의 방향벡터들이 상관과 같은 평면(coplanar)을 이루므로 힘변환행렬 J는 특이해지고 따라서, 이 자세에서는 상관의 웨치를 감당하기 위하여 필요로 하는 각 선형구동기의 힘을 계산할 수 없게 된다. 한편, Fig. 5는 β 가 63.5° 인 특이점에 가까이 접근함에 따라 조작 지수 M^{-1} 및 DI값 모두 0에 접근함을 보이고 있다.



Fig. 4 Stewart Platform at $\beta=63.5^\circ$

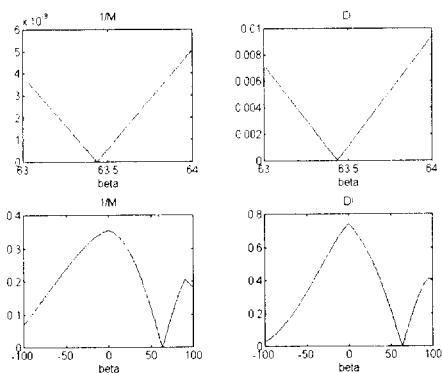


Fig. 5 DI with respect to β

4.3 스케일링에 따른 조작 지수의 비교

본 절에서는 스케일링에 따른 조작지수의 변화를 아래와 같은 조건에서 살펴보도록 하였다. 즉, $r_p/r_b=1.0$, $\alpha=\beta=\gamma=0$, $P_{ref}=[x/r_b, y/r_b, z/r_b]^T$ 일 때, Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8에서 XY평면에 대한 그림은 $z/r_b=1.0$ 인 단면에서 살펴본 값이고, YZ평면에 대한 그림은 $x=0.0$ 인 단면에서 살펴본 값이다. 이 그림들에서는 같은 조작지수를 나타내고 있는 등고선의 인쪽방향으로 이동할수록 이 기구의 조작성이 증가되고 있음을 나타낸다. 한번, 힘변환행렬 J의 M^{-1} 는 Fig. 7과 같이 스케일링($r_b=0.001$)을 하였을 경우 힘 부분에 가중치를 둔 결과가 나타났고, Fig. 8과 같이 스케일링($r_b=1000$)을 하였을 경우는 모멘트 부분에 가중치를 둔 결과가 나타났다. 그러나, DI는 스케일링에 관계없이 일정한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

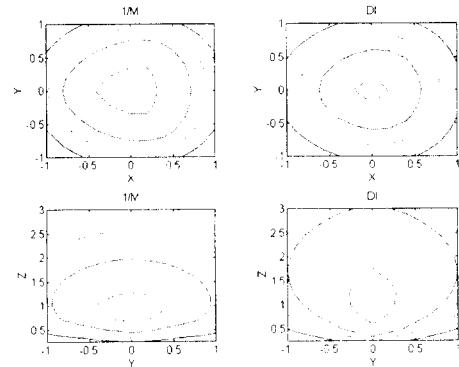


Fig. 6 Scaling factor=1.0

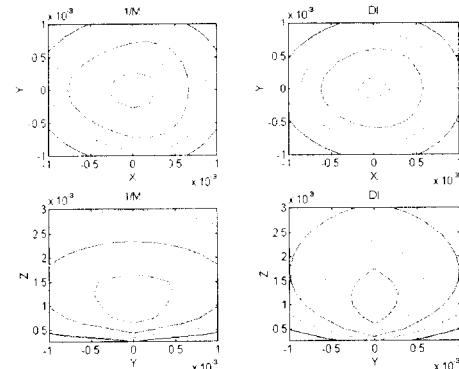


Fig. 7 Scaling factor=0.001

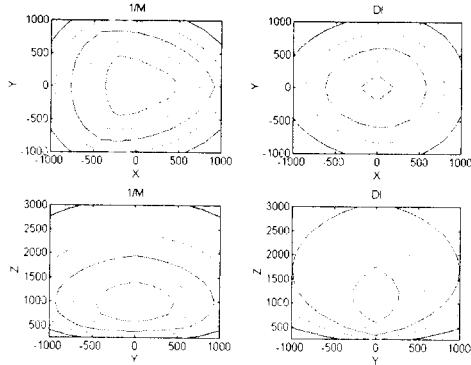


Fig. 8 Scaling factor=1000

5. 결론

기존에 제안된 조작 지수, 즉, 조작지수 w 및 조건수 M 을 살펴본 결과 조작지수 w 는 특이점과의 거리를 나타내는 데는 3절에서 적절한 바와 같이, 스케일링 및 J의 크기에 따른 문제점을 갖고 있으며, 조건수도 3절과 4절에서 살펴본 바와 같이 이원벡터에 Euclidean norm을 취하거나 스케일링에 따른 상대적인 크기가 달라지는 지수이므로 물리적 의미가 없다고 할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 피할 수 있는 조작 지수 DI를 로봇의 조작성을 나타내는 척도로 사용되는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

- (1) T. Yoshikawa, 1985, "Manipulability of Robotic Mechanisms", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 2, pp3~9.
- (2) M. Togai, 1986, "An Application of the Singular Value Decomposition to Manipulability and Sensitivity of Industrial Robots." *SIAM*, Vol. 7, No. 2, pp. 315~320.
- (3) Y. Nakamura, 1991, "Advanced Robotics - Redundancy and Optimization." Addison-Wesley, pp. 105~122.
- (4) R. M. Murray and Z. Li and S. S. Sastry, 1994, "A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation." CRC press, pp.81~147.
- (5) R. S. Stoughton, and T. Arai, 1993, "A Modified Stewart Platform Manipulator with Improved Dexterity." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 2, pp. 166~173.
- (6) K. H. Pittens and R. P. Podhorodeski, 1993, "A Family of Stewart Platforms with Optimal Dexterity", *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 4, pp.463~479.
- (7) L. Brand, 1948, "Vector and Tensor Analysis", John Wiley & Sons, Inc
- (8) 김상범, 최용재, 1994, "로봇시스템의 원격제어를 위한 범용 6자유도 수동조작기 개발", 한국자동제어학회의 논문집, 제1권, pp 356~361.
- (9) O. Ma and J. Angles, 1991, "Architecture Singularities of Platform Manipulators",
- (10) L. ROMDHANE, 1989, "Kinesthetic Analysis of Multi-Fingered Hands." Ph.D. Thesis, University of Florida.
- (11) 최용재, 1991, "나선이론에 의한 로봇의 운동 및 역학적 해석." 대한기계학회회지, 제31권, 제7호, pp. 616~625.
- (12) L. Plücker, 1865, "On a New Geometry of Space", *Phil. Trans. Royal Society of London*, Vol. 155, pp.725~791.
- (13) S. J. Leon, 1986, "Linear Algebra with Applications", Macmillan
- (14) T. Ropponen and T. Arai, 1995, "Accuracy Analysis of a Modified Stewart Platform Manipulator", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp.521~525/