

잉여 다리 병렬형 로봇의 해석

Analysis of Parallel Manipulators with Redundant Limbs

김성복

한국외국어대학교 제어계측공학과 (Tel: (0335) 30-4091; Fax: (0335) 30-4120)

Abstracts This paper presents the kinematic and dynamic analysis of parallel manipulators with redundant limbs, obtained by putting additional limbs to an existing parallel manipulator. We develop the kinematic and dynamic models of a parallel manipulator with redundant limbs. The redundancy in parallelism due to the increased number of limbs and the redundancy in actuation due to the increased number of active joints are considered in the modeling. Based on the derived models, we define the kinematic and dynamic manipulabilities of a parallel manipulator with redundant limbs. The effect of the redundant limbs on the performance of parallel manipulators is analyzed in terms of kinematic and dynamic manipulabilities.

Keywords Parallel Manipulator, Redundant Limb, Kinematic/Dynamic Modeling, Kinematic/Dynamic Manipulability

1. 서론

병렬형 로봇은 능동 조인트와 수동 조인트의 닫힌 사슬 구조로서, 능동 조인트만의 열린 사슬 구조인 직렬형 로봇에 비해 작업공간이 협소하고 조작성이 떨어지는 반면 강성이 높고 정밀도가 우수하다. 이러한 특성으로 인해, 병렬형 로봇은 정밀 제어가 요구되는 용접작업, 도장작업, 포형 안테나 조정 등의 응용 분야에 적합하다고 할 수 있다.

대표적인 병렬형 로봇인 스튜어트 플랫폼 [1]은 구조의 단순성으로 인해 제작 및 제어가 용이한 반면, 작업 수행 능력에 제한이 따른다. 고성능 병렬형 로봇의 설계를 위해서는 단순한 스튜어트 플랫폼 구조를 벗어나, 신형/회전형의 조인트 유형, 능동/피동의 조인트 분포 그리고 다리의 수 등에 있어 변화를 시도할 수 있다. 일반적으로 병렬형 로봇의 구조는 mobility와 controllability를 만족하는 한 특별한 제약을 받지 않으며, 최근 스튜어트 플랫폼을 변형한 다양한 구조의 병렬형 로봇이 제안되고 있다 [7-12].

병렬형 로봇에 한 개 이상의 능동 조인트를 지닌 다리를 추가함으로써 얻어진 로봇을 잉여 다리 병렬형 로봇이라 부른다 [7, 11]. 잉여 다리 병렬형 로봇은 기존 병렬형 로봇에 비해 전체 다리의 수가 증가됨과 동시에 전체 능동 조인트의 수도 증가되게 된다. 따라서, 잉여 다리 병렬형 로봇은 복수의 직렬형 로봇 시스템에서의 병렬 협력 여유 자유도 [5]와 잉여 구동 병렬형 로봇에서의 조인트 구동 여유 자유도 [6]를 함께 갖는다.

그림 1은 2 d.o.f. 평면 작업용 병렬형 로봇과 이에 다리를 추가함으로써 얻어진 2 d.o.f. 잉여 다리 병렬형 로봇을 예시하고 있다. 그림 1a)의 기존 병렬형 로봇은 다리 수가 2, 능동 조인트 수가 2, 그리고 수동 조인트 수가 3이고, 그림 1b)의 잉여 다리 병렬형 로봇은 다리 수가 3, 능동 조인트 수가 3, 그리고 수동 조인트 수가 5이다. 따라서, 그림 1b)의 병렬형 로봇은 그림 1a)의 병렬형 로봇과 비교하여 병렬 협력 여유 자유도와

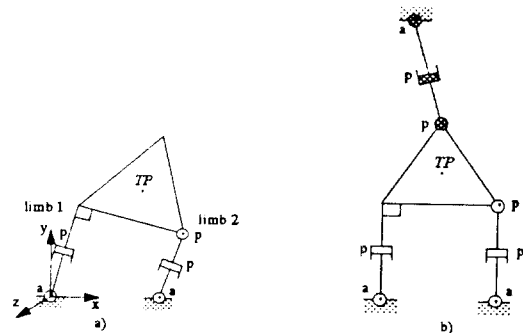


그림 1. 2 d.o.f. 평면 작업용 병렬형 로봇의 예: a) 기존 병렬형 로봇 그리고 b) 잉여 다리 병렬형 로봇.

Fig. 1. An example of 2 d.o.f. planar parallel manipulators: a) an existing parallel manipulator and b) a parallel manipulator with a redundant limb.

조인트 구동 여유 자유도를 동시에 갖는다.

본 논문은 잉여 다리 병렬형 로봇의 모델링과 성능 평가에 목적이 있다. 먼저, 병렬형 로봇의 기구학 및 동역학 모델을 유도하고 [2-4] 이를 바탕으로 정량적 성능평가 방식으로서 기구학 및 동역학적 manipulability를 정의한다. 다음, 잉여 다리가 병렬형 로봇의 모델링과 성능에 미치는 영향을 기구학 및 동역학적 측면에서 분석한다. 동역학적 해석의 편의를 위해, 이동판의 질량은 무시될 수 있다고 가정한다.

2. 병렬형 로봇

이 절에서는 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학 모델을 유도하고, 이를 바탕으로 기구학 및 동력학적 성능평가 방식을 제시한다.

2.1 기구학적 모델링

병렬형 로봇의 능동 조인트군과 수동 조인트군의 위치를 각각 θ_a 와 θ_p 라 하자. 수동 조인트의 속도는 능동 조인트의 속도에 따라 결정되므로, 병렬형 로봇의 조인트 속도 제한 관계는

$$\dot{\theta}_p = G \dot{\theta}_a \quad (1)$$

여기서 $G = \frac{\partial \theta_p}{\partial \theta_a}$ 이다. 병렬형 로봇의 이동판 상의 한

점 TP 에서의 위치를 x_o 라 하자. 식 (1)을 다리별 기구학에 적용하면, 병렬형 로봇의 기구학은

$$\dot{x}_o = J_o \dot{\theta}_a \quad (2)$$

여기서 J_o 는 병렬형 로봇의 자코비안이다.

병렬형 로봇의 능동 조인트군과 수동 조인트군의 토크를 각각 τ_a 와 τ_p , 그리고 TP 에서의 작업 공간 힘을 f_o 라 하자. 가상 일의 원리에 의해, (1)의 조인트 속도 제한 관계로부터, 병렬형 로봇의 조인트 토크 제한 관계는

$$\tau_a = G^T \tau_p \quad (3)$$

또한, (2)의 기구학으로부터, 병렬형 로봇의 정력학은

$$\tau_a = J_o^T f_o \quad (4)$$

식 (1)과 (3)은 병렬형 로봇의 조인트 공간에서의 기구학적 제한 관계를 나타내며, (2)와 (4)는 작업 공간에서의 기구학적 제한 관계를 나타낸다.

2.2 동력학적 모델링

모든 조인트가 능동형이라 가정하고 얻어진 다리별 동력학이 다음과 같이 표현된다고 하자.

$$\begin{bmatrix} \tau_a \\ \tau_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ap} \\ M_{pa} & M_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_a \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{ab} \\ \tau_{pb} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $M_{\alpha\beta} = M_{\beta\alpha}^T$, $\alpha, \beta = a, p$, 는 다리 관성의 부행렬이고, $\tau_{\alpha b}$, $\alpha = a, p$, 는 바이어스 토크이다.

식 (1)과 (3)의 조인트 공간 기구학적 제한 관계를 (5)에 대입하면, 병렬형 로봇의 조인트 공간 동력학은

$$\tau_a = M_a \ddot{\theta}_a + \hat{\tau}_{ab} \quad (6)$$

여기서

$$M_a = M_{aa} + G^T M_{pa} + M_{ap} G + G^T M_{pp} G = M_a^T \quad (7)$$

로서 병렬형 로봇의 관성이다. 식 (2)와 (4)의 작업 공간 기구학적 제한 관계를 (6)에 대입하면, 병렬형 로봇의 작업 공간 동력학은

$$f_o = M_o \ddot{x}_o + f_{ob} \quad (8)$$

여기서

$$M_o = [J_o \ M_a^{-1} \ J_o^T]^{-1} = M_o^T \quad (9)$$

로서 병렬형 로봇의 작업 공간 유효 질량이다.

2.3 기구학적 성능평가

병렬형 로봇의 속도 manipulability는 능동 조인트의 속도 공간 상의 단위 원에 대응되는 작업 공간 상의 속도 범위로 정의되며, 병렬형 로봇의 기구학적 조작성을 나타낸다. 병렬형 로봇의 속도 manipulability R_{x_o} 은, (2)의 기구학에 의거,

$$R_{x_o} : \|\dot{\theta}_a\|^2 \leq 1 \text{로부터} \\ R_{x_o} : \dot{x}_o^T [J_o \ J_o^T]^{-1} \dot{x}_o \leq 1 \quad (10)$$

병렬형 로봇의 힘 applicability는 능동 조인트의 토크 공간 상의 단위 원에 대응되는 작업 공간 상의 힘 범위로 정의되며, 병렬형 로봇의 외력에 대한 저항성을 나타낸다. 병렬형 로봇의 힘 applicability R_{f_o} 은, (4)의 정력학에 의거,

$$R_{f_o} : \|\tau_a\|^2 \leq 1 \text{로부터} \\ R_{f_o} : f_o^T [J_o \ J_o^T] f_o \leq 1 \quad (11)$$

2.4 동력학적 성능평가

병렬형 로봇의 가속도 manipulability는 능동 조인트 토크 공간 상의 단위 원에 대응되는 작업 공간 상의 가속도 범위로 정의되며, 병렬형 로봇의 동력학적 조작성을 나타낸다.

병렬형 로봇의 유효 질량에 작용하는 유효 힘을

$f_{oe} = f_o - f_{ob}$ 라 하자. 유효 힘의 범위 $R_{f_{oe}}$ 은, (11)로부터

$$R_{f_{oe}} : (f_{oe} + f_{ob})^T [J_o \ J_o^T] (f_{oe} + f_{ob}) \leq 1 \quad (12)$$

다음, 병렬형 로봇의 가속도 manipulability R_{x_o} 은, (8)의 작업 공간 동력학에 의거, (12)로부터

$$R_{x_o} : (\ddot{x}_o + \ddot{x}_{ob})^T [M_o \ J_o \ J_o^T \ M_o] (\ddot{x}_o + \ddot{x}_{ob}) \leq 1 \quad (13)$$

여기서 $\ddot{x}_{ob} = M_o^{-1} f_{ob}$.

3. 잉여 다리 병렬형 로봇

이 절에서는 병렬형 로봇에 다리를 추가함으로써 얻어진 잉여 다리 병렬형 로봇을 해석한다. 먼저, 잉여 다리를 고려하여 유도된 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학 모델을 바탕으로 잉여 다리 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학적 manipulability를 정의하고, 이를 이용하여 잉여 다리가 병렬형 로봇의 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다. 해석의 편의상, 잉여 다리의 수는 1이고, 잉여 다리는 1개 이상의 능동 조인트를 지니고 있다고 가정한다. 또한, 전체 능동 조인트 중 독립 제어 대상 능동 조인트군의 선택에 변화가 없다고 하자.

3.1 기구학적 모델링

병렬형 로봇에 다리가 추가될 때, 잉여 다리의 움직임은 독립적일 수 없으며 기존 병렬형 로봇의 움직임에 종속되게 된다. 따라서, 독립 제어 능동 조인트군의 선택에 변화가 없다고 하면, 잉여 다리 병렬형 로봇의 기구학과 정력학은 기존 병렬형 로봇의 경우와 동일하며 각각 (2)와 (4)로 주어진다.

잉여 다리의 조인트군 위치를 θ_3 라 하자. 잉여 다리는 기존 병렬형 로봇의 움직임을 좇으므로

$$J_3 \dot{\theta}_3 = \dot{\mathbf{x}}_o \quad (14)$$

여기서 J_3 은 잉여 다리의 자코비안이다. J_3 가 가역적이라 하면, (2)의 기구학과 (14)로부터

$$\dot{\theta}_3 = Q_3 J_o \dot{\theta}_a \quad (15)$$

여기서 $Q_3 = J_3^{-1}$. 식 (15)는 잉여 다리의 조인트 속도가 독립 제어 능동 조인트 속도에 따라 결정됨을 나타낸다. 잉여 다리의 조인트군 토크를 τ_3 라 하면, 가상 일의 원리에 의해, (15)로부터

$$\tau_a = (Q_3 J_o)^T \tau_3 \quad (16)$$

식 (1), (3), (15), 그리고 (16)으로부터

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_a \\ \dot{\theta}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_3 J_o \\ I \\ G \end{bmatrix} \dot{\theta}_a \quad (17)$$

$$\tau_a = \left[(Q_3 J_o)^T \quad I \quad G^T \right] \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_a \\ \tau_p \end{bmatrix} \quad (18)$$

이는 잉여 다리 병렬형 로봇의 조인트 공간 기구학적 제한 관계를 나타낸다. 한편, 병렬형 로봇의 작업 공간 기구학적 제한 관계는 잉여 다리와 무관함을 주목하라.

잉여 다리의 능동 조인트군의 위치와 토크를 각각 θ_{3a} 와 τ_{3a} 라 하자. 또한, 잉여 다리 병렬형 로봇의 전체 능동 조인트군의 위치와 토크를 각각 $\theta_a = [\theta_{3a}^T \quad \theta_a^T]^T$ 와

$T_a = [\tau_{3a}^T \quad \tau_a^T]^T$ 라 하자. 잉여 다리 병렬형 로봇의 전체 능동 조인트와 독립 제어 능동 조인트의 기구학적 관계는 다음과 같이 표현된다. 식 (15)로부터

$$\dot{\theta}_a = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{3a} \\ \dot{\theta}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{3a} J_o \\ I \end{bmatrix} \dot{\theta}_a \quad (19)$$

여기서 Q_{3a} 는 $\dot{\theta}_{3a}$ 에 상응하는 Q_3 의 부행렬이다. 가상 일의 원리에 의해, (18)로부터

$$\begin{aligned} \tau_a &= \left[(Q_{3a} J_o)^T \quad I \right] \begin{bmatrix} \tau_{3a} \\ \tau_a \end{bmatrix} \\ &= \left[(Q_{3a} J_o)^T \quad I \right] T_a \end{aligned} \quad (20)$$

3.2 동력학적 모델링

모든 조인트가 능동형이라 가정하고 얻어진 잉여 다리의 동력학이 다음과 같이 표현된다고 하자.

$$\tau_3 = M_3 \ddot{\theta}_3 + \tau_{3b} \quad (21)$$

여기서 $M_3 = M_3^T$ 는 잉여 다리의 관성이고 τ_{3b} 는 바이어스 토크이다. 식 (5)의 기존 다리의 동력학과 (21)로부터

$$\begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_a \\ \tau_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_3 & 0 & 0 \\ 0 & M_{aa} & M_{ap} \\ 0 & M_{pa} & M_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_a \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{3b} \\ \tau_{ab} \\ \tau_{pb} \end{bmatrix} \quad (22)$$

식 (17)과 (18)의 기구학적 제한 관계를 이용하면, (22)로부터, 잉여 다리 병렬형 로봇의 조인트 공간 동력학은

$$\tau_a = (\hat{M}_3 + M_a) \ddot{\theta}_a + \hat{\tau}_{ab} \quad (23)$$

여기서

$$\hat{M}_3 = (Q_3 J_o)^T M_3 (Q_3 J_o) = \hat{M}_3^T \quad (24)$$

식 (23)으로부터, 잉여 다리로 인해 병렬형 로봇의 유효 관성이 M_a 에서 $(\hat{M}_3 + M_a)$ 로 증가됨을 주목하라.

식 (2)와 (4)의 작업공간 기구학적 제한 관계를 이용하면, (24)로부터, 잉여 다리 병렬형 로봇의 작업 공간 동력학은

$$\mathbf{f}_o = \hat{M}_o \ddot{\mathbf{x}}_o + \hat{\mathbf{f}}_{ob} \quad (25)$$

여기서

$$\hat{M}_o = J_o (\hat{M}_3 + M_a)^{-1} J_o^T \quad (26)$$

특히 J_o 가 가역적이면

$$\hat{M}_o = Q_3^T M_3 Q_3 + M_o \quad (27)$$

이는 잉여 다리로 인해 병렬형 로봇의 유효 질량이 M_o 에서 $(Q_3^T M_3 Q_3 + M_o)$ 로 증가됨을 의미한다.

3.3 기구학적 성능평가

잉여 다리 병렬형 로봇의 속도 manipulability은 독립 제어군과 종속 제어군을 포함한 전체 능동 조인트의 속도 공간 상의 단위 원에 대응되는 작업 공간 상의 속도 범위로 정의된다. 먼저, 독립 제어 능동 조인트의 유효 속도 $\dot{\theta}_a$ 의 범위 \hat{R}_{θ_a} 은, (19)의 기구학적 관계에 의해,

$$\hat{R}_{\theta_a} : \|\dot{\theta}_a\|^2 = \|\dot{\theta}_{3a}\|^2 + \|\dot{\theta}_a\|^2 \leq 1 \text{로부터}$$

$$\hat{R}_{\theta_a} : \dot{\theta}_a^T [J_o^T Q_{3a}^T Q_{3a} J_o + I] \dot{\theta}_a \leq 1 \quad (28)$$

이는 단위원 보다 작다. 이러한 유효 속도 범위의 감소는 잉여 다리의 능동 조인트가 지니는 속도 한계에 기인한다.

다음, 잉여 다리 병렬형 로봇의 속도 manipulability $\hat{R}_{\mathbf{x}_o}$ 은, (2)의 기구학에 의해, (28)로부터

$$\hat{R}_{\mathbf{x}_o} : \dot{\mathbf{x}}_o^T [J_o (J_o^T Q_{3a}^T Q_{3a} J_o + I)^{-1} J_o^T] \dot{\mathbf{x}}_o \leq 1 \quad (29)$$

특히 J_o 가 가역적이면

$$\hat{R}_{\mathbf{x}_o} : \dot{\mathbf{x}}_o^T [Q_{3a}^T Q_{3a} + (J_o J_o^T)^{-1}] \dot{\mathbf{x}}_o \leq 1 \quad (30)$$

이를 (10)과 비교하면

$$\hat{R}_{x_o} \subset R_{x_o} \quad (31)$$

이는 잉여 다리로 인해 병렬형 로봇의 속도 manipulability가 감소됨을 의미한다.

잉여 다리 병렬형 로봇의 힘 applicability는 전체 능동 조인트의 토크 공간 상의 단위 원에 대응되는 작업 공간 상의 힘 범위로 정의된다. 먼저, 독립 제어 능동 조인트의 유효 토크 τ_a 의 범위 \hat{R}_{τ_a} 은, (20)의 기구학적 관계에 의거,

$$R_{\tau_a} : \|T_a\|^2 = \|\tau_{3a}\|^2 + \|\tau_a\|^2 \leq 1 \text{로부터}$$

$$\hat{R}_{\tau_a} : \tau_a^t [J_c^t Q_{3a}^t Q_{3a} J_c + I]^{-1} \tau_a \leq 1 \quad (32)$$

이는 단위원 보다 크다. 이러한 유효 토크의 증가는 잉여 다리의 능동 조인트가 지니는 외부 힘에 대한 저항력에 기인한다.

다음, 잉여 다리 병렬형 로봇의 힘 applicability \hat{R}_{f_o} 은, (4)의 정력학에 의거, (32)로부터

$$\hat{R}_{f_o} : f_o^t [J_o (J_o^t Q_{3a}^t Q_{3a} J_o + I)^{-1} J_o^t]^{-1} f_o \leq 1 \quad (33)$$

특히 J_o 가 가역적이면

$$\hat{R}_{f_o} : f_o^t [Q_{3a}^t Q_{3a} + (J_o J_o^t)^{-1}]^{-1} f_o \leq 1 \quad (34)$$

이를 (11)과 비교하면

$$\hat{R}_{f_o} \supset R_{f_o} \quad (35)$$

이는 잉여 다리로 인해 병렬형 로봇의 힘 applicability가 증가됨을 의미한다.

3.4 동력학적 성능평가

잉여 병렬형 로봇의 가속도 manipulability는 전체 능동 조인트의 토크 공간 상의 단위 원에 대응되는 작업 공간 상의 가속도 범위로 정의된다. 먼저, 잉여 다리 병렬형 로봇의 가속을 위한 유효 힘을 $f_{ae} = f_o - \hat{f}_{ob}$ 라 하면, 유효 힘의 범위 $\hat{R}_{f_{ae}}$ 은, (33)으로부터

$$\hat{R}_{f_{ae}} : (f_{ae} + \hat{f}_{ob})^t [Q_{3a}^t Q_{3a} + (J_o J_o^t)^{-1}]^{-1} (f_{ae} + \hat{f}_{ob}) \leq 1 \quad (36)$$

이는 (12)로 주어진 $R_{f_{ae}}$ 에 비해 체적이 크다.

다음, 잉여 다리 병렬형 로봇의 가속도 manipulability \hat{R}_{x_o} 은, (25)의 작업 공간 동력학에 의거, (36)으로부터

$$\hat{R}_{x_o} : (\bar{x}_o + \hat{x}_{ob})^t [M_o (Q_{3a}^t Q_{3a} + (J_o J_o^t)^{-1})^{-1} M_o] (\bar{x}_o + \hat{x}_{ob}) \leq 1 \quad (37)$$

여기서 $\hat{x}_{ob} = M_o^{-1} \hat{f}_{ob}$ 식 (26)과 (36)에서 보듯이,

잉여 다리는 유효 질량 M_o 과 유효 힘의 범위 $\hat{R}_{f_{ae}}$ 을 동시에 증가시키므로, 잉여 다리 병렬형 로봇의 가속도 manipulability는 잉여 다리의 동력학적 특성에 따라 좌우되게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 잉여 다리 병렬형 로봇을 기구학 및 동력학적으로 모델링하고, 잉여 다리가 병렬형 로봇의 작업 수행 능력에 미치는 영향을 고찰하였다. 먼저, 잉여 다리로 인해 생긴 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학 모델을 유도하였다. 다음, 유도된 모델을 바탕으로 잉여 다리 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학적 manipulability를 정의하고, 이를 이용하여 잉여 다리가 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학적 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 본 논문의 결과를 토대로 잉여 다리를 활용한 고성능 여유 자유도 병렬형 로봇의 설계 지침을 마련할 수 있다.

참고문헌

- [1] D. Stewart, "A Platform with Six Degrees of Freedom," Proc. Inst. Mech. Engr., Vol. 180, pp. 371-386, 1965.
- [2] E. F. Fichter, "A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Consideration," Int. Jour. Robotics and Research, Vol. 5, pp. 157-182, 1986.
- [3] K. Sugimoto, "Kinematic and Dynamic Analysis of Parallel Manipulators by Means of Motor Algebra," Trans. ASME Jour. Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol. 109, pp. 3-7, 1987.
- [4] J. J. Murray and G. H. Lovell, "Dynamic Modeling of Closed-Chain Robotic Manipulators and Implications for Trajectory Control," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 5, pp. 522-528, 1989.
- [5] Y. Nakamura, K. Nagai, and T. Yoshikawa, "Dynamics and Stability in Coordination of Multiple Robotic Mechanisms," Int. Jour. Robotics Research, Vol. 8, pp. 44-61, 1989.
- [6] Y. Nakamura and M. Ghodoussi, "Dynamics Computation of Closed-Link Robot Mechanisms with Nonredundant and Redundant Actuators," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 5, pp. 294-302, 1989.
- [7] S. Lee and S. Kim, "Kinematic Feature Analysis of Parallel Manipulator Systems," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 77-82, 1994.
- [8] J. -P. Merlet, "Singular Configurations and Direct Kinematics of a New Parallel Manipulator," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 338-343, 1992.
- [9] K. Cleary and T. Brooks, "Kinematic Analysis of a Novel 6-DOF Parallel Manipulator," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 708-713, 1993.
- [10] C. M. Gosselin, S. Lemicux, and J. P. Merlet, "A New Architecture of Planar Three-Degree-of Freedom Parallel Manipulator," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 3738-3743, 1996.
- [11] 이병주, 김희국, "고장에 강인한 구형 3자유도 모듈에 관한 기구학적 해석," 대한기계학회논문집, 제18권, 제11호, pp. 2846-2859, 1994.
- [12] 변용규, 조형석, "새로운 6자유도 병렬 매니플레이터의 기구학 해석," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제2호, pp. 414-430, 1996.