

## 영어 구동 병렬형 로봇의 해석

### Analysis of Parallel Manipulators with Actuation Redundancy

김성복, 김순석

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

**Abstracts** This paper presents the kinematic and dynamic analysis of parallel manipulators with actuation redundancy, obtained by replacing the passive joints of an existing parallel manipulator with the active ones. We develop the kinematic and dynamic models of a parallel manipulator with actuation redundancy. The multiplicity in selecting the controllable active joints among the increased number of active joints is considered in the modeling. Based on the derived models, we define the kinematic and dynamic manipulabilities of a parallel manipulator with actuation redundancy. The effect of the actuation redundancy on the performance of parallel manipulators is analyzed in terms of kinematic and dynamic manipulabilities.

**Keywords** Parallel Manipulator, Actuation Redundancy, Kinematic/Dynamic Modeling, Kinematic/Dynamic Manipulability

#### 1. 서론

병렬형 로봇은 능동 조인트와 수동 조인트의 닫힌 사슬 구조로 특징지워 질 수 있다. 대표적인 병렬형 로봇인  $n$  d.o.f. 스튜어트 플랫폼 [1]은 고정판, 이동판, 그리고 두 판을 연결하는  $n$ 개의 다리로 구성된다. 각 다리에는 선형 능동 조인트 그리고 양 끝에 볼소켓과 유니버설 수동 조인트가 설치되어 있어 다리의 길이를 변화시킴으로써 고정판에 대한 이동판의 상대적 위치를 조정한다. 스튜어트 플랫폼은 구조의 단순성으로 인해 제작 및 제어가 용이한 반면, 작업 수행 능력에 제한이 따른다.

고성능 병렬형 로봇의 설계를 위해 단순한 스튜어트 플랫폼 구조를 벗어나, 선형/회전형의 조인트 유형, 능동/피동의 조인트 분포 그리고 다리의 수 등에 있어서 변화를 시도할 수 있다. 병렬형 로봇은 mobility와 controllability를 만족하는 한 특별한 구조적 제약을 받지 않으며, 최근 스튜어트 플랫폼을 변형한 다양한 구조의 병렬형 로봇이 제안되고 있다 [6-11].

병렬형 로봇의 수동 조인트를 능동형으로 대체함으로써 얻어진 로봇을 영어 구동 병렬형 로봇이라 부른다. 영어 구동 병렬형 로봇은 기존 병렬형 로봇에 비해 수동 조인트의 수가 감소되는 반면, 능동 조인트의 수가 증가되므로 조인트 구동 상의 여유 자유도 [5, 6, 10]를 갖는다. 영어 구동 병렬형 로봇에 관한 기존 연구는 힘 분배, 강성, 고장 강인성 등 단편적 특성 분석에 국한되어 왔으며, 영어구동이 미치는 기구학 및 동역학적 영향에 대한 종합적인 해석은 미진한 상태이다.

그림 1은 2 d.o.f. 평면 작업용 병렬형 로봇과 수동형 조인트를 능동형으로 대체함으로써 얻어진 2 d.o.f. 영어 구동 병렬형 로봇을 예시하고 있다. 그림 1a)의 기존 병렬형 로봇은 다리 수가 2, 능동 조인트 수가 2, 그리고 수동 조인트 수가 3이고, 그

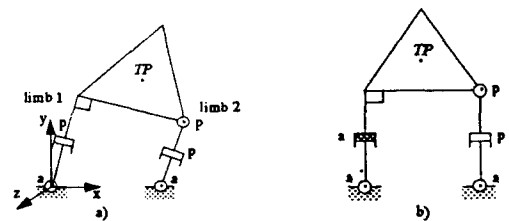


그림 1. 2 d.o.f. 평면 작업용 병렬형 로봇의 예: a) 기존 병렬형 로봇 그리고 b) 영어 구동 병렬형 로봇

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

림 1b)의 영어 구동 병렬형 로봇은 다리 수가 2, 능동 조인트 수가 3, 그리고 수동 조인트 수가 2이다. 따라서, 그림 1b)의 병렬형 로봇은 그림 1a)의 병렬형 로봇과 비교하여 조인트 구동 상의 여유 자유도를 갖는다.

영어 구동 병렬형 로봇은 독립적으로 제어할 능동 조인트군의 선택에 있어 자유도를 가지며, 전체 능동 조인트는 독립 제어 능동 조인트군의 선정에 따라 독립 제어군과 종속 제어군으로 양분되게 된다. 종속 제어 능동 조인트는 수동 조인트와 비교할 때, 독립적으로 제어될 수 없다는 점에서는 같으나 요구되는 운동을 능동적으로 발생시킨다는 점에서는 다르다. 이러한 관점에서, 영어 구동 병렬형 로봇은 독립 제어 능동 조인트군의 선택 자유도 그리고 종속 제어 능동 조인트군의 존재로 특징지워질 수 있다.

본 논문은 영어 구동 병렬형 로봇의 모델링과 성능 평가에 목적이 있다. 먼저, 병렬형 로봇의 기구학 및 동역학 모델을 유도

하고 [2-4], 정량적 성능 평가 방식으로서 기구학 및 동력학적 manipulability를 정의한다. 다음, 잉여 구동이 병렬형 로봇의 모델링과 성능에 미치는 영향을 기구학 및 동력학적 측면에서 분석한다. 해석의 편의 상, 수동 조인트와 이를 대체된 능동 조인트의 기구학 및 동력학적 특성이 서로 같다고 가정한다.

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

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. 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  $\theta_a$ 와  $\theta_p$ , 그리고 이동판 상의 한 점  $TP$ 에서의 위치를  $x_o$ 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  $G = \frac{\partial x_o}{\partial \theta_a}$ 이다. 식 (1)을 다리별 기구학에 적용

하면, 병렬형 로봇의 기구학은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서  $J_o = \frac{\partial x_o}{\partial \theta_a}$ 로서 병렬형 로봇의 자코비안이다.

병렬형 로봇의 능동 조인트군과 수동 조인트군의 토크를 각각  $\tau_a$ 와  $\tau_p$ , 그리고  $TP$ 에서의 작업 공간 힘을  $f_o$ 라 하자. 가상 일의 원리에 의해, (1)로부터, 병렬형 로봇의 조인트 토크 제한 관계는

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

또한, (2)로부터, 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  $M_{\alpha\beta} = M_{\beta\alpha}$ ,  $\alpha, \beta = a, p$ , 는 다리 관성의 부행렬이고,  $\tau_{\alpha\beta}$ ,  $\alpha = a, p$ , 는 바이어스 토크이다.

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

### 2.3 기구학적 성능평가

병렬형 로봇의 속도 manipulability (힘 applicability) 는 능동 조인트 속도 (토크) 공간 상의 단위원에 대응되는 작업 공간 상의 속도 (힘) 범위로 정의되며, 병렬형 로봇의 기구학적 조작성 (외력에 대한 저항성) 을 나타낸다.

병렬형 로봇의 속도 manipulability  $R_{x_o}$ 은, (2)의 기구학에 의거,  $R_{x_o} : \|\dot{\theta}_a\|^2 \leq 1$ 로부터

$$R_{x_o} : \dot{x}_o^T [ J_o \ J_o^T ]^{-1} \dot{x}_o \leq 1 \quad (10)$$

그리고, 병렬형 로봇의 힘 applicability  $R_{f_o}$ 은, (4)의 정력학에 의거,  $R_{f_o} : \|\tau_a\|^2 \leq 1$ 로부터

$$R_{f_o} : f_o^T [ J_o \ J_o^T ] f_o \leq 1 \quad (11)$$

식 (10)과 (11)에서 보듯이 속도 manipulability  $R_{x_o}$ 과 힘 applicability  $R_{f_o}$  사이에는 반비례 관계가 존재하는데, 이는 (2)와 (4) 즉 속도와 힘의 이중 관계에 기인한다.

### 2.4 동력학적 성능평가

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

먼저, 병렬형 로봇의 가속을 위한 유효 힘을

$$f_{oe} = f_o - f_{ob}$$

라 하면, 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 구동 병렬형 로봇

이 절에서는 병렬형 로봇의 수동형 조인트 중 일부를 능동형으로 대체함으로써 얻어진 잉여 구동 병렬형 로봇을 해석한다. 잉여 구동을 고려하여 유도된 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학 모델을 바탕으로 잉여 구동 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학적 manipulability를 정의하고 이를 이용하여 잉여 구동이 병렬형 로봇의 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다.

#### 3.1 기구학적 모델링

수동 조인트의 능동형으로의 대체는 병렬형 로봇의 기구학적 구조에 영향을 미치지 않으며, 따라서 잉여 구동 병렬형 로봇의 기구학 모델링은 그 방법상 기존 병렬형 로봇의 경우와 동일하다. 즉, 잉여 구동 병렬형 로봇의 기구학 모델은 독립 제어 대상 능동 조인트군의 선택에 따라 정해진 독립 제어 능동 조인트군을 새로운 능동 조인트군, 그리고 그 나머지 조인트들을 새로운 수동 조인트군으로 취급하여 앞 절에서와 같이 유도된다.

병렬형 로봇의 수동 조인트 중 능동형으로 대체된 조인트군의 위치와 토크를 각각  $\theta_c^*$ 와  $\tau_c^*$ 라 하자. 잉여 구동 병렬형 로봇의 독립 제어 능동 조인트군의 위치와 토크를 각각  $\theta_a^*$ 와  $\tau_a^*$ , 종속 제어 능동 조인트군의 위치와 토크를 각각  $\theta_c^*$ 와  $\tau_c^*$ , 그리고 수동 조인트군의 위치와 토크를 각각  $\theta_p^*$ 와  $\tau_p^*$ 라 하자.

잉여 구동 병렬형 로봇의 독립 제어 능동 조인트군과 종속 제어 조인트군의 기구학적 제한 관계는

$$\dot{\theta}_c^* = G_c^* \dot{\theta}_a^* \quad (14)$$

$$\tau_a^* = G_c^{*T} \tau_c^* \quad (15)$$

여기서  $G_c^* = \frac{\partial \theta_c^*}{\partial \theta_a^*}$ . 그리고, 잉여 구동 병렬형 로봇

의 기구학과 정력학은 각각

$$\dot{x}_o^* = J_o^* \dot{\theta}_a^* \quad (16)$$

$$\tau_a^* = J_o^{*T} f_o \quad (17)$$

잉여 구동 병렬형 로봇의 독립 제어군과 종속 제어군을 포함하는 전체 능동 조인트군의 위치와 토크를 각각  $\theta_a = [\theta_c^{*T} \theta_a^{*T}]^T$ 와  $T_a = [\tau_c^{*T} \tau_a^{*T}]^T$ 라 하자. 식 (14)와 (15)로부터, 잉여 구동 병렬형 로봇의 전체 능동 조인트군과 독립 제어 능동 조인트군의 기구학적 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\theta}_a = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_c^* \\ \dot{\theta}_a^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_c^* \\ I \end{bmatrix} \dot{\theta}_a^* \quad (18)$$

$$\tau_a^* = \begin{bmatrix} G_c^{*T} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_c^* \\ \tau_a^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_c^{*T} & I \end{bmatrix} T_a \quad (19)$$

#### 3.2 동력학적 모델링

수동 조인트의 능동형으로의 대체는 병렬형 로봇의 동력학적 구조에 영향을 미치지 않으며, 따라서 잉여 병렬형 로봇의 동력학적 모델은 새로이 선정된 능동 조인트군과 수동 조인트군에 대해 기존 병렬형 로봇과 동일한 방법으로 유도된다.

잉여 구동 병렬형 로봇의 조인트 공간 동력학과 작업 공간 동력학은 각각

$$\tau_a^* = M_a^* \ddot{\theta}_a^* + \hat{\tau}_{ab}^* \quad (20)$$

$$f_o = M_o^* \ddot{x}_o^* + f_{ob} \quad (21)$$

여기서

$$M_o^* = [ J_o^* M_a^{*-1} J_o^{*T} ]^{-1} = M_o^{*T} \quad (22)$$

잉여 구동 병렬형 로봇의 운동 에너지와 기존 병렬형 로봇의 운동 에너지는 같으므로

$$\frac{1}{2} \dot{x}_o^{*T} M_o^* \dot{x}_o^* = \frac{1}{2} \dot{x}_o^T M_o \dot{x}_o \quad (23)$$

따라서

$$M_o^* = M_o \quad (24)$$

이는 병렬형 로봇의 유효 질량이 잉여 구동과 무관함을 의미한다. 잉여 구동 병렬형 로봇의 작업 공간 동력학 모델이 기존 병렬형 로봇의 경우와 같음을 주목하라.

#### 3.3 기구학적 성능평가

잉여 구동 병렬형 로봇의 속도 manipulability (힘 applicability)는 전체 능동 조인트 속도 (토크) 공간 상의 단위 원에 대응되는 작업 공간 상의 속도 (힘) 범위로 정의된다.

먼저, 독립 제어 능동 조인트의 유효 속도  $\dot{\theta}_a^*$ 의 범위  $\hat{R}_{\theta_a^*}$ 은, (18)의 기구학적 관계에 의거,

$$R_{\theta_a^*} : \|\dot{\theta}_a^*\|^2 = \|\dot{\theta}_c^*\|^2 + \|\dot{\theta}_a^*\|^2 \leq 1 \text{로부터}$$

$$\hat{R}_{\theta_a^*} : \dot{\theta}_a^{*T} [ G_c^{*T} G_c^* + I ] \dot{\theta}_a^* \leq 1 \quad (25)$$

이는 단위원 보다 작다. 이와 같은 유효 속도 범위의 감소는 능동형으로 대체된 수동 조인트가 갖게 되는 속도 한계에 기인한다. 다음, 잉여구동 병렬형 로봇의 속도 manipulability  $\hat{R}_{x_o^*}$ 은, (16)의 기구학에 의거, (25)로부터

$$\hat{R}_{x_o^*} : \dot{x}_o^{*T} [ J_o^{*T} ( G_c^{*T} G_c^* + I )^{-1} J_o^{*T} ]^{-1} \dot{x}_o^* \leq 1 \quad (26)$$

식(14)와 (15)의 이중 관계를 이용하면, 독립 제어 능동 조인트의 유효 토크  $\tau_a^*$ 의 범위  $\hat{R}_{\tau_a^*}$ 은 (25)로부터

$$\hat{R}_{\tau_a^*} : \tau_a^{*T} [ G_c^{*T} G_c^* + I ]^{-1} \tau_a^* \leq 1 \quad (27)$$

이는 단위원 보다 크다. 이와 같은 유효 토크 범위의 증가는 능동형으로 대체된 수동 조인트가 갖게 되는 외력에 대한 저항 능력에 기인한다. 다음, (16)과 (17)의 이중 관계를 이용하면, 잉여구동 병렬형 로봇의 힘 applicability  $\hat{R}_{f_o}$ 은 (26)으로부터

$$\hat{R}_{f_s} : f_o [ J_o^* ( G_c^* G_c^* + I )^{-1} J_o^{*'} ]$$

$$f_o \leq 1 \quad (28)$$

식 (26)과 (28)으로부터, 잉여 구동 병렬형 로봇의 속도 manipulability  $\hat{R}_{x_s}$ 와 힘 applicability과  $\hat{R}_{f_s}$ 이

$$J_o^* ( G_c^* G_c^* + I )^{-1} J_o^{*'} \quad (29)$$

에 의해 특징지워짐을 알 수 있다.  $J_o^* = \frac{\partial x_o}{\partial \theta_a^*}$  이고

$$G_c^* = \frac{\partial \theta_c^*}{\partial \theta_a^*} \text{이므로, (29)는}$$

$$\frac{\partial x_o}{\partial \theta_a^*} \left[ \left( \frac{\partial \theta_c^*}{\partial \theta_a^*} \right)' \frac{\partial \theta_c^*}{\partial \theta_a^*} + \left( \frac{\partial \theta_a^*}{\partial \theta_a^*} \right)' \frac{\partial \theta_a^*}{\partial \theta_a^*} \right]^{-1} \left( \frac{\partial x_o}{\partial \theta_a^*} \right)'$$

$$= \frac{\partial x_o}{\partial \theta_a^*} \left[ \left( \frac{\partial \theta_a^*}{\partial \theta_a^*} \right)' \frac{\partial \theta_a^*}{\partial \theta_a^*} \right]^{-1} \left( \frac{\partial x_o}{\partial \theta_a^*} \right)' \quad (30)$$

$J_o^*$ 가 가역적이면

$$\left[ \left( \frac{\partial \theta_a^*}{\partial x_o} \right)' \frac{\partial \theta_a^*}{\partial x_o} \right]^{-1} \quad (31)$$

이는 잉여 구동 병렬형 로봇의 속도 manipulability와 힘 applicability가 독립 제어 능동 조인트군의 선택과 무관함을 의미한다.

독립 제어 능동 조인트의 선택에 변화가 없다고 하면, 즉

$$J_o^* = J_o \text{이면, (10)과 (26)으로부터}$$

$$\hat{R}_{x_s} \subset R_{x_s} \quad (32)$$

$$\hat{R}_{f_s} \supset R_{f_s} \quad (33)$$

이는 종속 제어 능동 조인트의 존재로 인해 병렬형 로봇의 속도 manipulability가 감소되는 반면, 힘 applicability가 증가됨을 의미한다.

### 3.4 동력학적 성능평가

병렬형 로봇의 가속도 manipulability는 전체 능동 조인트 토크 공간 상의 단위 원에 대응되는 작업 공간 상의 가속도 범위로 정의된다. 먼저, 잉여 구동 병렬형 로봇의 가속을 위한 유효 힘을  $f_{oe} = f_o - f_{ob}$ 라 하면, 유효 힘의 범위  $\hat{R}_{f_{oe}}$ 은, (28)로부터

$$\hat{R}_{f_{oe}} : ( f_{oe} + f_{ob} )' [ J_o^* ( G_c^* G_c^* + I )^{-1} J_o^{*'} ]$$

$$( f_{oe} + f_{ob} ) \leq 1 \quad (34)$$

이는 (12)에 주어진  $R_{f_{oe}}$ 에 비해 크다.

다음, 잉여 구동 병렬형 로봇의 가속도 manipulability  $\hat{R}_{x_s}$ 은, (8)의 작업 공간 동력학에 의거, (34)로부터

$$R_{x_s} : ( \bar{x}_o + \bar{x}_{ob} )' [ M_o J_o^* ( G_c^* G_c^* + I )^{-1} J_o^{*'} M_o ] ( \bar{x}_o + \bar{x}_{ob} ) \leq 1 \quad (35)$$

독립 제어 능동 조인트군의 선택에 변화가 없는 경우, (13)과 (35)로부터,

$$\hat{R}_{x_s} \supset R_{x_s} \quad (36)$$

이는 잉여 구동으로 인해 병렬형 로봇의 가속도 manipulability

가 증가됨을 의미한다.

## 4. 결론

본 논문에서는 기존 병렬형 로봇의 수동 조인트를 능동형으로 대체함으로써 얻어지는 잉여 구동 병렬형 로봇을 해석하였다. 순수한 잉여 구동 효과의 고찰을 위해 수동 조인트와 이를 대체한 능동 조인트의 기구학 및 동력학적 특징이 같다고 가정하고, 전체 능동 조인트 수의 증가로 인한 독립 제어 대상 능동 조인트군의 선택 자유도가 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학 모델과 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 본 논문의 결과는 잉여 구동을 도입한 고성능 여유 자유도 병렬형 로봇의 설계 지침으로 활용될 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 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.
- [6] S. Lee and S. Kim, "Kinematic Feature Analysis of Parallel Manipulator Systems," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 77-82, 1994.
- [7] J. -P. Merlet, "Singular Configurations and Direct Kinematics of a New Parallel Manipulator," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 338-343, 1992.
- [8] 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.
- [9] C. M. Gosselin, S. Lemieux, 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.
- [10] 이병주, 김희국, 김동구, "고장에 견디는 여유 구동/자유도 로봇의 성능에 대한 해석," 대한기계학회논문집, 제19권, 제11호, pp. 2927-2938, 1995.
- [11] 변용규, 조형석, "새로운 6자유도 병렬 매니퓰레이터의 기구학 해석," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제2호, pp. 414-430, 1996.