

잉여 조인트 병렬형 로봇의 해석

Analysis of Parallel Manipulators with Redundant Joints

김성복

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

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

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

1. 서론

병렬형 로봇은 능동 조인트와 수동 조인트의 닫힌 사슬 구조로 특징지어지며, mobility와 controllability를 만족하는 한 특별한 구조적 제약이 없다. 스튜어트 플랫폼 [1]은 구조의 단순성으로 인해 제작 및 제어가 용이한 반면, 작업 수행 능력이 상당히 제한된다. 따라서, 고성능 병렬형 로봇의 설계를 위하여 스튜어트 플랫폼을 변형시킨 다양한 구조의 병렬형 로봇이 제안되고 있다 [5-9].

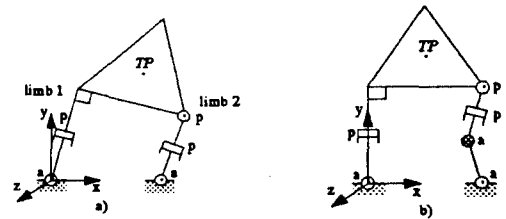


그림 1. 2 d.o.f. 평면 작업용 병렬형 로봇의 예: a) 기존 병렬형 로봇 그리고 b) 잉여 조인트 병렬형 로봇

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 joint.

병렬형 로봇에 조인트를 추가함으로써 얻어지는 로봇을 잉여 조인트 병렬형 로봇이라 부른다 [6]. 잉여 조인트 병렬형 로봇의 경우 기존 병렬형 로봇에 비해 다리별 조인트 수가 증가됨에 따라 직렬형 로봇에서의 여유 자유도를 갖는다. 잉여 조인트 병렬형 로봇은 능동/수동 조인트가 혼재하는 여유 자유도 다리들 간의 병렬 협력 시스템으로 취급될 수 있다. 한편, 단일 여유 자유도 직렬형 로봇에 관한 연구가 많이 진척된 반면, 여유 자유도 다리의 병렬 협력 시스템에 관한 연구는 미약한 상태이다.

병렬형 로봇의 기구학적 성능은 기구학 모델에 의거 정의되는 속도 manipulability와 힘 applicability에 의해 평가될 수 있으며, 이들은 각각 병렬형 로봇의 기구학적 조작성과 외력에 대한 저항성을 나타낸다 [6]. 한편, 병렬형 로봇의 동력학적 성능은 동력학 모델에 의거 정의되는 가속도 manipulability에 의해 평가될 수 있으며, 이는 동력학적 조작성을 나타낸다.

그림 1은 2 d.o.f. 평면 작업용 병렬형 로봇과 이에 조인트를 추가함으로써 얻어진 2 d.o.f. 잉여 조인트 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 조인트 병렬형 로봇은 다리 수가 2, 능동 조인트 수가 3, 그리고 수동 조인트 수가 3이다. 따라서, 그림 1b)의 병렬형 로봇은 그림 1a)의 병렬형 로봇과 비교하여 다리가 직렬형 로봇에서의 여유 자유도를 갖는다.

본 논문은 여유 조인트 병렬형 로봇의 모델링과 성능 평가에 목적이 있다. 먼저, 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학 모델을 유도하고, 정량적 성능평가 방식으로 기구학 및 동력학적 manipulability를 정의한다. 다음, 잉여 조인트가 병렬형 로봇의 모델링과 성능에 미치는 영향을 기구학 및 동력학적 측면에서 분석한다. 동력학적 해석의 편의상, 이동판의 질량은 무시될 수 있다고 가정한다.

병렬형 로봇의 기구학 모델은 각 다리에 대해 개별적으로 얻어진 기구학에 병렬형 로봇의 능동 조인트군과 수동 조인트군 간의 상호 제한 관계를 적용함으로써 유도된다 [2, 3]. 한편, 병렬형 로봇의 동력학 모델은 모든 조인트가 능동형이라는 가정 아래 얻어진 다리 별 조인트 공간 동력학에 병렬형 로봇의 기구학적 제한 관계를 적용함으로써 유도된다 [4, 5].

2. 병렬형 로봇

이 절에서는 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학 모델을 유도하고, 이를 바탕으로 기구학 및 동력학적 성능평가 방식을 제시한다. 간결성을 위해 병렬형 로봇의 다리 수는 2라 하자.

2.1 기구학적 모델링

i 번째 다리의 능동 조인트군과 수동 조인트군의 위치를 각각 θ_{ia} 와 θ_{ip} , $i=1,2$, 그리고 이동판 상의 한 점 TP 에서의 위치를 x_i 라 하자. i 번째 다리의 기구학은

$$\dot{x}_i = J_{ia} \dot{\theta}_{ia} + J_{ip} \dot{\theta}_{ip}, \quad i=1,2 \quad (1)$$

여기서 J_{ia} , $\alpha=a,p$,는 i 번째 다리의 자코비안의 부행렬이다. 병렬형 로봇의 능동 조인트군과 수동 조인트군의 위치를 각각 $\theta_\alpha = [\theta_{1\alpha} \ \theta_{2\alpha}]^T$, $\alpha=a,p$, 라 하면, (1)로부터

$$\dot{x}_1 = \bar{J}_a \dot{\theta}_a + \bar{J}_p \dot{\theta}_p \quad (2)$$

여기서 $\bar{J}_\alpha = [J_{1\alpha} \ 0]$.

수동 조인트군의 움직임은 능동 조인트군에 의해 결정되므로, 병렬형 로봇의 조인트 속도 제한 관계는

$$\dot{\theta}_p = G \dot{\theta}_a \quad (3)$$

여기서 $G = \frac{\partial \theta_p}{\partial \theta_a}$. 병렬형 로봇의 TP 에서의 작업 공간 위치를 x_o 라 하자. 식 (3)을 (2)에 대입하면, 병렬형 로봇의 기구학은

$$\dot{x}_o = J_o \dot{\theta}_a \quad (4)$$

여기서

$$J_o = \bar{J}_a + \bar{J}_p G \quad (5)$$

로서 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, (3)과 (4)로부터

$$\tau_a = G^T \tau_p \quad (6)$$

$$\tau_a = J_o^T f_o \quad (7)$$

식 (3)과 (6)은 병렬형 로봇의 조인트 공간에서의 기구학적 제한 관계를 나타내며, (4)와 (7)은 작업 공간에서의 기구학적 제한 관계를 나타낸다.

2.2 동력학적 모델링

모든 조인트가 능동형이라 가정하고 얻어진 i 번째 다리의 조인트 공간 동력학은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_i = M_i \ddot{\theta}_i + \tau_{ib}, \quad i=1,2 \quad (8)$$

여기서 $M_i = M_i^T$ 로서 i 번째 다리의 관성이고, τ_{ib} 는 바이어스 토크이다. 식 (8)을 능동 조인트군과 수동 조인트군별

로 묶으면

$$\begin{bmatrix} \tau_a \\ \tau_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ap} \\ M_{pa} & M_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_a \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{ab} \\ \tau_{pb} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $M_{\alpha\beta} = M_{\beta\alpha}^T$, $\alpha=a,p$. 본 논문에서는 간결성을 위해 τ_{ab} 과 τ_{pb} 등 바이어스항의 세부적 표현은 생략한다.

식 (3)과 (6)을 이용하면, (9)로부터, 병렬형 로봇의 조인트 공간 동력학은

$$\tau_a = M_a \ddot{\theta}_a + \hat{\tau}_{ab} \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} M_a &= M_{aa} + G^T M_{pa} + M_{ap} G + G^T M_{pp} G \\ &= M_a^T \end{aligned} \quad (11)$$

로서 병렬형 로봇의 관성이다. 식 (4)과 (7)을 이용하면, (10)으로부터, 병렬형 로봇의 작업 공간 동력학은

$$f_o = M_o \ddot{x}_o + f_{ob} \quad (12)$$

여기서

$$M_o = [J_o \ M_a^{-1} J_o^T]^{-1} = M_o^T \quad (13)$$

로서 병렬형 로봇의 유효 질량이다.

2.3 기구학적 성능평가

병렬형 로봇의 속도 manipulability은 능동 조인트 속도 공간상의 단위원에 대응되는 작업 공간상의 속도 범위로 정의된다. 병렬형 로봇의 속도 manipulability R_{x_o} 은, (4)에 의거,

$$R_{x_o} : \|\dot{\theta}_a\|^2 \leq 1 \text{로부터}$$

$$R_{x_o} : \dot{x}_o^T [J_o \ J_o^T]^{-1} \dot{x}_o \leq 1 \quad (14)$$

로봇의 힘 applicability는 능동 조인트 토크 공간의 단위원에 대응되는 작업 공간상의 힘 범위로 정의된다. 병렬형 로봇의 힘 applicability R_{f_o} 은, (7)에 의거, $R_{f_o} : \|\tau_a\|^2 \leq 1$ 로부터

$$R_{f_o} : f_o^T [J_o \ J_o^T] f_o \leq 1 \quad (15)$$

2.4 동력학적 성능평가

병렬형 로봇의 가속도 manipulability는 능동 조인트 토크 공간상의 단위 원에 대응되는 작업 공간상의 가속도의 범위로 정의된다. 먼저, 병렬형 로봇의 가속을 위한 유효 힘을 $f_{oe} = f_o - f_{ob}$ 라 하면, 유효 힘의 범위 $R_{f_{oe}}$ 은, (15)로부터

$$R_{f_{oe}} : (f_{oe} + f_{ob})^T [J_o \ J_o^T] (f_{oe} + f_{ob}) \leq 1 \quad (16)$$

다음, 병렬형 로봇의 가속도 manipulability $R_{x_{oe}}$ 은, (12)에 의거, (16)으로부터

$$\begin{aligned} R_{x_{oe}} : & (\bar{x}_o + \bar{x}_{ob})^T [M_o \ J_o \ J_o^T \ M_o] \\ & (\bar{x}_o + \bar{x}_{ob}) \leq 1 \end{aligned} \quad (17)$$

3. 잉여 조인트 병렬형 로봇

이 절에서는 병렬형 로봇에 능동 조인트를 추가함으로써 얻어진 잉여 조인트 병렬형 로봇을 해석한다. 잉여 조인트를 고려하여 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학 모델을 유도하고, 이를 바탕으로 정의된 잉여 조인트 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학적 manipulability를 이용하여, 잉여 조인트가 병렬형 로봇의 성능에 미치는 영향을 분석한다. 해석의 편의 상, 추가된 능동 조인트는 기존 다리의 하단에 위치한다는 가정한다.

3.1 기구학적 모델링

i 번째 다리에 추가된 능동 조인트군의 위치를 θ_{ir} , $i=1,2$, 라 하고, 잉여 조인트 병렬형 로봇의 추가된 능동 조인트군의 위치를 $\theta_r = [\theta_{1r} \ \theta_{2r}]^T$, 그리고 추가군과 기존군을 포함한 전체 능동 조인트군의 위치를 $\theta_a = [\theta_r \ \theta_a']^T$ 라 하자. 잉여 조인트의 추가에 따라, (1)로부터

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= J_{1r} \dot{\theta}_{1r} + J_{1a} \dot{\theta}_{1a} + J_{1p} \dot{\theta}_{1p} \\ &= \bar{J}_r \dot{\theta}_r + \bar{J}_a \dot{\theta}_a + \bar{J}_p \dot{\theta}_p \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $\bar{J}_r = [J_{1r} \ 0]$. 이 때 J_{1r} 은 잉여 조인트군의 자코비안이다. 잉여 조인트 병렬형 로봇의 조인트 속도 제한 관계는

$$\dot{\theta}_p = [G_r \ G] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_a \end{bmatrix} = [G_r \ G] \dot{\theta}_a \quad (19)$$

여기서 $G_r = \frac{\partial \theta_p}{\partial \theta_r}$.

식 (19)를 (18)에 대입하면, 잉여 조인트 병렬형 로봇의 기구학은

$$\dot{x}_0 = [J_r \ J_0] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_a \end{bmatrix} = [J_r \ J_0] \dot{\theta}_a \quad (20)$$

여기서 $J_r = \bar{J}_r + \bar{J}_p G_r$. 식 (4)와 (20)으로부터, 잉여 조인트 병렬형 로봇의 자코비안이 J_0 에서 $[J_r \ J_0]$ 로 확장됨을 주목하라.

잉여 조인트 병렬형 로봇의 추가 능동 조인트군의 토크를 $\tau_r = [\tau_{1r} \ \tau_{2r}]^T$, 그리고 전체 능동 조인트군의 토크를 $T_a = [\tau_r \ \tau_a']^T$ 라 하자. 가상 일의 원리에 의해, (19)와 (20)으로부터,

$$T_a = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_r \\ G \end{bmatrix} \tau_p \quad (21)$$

$$T_a = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_r \\ J_0 \end{bmatrix} f_0 \quad (22)$$

식 (19)와 (21)은 잉여 조인트 병렬형 로봇의 조인트 공간 기구학적 제한 관계를 나타내며, (20)과 (22)는 작업공간 기구학적 제한 관계를 나타낸다.

3.2 동력학적 모델링

i 번째 다리의 하단에 추가된 능동 조인트군의 동력학이 다음과 같이 표현된다고 하자.

$$\tau_{ir} = M_{ir} \ddot{\theta}_{ir} + \tau_{irb}, \quad i=1,2 \quad (23)$$

여기서 $M_{ir} = M_{ir}'$ 은 추가 조인트군의 관성이고 τ_{irb} 는 바이어스 토크이다. 기존 조인트군 (상단) 과 추가 조인트군 (하단) 은 직렬구조를 이루므로, i 번째 다리의 조인트 공간 동력학은 [10]

$$\begin{bmatrix} \tau_{ir} \\ \tau_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{ir} + m_i & \phi_{ri} \\ \phi_{ir} & M_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{ir} \\ \ddot{\theta}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{\tau}_{irb} \\ \tilde{\tau}_{ib} \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서, m_i 상단의 하단에 대한 관성, $\phi_{ri} = \phi_{ir}'$ 로서 상하단 간의 동적 결합, 그리고 $\tilde{\tau}_{irb}$ 와 $\tilde{\tau}_{ib}$ 는 각각 하단과 상단의 바이어스를 나타낸다.

식 (24)를 추가 능동 조인트군, 기존 능동 조인트군, 그리고 수동 조인트군별로 묶으면

$$\begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_r + m & \phi_{ra} & \phi_{rp} \\ \phi_{ar} & M_a & M_{ap} \\ \phi_{pr} & M_{pa} & M_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_r \\ \ddot{\theta}_a \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{\tau}_{rb} \\ \tilde{\tau}_{ab} \\ \tilde{\tau}_{pb} \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서

$$M_r = \begin{bmatrix} M_{1r} & 0 \\ 0 & M_{2r} \end{bmatrix} = M_r', \quad m = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = m', \quad \text{그리}$$

고 $\phi_{ra} = \begin{bmatrix} \phi_{r1a} & 0 \\ 0 & \phi_{r2a} \end{bmatrix} = \phi_{ar}'$, $\alpha=a, p$. 이 때 ϕ_{ra} , $i=1,2$,는 ϕ_{ri} 의 부행렬이다.

식 (19)와 (21)을 이용하면, (25)로부터, 잉여 조인트 병렬형 로봇의 조인트 공간 동력학은

$$\begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{M}_r & \hat{\phi}_{ra} \\ \hat{\phi}_{ar} & M_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_r \\ \ddot{\theta}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\tau}_{rb} \\ \hat{\tau}_{ab} \end{bmatrix} \quad (26)$$

여기서

$$\begin{aligned} \hat{M}_r &= M_r + m + G_r' \phi_{pr} + \phi_{rp} G_r + G_r' M_{pp} G_r \\ &= \hat{M}_r' \\ \hat{\phi}_{ra} &= \phi_{ra} + G_r' M_{pa} + \phi_{rp} G + G_r' M_{pp} G = \hat{\phi}_{ar}' \end{aligned} \quad (27)$$

식 (20)과 (22)를 이용하면, (26)으로부터, 잉여 조인트 병렬형 로봇의 작업 공간 동력학은

$$f_0 = \hat{M}_0 \ddot{x}_0 + \hat{f}_{0b} \quad (28)$$

여기서

$$\hat{M}_0 = \left([J_r \ J_0] \begin{bmatrix} \hat{M}_r & \hat{\phi}_{ra} \\ \hat{\phi}_{ar} & M_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} J_r' \\ J_0' \end{bmatrix} \right)^{-1} = \hat{M}_0' \quad (29)$$

G_r 과 ϕ_{ra} 이 충분히 작다고 가정하면, 즉

$$\hat{M}_r = M_r + m \text{이고 } \hat{\phi}_{ra} = 0 \text{이면, (29)는}$$

$$\hat{M}_0 = (M_r^{-1} + M_a^{-1})^{-1} \quad (30)$$

여기서 $M_r^{-1} = J_r (M_r + m)^{-1} J_r'$. 식 (30)으로부터 잉여조인트로 인해 병렬형 로봇의 유효질량이 M_0 에서

$[M_r^{-1} + M_a^{-1}]^{-1}$ 로 감소됨을 주목하라. 이를 관성

감소 효과라 부른다.

3.3 기구학적 성능평가

잉여 조인트 병렬형 로봇의 속도 manipulability은 전체 능동 조인트 속도 공간 상의 단위원에 대응되는 작업 공간 상의 속도 범위로 정의된다. 잉여 조인트 병렬형 로봇의 속도 manipulability $\hat{R}_{\dot{x}_o}$ 은, (20)에 의거,

$$R_{\dot{x}_o} : \|\dot{\theta}_a\|^2 = \|\dot{\theta}_r\|^2 + \|\dot{\theta}_o\|^2 \leq 1 \text{로부터}$$

$$\hat{R}_{\dot{x}_o} : \dot{x}_o' [J_r \ J_r' + J_o \ J_o']^{-1} \dot{x}_o \leq 1 \quad (31)$$

이를 (14)와 비교하면

$$\hat{R}_{\dot{x}_o} \supset R_{\dot{x}_o} \quad (32)$$

이는 잉여 조인트로 인해 병렬형 로봇의 속도 manipulability가 증가됨을 의미한다.

잉여구동 병렬형 로봇의 힘 applicability는 전체 능동 조인트 토크 공간 상의 단위원에 대응되는 작업 공간 상의 힘 범위로 정의된다. 잉여 조인트 병렬형 로봇의 힘 applicability \hat{R}_{f_o} 은, (22)에 의거,

$$R_{T_o} : \|\tau_a\|^2 = \|\tau_r\|^2 + \|\tau_o\|^2 \leq 1 \text{로부터}$$

$$\hat{R}_{f_o} : f_o [J_r \ J_r' + J_o \ J_o'] f_o \leq 1 \quad (33)$$

이를 (15)와 비교하면

$$\hat{R}_{f_o} \subset R_{f_o} \quad (34)$$

이는 잉여구동으로 인해 병렬형 로봇의 힘 applicability가 감소됨을 의미한다.

3.4 동력학적 성능평가

병렬형 로봇의 가속도 manipulability는 전체 능동 조인트 토크 공간 상의 단위원에 대응되는 작업 공간 상의 가속도 범위로 정의된다. 먼저, 병렬형 로봇의 가속을 위한 유효 힘을

$f_{oe} = f_o - \hat{f}_{ob}$ 라 하면, 여유 조인트 병렬형 로봇의 유효 힘의 범위 $\hat{R}_{f_{oe}}$ 은, (33)으로부터

$$\hat{R}_{f_{oe}} : (f_{oe} + \hat{f}_{ob})' [J_r \ J_r' + J_o \ J_o'] (f_{oe} + \hat{f}_{ob}) \leq 1 \quad (35)$$

다음, 여유 조인트 병렬형 로봇의 가속도 manipulability $\hat{R}_{\ddot{x}_o}$ 은, (28)에 의거, (35)로부터

$$R_{\ddot{x}_o} : (\ddot{x}_o + \hat{\ddot{x}}_{ob})' [M_o (J_r \ J_r' + J_o \ J_o')] M_o (\ddot{x}_o + \hat{\ddot{x}}_{ob}) \leq 1 \quad (36)$$

여기서 $\hat{\ddot{x}}_{ob} = M_o^{-1} \hat{f}_{ob}$, 식 (30)과 (36)에서 보듯이,

잉여 조인트는 유효 질량 M_o 과 유효 힘의 범위 $\hat{R}_{f_{oe}}$ 을 동시에 감소시키므로, 잉여 조인트 병렬형 로봇의 가속도 manipulability는 잉여 조인트의 동력학적 특성에 따라 좌우되게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 잉여 조인트 병렬형 로봇을 기구학 및 동력학적으로 모델링하고, 잉여 조인트가 병렬형 로봇의 작업 수행 능력에 미치는 영향을 고찰하였다. 먼저, 다리당 조인트 수의 증가로 인한 다리의 여유 자유도를 고려하여, 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학 모델을 유도하였다. 다음, 유도된 모델을 바탕으로 잉여 조인트 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학적 manipulability를 정의하고, 이를 이용하여 잉여 조인트가 병렬형 로봇의 기구학 및 동력학적 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 본 논문의 결과는 잉여 조인트를 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] S. Kim and S. Lee, "Dynamic Coordination of a Self-Reconfigurable Manipulator System," Proc. 30th IEEE Conf. Decision and Control, pp. 2404-2409, 1991.