

# 고강성 로봇을 이용한 프로펠러 연삭에 관한 연구

이민기\*, 최병오\*\*, 박근우\*\*\*

## Study on Propeller Grinding Applied by a High Stiffness Robot

Lee, Min Ki\*, Choi, Byung Oh\*\*, Park, Kun Woo\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents the robot program for propeller grinding. A robot manipulator is constructed by combining a parallel and a serial mechanism to increase high stiffness as well as workspace. The robot program involves inverse/direct kinematics, velocity mapping, Jacobian, and etc. They are derived in efficient formulations and implemented in a real time control. A velocity control is used to measure the height of a propeller blade with a touch probe and a position control is performed to grind the surface of the blade.

**Key Words:** Propeller grinding(프로펠러 연삭작업), Hybrid Parallel-Serial Manipulator(병렬-직렬 조합형 머니플레이터) Stiffness(강성), Decoupled Workspace(분리된 작업공간), Direct Kinematics(순방향 기구학), Link Train and Passive Joint(링크 트레인과 수동 조인트)

### 1. 서 론

연삭 작업은 일반적으로 NC 공작기계에 의해 행해지는데 이들에 대한 시스템 구성과 언어 개발에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 로봇은 극히 일부의 분야<sup>(1,2)</sup>에 적용되고 연구도 미비한 실정이다. 위의 경우는 다관절 로봇을 연삭 작업에 적용한 사례로 가공시 변형을 줄이고 안정성을 높이기 위한 제어 시스템 개발에 주안점을 두고 있다. 다관절 로봇은 낮은 강성으로 큰 부하를 낼 수 없으므로 요즘 강성이 큰 평행기구 로봇을 여러 분야<sup>(3,4)</sup>에 적용하고 있다.

우리는 프로펠러 연삭 작업을 위한 병렬-직렬 조합형 머니플레이터 (Hybrid Parallel Serial Manipulator, HPSM)를 제안했다<sup>(5)</sup>. HPSM는 병렬기구(Parallel Mechanism, PM)에 리스틴 직렬기구(Serial Mechanism, SM)를 결합하여 서로 취약점을 보완한 로봇으로 프로펠러 블레이드 연삭에 적합하도록 설계·제작되었다. 그러나 PM의 구동방식이 간접구동으로 링크의 길이와 기하학적 구속조건으로 행해지므로 HPSM의 제어 프로그램은 일반 다관절과 달리 많은 연산을 요하며 알고리즘도 복잡하다. 즉, 링크의 길이에 따라 로봇의 위치를 산출하는 순방향 기구학 해석<sup>(6)</sup>, 연삭 속도를 생성하기 위

\* 창원대학교 제어계측과  
 \*\* KIMM 산업기계실  
 \*\*\* 창원대학교 제어계측과 대학원

한 자코비안<sup>(7)</sup>, 조인트 및 링크의 간섭운동을 고려한 궤적 생성<sup>(8)</sup>등이 실제 시스템에 적용되고, 실시간으로 처리되어야 한다.

본 논문에서는 HPSM 로봇의 위치 제어를 위해 역방향 및 순방향 기구학 해석을 실시하고 속도 제어를 위해 모터 벡터를 이용한 자코비안을 유도한다. 또한, 프로펠러 연삭 작업을 위해 제작된 HPSM 로봇 시스템을 소개하며 위에서 개발된 알고리즘을 실시간 처리 콘트롤러에 적용하여 프로펠러 블레이드의 높이를 측정하고, 연삭작업을 실시한 결과를 보인다.

## 2. HPSM 구조

HPSM은 Fig.1과 같이 포지션 구동은 PM이, 오리엔테이션 구동은 리스트인 SM이 분리해서 행해지도록 되어 있다. PM은 3개의 다리와 중앙축으로 되어 있는데,  $leg_i (i=1,2,3)$ 가 베이스(Base)의  $B_i$ 로부터 플랫폼(Platform)의  $P_i$ 까지 유니버설조인트에 의해서 각각 연결되어 있다. 점  $B_i$ 와  $P_i$ 는 베이스와 플랫폼의 중앙으로부터 각각  $\parallel \vec{O_0B_i} \parallel = r_b$ ,  $\parallel \vec{O_3P_i} \parallel = r_p$ 이며  $120^\circ$ 의 등 간격으로 위치한다. 여기서 점  $O_0$ 과  $O_3$ 는 각각 베이스와 플랫폼의 중앙점이다.

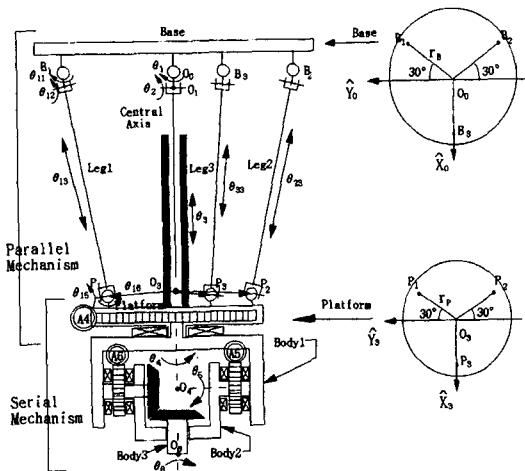


Fig. 1 Hybrid Parallel-Serial Manipulator

$Leg_i$ 의 링크 트레인은 Fig.2와 같이  $U_{i1} - n_{i1} - PR_{i2} - n_{i2} - U_{i3}$ 의 구조로 되어 있는데 유니버설조인트인  $U_{i1}$ 가 리니어 액추에이터 (LA<sub>i</sub>)의 하우징( $n_{i1}$ )에 2-dof

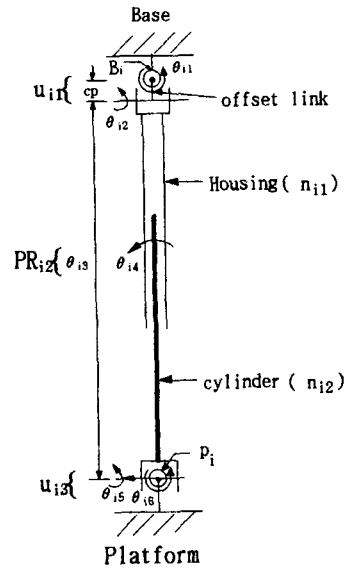


Fig. 2 Link Train of Leg i

$(\theta_{i1}, \theta_{i2})$ 를 제공하고, 미끄럼 및 회전 조인트인  $PR_{i2}$ 가 실린더 ( $n_{i2}$ )에 2-dof  $(\theta_{i3}, \theta_{i4})$ 를, 그리고  $U_{i3}$ 의 2-dof  $(\theta_{i5}, \theta_{i6})$ 가 추가되어 전체 6-dof의 링크 트레인이 된다. 유니버설조인트의 운동범위를 넓히기 위해 상위 조인트,  $U_{i1}$ 에 편심 링크 (offset-link)를 삽입한다. Leg<sub>i</sub>로만 이루어진 PM의 자유도는 6으로 LA<sub>i</sub>의 길이  $\theta_{i3}$ 를 고정함으로써 플랫폼을 지지할 수 없다. 그러므로 3 자유도를 구속할 수 있는 중앙축을 첨가한다. 중앙축은 베이스의 중앙에 위치하며 상단에 설치된  $U_1$ 의 회전운동  $(\theta_1, \theta_2)$ 과  $P_2$ 의 미끄럼 운동( $\theta_3$ )으로 플랫폼을 구속시켜 PM의 전체적인 자유도를 3으로 줄인다. 플랫폼에 오리엔테이션 운동  $(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$ 을 위한 리스트를 첨가할 경우 6-dof의 HPSM이 된다.

리스트 메커니즘은 연삭 각도를 자유롭게 생성하고 운동공간을 크게 하기 위해 SM를 이용한다. SM의 경우 최대  $360^\circ$ 까지 회전이 가능하여 PM으로써 만족하지 못한 작업공간을 보상할 수 있다. 그러나 연삭 부하가 SM에 설치된 모터에 직접 전달되므로 워엄 기어(Worm Gear)를 사용하여 기계적으로 차단한다. 즉,  $A_4$ 는 워엄 기어를 통해서 body-1을 회전시켜  $\theta_4$ 운동을 생성하고,  $A_5$ 는 body-2를 회전시켜  $\theta_5$ 운동을 생성하며, 마지막  $A_6$ 은 body-3인 엔드 이펙터 (end-effector)를 회전시킴으로써  $\theta_6$ 운동을 만든다.  $\theta_4$ 와  $\theta_6$ 은  $360^\circ$ 회전이 가능하며  $\theta_5$ 는  $180^\circ$ 의 운동범위를 가진다.

### 3. 기구학 해석

역 기구학은 엔드 이펙터의 위치/방위가 주어질 때 구동 조인트의 길이 및 각도를 구하는 것으로 Fig.1과 같이 좌표가 부여되고 위치와 방위가 각각  ${}^0O_6$  와  ${}^0R_6$  일 때 리스트 조인트  $\theta_i (i=4,5,6)$  을 포함한 중앙축 조인트의 각도는

$$(\theta_1, \dots, \theta_6) = \text{Invkin\_center}({}^0O_6, {}^0R_6) \quad (1)$$

이다. 여기서  $\text{Invkin\_center}(\cdot)$ 는 중앙축의 역 기구학 해석으로 다관절 로봇과 동일하나  $\theta_i (i=1,2,3)$  이 피동 조인트로 이를 생성하는 구동 조인트의 길이를 PM에서 구해야 한다. PM의 페루프 관계에서 구동 조인트  $\theta_{i3}$  을 포함한 링크 트레인  ${}^0B_iP_i (i=1,2,3)$  은

$${}^0B_iP_i = {}^0O_0O_3 - {}^0O_0B_i + {}^0R_3 {}^3O_3P_i (i=1,2,3) \quad (2)$$

이다. 편심 링크가 없을 경우  $\theta_{i3} = \parallel {}^0B_iP_i \parallel$  이나 Fig.2의 링크 트레인에 의해서 아래와 같이 구해진다.

$$\theta_{i3} = \text{Invkin\_leg}_i({}^0B_iP_i) (i=1,2,3) \quad (3)$$

여기서  $\text{Invkin\_leg}_i(\cdot)$ 는  $\text{leg}_i$ 의 역 기구학이다. 식 (1)에서 구동 조인트  $\theta_i (i=4,5,6)$  가 직접 구해지고, 식 (2)와 (3)에 의해  $\theta_{i3} (i=1,2,3)$  을 구함으로써 역 기구학이 완료되고 이를 위치 및 방위 제어에 적용한다. 이러한 제어를 위해 순 방향 기구학 해석도 필요한데 이는 구동 조인트의 길이 및 각도에 따른 엔드 이펙터의 위치/방위를 구하는 것이다. SM는 직접 구동으로 간단히 해석되나 PM는 간접 구동으로 복잡한 구속식<sup>(9)</sup>로 나타내진다. 즉, 중앙축의 조인트 변수들은  $\theta_{i3}$ 와 기하학적 구속조건(Geometric Constraint, GC)에 의해서 결정된다. GC에 참여하는 페루프수<sup>(10)</sup>는

$$\text{Loop} = j - n + 1 \quad (4)$$

으로  $O_0O_3P_1B_1$ ,  $O_0O_3P_2B_2$ ,  $O_0O_3P_3B_3$ 의 3-loops가 서로 운동을 구속하면서 참여한다. 이 관계를 구속식으로 나타내면

$$\theta_i = \text{const}_i(\theta_{13}, \theta_{23}, \theta_{33}) (i=1,2,3) \quad (5)$$

이다.  $\text{const}_i(\cdot)$ 는 GC을 나타내는 방정식으로 구동

조인트가 3개밖에 포함되지 않아 방정식의 차수가 낮고 식이 간단하다. 외부 센서를 중앙축의 조인트에 설치하여  $\theta_i$ 를 측정할 경우 순방향 해석은 직접 구해진다. 그러나 본 연구에서는 구속식을 유도함으로써 외부 센서를 설치하지 않고  $\theta_i$ 를 구한다.

베이스에 설치된  $U_{i1}$ 의 위치 벡터,  ${}^0O_0B_i (i=1,2,3)$ 는

$${}^0O_0B_1 = \left\{ -\frac{r_B}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}r_B, 0 \right\},$$

$${}^0O_0B_2 = \left\{ -\frac{r_B}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}r_B, 0 \right\},$$

$${}^0O_0B_3(r_B, 0, 0)$$

이고 플랫폼에 설치된  $U_{i3}$ 의 위치 벡터,  ${}^3O_3P_i (i=1,2,3)$ 는

$${}^3O_3P_1 = \left\{ -\frac{r_P}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}r_P, 0 \right\},$$

$${}^3O_3P_2 = \left\{ -\frac{r_P}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}r_P, 0 \right\},$$

$${}^3O_3P_3 = \{r_P, 0, 0\}$$

이다.  ${}^0O_0O_3$ 을 중앙축의 조인트 값으로 나타내면

$${}^0O_0O_3 = \{ \theta_3 s \theta_2, -s \theta_1 (c p + \theta_3 c \theta_2), c \theta_1 (c p + \theta_3 c \theta_2) \} \quad (6)$$

이고,  ${}^0B_iP_i$ 를  $i$ -링크 트레인의 조인트 변수로 나타내면

$${}^0B_iP_i = \{ \theta_{i3} s \theta_{i2}, -s \theta_{i1} (c p + \theta_{i3} c \theta_{i2}), c \theta_{i1} (c p + \theta_{i3} c \theta_{i2}) \} \quad (7)$$

이다. 여기서  $c(\cdot) = \cos(\cdot)$ ,  $s(\cdot) = \sin(\cdot)$ 이다.  ${}^0O_0O_3$ 가 플랫폼의 중앙에 위치하고  $B_i$ 와  $P_i$ 가  $120^\circ$ 의 등 간격으로 각각 위치하므로 아래와 같은 관계를 갖는다.

$${}^0O_0O_3 = 1/3 \sum_{i=1}^3 {}^0B_iP_i \quad (8)$$

위의 식에 포함된 9개의 미지수 ( $\theta_1, \theta_{i1}, \theta_{i2}$ )를 풀기 위해서는 2개의 구속조건이 더 필요하다. 즉, 루프  $O_0O_3P_1B_1$ 와  $O_0O_3P_2B_2$ 의 관계에 의해서  ${}^0P_1P_2$ 의 위치 벡터는

$$\begin{aligned} \overrightarrow{{}^0P_1P_2} &= (\overrightarrow{{}^0B_0B_2} + \overrightarrow{{}^0B_2P_2}) - (\overrightarrow{{}^0O_0B_1} + \overrightarrow{{}^0B_1P_1}) \\ &= \overrightarrow{{}^0R_3({}^3O_3P_2 - {}^3O_3P_1)} \end{aligned} \quad (9)$$

이고, 루프  $O_0O_3P_2B_2$  와  $O_0O_3P_3B_3$  의 관계에 의해서  $\overrightarrow{{}^0P_2P_3}$  의 위치 벡터를

$$\begin{aligned} \overrightarrow{{}^0P_2P_3} &= (\overrightarrow{{}^0B_0B_3} + \overrightarrow{{}^0B_3P_3}) - (\overrightarrow{{}^0O_0B_2} + \overrightarrow{{}^0B_2P_2}) \\ &= \overrightarrow{{}^0R_3({}^3O_3P_3 - {}^3O_3P_2)} \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 위의 벡터들을 간단히 나타내기 위해서 아래와 같은 변수를 정의한다.

$$\begin{aligned} cb_i &= \theta_{i3}c\theta_{i2}, \quad sb_i = \theta_{i3}s\theta_{i2} \\ ss_i &= (cp + cb_i)s\theta_{i1}, \quad cc_i = (cp + cb_i)c\theta_{i1} \end{aligned}$$

정의된 변수로 구속식(8)~(10)에 포함된 벡터들을 다시 나타내고, 각 벡터의 x-성분에 포함되어있는  $sb_i$ , y-성분에 포함되어 있는  $ss_i$ , z-성분에 포함되어 있는  $cc_i$ 를  $\theta_i$ 로 나타낸다. 미지수  $\theta_i$ 를 풀기 위해 구속식을 구하는 데 정의로부터  $cb_i$ 는

$$cb_i = \pm \sqrt{ss_i^2 + cc_i^2} - cp \quad (11)$$

이다. 여기서  $-90^\circ < \theta_{i1}, \theta_{i2} < 90^\circ$  임으로 양의 제곱근만 취하고,  $cb_i^2 + sb_i^2 - \theta_{i3}^2 = 0$ 에 의해서 아래와 같은 구속식을 유도한다.

$$\begin{aligned} c_1 &= -p_1c\theta_1 - p_1c\theta_2 + p_1s\theta_1c\theta_2 + p_1s\theta_2 + p_1s\theta_1s\theta_2 + p_1s\theta_2s\theta_1 + p_1c\theta_1s\theta_2 + p_1c\theta_2s\theta_1 + \theta_1^2 - \\ &\quad cp \sqrt{(-q_1c\theta_1 + q_1s\theta_1c\theta_2 + 4\theta_1^2c\theta_1^2 + q_1s\theta_1 + q_1s\theta_2 + q_1s\theta_1s\theta_2 + q_1s\theta_2s\theta_1 + q_1c\theta_1s\theta_2 + q_1c\theta_2s\theta_1 + c_1) + c - \theta_1^2} \\ c_2 &= -p_2c\theta_1 - p_2c\theta_2 + p_2s\theta_1c\theta_2 - p_2s\theta_1 + p_2s\theta_2 + p_2s\theta_1s\theta_2 - p_2s\theta_2s\theta_1 - p_2c\theta_1s\theta_2 - p_2c\theta_2s\theta_1 + \theta_2^2 - \\ &\quad cp \sqrt{(-q_2c\theta_1 + q_2s\theta_1c\theta_2 + 4\theta_2^2c\theta_1^2 - q_2s\theta_1 - q_2s\theta_2 - q_2s\theta_1s\theta_2 + q_2s\theta_2s\theta_1 + q_2c\theta_1s\theta_2 + q_2c\theta_2s\theta_1 + c_2) + c - \theta_2^2} \\ c_3 &= -4p_3c\theta_3 + p_3c\theta_1\theta_3 - p_3s\theta_1 - 2p_3s\theta_2 + p_3s\theta_1s\theta_2 - \\ &\quad cp \sqrt{(-q_3c\theta_1 + q_3s\theta_1c\theta_2 + 4\theta_3^2c\theta_1^2 - q_3s\theta_1 + q_3s\theta_2 - q_3s\theta_1s\theta_2 + q_3s\theta_2s\theta_1 + q_3c\theta_1s\theta_2 - q_3c\theta_2s\theta_1 + c_3) + c - \theta_3^2} \end{aligned} \quad (12)$$

위 식에서

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{3}{2}r_1r_2, p_2 = \frac{1}{2}r_1r_2, p_3 = 2cp, p_4 = \sqrt{3}cpr_2, p_5 = cpr_2, p_6 = r_2, p_7 = \frac{1}{2}\sqrt{3}r_1r_2, p_8 = \sqrt{3}r_2 \\ q_1 &= 6r_1r_2, q_2 = 8cp, q_3 = 4\sqrt{3}cpr_2, q_4 = cpr_2, q_5 = 2\sqrt{3}r_1r_2, q_6 = r_1^2, p_8 = 4r_1, q_7 = 4\sqrt{3}r_2 \\ c &= r_1^2 + r_2^2 + 2cp^2, C_3 = 4cp^2 + 3r_2^2 + 3r_1^2 \end{aligned}$$

이다.

위 식은 3차 연립 방정식으로  $\theta_{i3}$ 가 주어질 때 미지수,  $\theta_i$ 를 찾을 수 있다. 그러나 구속식은 제곱근과 삼각 함수가 포함된 비선형으로 식 (5)와 같은 형태로 변형이 불가능하므로 뉴턴의 연산법을 적용하여 근을 구한다. 수렴속도를 빨리하고, 발산을 방지하기 위해 PM을 단순화하여 근사한 근을 구하고 이 값을 초기값으로 대입하여 실제 근을 구한다. 단순화된 로봇 암을  $cp = 0, r_p = 0, r_B = 0$ 으로 가정하면 구속식은

$$\begin{aligned} cf_1^0 &= \theta_3^2 + \frac{r_B\theta_3s\theta_1c\theta_2}{\sqrt{3}} + \frac{r_B\theta_3s\theta_2}{3} + \frac{r_B^2}{9} - \theta_{13}^2 \\ cf_2^0 &= \theta_3^2 - \frac{r_B\theta_3s\theta_1c\theta_2}{\sqrt{3}} + \frac{r_B\theta_3s\theta_2}{3} + \frac{r_B^2}{9} - \theta_{23}^2 \\ cf_3^0 &= \theta_3^2 - \frac{2r_B\theta_3s\theta_2}{3} + \frac{r_B^2}{9} - \theta_{33}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

이다.  $\theta_i$ 를 구하여 값과 구분하기 위해  $\theta_i^0$ 로 뉴턴 연산의 초기 값으로 사용한다. 미지수를  $X = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ 로 정의하고, 구속식 (12)를

$$F[X] = 0 \quad (14)$$

으로 나타내면, 뉴턴의 반복 연산은 아래와 같이 된다.

$$X^{k+1} = X^k - \left[ \frac{\partial F(X^k)}{\partial X} \right]^{-1} F(X^k) \quad (15)$$

$x^0 = [\theta_1^0, \theta_2^0, \theta_3^0]^T$ 을 초기 값으로 사용하면 이들이 근에 가까우므로  $[\partial F(X^k) / \partial X]^{-1}$ 은 수렴하는 동안 일정하다고 가정할 수 있다<sup>6)</sup>.

위의 반복 연산은 근의 오차가  $10^{-3}$ 이내가 되었을 때 완료시키고 X의  $\theta_i$  ( $i=1,2,3$ ) 과 측정된  $\theta_i$  ( $i=4,5,6$ )를 중앙축의 순방향 기구해석에 의해 엔드 이펙터의 위치/방위를 구한다.

#### 4. 자코비안 해석

일반 다관절 머니플레이터의 속도 해석은 간단하나

PM의 속도해석은 페루프의 구속운동으로 대단히 복잡하다. 대부분의 방법은 6개의 다리가 플랫폼을 지지하는 스튜워트 플랫폼에 관한 것으로 Screw 원리와 Plucker 좌표행렬<sup>17)</sup> 등이 적용되어 6×6 정방행렬인 자코비안을 유도하고 6×1의 플랫폼 속도(선속도, 회전속도)를 6개의 다리에 투영시켜 구동 조인트의 속도를 구했다.

그러나 HPSM의 평행기구는 3개 다리밖에 없고 특히 중앙축은 피동 조인트로만 이루어져 스튜어트 플랫폼같이 6×1의 속도를 3개의 다리에 직접 투영할 수 없다. 본 논문은 중앙축, PM, SM의 구속운동을 모두 포함한 자코비안을 모터 벡터<sup>18)</sup>의 원리를 이용하여 구한다. Fig. 3에서와 같이 모터 벡터를 정의하면 i-링크 트레인의 j-조인트 ( $\theta_{ij}$ )의 모터 벡터  $M_{ij}$ 는 j-조인트를 단위 속도로 구동할 때 플랫폼의 회전 속도 및 선 속도로

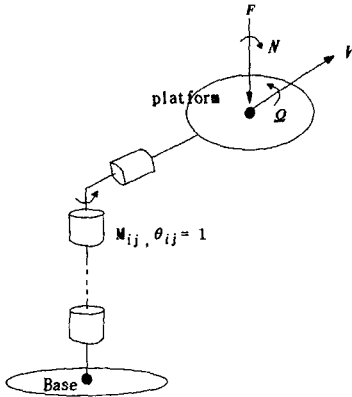


Fig. 3 Motor vector

$$M_{ij} = [\Omega \ V]^T \quad (16)$$

이며 6×1 벡터이다. 그러므로 각 조인트의 속도가  $\dot{\theta}_{ij}$  일 때 플랫폼의 속도는

$$Endvel = \dot{\theta}_{i1} M_{i1} + \dot{\theta}_{i2} M_{i2} + \dots + \dot{\theta}_{ik} M_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

이다. 여기서,  $Endvel$ 은 플랫폼의 회전 및 선 속도,  $n$ 은 링크 트레인의 수,  $k$ 는 링크 트레인의 조인트 수를 나타낸다. 식 (17)을 HPSM에 적용하면 엔드 이펙터 즉, body-3의 점  $O_6$ 의 회전 및 선 속도를 중앙축과 SM 조인트의 모터 벡터로 나타낼 수 있다.

$$Endvel_{end} = \dot{\theta}_1 M_2 + \dots + \dot{\theta}_6 M_6 \quad (18)$$

위 식에서  $M_{j(j=1,2,\dots,6)}$ 는 각 조인트와 엔드 이펙터 사이의 모터 벡터로 이들로 이루어진 6×6 정방행렬인 자코비안을

$$J_c = [M_1 M_2 \dots M_6]^T$$

로 정의할 때 위 식은 아래와 같다.

$$Endvel_{end} = J_c \dot{\Theta} \quad (19)$$

여기서  $\dot{\Theta} = [\dot{\Theta}_c \ \dot{\Theta}_s]^T$ 이며  $\dot{\Theta}_c$ 는  $[\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$ 로 중앙축의 속도 벡터를 나타내고,  $\dot{\Theta}_s$ 는  $[\dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6]^T$ 로 SM의 속도 벡터를 나타낸다. 역으로  $Endvel_{end}$ 가 주어질 때 조인트 속도 벡터는

$$\dot{\Theta} = J_c^{-1} Endvel_{end} \quad (20)$$

로 SM의 구동 조인트  $\dot{\theta}_s$ 은 바로 구해지나 중앙축의 피동 조인트  $\dot{\theta}_c$ 는 리니어 액추에이터 속도  $\dot{\theta}_{i3} (i=1,2,3)$ 에 의해서 생성되어야 한다. 이를 구하기 위해  $leg_i$ 의 하단 조인트가 설치된  $P_i$ 의 선 속도를 구한다.

$$Endvel_{P_i} = \dot{\theta}_1^i M_1 + \dot{\theta}_2^i M_2 + \dot{\theta}_3^i M_3 \quad (21)$$

여기서,  ${}^i M_j (i,j=1,2,3)$ 은 3×1 벡터로 점  $P_i$ 의 선 속도와 조인트  $\theta_i$  사이의 모터 벡터이며 이것들로 이루어진 3×3의 정방행렬 자코비안

$${}^i J_c = [{}^i M_1 \ {}^i M_2 \ {}^i M_3]^T$$

를 정의할 때 위 식은

$$Endvel_{P_i} = {}^i J_c \dot{\Theta}_c \quad (22)$$

가 된다. 또한,  $Endvel_{P_i}$ 는  $leg_i$ 의 링크 트레인의 조인트 속도로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Endvel_{P_i} = \dot{\theta}_{i1}^i M_{i1} + \dot{\theta}_{i2}^i M_{i2} + \dot{\theta}_{i3}^i M_{i3} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (23)$$

여기서  ${}^i M_{ij}$ 은 3×1 벡터로  $leg_i$ 의 j-조인트와 점  $P_i$  사이의 모터 벡터이다. 이 모터 벡터로 이루어진 3×3 정방행

렬인 자코비안을

$${}^i J_i = [{}^i M_{i1} \ {}^i M_{i2} \ {}^i M_{i3}]^T$$

로 정의하면  $Endvel\_P_i$  이 주어질 때 조인트 속도는 아래와 같다.

$$[\dot{\theta}_{i1}, \dot{\theta}_{i2}, \dot{\theta}_{i3}]^T = {}^i J_i^{-1} Endvel\_P_i \quad (24)$$

${}^i J_i^{-1} = [{}^i S_1 \ {}^i S_2 \ {}^i S_3]^T$  일 때 구동 조인트 속도  $\dot{\theta}_{i3}$  는  ${}^i S_3$  와  $Endvel\_P_i$  의 내적으로도 구할 수 있다.

$$\dot{\theta}_{i3} = {}^i S_3 \cdot Endvel\_P_i \quad (25)$$

위 식 (20), (22), (25)에서  $Endvel\_end$  이 주어질 때 구동 조인트의 속도를 구하는 과정을 한 식으로 나타내면

$$[\dot{\theta}_{13}, \dot{\theta}_{23}, \dot{\theta}_{33}, \dot{\theta}_4, \dot{\theta}_5, \dot{\theta}_6]^T = A \ B \ J_c^{-1} Endvel\_end \quad (26)$$

이며, 여기서 A와 B 각각  $6 \times 12$  및  $12 \times 6$  행렬로 아래와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} {}^1 S_3 & & & & & \\ & {}^2 S_3 & & 0 & & \\ & & {}^3 S_3 & & & \\ & & & 1 & & \\ & 0 & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} {}^1 J_c & & & & & \\ & {}^2 J_c & & 0 & & \\ & & {}^3 J_c & & & \\ & & & 1 & & \\ & 0 & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

위 식으로부터  $Endvel\_end$  를 구동 조인트의 속도로 변환시키는  $6 \times 6$  자코비안이 유도된다.

$$J = A \ B \ J_c^{-1} \quad (27)$$

HPSM의 자코비안은 일반 평행기구와 달리 중앙축 및 각 leg\_i의 역 자코비안이 포함되어 복잡하다. 이를 단순화하기 위해 편심 링크의 길이를 무시하고  $Endvel\_P_i$  를 리니어 엔추에이터의 방향으로 투영할 수 있다. 즉,  ${}^i S_j$  는

$${}^i S_j = \frac{\vec{B}_i P_i}{\|B_i P_i\|} \quad (28)$$

으로 단순화되어 역 자코비안의 계산을 줄일 수 있다. 그러나 편심 링크의 길이가 클 경우 속도 오차가 크므로 위 벡터를 사용하지 말아야 한다.

### 5. HPSM 로봇 시스템 및 프로그램

로봇 시스템은 HPSM 로봇과 이를 제어하는 6개의 Axis Drivers, 6축 동시제어 DSP Motion Controller (DMC) 및 PC 등으로 구성되며 Fig. 4와 같이 실제 제작되었다.

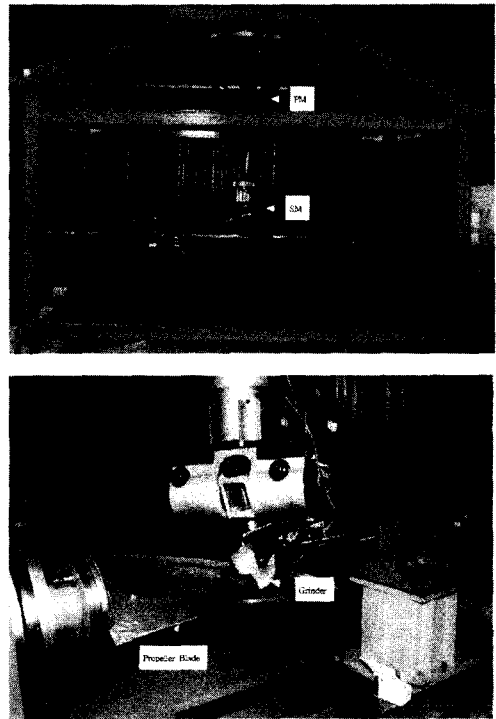


Fig. 4 HPSM Robot System for propeller grinding

PC는 사용자가 개발한 모든 수학적 연산을 실시하며 키보드에 의해서 로봇을 교시한다. 연산 결과 및 키보드 명령은 Data Bus를 통해 DMC에 제공되며 DMC는 Axis Driver와 연결되어 로봇을 구동한다. 구동 명령은 DMC에 의해 해석 가능한 "C"-언어 함수로 위치, 속도, 궤적 등을 제어하는 함수, 디지털 및 아날로그 센서의 입출력을 처리하는 함수, 시스템을 관리하는 함수 등으로 되어있다.

로봇 프로그램은 사용자와 통신을 위한 모니터 프로그

램과 로봇의 위치 및 속도 제어를 위한 구동 프로그램 등으로 되어있다. 모니터 프로그램은 Fig. 5와 같이 현재 로봇의 정보를 보여주며 제공되는 메뉴의 선택과 단축키를 통해서 명령을 지정한다. 제공되는 메뉴는 파일 관리, 운동 생성, 프로그램 실행, 상태 정보 제공, 데이터 변경 등이 있다.

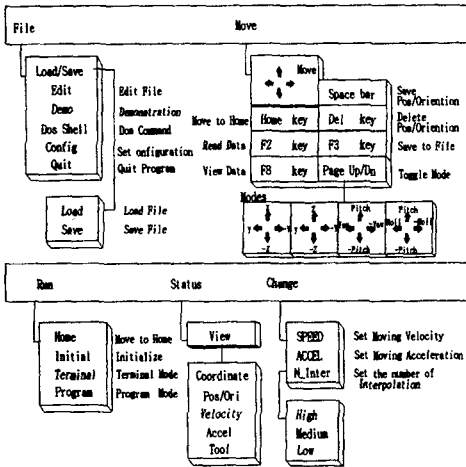


Fig. 5 Monitor Program

파일 관리는 일반적인 Editor를 이용하여 새 프로그램을 작성하고 기존 프로그램을 쉽게 변경할 수 있도록 한다. 생성된 프로그램은 DMC 함수로 해석되어 파일로 저장 및 재생된다. 운동생성은 엔드 이펙터의 위치와 방향을 직각좌표로 환산하여 설정된 방향에 따라 구동시키는 것으로 키 보드 조작에 따라 6개의 조인트가 동시 제어된다. 키가 눌러져 있는 동안에는 로봇이 정해진 방향이나 자세로 움직이고 키를 떼면 정지한다. 운동은 X-Y, Y-Z, Yaw-Pitch, 그리고 Pitch-Roll로 나누어지는데 운동 Mode의 선택은 Page Up과 Page Down키를 이용하여 토글(toggle)한다. 로봇이 작업에 필요한 위치와 방향에 도달했을 때 특정한 키(Space Bar)를 누르면 PC의 메모리에 위치/방위를 나타내는 데이터 {X, Y, Z, Yaw, Pitch, Roll}을 저장한다.

RUN 메뉴에서 프로그램을 실행하며 STATUS 메뉴에서 위치/방위, 속도, 가속도, 입/출력 등, 로봇의 상태를 볼 수 있다. CHANGE 메뉴는 특수 대화 모드로 프로그램 실행 중에도 속도, 가속도, 궤적의 보간수 등을 변경함으로써 최적의 가공조건을 만들어낸다.

### 6. 프로펠러 블레이드의 표면측정 및 연삭 작업을 위한 속도 및 위치 제어

연삭전 블레이드 주물의 형상을 알 수 없으므로 연삭 깊이와 궤적을 결정할 수 없다. 그러므로 접촉 probe으로 블레이드 표면의 높이를 측정하고 이를 설계형상과 비교함으로써 연삭 깊이를 결정한다. 측정 방법으로는 X-Y 평면에 일정한 간격으로 그리드 (grid)를 만들고 각 점에서 접촉 probe를 수직방향으로 이동시켜 블레이드 면에 닿을 때 그 위치를 측정한다. 수직방향의 이동을 위해 속도제어를 이용한다. 즉 Z-축 방향의 속도 및 가속도 명령이 생성되어 로봇이 운동하고 엔드 이펙터에 설치된 probe가 블레이드 면에 접촉하는 순간 감속시켜 멈춘다. 이 방법은 접촉 probe 끝단의 속도를 제어하는 것으로 멈추는 시간이 짧고 일정하다. 그러나 그립과 끝단의 속도를 각 축으로 변환시키는 자코비안과 각 축의 위치 데이터를 읽어 로봇의 위치와 방위를 결정하는 순 방향 해석이 포함되므로 프로그램이 복잡하고 계산량이 많다. 위에서 실시간 처리가 가능한 알고리즘이 개발되었으므로 이를 Fig.6과 같이 적용한다.

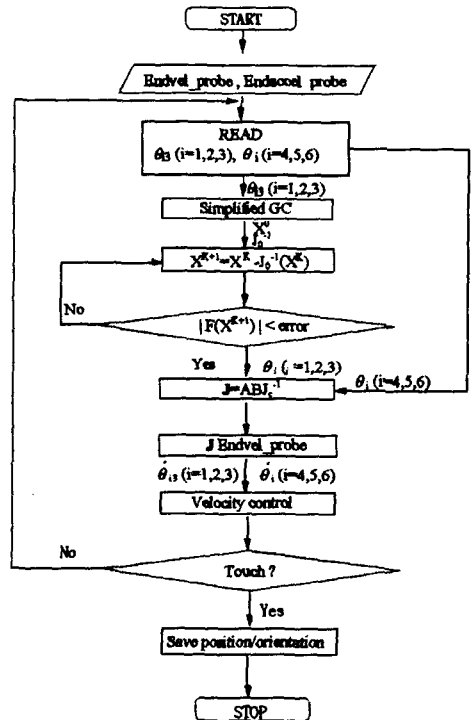


Fig. 6 Flow chart of Velocity Control

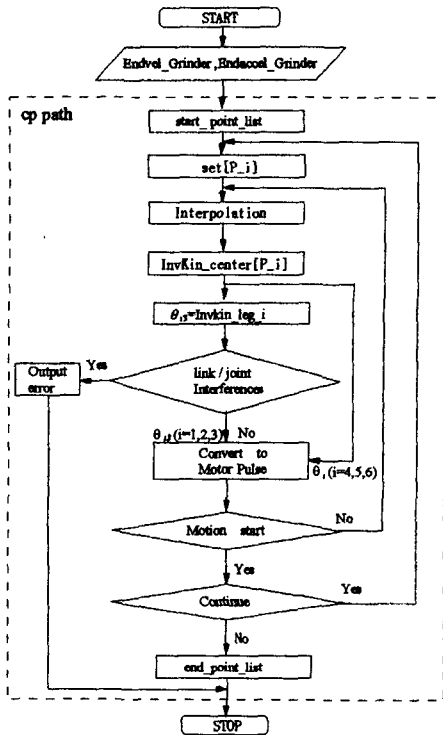


Fig. 7 Flow Chart of Position Control

콘트롤러가 우선 probe의 속도(*Endvel\_probe*) 및 가속도(*Endvel\_probe*)를 결정하고, 단순화 된 구속 식으로부터 측정 값  $\theta_{i3}$ 에 따른 중앙축 조인트의 초기값을 계산한다. 이 값을 뉴턴의 연산 식에 대입하여 수렴한 근을 구하고 리스트 조인트의 측정값과 함께 자코비안을 구한다.

이를 이용하여 probe의 속도를 생성할 수 있는 구동 조인트의 속도를 구하고 모터의 속도 명령으로 내 보낸다. probe가 블레이드 표면을 접촉할 때까지 위 과정을 계속하며 접촉하는 순간 감속시켜 로봇을 멈춘다.

높이가 측정되어 블레이드가 형상화되면 연삭 깊이에 따라 작업을 실시한다. 연삭 작업은 위치 제어로 실시되는데 엔드 이펙터의 위치와 방향이

$$P_i = \{ \{X, Y, Z\}, \{Yaw, Pitch, Roll\} \}$$

으로 선언된다. 여기서,  $\{X, Y, Z\}$ 는 블레이드의 위치이고  $\{Yaw, Pitch, Roll\}$ 은 면이 기준 좌표축과 이루는 경사각도이다. 콘트롤러는 Fig. 7과 같이 엔드 이펙터에 정작된 그라인더가  $\{X, Y, Z\}$ 에 위치하고  $\{Yaw, Pitch,$

Roll)에 수직방향이 되도록 위치 제어를 실시한다. 즉, 속도 제어에서 측정 한 데이터를 *start\_point\_list*와 *end\_point\_list* 사이에 프레임 (Frame) 형태로 쌓아두고 각 점 사이를 곡선으로 보간한 후 모든 데이터를 한 개적으로 인식하여 이를 따라 그라인더를 이동시킨다.  $P_i$ 에 따라 중앙축의 역 기구학 해석을 실시하여 구동 및 피동 조인트 값을 구하고 피동 조인트 값에 따른  $\theta_{i3}$ 의 길이를 계산한다. 또한, 이들 값에 의한 조인트 및 링크의 간섭을 점검한 후 구동 조인트 값을 서어보 모터의 펄스로 변환하여 위치 제어 명령을 내보낸다. 감·가속 운동이 가능한 거리가 되었을 때 운동을 시작하며 *start\_point\_list*와 *end\_point\_list*에 쌓아둔 모든 데이터를 다 소비했을 때 위치 제어가 완료된다.

## 7. 결과

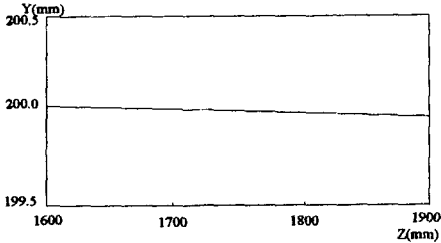
점(100,200,1600)에서 블레이드의 표면을 측정하기 위해 probe를 수직방향으로 300mm 이동한다. 속도 및 가속도를 각각 100mm/sec와 200mm/sec<sup>2</sup>로 속도 제어를 실시했을 때 probe의 궤적은 Fig.8과 같다. 위치 오차는 0.1mm 이 내로 1-2mm의 정밀도를 충분히 만족할 수 있으며 probe가 블레이드를 접촉하면 0.1 sec내에 감속시켜 정지시키고 그 때 데이터를 기록한다. Table 1은 연산 과정의 계산 시간을 보여준다. 전체 소요 시간은 Pentium-75를 사용할 경우 4.88 m-sec으로 실시간 처리가 가능하나 각 링크 트레인의 역 자코비안에 따른 계산이 큰 부담이 되고 있다. HPSM에서 사용한 편심 링크의 길이는 20mm로 전체 리니어 액추에이터의 길이에 비해 아주 작으므로 이를 무시하고 리니어 액추에이터의 방향으로 속도를 투영하면 계산시간은 3 m-sec으로 줄고 위치 오차도 0.1 mm 이내이다. 그러므로 더 많은 계산

Table 1. Computational Time

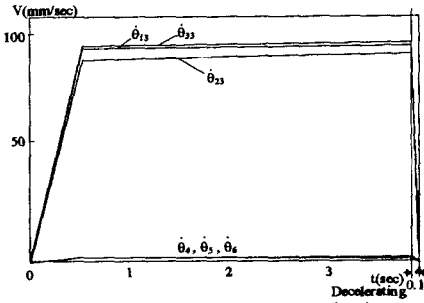
Step	Process	Computation Time(msec)
1	Initial Value $X^0, \dot{p}$	0.05
2	Newton's Iteration $f(X^{k+1}) < error$	1.25
3	Direct Kinematics of Central Axis $kin\_center(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6)$	0.21
4	Jacobian $J = ABJ_c^{-1}$	2.27
5	Active joint velocities $\dot{J} \cdot Endvel$	1.10
	Total	4.88



이 요구되는 알고리즘이 요구될 경우 위의 방법으로 계산량을 크게 줄일 수 있다.



Trajectory of Grinder in Y-Z Plane



Velocity profiles

Fig. 8 Result of Velocity Control

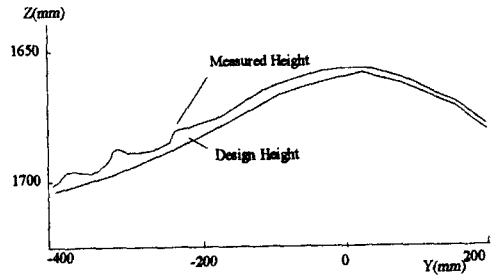


Fig. 10 Measured and Design Heights in Blade Section

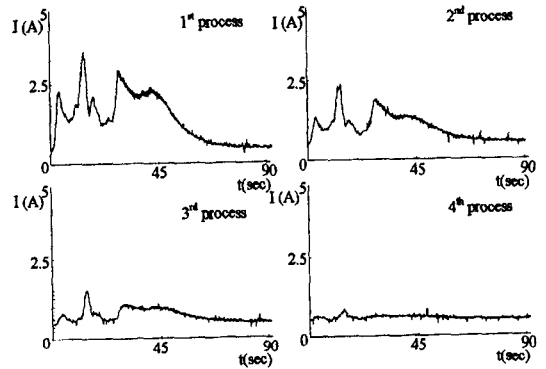


Fig. 11 Grinding Loads at Grinding Processes

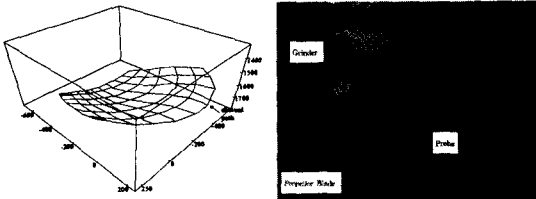


Fig. 9 Measured Data of Propeller Blade, Measured Probe

그리드의 간격을 100mm로 하고 각 점에서 수직방향으로 probe를 이동시켜 형상화한 그림은 Fig. 9와 같다. 이 데이터와 설계 값을 비교하여 연삭 깊이 및 궤적을 결정한다. 위 결과에서 {400, -400, 1700}로부터 {400, 200, 1685}까지 궤적을 곡선으로 보간하면 설계 값과 측정 값은 Fig. 10과 같다. 연삭 깊이를 1mm로 위 궤적을 따라 작업을 실시할 때 Fig. 11은 연삭 횟수에 따른 연삭 부하를 보여준다. 이것은 그라인더에 부과되는 전류를 측정 한 것으로 결과에서 보듯이 블레이드 면의 높낮이에 따라 큰 차이를 나타낸다. 그러므로 여러 번 반복해서

원하는 깊이까지 연삭작업을 실시하고 접촉 probe로 깊이를 측정하여 연삭량을 다시 결정하는 작업을 반복해야 한다. 위 작업시 모터에 부과되는 토크는 모두 1.5 N·m 이하로 HPSM 로봇이 소형 모터로 제작이 가능하며 또한 가반 중량에 대한 중량의 비가 다관절 로봇에 비해 훨씬 작음을 보여준다.

## 8. 결론

본 논문은 프로펠러 연삭 작업을 위한 병렬-직렬 조합형 머니플레이터의 기구학 및 자코비안을 해석하여 실시간 콘트롤러에 구현시켰다. 기구학 해석에서 병렬과 직렬 기구를 분리함으로써 구속식이 3차 연립 방정식으로 유도되고 근도 하나만 존재하는 연산방법이 제시되었다. 또한, 모터 벡터를 이용하여 직렬, 병렬, 중앙축의 속도 변환을 모두 포함하는 자코비안을 유도하고 3개의 다리만 플랫폼을 지지하는 평행기구기의 속도변환을 가능케 했

다. 위의 알고리즘의 효율성은 계산 시간으로 입증되었는데 4.88m-sec으로 실시간 처리가 충분히 가능했다. 프로펠러의 표면 높이를 측정하는데 속도 제어가 적용되고, 측정 데이터에 의한 면 연삭 작업은 위치 제어에 의해서 행해졌다. 실험 결과는 로봇의 측정 오차가 허용치 이내에 있으며 연삭 작업도 성공적으로 행해졌다. 모터에 부과되는 토크는 1.5 N-m이하로 직렬 기구에서도 작은 부하를 받았고, 연삭 부하에 비한 모터 용량이 적어 프로펠러 연삭 작업 뿐아니라 다른 기계가공 작업에도 적합함을 입증했다.

### 후 기

본 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음을 밝히며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참 고 문 헌

1. Whitney, D. E., and Tung, E. D., "Robot Grinding and Finishing of Cast Iron Stamping Dies," ASME J. of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 114, No. 1, pp. 132-140.1992.
2. Her, M. G. and Kazerooni, "Automated Robotic Deburring of Parts Using Compliance Control," ASME J. of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 60-66.1991.
3. D. R. Kerr, "Analysis, properties, and design of a Stewart platform transducer," ASME J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 111, pp. 25-28, 1989.

4. F. Pierrot, A. Fournier, and P. Dauchez, "Toward a fully parallel 6-DOF robot for high-speed applications," IEEE J of Robotics and Automation, Vol. 7, pp. 15-22, 1992.
5. 이민기, 최병오, 정중윤, 박근우, "프로펠러 연삭작업을 위한 병렬-직렬 로봇암의 개발", 대한정밀공학회지, 제13권, 제2호, pp 146 - 158, 1996.
6. J. P. Merlet, "Direct Kinematics of Parallel Manipulators," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 6, pp. 842-846, 1993.
7. M. G. Mohamed and J. Duffy, "A Direct Determination of the Instantaneous Kinematics of Fully Parallel Robot Manipulators," ASME J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol.107, pp. 226-229, 1985.
8. J. P. Merlet, "Trajectory Verification in the workspace for Parallel Manipulators," J. of Robotics Research, Vol.13, No.4, pp.326-333, 1994.
9. K. E. Zanganeh and J. Angeles, "Real-Time Direct Kinemaitcs of General Six-Degree of Freedom Parallel Manipulators with Minimum-Sensor Data," J. of Robotic Systems, pp.833-844, Vol 12, No 12, 1995.
10. G. N. Sandor and A. G. Erdman, Advanced Mechanism Design: Analysis and Synthesis, Prentice-Hall, 1984.
11. K. Sugimoto, "Kinematic and Dynamic Analysis of Parallel Manipulators by Means of Motor Algebra". ASME J. of Mech., Trans., and Auto. in Design, Vol. 109, pp. 3-7, 1987.