

## 병렬형 공작기계를 위한 윤곽제어 알고리즘

이승환\*(고려대 대학원 기계공학과), 홍대희, 최우천, 송재복(고려대 기계공학과)

### Contour Control Algorithm for Parallel Machine Tool

Seung-Hwan Lee\*, Dae-Hie Hong, Woo Chun Choi, Jae-Bok Song

#### ABSTRACT

In machining free-form curves with a machine tool equipped with parallel device, improving contouring accuracy is very important. In this paper, we present contouring control algorithm for parallel machine tool. The relation between the error in joint space and the error in cartesian space is evaluated, and we estimate contouring error vector which efficiently determines the variable gains for the cross coupled control. To show the validity of the algorithm, the contouring control is simulated for free form contour trajectory in cubic parallel machine tool model.

**Key Words :** Contouring error(윤곽오차), Cross-coupled control(교차식 제어), Multi-axis motion control(다축모션제어), Cubic parallel machine tool(육면형 병렬공작기계)

#### 1. 서론

최근 들어 고속, 고강성, 고정도의 특성을 지니고 있는 병렬기구를 공작기계에 응용하려는 연구가 진행되고 있다. 병렬형 기구는 강성이 크고 가감속 특성이 우수하며 오차가 적어서 정밀한 가공에 적합하다. 또한 일반적인 밀링형 공작기계가 각 축에 따른 선형운동으로 3 자유도(x,y,z)를 갖는 반면에 병렬기구를 적용할 경우 6 자유도(x,y,z,α,β,γ)운동이 가능하므로 자유곡면의 가공이 용이하게 된다.

이러한 공작기계에서는 정확한 가공경로의 생성과 그에 따른 경로추종능력의 확보가 중요하고 특히 지령경로와 실제 경로간의 거리를 나타내는 윤곽오차를 최소화해야 한다. 이를 위해서 각 축의 운동을 조화롭게 제어하는 것이 필요하고 지금까지 일반적으로 사용되어온 방법은 각 축의 운동을 독립적으로 해석하여 그 운동 경로를 추적하도록 하는 독립축 제어 방식이다. 이 방식은 각 축에 독립적으로 feedback 혹은 feedforward 등과 같은 간단한 제어 방식을 적용하여 비교적 높은 제어 성능을 달성한다.

그러나 이러한 독립축 제어방식은 각 축의 이득이나 시상수와 같은 동역학 거동이 다르거나 비대칭적인 외란이 각 축에 인가되었을 경우에 발생하는 윤곽오차에 대한 제어능력이 부족하다 이는 운동에 따라 각 축의 동역학적 특성이 비대칭적으로 변하는 병렬형 기구의 경우 더욱 문제시된다. 이러

한 독립축 제어 방식의 단점을 보완하기 위하여 제시된 방식이 윤곽오차 제어 방식이다. 이 방식은 윤곽오차 보정을 직접 제어기 설계 시에 반영함으로써 이동 중에 제어가 실시간으로 이 오차를 줄이는 방향으로 제어작용을 하게 된다. 윤곽오차 제어는 Koren[4]에 의해 최초로 개념이 확립되었으며 이를 감소시킬 수 있는 제어기법으로써 교차식 구조가 제안되었다. 그리고 Kulkarni[5]등은 윤곽오차 개선을 위해 최적 제어방식에 의한 윤곽오차 제어기를 선행적으로 연구하였다.

그 동안 복축 운동을 위한 윤곽제어에 대해서는 많은 연구가 행해졌지만 다축 운동을 위한 윤곽제어의 연구는 최근에서야 이루어지고 있고 특히 병렬형 기구에 윤곽제어를 적용하는 문제는 기구학적 복잡성과 이에 따른 연산시간의 증가 등으로 인해 아직 많은 연구가 이루어지고 있지 못하다.

본 연구에서는 윤곽제어 알고리즘을 병렬형 공작기계에 맞게 새로이 설계하고 이를 병렬형 공작기계의 제어에 적용하고자 한다. 이를 위해 병렬형 기구의 자코비안을 구하여 조인트 공간에서의 오차와 카테시안 공간에서의 오차의 관계를 결정한다. 또한 다차원 공간에서의 윤곽오차벡터를 근사적으로 정의하여 이를 윤곽제어기의 이득값으로 활용한다. 마지막으로 자유곡선경로에 대한 제어 시뮬레이션 실시하여 알고리즘의 타당성을 입증하고자 한다.

## 2. 병렬기구의 추적오차벡터

센서에 의한 직접측정이 용이하지 않을 시 병렬 기구의 이송 중에 발생하는 각 축 구동부의 오차는 조인트 공간상에서 측정되기 때문에 카테시안 공간 상에서 지령위치와 실제위치의 차이를 나타내는 추적오차는 병렬기구의 기구학을 이용하여 구할 수 있다.

### 2.1 병렬기구의 자코비안

병렬 기구의 자코비안은 각 축 조인트의 속도와 출력 플랫폼의 속도관계를 나타내는 행렬로서 기구의 자세변화에 따라 연속적으로 변하는 값이다.

각  $i$  번째 링크열의  $j$  번째 조인트의 속도를  $\theta_j^i$  로 나타내면 6 자유도 병렬기구에서 플랫폼의 속도  $S$  는 스크류 좌표를 이용하여 다음과 같이 적용시킬 수 있다.

$$\theta_1^1 M_1^i + \theta_2^1 M_2^i + \theta_3^1 M_3^i + \theta_4^1 M_4^i + \theta_5^1 M_5^i + \theta_6^1 M_6^i \quad (1)$$

$$= S \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

$M_i^i$  는 각 조인트의 회전위치를 나타내는 6 개의 스칼라 요소를 가지는 스크류 벡터이고 따라서 식 (1)은  $6 \times 6$  개의 미지수와 동일한 수의 식을 갖게 된다. 첫 번째 링크열을 기준으로  $S$  를 소거하면,

$$\theta_1^1 M_1^i + \theta_2^1 M_2^i + \theta_3^1 M_3^i + \theta_4^1 M_4^i + \theta_5^1 M_5^i + \theta_6^1 M_6^i$$

$$- \theta_1^1 M_1^i + \theta_2^1 M_2^i + \theta_3^1 M_3^i + \theta_4^1 M_4^i + \theta_5^1 M_5^i + \theta_6^1 M_6^i \quad (2)$$

$$= 0 \quad i = 2, 3, \dots, 6$$

병렬기구의 문제에서는 모든  $M_i^i$  가 능동 조인트가 아니기 때문에, 미지수인 것과 미지수가 아닌 항으로 구분된다. 따라서 각 링크 열마다 하나씩 가진 6 개의 능동 조인트 속도를  $a$  라 하고 나머지 수동 조인트의 속도를  $b$  로 정의하면 식(1)과 (2)는 각각 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Aa + Bb = S \quad (3)$$

$$Ca + Db = 0$$

여기서 수동조인트의 속도  $b$  를 소거 시키면 다음과 같이 자코비안 행렬이 유도된다.

$$(A - BD^{-1}C)a = S \quad (4)$$

$$J = A + BD^{-1}C$$

$Ja = S$  로 표현되는 능동 조인트 식을 이용해서 속도 기구학과 역속도 기구학을 해석 할 수 있다.

## 2.2 추적오차벡터

병렬기구의 모션 제어 시 각 sampling time 마다 발생하는 6 개 구동부에서의 오차, 즉 조인트 공간 상에서의 추적오차벡터  $\varphi$  는 추적오차의 크기가 충분히 작을 경우 자코비안에 의해 카테시안 공간 상에서의 추적오차벡터  $e$  로 변환된다

$$e = J\varphi \quad (5)$$

## 3. 다차원 공간에서의 윤곽오차벡터

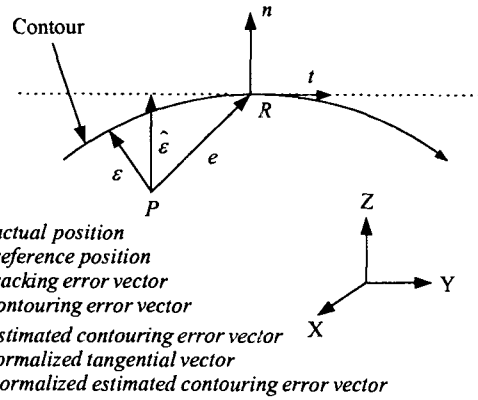


Fig.1 Geometrical relations of 3-axis motion control systems

Fig.1 은 원하는 자유곡선 경로상에서 지령위치  $R$  과 실제 위치  $P$  의 관계를 나타낸다. 추적오차벡터  $e$  는 지령위치  $R$  과 실제위치  $P$  의 차를 뜻하고 윤곽오차벡터  $\epsilon$  는  $P$  에서 지령경로상의 가장 가까운 점으로의 벡터이다.

정확한 윤곽오차벡터  $\epsilon$  를 얻는 것이 어렵기 때문에, 추적오차  $e$  가 충분히 작을 경우 실제위치  $P$  로부터 지령위치  $R$  에서의 접선상의 가장 가까운 점까지의 벡터를 근사 윤곽오차벡터  $\hat{\epsilon}$  로 정의한다. Fig.1 에서 보는 바와 같이 근사 윤곽오차벡터  $\hat{\epsilon}$  는 추적오차벡터  $e$  와 단위 접선벡터  $t$  에 의해 정의되는 평면상에 있고 단위 접선벡터  $t$  와 수직이다. 단위 근사 윤곽오차벡터  $n$  을 정의하면

$$n = \alpha_1 t + \alpha_2 e \quad (6)$$

$$\langle n, t \rangle = 0 \quad (7)$$

$$\|n\| = 1 \text{ or } \langle n \cdot n \rangle = 1 \quad (8)$$

$$\|t\| = 1 \text{ or } \langle t \cdot t \rangle = 1 \quad (9)$$

여기에서  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  는 내적을 나타내고  $\| \cdot \|$  는 2-norm 을 나타낸다.

(7)-(9)로부터  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 의 관계는

$$\alpha_1 = -\alpha_2 \cdot \langle e, t \rangle \quad (10)$$

일반적으로 단위 근사 윤곽오차벡터  $n$ 과 추적오차벡터  $e$ 가 이루는 작은  $[-90^\circ, +90^\circ]$ 이므로

$$\langle n, e \rangle \geq 0 \quad (11)$$

(10)을 (6)에 대입하고 이를 다시 (8)에 대입하여 (11)의 조건을 만족하는  $\alpha_1$ 와  $\alpha_2$ 를 구하면

$$\alpha_1 = -\frac{\langle e, t \rangle}{\sqrt{\|e\|^2 - \langle e, t \rangle^2}} \quad (12)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{\|e\|^2 - \langle e, t \rangle^2}}$$

근사 윤곽오차벡터  $\hat{\varepsilon}$ 의 크기는 단위 근사 윤곽오차벡터  $n$ 과 추적오차벡터  $e$ 의 내적이다. 따라서 근사 윤곽오차벡터  $\hat{\varepsilon}$ 는

$$\hat{\varepsilon} = \|\hat{\varepsilon}\| \cdot n = \langle n, e \rangle \cdot n \quad (13)$$

#### 4. 윤곽제어기 설계

##### 4.1 윤곽제어기의 구조

Fig.2는 6축으로 구동되는 병렬형 기구의 윤곽제어기구조를 보여주고 있다. 지령경로가 보간기에 의해 각 축의 지령으로 분해되어 입력되고 각 축의 위치제어루프는 비례제어기  $Kp_i (i=1,2,\dots,6)$ 에 의해 구현된다.

각 축의 플랜트 모델은 실험 데이터로부터 근사적으로 구한 파라미터로 1차 지연형 모델링을 수행하여 제어기 설계에 이용하였다.

$$P_i(s) \cong \frac{k_v}{\tau s + 1} \quad i=1,2,\dots,6 \quad (2)$$

Table.1 Parameter of each axis plant model

	$\tau$ (sec)	$k_v$
Plant1	0.0153	0.9930
Plant2	0.0142	0.9982
Plant3	0.0160	0.9755
Plant4	0.0126	1.0029
Plant5	0.0138	1.0004
Plant6	0.0151	0.9901

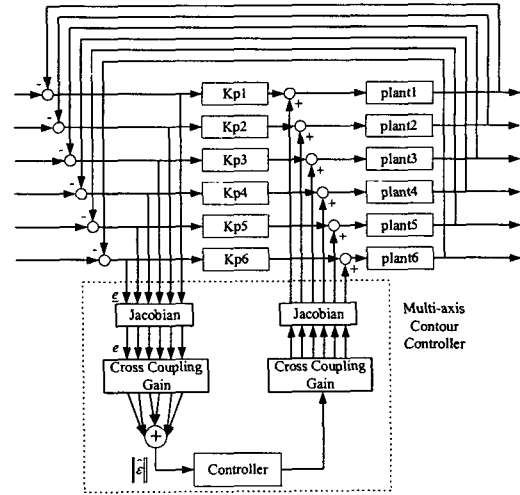


Fig.2 Multi-axis motion controller for parallel manipulator

조인트 공간에서 구해진 6축의 추적오차벡터  $e$ 는 자코비안에 의해 카테시안 공간상의 추적오차벡터  $e$ 로 변환되고 이는 cross coupling gain에 의해 근사 윤곽오차의 크기인  $\|\hat{\varepsilon}\|$ 로 변환된다

이 때 cross coupling gain ( $C_1, C_2, \dots, C_6$ )는 단위 근사 윤곽오차벡터인  $n = [n_1, n_2, \dots, n_6]^T$ 의 요소와 일치하므로 바로 구해 질 수 있다.

$$C_i = n_i \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (15)$$

계산된 근사 윤곽오차의 크기는 비례제어기에 입력되어 다시 각 축에 대한 보상치로 분해된 후 조인트 공간의 6축으로 분배된다.

#### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

앞에서 구현된 윤곽제어 알고리즘의 타당성과 병렬 기구와의 연관성을 검증하기 위해 본 제어 알고리즘을 적용할 유면형 병렬공작기계의 모델을 사용하여 임의의 자유곡선 경로에 따른 이송 시뮬레이션을 실시하였다.

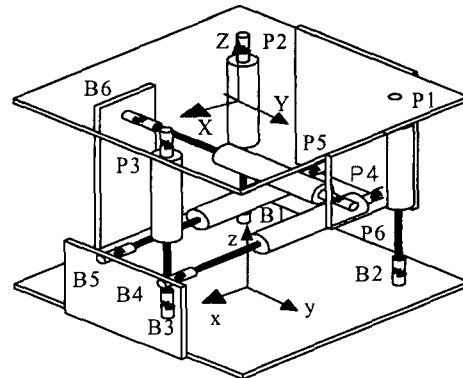


Fig. 3 Schematic diagram of cubic parallel manipulator

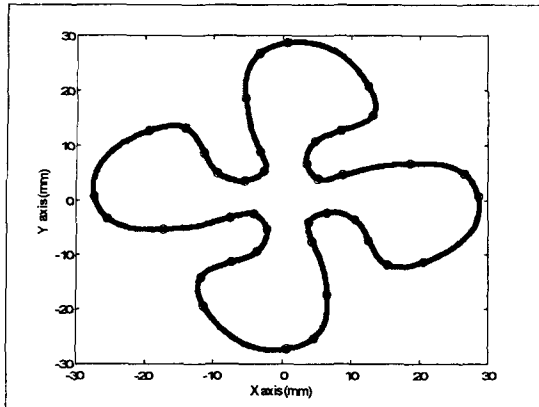


Fig. 4 Contour trajectory used in the biaxial experiments

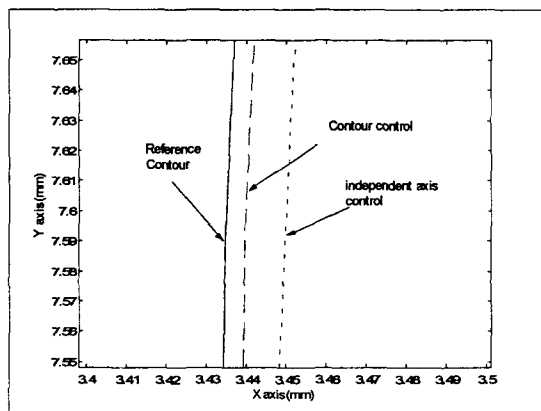


Fig.5 Response for independent axis control and contouring control

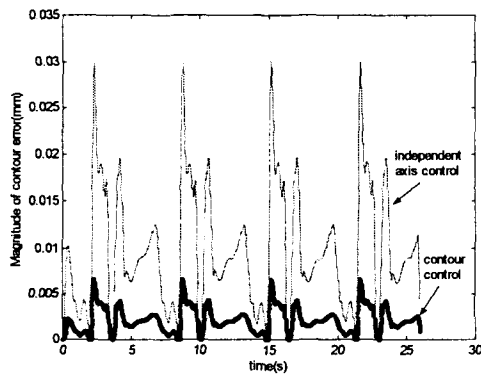


Fig.6 Contour error for independent axis control and contouring control

여기서는 Fig.4 와 같은 CAD 파일에서 추출한 point 데이터의 매듭값으로 보간된 fan 타입의 2 차원 윤곽경로를 선정하였다. 최대 이송속도는  $F=16[\text{mm}/\text{sec}]$ 이고 보간오차가  $h=1\mu\text{m}$  이내로 유지되도록 이송속도가 조절된다.

Fig.5 는 주어진 경로에 대해서 독립축 제어만을 실시하였을 경우의 윤곽오차와 교차식 구조를 이용

한 다축 윤곽제어를 실시하였을 경우의 응답선도를 확대한 그림이고 Fig.5 는 이송진행에 따른 윤곽오차를 비교하고 있다. 독립축 제어의 경우 추적 정밀도 향상에는 매우 효과적이지만 윤곽정밀도 개선에는 큰 효과를 거두지 못한다. Fig.5 에서 보는 바와 같이 여기서 설계된 윤곽제어 알고리즘이 윤곽오차를 효과적으로 감소시키고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

병렬형 공작기계의 윤곽제어성능 향상을 위한 윤곽제어기를 설계하였고 이를 병렬형 공작기계 모델에 적용하여 임의의 2 차원 경로에 대해 시뮬레이션을 실시하여 타당성을 검증하였다. 조인트 공간상에서의 오차를 직교좌표 공간상의 오차로 변환시키는 간단한 알고리즘은 제어부담감소에 기여할 것이고 이 연구에 사용된 다차원 공간상에서의 근사 추적오차개념과 이를 이용한 cross coupling gain의 설정은 다차원 경로상에 적용 할 수 있고 앞으로 병렬형 공작기계의 고속 정밀 가공시 활용 될 수 있을 것이다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호: 1999-1304-003-3)에 의해 지원을 받아 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Koren, Y., Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw Hill Book Company, 1983
2. Bollinger, J. G., "Digital Controls of Feed Drives - State of the Art and New Developments," Annals of CIRP, Vol. 29, 1980
3. Doraiswami, R. and Gulliver, A., "A Control Strategy for Computer of Machine Exhibiting Precision and Rapidity," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 106, 1984
4. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 102, pp. 265-272, 1980
5. Syh-Shiuh, Yeh, and Pau-Lo, Hsu, "Estimation for the Contouring Error Vector for the Cross-Coupled Control Design" ASME Transactions on Mechatronics, Vol.7, 2002
6. Koichi Sugimoto, "Kinematic and Dynamics Analysis of parallel Manipulators by Means of Motor Algebra," ASME J. of Mechanism Transmissions, and Automation in Design, Vol. 109, pp.3-7,1987