

# 난형상 공작기계 및 건설장비 개발을 위한 병렬기구 로봇의 설계, 제어, 보정, 프로그램에 대한 연구

## Study on Design, Control, Calibration and Program of Parallel Robots for Machining Work and Heavy Construction

\*\*김태성<sup>1</sup>

\*#T. S. Kim(tskim@sarim.changwon.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 국립창원대학교 메카트로닉스연구원

Key words : Calibration Configuration, Constraint Operator, Observation Matrix, QR-Decomposition

### 1. 서론

본 논문은 병렬기구를 이용한 공작기계 및 건설장비 개발에 관한 것이다. 특히 병렬기구가 공작기계에 적용되기 위해 기구의 절대정밀도를 반복정밀도까지 높이는 보정에 관한 내용을 다룬다. 일반적으로 보정작업은 기구학을 해석하고, 실제운동과 이론운동의 차이에 따른 오차를 찾아 이를 최소화하는 실제 치수를 찾는 것이다. 보정의 단계 중 실제 운동을 정확하게 측정하는 계측기술[1~3]과 기구학적 변수의 관측성[4][5]이 주요 쟁점이 되고 있다. 본 논문에서는 한 개의 구속평면과 3개의 디지털 인디케이터를 이용한 구속운동의 관측성을 검토하고 구속평면의 높이를 임의로 조절함으로써 전체적인 보정을 구현하는 방법을 제시한다. 관측행렬을 QR-분리해 행벡터의 독립성을 극대화할 수 있는 최적의 보정형상을 찾고, 이들로부터 얻은 관측행렬의 랭크로부터 관측할 수 있는 변수의 수를 제시한다. 이를 실제 제작된 병렬기구형 공작기계에 적용하여 보정 결과에서 한 개의 구속평면과 간단한 인디케이터로도 충분한 관측성을 확보할 수 있으며 정밀한 보정작업이 가능하고 보정에 매우 효율적 방법임을 입증한다.

### 2. 구속 연산자에 의한 보정시스템

구속운동을 정의하기 위해 트위스트 (Twist) 좌표계를 도입한다. 이를 6x1의 트위스트 좌표벡터로 나타내면

$$\mathbf{T} = [T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6]^T \quad (1)$$

로  $(T_1, T_2, T_3)$ 와  $(T_4, T_5, T_6)$ 는 각각 X, Y, Z 축에 대한 회전 및 이송속도성분이다. 구속운동은 위 6개 좌표 중 전부 또는 일부를 택해 그 좌표 상의 운동량을 설정하고 출력링클을 구속조건에 맞도록 이동시키는 것이다. 이를 수학적으로 나타내기 위해 구속연산자  $\mathbf{C}[\cdot]$ 를 정의한다.  $\mathbf{C}$ 는  $[\cdot]$ 에 포함된 두 형상 사이의 운동을 구속시키는 것으로 형상  $\chi^a$ 와  $\chi^b$ 가 기구학적 변수 벡터  $\rho$ 와 능동조인트값  $\Delta \mathbf{q}$ 의 함수일 때 구속운동은

$$\mathbf{C}[\chi^b(\Delta \mathbf{q}^b, \rho) - \chi^a(\Delta \mathbf{q}^a, \rho)] = \mathbf{N} \quad (2)$$

이다. 여기서  $\mathbf{C} = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_6)$ ,  $\mathbf{N} = [n_1, n_2, \dots, n_6]^T$ 으로  $c_j(j=1,2,\dots,6)$ 는 트위스트 좌표의  $j$  번째 운동이 구속되면 "1"이고, 자유이면 "0"이다.  $n_j(j=1,2,\dots,6)$ 는  $c_j$ 의 구속하에서 일어나는 구속운동량이다. 구속운동으로부터 아래와 같은 보정식이 유도된다.

$$\mathbf{G}(\Delta \mathbf{Q}, \Sigma, \rho) = \begin{bmatrix} g_1(\Delta \mathbf{q}^{a+1}, \mathbf{N}^1, \rho) \\ \vdots \\ g_c(\Delta \mathbf{q}^{c-1} \rightarrow \epsilon, \mathbf{N}^c, \rho) \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

기구학적 변수의 설계값을  $\rho_0$ , 실제값과 오차를  $\Delta \rho$  라 하면 아래와 같은 오차모델이 유도된다.

$$\Delta \mathbf{H}(\Delta \mathbf{Q}, \Sigma, \rho_0) = \mathbf{J}(\Delta \mathbf{Q}, \Sigma, \rho_0) \Delta \rho \quad (4)$$

여기서  $\Delta \mathbf{H}$ 는 실제시스템과 기구학모델 사이의 오차이고,  $\mathbf{J}$ 는

관측행렬을 나타낸다.

### 3. 구속운동하의 기구학적 변수의 관측성

구속조건에 따라 운동에 관여하지 않거나 다른 변수와 뭉쳐져 분리되지 않는 기구학변수가 있다. 여기서는 QR-분리 방법을 이용해 보정데이터를 택할 때마다 지금까지 얻은 관측행렬의 행벡터와 가장 독립적인 행을 얻을 수 있는 최적의 형상을 찾아서 보정데이터를 취하여 관측성을 확보한다.

보정 형상이  $\chi^i$ 에서  $\chi^{i+1}$ 으로 변할 때 구속되지 않는 좌표들로 이루어진 자유벡터  $\mathbf{F}$ 를 정의 한다:

$$\mathbf{F}(\rho, \Delta \mathbf{q}^{i \rightarrow i+1}) = \chi^{i+1} - \chi^i \quad (5)$$

벡터  $\mathbf{F}$ 는 자유좌표의 수만큼 자유도를 가지고 크기와 방향을 변화시켜 보정형상을 만든다. 두 형상의 구속운동으로부터 얻어지는 관측행렬의 행벡터들은

$$[\Psi_{k^*i+1}^T, \dots, \Psi_{k^*i+k}^T]^T \mathbf{T} = \frac{\partial \mathbf{F}(\rho, \Delta \mathbf{q}^{i \rightarrow i+1})}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_0} \quad (6)$$

으로 위의 벡터들이 지금까지 얻어진 행벡터  $\Psi_j(j=1, \dots, k^*i)$ 으로부터 독립이어야 관측행렬의 랭크가 증가된다. 독립성을 확보하려면 형상을 변화시키는 벡터  $\mathbf{F}$ 가 지금까지 만들어졌던 벡터와 달라야하며 차별화가 클수록 보정에 필요한 정보를 더 많이 제공해 관측성을 향상시킨다. 형상  $\chi^j(j=0, \dots, i)$ 와  $\chi^{i+1}$ 으로부터 얻어진 행벡터를 나열해 관측행렬

$$\mathbf{J}_{i+1} = [\Psi_1^T, \dots, \Psi_{k^*i}^T, \Psi_{k^*i+1}^T, \dots, \Psi_{k^*i+k}^T]^T \quad (7)$$

를 구하고,  $\mathbf{J}_{i+1}^T$ 를 QR-분리한다.

$$\mathbf{J}_{i+1}^T = \mathbf{Q}\mathbf{R} \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{Q}$ 는  $(p \times k^*(i+1))$ 의 직교행렬이고  $\mathbf{R}$ 은  $(k^*(i+1) \times k^*(i+1))$ 의 상삼각행렬이다. 형상  $\chi^{i+1}$ 으로부터 얻어지는 행벡터들의 독립성을  $\mathbf{R}$  행렬의 상응하는 대각 요소들의 역수의 합으로 나타낸다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{F}) = \sum_{j=i+1}^{i+k} \left( \frac{1}{r_{jj}} \right) \quad (9)$$

따라서  $\mathbf{M}(\mathbf{F})$ 값을 최소화할 수 있는 형상이 최적의 형상  $\chi^{i+1}$ 이 된다.

### 4. 병렬기구형 공작기계의 관측성 검토 및 보정

보정형상의 최적화 원리를 병렬기구형 공작기계 (PMC, Parallel-typed Machining Center)에 적용해 구속운동에 따른 관측성을 검토한다. PMC는 Fig. 1과 같이 베이스, 플랫폼, 그리고 그 사이에 설치된 선형 액추에이터, LA<sub>*i*</sub> ( $i=1, 2, \dots, 6$ )로 이루어져 있다.

보정 작업의 기준이 되는 월드 좌표계  $\{W\}$ 를 구속평면에 부여하고, 베이스와 플랫폼에 좌표계를 각각 고정시킨다. 피동조인트가 완벽하다면 베이스에 대한 플랫폼의 포즈는 36개의 기구학적 변수로 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 Fig. 2와 같이 정반 테이블을 플랫폼 아래에 두고 플랫폼에 120도의 등 간격으로 3개의 디지털 인디케이터를 설치하여 구속운동을 생성한다. 이때 병렬기구의 작업공간 내에서 최적형상을 구하면 Fig. 3와 같은 분포를 얻을 수 있으며 식(8)의 J 행렬의 랭크를 32개 까지 확보하여 모든 기구학 변수가 관측가능해 진다.

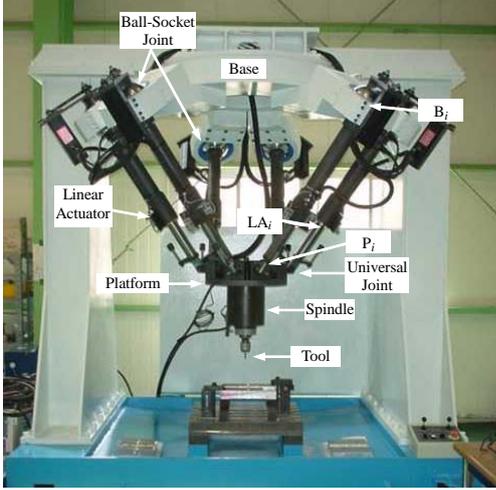


Fig. 1 PMC (Parallel-typed Machining Center)

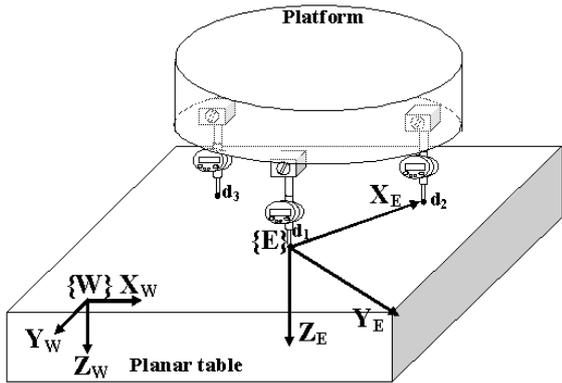


Fig. 2 Constrained movement inspected by three digital indicators

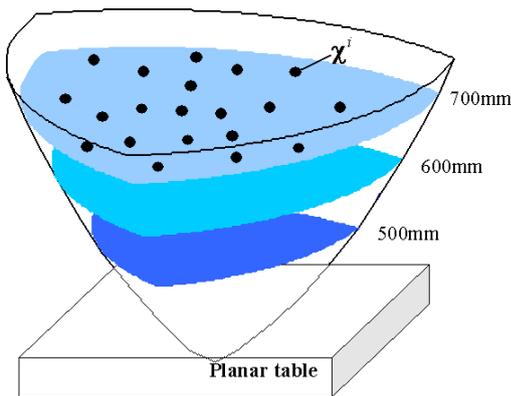


Fig. 3 Three constraint planes for constraint movements

Table 1 Kinematic parameters calibrated by automatic calibration system with a constraint operator (unit : mm)

$i$	${}^B P_{Bi_x}$	${}^B P_{Bi_y}$	${}^B P_{Bi_z}$	${}^P P_{Pi_x}$	${}^P P_{Pi_y}$	${}^P P_{Pi_z}$	$q_{off, i}$
1	0	0	0	0	0	0	848.42
2	1089.32	0	2.74	133.64	0	0	847.14
3	1287.18	-344.68	1.3	318.69	-320.09	-1.23	851.03
4	745.23	-1286.25	2.78	250.27	-437.15	-2.71	848.24
5	346.13	-1286.31	2.93	-117.78	-436.98	-2.62	851.12
6	-198.86	-343.63	1.64	-184.7	-321.68	0	850.85
[ ${}^P P_{E_x}, {}^P P_{E_y}, {}^P P_{E_z}$ ]				[128.18, 53.49, 551.11]			

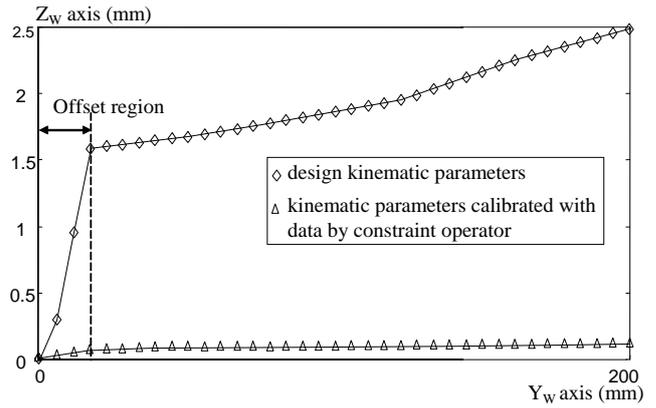


Fig. 4 Calibration results

제시한 구속연산자를 이용하여 보정데이터를 측정하고 이로부터 보정작업을 수행하였다. 보정결과로 Table 1 과 같은 기구학 변수값을 찾았으며 이를 적용하여 병렬기구의 정밀도를 측정한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4는 플랫폼의 위치운동시 정반 테이블에 대한 높이의 오차를 나타내는데 설계치수를 기구학적 모델로 적용한 경우 2.5mm의 높이오차를 가졌으나 보정치수를 사용한 경우 오차는 0.12mm으로 줄어든다. 특히, 시작구간을 지나면 상대적인 오차가 20 μm 이내로 매우 정밀하다. 시작구간의 오차는 보정시스템에서 야기된 것이라기보다 기구가 가지고 있는 비 기구학적인 요인들 (백래시, 측정 노이즈, 변형 등)에서 비롯된 것이라 볼 수 있다. 이 결과는 간단한 디지털 인디케이터와 정반 테이블 만으로 병렬기구의 보정작업이 가능함을 보여준다.

### 5. 결론

구속연산자를 이용한 보정시스템의 관측성을 검토했다. QR-분리를 이용해 관측행렬의 독립성을 극대화하는 형상을 찾아 보정에 필요한 모든 기구학변수의 관측성이 구속연산자 하에서 확보됨을 보였다. 실제시스템에 적용한 결과 보정작업이 성공적으로 이뤄졌다. 아직도 20 μm이내의 상대적 오차를 가지나 이는 보정 시스템에서 비롯된 것이라기보다 기구가 가지고 있는 비 기구학적인 요인들 (백래시, 측정 노이즈, 변형 등)에 의한 것이다. 본 연구를 통해서 단일평면에 의한 보정작업은 관측성이 낮고, 국소적인 보정이라는 염려를 불식시켰다. 따라서 간단한 디지털 인디케이터와 정반 테이블만으로 작업공간 전 영역에 대해 보정데이터 획득이 가능하며 정밀한 보정작업이 가능함을 보여주었다.

### 참고문헌

1. Decker, S. Prenninger, J. P. Gander, H. and Vincze, M., 1992, "Dynamic Measurement of Position and Orientation of Robots," IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 300-304.
2. Zhuang, H. Masory, O. and Yan, J., 1995, "Kinematic Calibration of Stewart Platform Using Pose Measurements Obtained by a Single Theodolite," in Proc. IROS, pp. 329-335.
3. Desnard, S. and Khalil, W., 1999, "Calibration of Parallel Robots Using Two Inclinometers," Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation Detroit, Michigan, pp. 1758-1763.
4. Borm, J. H. and Menq, C. H., 1991, "Determination of Optimal Measurement Configurations for Robot Calibration Based on Observability Measure," Int. J. Robot. Res., Vol. 10, No. 1, pp. 51-63.
5. Menq, C. H. Borm, J. H. and Lai, J. Z., 1989, "Identification and Observability Measure of a Basis Set of Error Parameters in Robot Calibration," ASME J. Mech. Trans. Automat. Design, Vol. III, No. 4, pp. 513-518, Dec.