

병렬기구형 공작기계의 기구학적 보정에 관한 연구

이민기[†] · 김태성^{*} · 박근우^{**}
(2001년 9월 28일 접수, 2002년 8월 14일 심사완료)

Study on Kinematic Calibration of a Parallel-typed Machining Center Tool

Min Ki Lee, Tae Sung Kim and Kun Woo Park

Key Words: Calibration(보정), Constraint Operator(구속연산자), Kinematic Parameter(기구학적 변수), Cost Function(비용함수), Observability(관측성).

Abstract

This research develops a low-cost and high accuracy kinematic calibration method based on the following principles: 1) the platform locations are accurately measured by a constrained movement to inspect a calibration target; 2) the constrained movement is chosen to guarantee the parameter observability; 3) the mechanical fixture to constrain the movement and the sensor to check the constrained movement are implemented by low-cost and high-accuracy devices; 4) the calibration is easily done at an industrial environment. The kinematic parameters calibrated with respect to a single plane aren't influenced due to the misalignment of the plane. A parameter observability is successfully obtained even through one planar constraint, which guarantees that all kinematic parameters are estimated by minimizing the cost function.

1. 서론

일반 직각좌표형 공작기계가 기계가공작업에 광범위하게 사용되고 있으나 툴의 자세를 조절할 수 없으므로 복잡한 형상을 가공하는 데는 한계가 있다. 복합형상가공 작업은 가공 툴이 절삭부위에 자유롭게 접근해야하므로 툴의 위치와 자세(포즈, Pose)를 동시에 생성할 수 있는 병렬기구형 공작기계⁽¹⁾ (PMCT, Parallel-typed Machining Center Tool)가 차세대 공작기계로 부각되고 있다. 병렬기구는 여러 링크가 툴을 지지하므로 강성이 크고, 조인트의 오차가 누적되지 않아 정밀도가 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 링크와 플랫폼 및 베이스가 공간상에서 조립되므로 조립 공차가 크고, 보정할 기구학적 변수의 수가 많아 일반

공작기계의 정밀도에 크게 못 미친다.⁽²⁾ 따라서 병렬기구가 공작기계에 적용되기 위해서는 정밀도를 높이기 위한 보정에 관한 연구가 절실히 필요하다.

기구학적 보정은 실제 기구학적 치수를 찾는 것으로 대략 3 단계로 이뤄진다. 즉, 1) 기구학 해석을 수행하고, 2) 실제운동과 이론운동의 차이에 따른 오차를 찾아내 비용함수(cost function)를 유도하며, 3) 비용함수 값을 최소화할 수 있는 기구학적 치수를 실제 치수로 하여 기구학적 모델 속에 잘못 책정된 치수를 교정하는 것이다. 위 단계 중 기구학 해석, 최적화 연산 등은 컴퓨터의 발달로 더 이상 문제가 되지 않으나 실제 운동을 정확하게 측정하는 계측기술이 가장 큰 장애점이 되고 있다. 출력운동을 측정하는 방법으로 플랫폼의 포즈를 레이저,⁽³⁾ 경위,⁽⁴⁾ 수평계⁽⁵⁾를 사용해 직접 측정하는 방법이 제시되었다. 이 방법은 보정의 목표인 플랫폼의 포즈를 직접 측정할 수 있다는 장점이 있으나 센서들이 외부에 설치돼 외적환경에 영향을 받으므로 온 라인 자체보상이 불가능하다는 단점이 있다. 유사한 방법으로 말단부에 비전 카메라를 장착해 설정된 목표

[†] 책임저자, 회원, 창원대학교 메카트로닉스공학부

E-mail : minkilee@sarim.changwon.ac.kr

TEL : (055)279-7553 FAX : (055)262-5064

^{*} 회원, 창원대학교 대학원 제어계측공학과

^{**} 회원, 창원대학교 메카트로닉스공학부

물과 영상 데이터 사이의 관계식으로부터 실제 포즈를 측정하는 방법이 로봇 보정에 사용되었다.⁽⁶⁾ 그러나 3D 공간에서 포즈를 정확히 측정하는데는 고가의 장비가 필요하며 기술적으로 어려움이 많다. 따라서 간접적인 방법으로 플랫폼의 포즈에 따라 피동적으로 회전하는 피동 조인트의 회전 각도를 측정하는 방법⁽⁷⁾이 제안되었다. 이 방법은 온 라인 자체보상이 가능하나 센서 설치가 어렵고, 제한된 개수의 피동 조인트가 출력운동을 정확히 대변한다 할 수 없다.

포즈의 실제운동을 측정하는 목적은 기구학적 모델의 기대값과 실제값을 비교해 오차를 찾아내는 데 있다. 따라서 위 방법과 역으로 미리 설정된 공간에 출력운동을 구속하고 그 구속조건이 만족할 때마다 능동 조인트의 운동량을 읽어 기구학적 모델의 기대값과 설정값 사이의 오차를 찾아내는 방법을 생각할 수 있다. 이와 관련한 연구로 말단부에 뾰족한 핀을 설치하고, 외부의 힘에 삽입함으로써 포즈를 구속시키거나,⁽⁸⁾ 점⁽⁹⁾ 또는 평면⁽¹⁰⁾으로 출력운동을 구속하는 방법이 제안되었다. 구속운동에 의한 보정작업은 구속운동이 잘 행해지는 지 점검할 수 있는 간단한 장치만 있으면 실제운동을 측정할 수 있으나 구속운동의 선정에 있어 기구학적 변수들을 모두 대변할 수 있는 관측성(observability)⁽¹¹⁾을 고려해야 한다.

이상의 선행연구는 비교적 정밀도가 낮은 직렬 및 병렬기구 로봇에 적용되었으며, 시뮬레이션으로 보정 결과를 보이고 있다. 실제 병렬기구 시스템에 적용한 연구는 많지 않으며 보정결과⁽⁴⁻⁷⁾도 공작기계에서 요구하는 정밀도에 훨씬 못 미치고 있다. 본 연구에서는 병렬기구를 공작기에 적용하기 위해 아래 4가지 원칙을 고려한 보정 알고리즘을 제시하고, 이를 실제 시스템에 적용하고자 한다.

- 1) 실제운동은 병렬기구의 정밀도를 직접 측정할 수 있는 플랫폼의 출력운동으로 한다.
- 2) 실제운동은 구속운동으로부터 정밀하게 측정한다.
- 3) 구속운동은 관측성을 충분히 확보할 수 있도록 한다.
- 4) 운동을 구속하는 픽스처(fixture)와 이를 점검하는 센서는 고 정밀, 저 비용인 것을 사용한다.

관측성을 높이기 위해 여러 개의 평면으로 운동을 구속하는 방법⁽¹⁰⁾이 제안되었으나 실제 적용에 있어서 평면 사이의 정밀한 치수조정에 어려움이 많다. 따라서 한 개의 평면을 사용하고 구속 좌표수를 조정함으로써 관측성을 충분히 확보한다.

본 논문에서는 구속연산자를 정의하고, 이를 이용한 보정 알고리즘을 유도해 실제 제작된 병렬기구형 공작기계인 PMCT에 적용해 보정결과를 보인다. 시뮬레이션 결과와 실제 결과를 비교하면서 병렬기구의 특성을 관찰하고, 문제점을 분석하며 이를 해결할 향후 연구과제를 제시하고자 한다.

2. 구속 연산자의 정의

병렬기구의 순방향 기구학은 기구학적 변수 벡터 ρ 와 능동조인트 변수 벡터 q 가 주어질 때 아래와 같이 포즈를 구할 수 있다.

$$x = f(\rho, q) \quad (1)$$

여기서 $x = [\Omega^T, p^T]^T$ 으로 출력링크의 포즈를 나타내는 6×1 벡터이다. $\Omega = [\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z]^T$ 는 Euler 각도로 X, Y, Z 축에 대한 출력링크의 회전 각도이며, $p = [p_x, p_y, p_z]^T$ 는 출력링크의 위치를 나타내는 X, Y, Z 축의 좌표 값이다.

구속운동을 나타내기 위해 트위스트 (Twist) 좌표를 도입한다. 공간상에서 이뤄지는 모든 물체의 운동은 트위스트 축을 중심으로 한 회전과 이송으로 나타낼 수 있다. 이를 6×1 의 트위스트 좌표 벡터로 나타내면

$$T = [T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6]^T \quad (2)$$

로 (T_1, T_2, T_3)와 (T_4, T_5, T_6)는 각각 X, Y, Z 축에 대한 회전 및 이송 속도성분이다. 구속운동은 위 6개 좌표 중 전부 또는 일부를 택해 그 좌표 상의 운동량을 설정하고 출력링크를 구속조건에 맞도록 이동시키는 것이다. 이를 수학적으로 나타내기 위해 구속연산자, $C[\]$ 를 정의한다.

$C[\]$ 는 []에 포함된 두 포즈 사이의 운동을 구속시키는 것으로 출력링크가 x_u 에서 x_v 로 이동할 때 구속운동을 아래와 같이 나타낸다.

$$C[x_v - x_u] = N \quad (3)$$

여기서

$$C = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_6)$$

$$N = [n_1, n_2, \dots, n_6]^T$$

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 구속 하에서 일어나는 구속운동량으로

$$n_j = 0 \quad \text{for} \quad c_j = 0 \quad (4a)$$

$$n_j = {}^d n_j + \hat{n}_j \quad \text{for} \quad c_j = 1 \quad (4b)$$

이다. 여기서 ${}^d n_j$ 는 설정된 운동량을 나타내며 \hat{n}_j 는 설정된 값으로부터 벗어난 오차로 픽스처의 가공오차 또는 측정 노이즈 등을 나타낸다. 구속운동 수는 $k = \sum_{j=1}^6 c_j$ 로 k 개의 좌표가 구속된다. 외부에 센서를 설치해 포즈를 직접 측정하는 경우 $C=[0, 0, \dots, 0]^T$ 으로 모든 운동이 자유인 것을 말하며, 역으로 $C=[1, 1, \dots, 1]^T$ 인 경우 포즈의 운동을 모두 구속해 보정 데이터를 얻는 것을 말한다. 따라서 구속과 자유를 적절히 조합해 관측성을 충분히 확보하면서 쉽게 보정 데이터를 획득할 수 있는 방법을 택해야 한다.

3. 오차모델

구속 연산자를 이용한 오차 모델을 식 (3)으로부터 유도한다. 포즈 x_0 와 x_i 사이에 구속연산자 C 가 작용할 때 구속운동량은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi_a(\rho, \Delta^m q_i) \equiv C[f(\rho, {}^m q_i) - f(\rho, {}^m q_0)] = N_i \quad (5)$$

여기서

$$\Delta^m q_i = {}^m q_i - {}^m q_0$$

${}^m q_0$ 와 ${}^m q_i$ 는 각각 초기와 i 번째 포즈를 생성하기 위한 능동 조인트 값이다. 함수 ψ_a 의 출력인 N_i 중 구속좌표로 이뤄진 $k \times 1$ 벡터, Γ_i 를 나타내는 함수 ψ 를 아래와 같이 정의한다.

$$\Gamma_i = \psi(\rho, \Delta^m q_i) \quad (6)$$

위 값은 두 포즈 사이에 설정된 구속운동량으로 기구학 모델 속에 있는 벡터, ρ^o 로 계산한 값은

$${}^o \Gamma_i = \psi(\rho^o, \Delta^m q_i) \quad (7)$$

이다. 같은 병렬기구이므로 식 (6)과 (7)의 결과는 같아야 한다. 그러나 $\rho^o \neq \rho$ 으로 Γ_i 와 ${}^o \Gamma_i$ 는 일치하지 않아 오차 벡터가 유도된다. 실제 기구

학적 치수를 찾는 과정을 거쳐서 $d\rho$ 를 구했다면 식 (6)으로부터

$$\Gamma_i = \psi(\rho^o + d\rho, \Delta^m q_i) \quad (8)$$

이다. $d\rho$ 가 충분히 작다면 테일러 급수의 1차 항만 취해서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_i \cong \psi(\rho^o, \Delta^m q_i) + {}^i J_\psi d\rho \quad (9)$$

여기서 ${}^i J_\psi \equiv \nabla \psi$ 로 ${}^i J_\psi$ 는 ρ 에 대한 자코비안 행렬이다. 식 (9)에서 식 (7)을 빼면

$$\Delta \Gamma_i \cong {}^i J_\psi d\rho \quad (10)$$

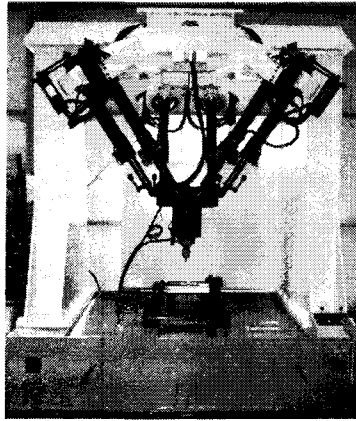
으로 오차 모델이 유도되고, 이로부터 비용함수는

$$C_\psi(\rho) = \sum_{i=1}^k [\Delta \Gamma_i - {}^i J_\psi d\rho]^T [\Delta \Gamma_i - {}^i J_\psi d\rho] \quad (11)$$

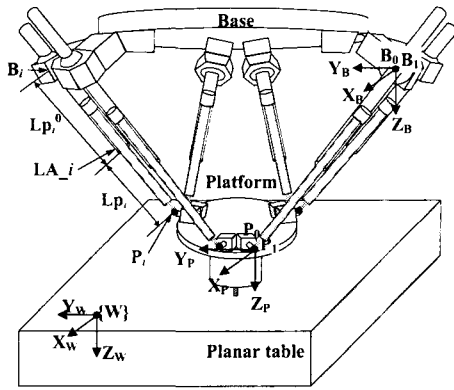
이다. 여기서 $C_\psi(\rho)$ 는 비용함수 값이고, p 는 측정 데이터 수이다. 식 (10)으로부터 ($p \times k$)개의 독립된 오차 식이 유도되는데 이 수는 찾아야 할 기구학적 변수 수보다 적어도 2배 이상 많아야 한다. 비용함수에 대한 정보가 충분히 확보되면 비선형 최적화 이론인 Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt 알고리즘 또는 Extended Kalman 필터 등을 적용해 비용함수 값을 최소화시키는 기구학적 변수 값 ρ 를 찾는다.

4. 보정 알고리즘의 PMCT 적용

위에서 유도한 보정 알고리즘을 PMCT에 적용한다. 병렬기구의 단점인 좁은 작업공간을 넓히기 위해 여러 종류의 병렬기구가 개발되었으나 스튜워트 플랫폼의 구조를 변경한 어떤 기구도 강성을 떨어뜨리므로 HEXAPOD형⁽¹⁾으로 PMCT를 개발했다. PMCT는 Fig. 1과 같이 베이스, 플랫폼, 그리고 그 사이에 설치된 선형 액추에이터, LA_{*i*} ($i=1, 2, \dots, 6$)로 이루어져 있다. LA_{*i*}의 상단은 볼-소켓 조인트에 의해 베이스 상의 점 B_{*i*}에 연결되고, 하단은 유니버설 조인트에 의해 플랫폼 상의 점 P_{*i*}에 연결된다. 강성을 높이기 위해 볼-소켓 조인트가 선형 액추에이터의 중간을



(a)



(b)

Fig. 1 (a) The PMCT constructed for a machining center
(b) Kinematic structure

감싸 $\|B_iP_i\|$ 의 거리를 줄였다. 각 LA_i 는 링크 트레인을 형성하는데 5개의 회전 조인트 (볼-소켓, 유니버셜)는 피동 조인트들이고, 1개의 선형 조인트만 능동조인트로써 LA_i 의 길이를 늘이고, 줄인다.

보정작업을 위해 좌표계와 기구학적 변수를 정의한다. 보정 데이터인 구속운동량은 구속평면에 대하여 측정되므로 월드 좌표계 {W}를 구속평면에 설치한다. 좌표계 {W}의 원점은 구속평면에 고정시키고 Z_w 는 구속평면에 수직하며, X_w 와 Y_w 은 구속평면과 나란하게 한다. 좌표계 {B}와 {P}를 베이스와 플랫폼에 각각 고정시키고, 그 원점 B_0 와 P_0 을 점 B_1 과 P_1 에 일치시킨다. 좌표계 {B}와 {W}의 방위는 동일하게 하고, 공작기계의 원점위치에서 좌표계 {P}와 {B}의 방위도 같게 한다. 디지털 인디케이터와 같이 외부센

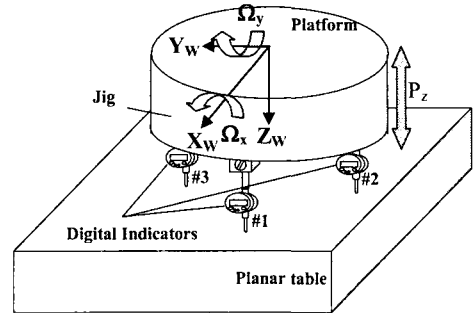


Fig. 2 Constrained movement inspected by three digital indicators

서를 이용하는 경우^(3,4) 센서의 측정값을 기구에 고정된 좌표로 변환하기 위해 위치와 방위를 나타내는 6개의 변수가 필요하다. 그러나 위와 같이 좌표계를 정의할 경우 좌표계 {W}와 {B}의 방위는 같고, 상대적 구속운동량을 보정 데이터로 사용하므로 {W}와 {B} 사이의 위치변수는 필요치 않다. 따라서 병렬기구 자체의 기구학적 변수 외에 다른 변수가 추가되지 않으며 임의의 구속평면에 대해 기구학적 변수가 구해진다.

플랫폼의 위치를 ${}^B B_0 P_0$ 으로 정의하고, 방위를 {B}에 대한 {P}의 회전행렬로 나타낼 때 기구학적 모델에 포함된 변수는 $i = 1, 2, \dots, 6$ 에 대해서 ${}^B B_0 B_i, {}^P P_0 P_i, Lp_i^0$ 로 총 42개가 된다. 여기서 Lp_i^0 는 LA_i 의 오프셋 길이로 $\|B_iP_i\|$ 에서 능동 조인트의 운동량, Lp_i 를 빼 값이다. 좌표계 {B}와 {P}의 정의로부터 아래와 같은 기구학적 변수는 0이 된다.

$${}^B B_{1X} = {}^B B_{1Y} = {}^B B_{1Z} = 0 \quad (12a)$$

$${}^P P_{1X} = {}^P P_{1Y} = {}^P P_{1Z} = 0 \quad (12b)$$

여기서 ${}^i V_{jk}$ 는 좌표계 {i}에 대한 점 V_j 의 k 축 방향의 좌표를 말한다. 따라서 찾아야할 기구학적 변수의 수는 36개로 줄어들며, 이들을 요소로 하는 기구학적 변수 벡터와 능동 조인트 벡터는 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\rho = [{}^B B_{2X}, {}^B B_{2Y}, {}^B B_{2Z}, \dots, {}^P P_{6X}, {}^P P_{6Y}, {}^P P_{6Z}, Lp_1^0, Lp_2^0, \dots, Lp_6^0]^T \quad (13a)$$

$$q = [Lp_1, Lp_2, Lp_3, Lp_4, Lp_5, Lp_6]^T \quad (13b)$$

구속 연산자를 이용한 오차 모델로 보정작업을 실시한다. 운동을 구속하기 위해 $400 \times 400 \text{ mm}^2$ 의

면적에서 평면도가 $5 \mu m$ 인 정반 테이블을 플랫폼 밑에 고정시키고, $1 \mu m$ 의 정밀도와 $25 mm$ 의 스트로크를 갖는 디지털 인디케이터 3개를 Fig. 2와 같이 등 간격으로 플랫폼에 설치한다. 인디케이터의 접촉 불을 테이블 면과 맞닿게 하여 Z_w 축 방향의 변위량을 측정하도록 한다. 테이블 면이 평행하므로 3개의 인디케이터 눈금이 변하지 않으면서 이동했다면 $C = diag(1, 1, 0, 0, 0, 1)$ 이다. 포즈 사이의 설정된 운동량은, ${}^d n_1 = {}^d n_2 = {}^d n_6 = 0$ 이며, 픽스처의 가공오차와 측정 노이즈를 무시하면 $\hat{n}_1 = \hat{n}_2 = \hat{n}_6 = 0$ 이다. 따라서 영점을 유지하면서 i 번째 포즈로 이동하면 실제 구속운동량은

$$\Gamma_i = [\Delta\Omega_x, \Delta\Omega_y, \Delta p_z]^T = [0, 0, 0]^T \quad (14)$$

이며, 이때 읽은 능동 조인트의 변화량, $\Delta^m q_i$ 과 기구학 모델 속에 있는 벡터, ρ^o 으로 계산한량은

$${}^c \Gamma_i = [\Delta^c \Omega_x, \Delta^c \Omega_y, \Delta^c p_z]^T = \Psi(\rho^o, \Delta^m q_i) \quad (15)$$

이다. 구속운동 수는 $k=3$ 으로 36개의 기구학적 변수를 보정하는데 적어도 12개의 데이터가 필요하다.

5. 기구학적 변수의 관측성 검토

관측성은 기구학적 변수오차가 보정 데이터에 반영되는 정도를 나타내는 값으로 관측할 수 있는 변수의 수와 변수들의 반영 비율로 표현된다. 따라서 각 보정 데이터에 대해 기구학적 변수오차와 구속운동오차의 관계를 나타내는 식 (10)의 ${}^i J_{\Psi}$ 을 쌓아 만든 전체 자코비안 $J_{\Psi} = [{}^1 J_{\Psi}^T, {}^2 J_{\Psi}^T, \dots, {}^p J_{\Psi}^T]^T$ 을 관측행렬로 정의한다.⁽⁷⁾ 관측행렬 J_{Ψ} 의 랭크는 독립된 행 또는 열 벡터의 수를 나타내므로 기구학적 변수의 수만큼 랭크가 크지 않으면 구속운동에 관여하지 않거나 다른 변수의 함수가 되는 종속변수가 있음을 말한다. 따라서 랭크 수로부터 관측할 수 있는 기구학적 변수의 수를 알 수 있으며 J_{Ψ} 의 QR 분리⁽¹¹⁾로부터 어느 변수가 관측불가능한 지도 판명된다.

충분한 랭크가 확보된 경우 모든 기구학적 변수 오차가 구속운동오차에 균일하게 반영되길 원한다. 이를 수학적으로 나타내기 위해 J_{Ψ} 의 특이값(singular value)을 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_L$ 으

로 나열하고, 최대 값과 최소 값의 비율인 상태수 (condition number)의 개념을 도입한다. 가장 이상적인 경우는 모든 고유벡터에 대해서 균일한 고유값을 가지는 것으로 상태수가 1 일 때이다. 랭크와 상태수에 보정 형상의 수까지 포함시켜 관측성을 나타내는 값⁽¹²⁾도 사용되고 있다.

$$O_M = \frac{L\sqrt{\sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdots \sigma_L}}{\sqrt{p}} \quad (16)$$

여기서 보정 형상의 수 p 가 클 수록 보정 데이터 사이에 형상의 차이가 줄어들어 O_M 의 값은 줄어들고, 충분한 랭크가 확보되지 못할 경우 $\sigma_L = 0$ 으로 $O_M = 0$ 이 된다.

위에서 정의한 구속연산자로부터 포즈를 변화시킬 수 있는 자유도는 3개에 불과 하다. 따라서 3개의 자유도로서 기구학적 변수가 모두 관측될 수 있는지 랭크, 상태수 및 O_M 의 값을 점검한다. 구속식의 수가 기구학적 변수의 수 보다 2배 이상이 되도록 보정 데이터를 취득한다. 위의 구속조건에 두 개의 자유도를 더 구속해서 직선운동(X_w 또는 Y_w 방향의 운동)으로 보정 데이터를 생성할 경우 랭크는 11 이상 늘어나지 않는다. 그러나 평면운동 (X_w 와 Y_w 방향의 조합운동)으로 보정 데이터를 생성할 경우 랭크는 17 으로 증가된다. 또한 Z_w 를 중심으로 한 회전운동까지 추가될 경우 랭크는 최대 27이 된다. 따라서 보정 데이터를 생성하는 자유도와 랭크 수는 직접적인 관계가 있다. 랭크 수를 증가시키는 방법으로 초기 포즈를 바꿔본다. 식 (3)으로부터 초기 포즈 x_u 를 변화시킬 경우 이를 기준으로 포즈 사이의 상대적 구속운동은 다른 성질의 보정 데이터를 생성하여 랭크는 33이 되며 초기 포즈를 계속 바꿔 기구학적 변수의 수와 같은 36개의 랭크를 얻을 수 있다. 충분한 랭크가 확보된 경우 상태수는 4137 이고, $O_M = 1.05$ 으로 구속운동 없이 6자유도로 보정 데이터를 생성해 얻은 상태수 1884, $O_M = 2.29$ 와 비교할 때 관측정도는 떨어지나 위에서 정의한 기구학적 변수를 관측하는 데는 문제가 없다.

6. 보정 결과

보정작업 전 PMCT의 반복 및 절대 정밀도를 점검해 봤다. Table 1의 설계치수를 기구학적 모델에 대입하고, (+) X 축 방향으로 30 mm 씩 명

Table 1 Design kinematic parameters (unit : mm)

i	${}^B B_0 B_i$			${}^P P_0 P_i$			Lp_i^0
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	0	0	0	0	0	0	850
2	-345.18	-199.29	0	-318.43	-183.84	0	850
3	-1288.23	345.18	0	-434.98	-116.55	0	850
4	-1288.23	743.76	0	-434.98	251.14	0	850
5	-345.18	1288.23	0	-318.43	318.43	0	850
6	0	1088.94	0	0	134.58	0	850

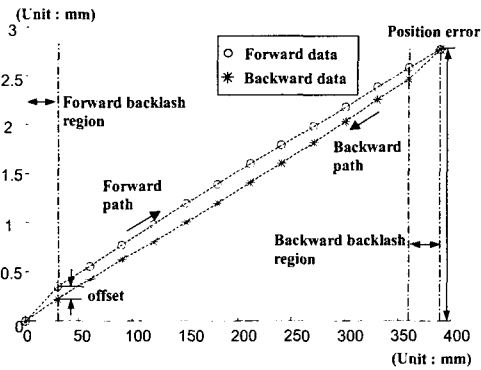


Fig. 3 Hysteresis curve formed by the position difference between forward and backward paths

령을 주어 390 mm를 이동하고, (-) X 축 방향으로 명령을 주어 처음 위치로 오는 반복운동을 하였다. 각 명령마다 플랫폼에 부착된 목표물의 위치를 레이저 센서로 측정해 Fig. 3의 결과를 얻었다. 오차는 서서히 증가하기 시작해 출발 구간을 지나면서 일정한 비율로 증가해 2.8 mm에 이르고, 돌아올 때는 감소하기 시작해 후진 구간을 지나면 일정한 비율로 감소해 "0"에 이른다. 접근하는 방향이 일정하면 각 위치의 반복정밀도는 2 μm 이내로 매우 정확하나 접근방향이 다르면 200 μm 의 오프셋 값을 가져 이력곡선 (hysteresis curve)을 형성한다.

오프셋 값은 조인트들의 백래시가 종합적으로 작용해 일어나는 현상으로 구속운동이 이론대로 일어나지 않고 있음을 나타낸다. 백래시는 백래시 구간에서 작용해 오차를 유발시키고, 이 영역을 지나면 잘못 책정된 기구학적 변수로 인해 진행되는 거리에 비례해서 오차가 증가한다.

위 결과로부터 병렬기구 보정연구의 가능성과 어려움을 발견하게 된다. 즉, 반복정밀도가 2 μm 이내이므로 보정작업만 정확히 이뤄진다면 높은 정밀도를 얻을 수 있으나 오차가 2.8 mm까지 증가하므로 실제 기구학적 치수는 설계치수와 크게

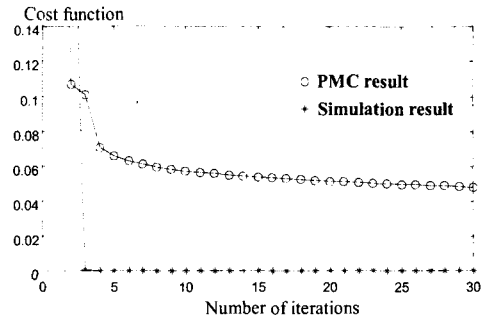


Fig. 4 Cost function vs. number of iterations

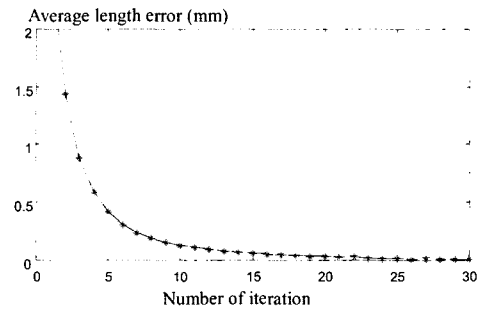


Fig. 5 Average error of Lp_i^0 ($i=1,2,\dots,6$) in simulation

다름을 알 수 있다. 또한, 방향이 바뀔 때마다 200 μm 의 백래시가 일어나므로 이 값이 보정 데이터에 오염되지 않도록 측정해야 한다.

위에서 제시한 방법을 검증하기 위해 시뮬레이션을 실시해 보았다. 초기값을 설계값으로 하고, Lp_i^0 는 5 mm 이내, ${}^B B_0 B_i$ 와 ${}^P P_0 P_i$ 는 3 mm 이내로 오차를 가정해 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 적용했다. 비용함수 값, $C_{\psi}(\rho)$ 는 Fig. 4와 같이 "0"에 잘 수렴하고 Lp_i^0 의 평균오차도 Fig. 5와 같이 0.003 mm까지 줄어들었다.

시뮬레이션과 같이 PMCT 보정작업을 실시했다. 테이블을 25개의 영역으로 골고루 나눠 각 영역으로부터 데이터를 취득한다. 플랫폼을 초기 포즈로부터 측정 포즈에 이동시키고, 3개의 디지털 인디케이터의 눈금이 모두 영점으로부터 2 μm 이내를 벗어나지 않을 때 ${}^m a_i$ 을 읽었다. 이 때 사용한 방법은 각 인디케이터의 눈금이 영점에 근접할 수 있는 방향으로 속도를 생성하는 속도 제어 방식이다. 시뮬레이션과 같이 기구학적 변수의 참값을 알 수 없으므로 $C_{\psi}(\rho)$ 의 수렴 값으로부터 보정성능을 점검한다. Fig. 4에서 보듯이 PMCT의 $C_{\psi}(\rho)$ 는 0.05 이하로 줄어들지

않는다. 이러한 결과의 가장 큰 요인은 구속운동을 생성하는 방법에 있다. 즉, 3개의 인디케이터 값이 모두 영점만족하기 위해 측정 포즈 근방에서 세밀한 운동조작이 이뤄지며, 운동방향을 여러 번 바꾸는 과정에서 백래시가 많이 포함되고, 측정오차와 노이즈가 첨가되기 때문이다.

위의 속도제어에 의해 측정된 데이터, m q_i 로 포즈를 재 생성하여 구속운동의 만족 정도를 확인하여 보았다. 이때 디지털 인디케이터의 눈금은 약 $\pm 200 \mu m$ 이상을 벗어났다. 이러한 오차로 오염된 데이터는 구속조건을 만족할 수 없으므로 $C_{\psi}(\rho)$ 가 바람직하게 수렴하지 않았다.

백래시에 오염되지 않은 보정 데이터를 획득하기 위해 플랫폼을 중앙에서 상하 반복운동 시킨 후 각각의 측정 포즈로 이동시킨다. 상하 반복운동은 다른 방향의 백래시 영향을 차단시키고, 각 측정 포즈에 접근하는 방향을 항상 일정하게 만든다. 중앙으로부터 측정포즈로 방향을 바꿀 때 백래시가 포함되나 Fig. 3에서 본 바와 같이 백래시 영역을 지난 후에는 그 영향이 일정하며, 접근방향이 같으므로 모든 측정 데이터에 같은 량의 백래시가 포함된다. 오차 모델은 두 포즈 사이의 상대적 구속 운동에 의한 함수이므로 같은 량의 백래시가 포함된다면 그 영향은 상쇄되고, 기구학적 변수만 비용함수에 반영되는 함수가 된다. 또한 최소한의 방향 전환으로 구속운동을 생성하기 위해 위치제어를 적용했다. 인디케이터의 눈금을 읽어 설정 값에서 벗어난 량, $\{ \Delta D_1, \Delta D_2, \Delta D_3 \}$ 을 결정하고, 이를 "0"으로 하는 선형 액추에이터의 길이 조절 량을 계산한다. 이를 위해 측정위치에서 두 관계를 선형화 하는 3×6 의 자코비안 행렬, J_d 을 실험적으로 구한 후 현재 포즈에서 구속포즈를 만족하기 위한 선형 액추에이터의 길이 조절 량

$$\begin{aligned} & \{ \Delta L b_1, \Delta L b_2, \dots, \Delta L b_6 \}^T \\ & = (J_d^T J_d)^{-1} J_d^T \{ \Delta D_1, \Delta D_2, \Delta D_3 \}^T \end{aligned} \quad (17)$$

을 구해 액추에이터의 길이를 보상하여 구속조건을 만족하도록 한다. 자코비안 행렬을 얻기 위한 선형 액추에이터 길이 변화, 구속 포즈를 찾아가는 액추에이터의 길이보상 등은 모두 위치제어로 행해지며, 백래시를 차단하기 위해 운동량을 최소한 작게 한다. 실제 보정 데이터 측정에서 위 식을 두 번 이내로 실행하여 모든 구속 포즈를 만족한다. 위치제어를 이용한 보정 데이터에 대해 그 포즈를 재생했을 때 디지털 인디케이터의 오차는 $\pm 20 \mu m$ 이내로 속도제어 때보다 10배 이

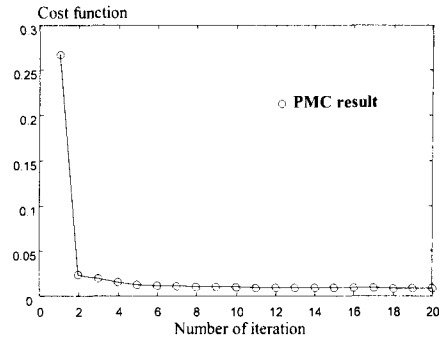


Fig. 6 Cost function vs. number of iterations with calibration data obtained by position control

Table 2 Kinematic parameters obtained by calibration process (unit : mm)

i	${}^B B_0 B_i$			${}^P P_0 P_i$			$L b_i^0$
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	0	0	0	0	0	0	850.12
2	-345.40	-198.78	-1.44	-319.60	-184.73	1.3	848.04
3	-1287.37	344.00	1.04	-437.02	-116.26	-0.18	851.93
4	-1286.92	743.71	1.19	-436.49	251.72	-1.09	848.44
5	-344.45	1287.84	-1.1	-321.19	318.64	0.48	851.75
6	-0.62	1089.02	-2.74	0.49	133.94	2.53	850.55

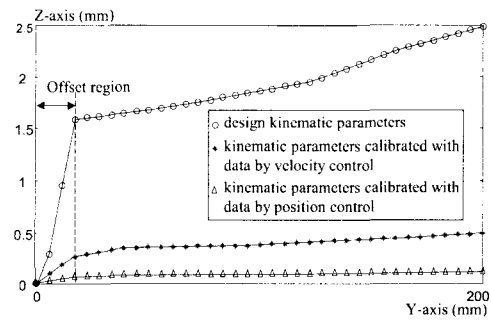


Fig. 7 Calibration results

상 향상을 가져왔다. 획득된 데이터를 최적화 알고리즘에 적용해 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. $C_{\psi}(\rho)$ 이 0.01까지 줄어들고 수렴 속도도 빠르다. 이는 위에서 제시한 방법이 보정 데이터의 측정오차를 $\pm 20 \mu m$ 이내로 줄이며, 백래시를 일률적으로 포함시키고, 측정노이즈를 줄여 구속조건을 잘 만족시키고 있기 때문이다. Table 2는 비용함수 값이 Fig. 6과 같이 수렴했을 때 얻은 기구학적 변수로 Table 1의 설계치수에 대해 2-3 mm의 오차를 가지고 있다.

지금까지 제시된 데이터 획득 방법과 보정 알고리즘의 성능을 점검하기 위해 플랫폼의 출력단에

디지털 인디케이터를 Z_w 축 방향으로 설치하고 테이블 면에 닿게 한 후 Y_w 축 방향으로 200 mm 이동했을 때 높이의 오차를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 실험결과는 설계치수를 기구학적 모델로 사용한 경우 2.5 mm의 높이오차를 가졌고, 속도제어로 생성된 데이터로 기구학적 변수를 보정한 경우 0.5 mm로 줄일 수 있었다. 위치제어로 생성된 데이터로 보정한 경우 0.13 mm까지 오차를 줄였으며 백래시 구간을 지나면 상대적인 오차가 20 μm 이내로 공작기계로서의 가능성을 보여준다.

7. 결론

구속연산자의 개념을 도입해 병렬기구형 공작기계의 보정작업을 실시했다. 구속평면을 하나만 설치함으로써 구속평면들 사이의 정밀한 치수 조정이 필요 없고, 구속평면에 월드 좌표계를 고정함으로써 추가적인 변수 없이 구속평면에 대해 측정된 보정 데이터가 베이스 좌표계로 환산되게 했다. 운동이 구속될 경우 보정 형상의 제한에 의해 기구학적 변수를 찾아내는 관측성이 떨어질 우려가 있다. 그러나 제안된 구속운동의 관측성 행렬이 36개의 랭크를 가져 필요한 모든 기구학적 변수를 찾는 데는 문제가 없었다.

속도제어를 이용해 구속운동을 생성할 경우 백래시가 많이 포함되어 만족할만한 결과를 얻지는 못했으나 위치제어를 이용해 4배 이상의 정밀도 향상을 가져와 200 mm를 이동할 때 130 μm 의 오차를 가졌다. 이는 보정작업을 실시하기 전 오차인 2.5 mm에 비해 획기적인 향상을 보였다.

연구결과는 구속연산자를 도입한 보정 알고리즘이 실제 시스템에 적용되어 획기적으로 정밀도를 향상시킬 수 있음을 보였으나 조인트에서 일어나는 백래시와 데이터를 오염시키는 측정 노이즈로 인해 일반 공작기계의 정밀도 수준에는 아직도 미치지 못하고 있음을 보여주고 있다. 향후 연구과제는 백래시를 극소화할 수 있는 정밀한 기구 제작, 백래시 예측 및 노이즈 보상이 가능한 보정방법 등이 개발되어야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Lee, M. K. Kim, T. S. and Park, K. W., 2000, "Development of a CNC Machining Tool with Stewart Platform," *Proc. of the ISIM, Kyongnam, Korea* pp. 270~274.
- (2) Masory, O. Wang, J. and Zhuang, H., 1993, "On the accuracy of a Stewart platform-Part II, kinematic calibration and compensation," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Atlanta, GA*, pp. 725~731.
- (3) Zhuang, H. Li, B. Roth, Z. S. and Xire, X., 1992, "Self-calibration and Mirror Center Offset Elimination of a Multi-beam Laser Tracking System," *Robot. Autonomous Syst.*, Vol. 9, pp. 255~269.
- (4) Masory, O. and Jiahua, Y., 1995, "Measurement of Pose Repeatability of Stewart Platform," *J. Robot. Syst.* Vol. 12, No. 12, pp. 821~832.
- (5) Desnard, S. Khalil, W., 1999, "Calibration of parallel robots using two inclinometers," *Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat. Detroit, Michigan*, pp. 1758~1763, May.
- (6) Zhuang, H. Wang, K. and Roth, S., 1995, "Simultaneous calibration of a robot and a hand-mounted camera," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 11, No. 5, pp. 649~660.
- (7) Wampler, W. Hollerbach, J. M. and Arai, T., 1995, "An implicit loop method for kinematic calibration and its application to closed-chain mechanisms," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 11, pp. 710~724.
- (8) Veitscherrer, W. K. and Wu, C. H., 1988, "Robot Calibration and Compensation," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 4, No. 6, pp. 643~655.
- (9) Bennett, D. and Hollerbach, J. M., 1991, "Autonomous calibration of single-loop closed kinematic chains formed by manipulators with passive endpoint constraints," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 7, pp. 597~606.
- (10) Zhuang, H. Motaghedi, S. H. and Roth, Z. S., 1999, "Robot calibration with planar constraints," *Proc. of the 1999 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat. Detroit, Michigan*, pp. 805~810, May.
- (11) Besnard, S. and Khalil, W., 2001, "Identifiable Parameters for Parallel Robots Kinematic Calibration," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., Seoul, Korea*, pp. 2859~2866.
- (12) 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.