

병렬기구형 공작기계의 보정 시스템 개발

김태성* · 박근우** · 윤태성** · 이민기**

Development of Kinematic Calibration System for a Parallel-typed Machining Center Tool

Tae Sung Kim, Kun Woo Park, Tae Sung Yoon and Min Ki Lee

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

Abstract

This research develops a low-cost and high accurate kinematic calibration method for a parallel typed machining center tool. A planar table is used for a mechanical fixture restricting the platform to place at the constrained pose and a low-cost and high accurate digital indicator is employed for a device checking if the constrained movement is satisfied within the established range. The kinematic parameters calibrated with respect to a single plane aren't influenced from the misalignment of the plane. A parameter observability is successfully obtained even through one planar constraint, which guarantees that the kinematic parameters is estimated by minimizing the cost function.

1. 서 론

기계 가공작업은 대부분 직교좌표형 공작기계에 의해서 행해진다. 그러나 복합형상을 가공하기 위해서는 가공 툴이 절삭부위에 자유롭게 접근할 수 있도록 툴의 위치뿐 아니라 자세도 조절되어야 한다. 따라서 툴의 위치와 자세 (포즈, Pose)를 동시에 생성할 수 있는 병렬기구형 공작기계 (PMCT, Parallel-typed Machining Center Tool)가 차세대 공작기계로 부각되고 있다⁽¹⁾. 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 수 (스튜워트 플랫폼의 경우 42개)가 많아 일반 공작기계에 크게 못 미친다⁽²⁾. 따라서 병렬기구가 공작기계에 적용되기 위해서는 정밀도를 향상시키기 위한 보정에 대한 연구가 절실히 필요하다.

기구학적 보정은 실제 기구학적 치수를 찾는 것으로 대략 3 단계로 나뉘어 이뤄진다. 즉, 1) 기구학을 해석하고, 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 측정된 치수를 교정하는 것이다. 위 단계 중 기구학 해석⁽³⁾, 최적화 연산^(4,5) 등은 컴퓨터의 발달로 더 이상 문제가 되지 않으나 실제 운동을 정확하게 측정하는 측정기술이 가장 큰 쟁점이 되고 있다.

출력운동을 측정하는 방법으로 플랫폼의 포즈를 레이저⁽⁴⁾나 경위⁽⁶⁾를 사용해 직접 측정하는 방

* 창원대학교 제어계측공학과 대학원

** 창원대학교 메카트로닉스공학부

법이 제시되었다. 이 방법은 보정의 목표인 플랫폼의 포즈를 직접 측정할 수 있다는 장점이 있으나 센서들이 외부에 설치돼 외적환경에 영향을 많이 받고, 온 라인 자체보상이 불가능하다는 단점이 있다. 유사한 방법으로 엔드 이펙터에 비전 카메라를 장착해 설정된 목표물과 영상 데이터 사이의 관계식으로부터 실제 포즈를 측정하는 방법이 로봇 보정에 사용되었다⁽⁷⁾. 그러나 3D 공간에서 포즈를 정확히 측정하는데는 고가의 장비가 필요하며 기술적으로 어려움이 많다. 따라서 Zhuang⁽⁸⁾ 과 Wampler 등⁽⁹⁾은 간접적인 방법으로 플랫폼의 포즈에 따라 피동적으로 회전하는 피동 조인트의 회전 각도를 측정하는 방법을 제안했다. 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.

본 연구에서는 운동을 구속하는 평면으로 고정밀로 쉽게 제작할 수 있는 정반 테이블을 사용하고, 구속조건을 점검하는 센서로 정밀도가 높고, 가격이 저렴한 디지털 인디케이터를 사용한다. 구속연산자를 정의하고, 이를 이용한 보정 알고리즘을 유도해 실제 제작된 병렬기구형 공작기계인 PMCT에 적용해 보정결과를 보인다. 시뮬레이션 결과와 실제 결과를 비교하면서 병렬기구의 특성을 보인다.

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 $x = [Q^T, p^T]^T$ 으로 출력링크의 포즈를 나타내는 6×1 벡터이다. $Q = [Q_x, Q_y, Q_z]^T$ 는 Euler 각도로 X, Y, Z-축에 대한 출력링크의 회전 각도이며, $p = [p_x, p_y, p_z]^T$ 는 출력링크의 위치를 X, Y, Z-축의 좌표 값으로 나타낸 것이다. 출력링크가 구속 없이 자유롭게 운동하면 임

의 포즈를 취하나 구속되면 구속조건을 만족시켜야 한다. 구속운동을 나타내기 위해 트위스트 (Twist) 좌표를 도입한다⁽²⁾. 공간상에서 이뤄지는 모든 물체의 운동은 트위스트 축을 중심으로 한 회전과 이송으로 나타낼 수 있다. 이를 6×1 의 트위스트 좌표 벡터로 나타내면

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

으로 (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 6-개 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

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

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

이다. 여기서 ${}^d n_j$ 는 설정된 운동량을 나타내며 \hat{n}_j 는 설정된 값으로부터 벗어난 오차로 픽스처의 가공오차 또는 측정 노이즈 등을 나타낸다. 한 개의 데이터에 대해서 일어나는 구속운동 수는 $k = \sum_{j=1}^6 c_j$ 으로 k -개의 좌표가 구속된다.

3. 오차모델

구속 연산자를 이용한 오차 모델을 식 (3)으로

부터 유도한다. 포즈 x_0 와 x_i 사이 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 구속이 이뤄진 좌표로만 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 으로 계산한 값은

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

이다. 같은 병렬기구이므로 식 (6)과 (7)의 결과는 같아야한다. 그러나 $\rho^o \neq \rho$ 으로 Γ_i 와 ${}^o \Gamma_i$ 는 일치하지 않아 오차 벡터, $\Delta \Gamma_i = \Gamma_i - {}^o \Gamma_i$ 가 유도된다. 실제 기구학적 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.

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

여기서 $J_\psi \equiv \nabla \Psi$ 으로 J_ψ 는 ρ 에 대한 자코비안 행렬이다. 식 (9)에서 식 (7)을 빼면

$$\Delta \Gamma_i \cong J_\psi d\rho \quad (10)$$

으로 오차 모델이 유도되고, 이로부터 비용함수는

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

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 많아야한다. 비용함수에 대한 정보가 충분히 확보되면 비선형 최적화 이론을 적용해 비용 함수 값을 최소화시키는 기구학적 변수 값 ρ 를 찾는다.

4. PMCT의 기구학적 변수

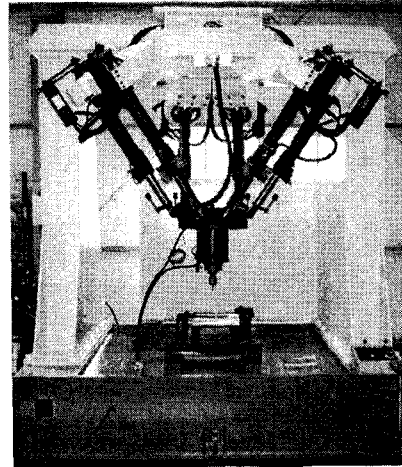


Fig. 1a The PMCT constructed for a machining center tool.

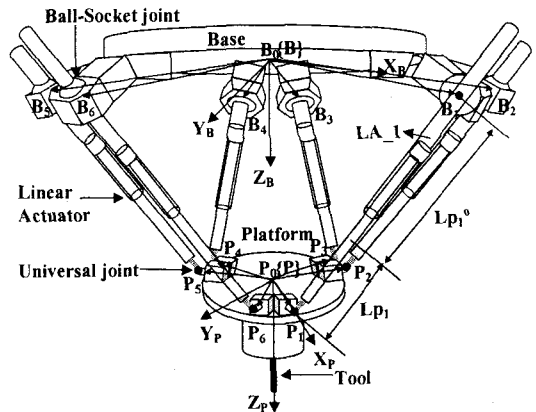


Fig. 1b Kinematic structure.

위에서 유도한 보정 알고리즘을 PMCT에 적용한다. 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 LA_i 하우징의 중간을 감싸 $\| \vec{B}_i \vec{P}_i \|$ 의 거리를 줄였다. 각 LA_i 는 링크 트레인을 형성하는데 5개의 회전 조인트 (볼-소켓, 유니버설)는 피동 조인트들이고, 1개의 선형 조인트 만 능동으로 LA_i 의 길이를 늘이고, 줄인다. 보정 작업을 위해 기준좌표와 기구학적 변수를 정의한다. 좌표 $\{B\}$ 와 $\{P\}$ 를 베이스와 플랫폼에 부여하고, 그 원점을 각각 B_0 와 P_0 라 한다. 각 좌표의 Z-축, Z_B 와 Z_P 는 평면에 수직방향으로 하고, X_B 와 X_P 는 각각 $\vec{B}_0 \vec{B}_1$ 과 $\vec{P}_0 \vec{P}_1$ 의 방향과 일치시키며, Y_B 와 Y_P 는 오른 나사 법칙에 의해 결정한다. 제어를 위한 능동 조인트의 운동량, Lp_i 는 $\| \vec{B}_i \vec{P}_i \|$ 에서 LA_i 의 오프셋 길이, Lp_i^0 를 뺀 값이다. 따라서 기구학적 변수는 $i=1, 2, \dots, 6$ 에 대해서 $\vec{B}_0 \vec{B}_i$, $\vec{P}_0 \vec{P}_i$, Lp_i^0 으로 총 42-개가 된다. 그러나 B_0 와 P_0 는 임의로 부여할 수 있는 점이므로 B_1 과 P_1 으로부터 정해진 거리에 있다면 $\vec{B}_0 \vec{B}_1$ 과 $\vec{P}_0 \vec{P}_1$ 은 아는 값이 된다. 따라서 찾아야 할 기구학적 변수의 수는 36-개로 줄어들며, 이들을 요소로 하는 36×1 의 기구학적 변수 벡터가

$$\rho = [(\vec{B}_0 \vec{B}_2)_x, (\vec{B}_0 \vec{B}_2)_y, \dots, (\vec{P}_0 \vec{P}_6)_y, (\vec{P}_0 \vec{P}_6)_z, Lp_1^0, Lp_2^0, \dots, Lp_6^0]^T \quad (12)$$

으로 정의되고, 능동 조인트 벡터는

$$q = [Lp_1, Lp_2, \dots, Lp_6]^T \quad (13)$$

으로 정의된다.

5. 보정 알고리즘 적용

구속 연산자를 이용한 오차 모델로 보정작업을 실시한다. 운동을 구속하기 위해 $400 \times 400 \text{ mm}^2$ 의 면적에서 평면도가 $5 \mu\text{m}$ 이내인 정반 테이블

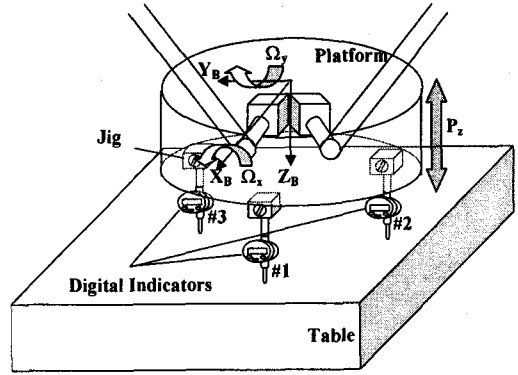


Fig. 2. Constrained movement inspected by three digital indicators.

을 플랫폼 밑에 베이스와 나란히 설치하고, $1 \mu\text{m}$ 의 정밀도와 25 mm 의 스트로크를 갖는 디지털 인디케이터를 플랫폼에 설치한다. 인디케이터의 접촉 볼이 테이블 면과 맞닿아 변위량을 측정하고, 이를 디지털 값으로 표시한다. 테이블이 출력 링크의 운동을 구속하는 픽스처이므로 보정결과는 테이블 평면을 기준으로 환산된다. 따라서 테이블이 베이스에 대해서 나란히 놓여지지 않을지라도 경사각을 감안해 기구학적 변수 값이 결정된다.

운동을 구속하는 방법으로 플랫폼의 높이와 자세를 테이블 평면과 같게 구속하는 방법을 택한다. 디지털 인디케이터 3-개를 Fig. 2와 같이 등간격으로 설치해 Z_B -축 방향의 변위량을 측정하도록 한다. 테이블 면이 평행하므로 X_B 와 Y_B -축을 중심으로 플랫폼이 회전하거나 Z_B -축 방향으로 이동하면 인디케이터의 눈금은 변한다. 따라서 3-개의 인디케이터 눈금이 변하지 않으면서 이동했다면 위 3-좌표가 구속되어 $C = \text{diag}(1, 1, 0, 0, 0, 1)$ 이다. 즉, 식 (2)에서 정의한 트위스트 좌표 중 첫 번째와 두 번째 좌표 (Ω_x, Ω_y) 그리고 여섯 번째 (p_2) 좌표는 구속되고, 나머지는 자유롭게 운동한다. 두 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. 구속운동 수는 $k=3$ 으로 1-개의 데이터로부터 3-개의 독립된 식을 얻을 수 있어 36-개의 기구학적 변수를 보정하는데 25-여 개의 데이터로 가능하다. 테이블을 25-개의 영역으로 골고루 나눠 각 영역으로부터 데이터를 취득한다. 플랫폼을 초기 포즈로부터 측정 포즈에 이동시키고, 3-개의 디지털 인디케이터의 눈금이 모두 영점으로부터 설정된 값 이내를 벗어나

지 않을 때 m q_i 을 읽었다. 백래시에 오염되지 않은 보정 데이터를 획득하기 위해 구속포즈에 접근하는 방향을 일정하게 하고, 최소한의 방향 전환으로 구속포즈를 찾아가는 방법을 적용했다.

플랫폼을 중앙에서 상하 반복운동 시킨 후 각각의 측정 포즈로 이동시킨다. 상하 반복운동은 다른 방향의 백래시 영향을 차단시키기 위함이고, 중앙으로부터의 접근은 각 측정 포즈에 접근하는 방향을 항상 일정하게 함이다. 최소한의 방향 전환으로 구속운동을 생성하기 위해 인디케이터의 눈금을 읽어 설정 값에서 벗어난 량, $\{\Delta D1, \Delta D2, \Delta D3\}$ 을 결정하고, 이를 "0"으로 하는 선형 액추에이터의 길이 조절 량을 계산한다. 이를 위해 측정위치에서 선형 액추에이터의 단위 길이를 변화시켜 디지털 인디케이터 값의 변화량을 측정하고, 두 관계를 선형화 시키는 3×6 의 자코비안 행렬, J_d 을 구한 후 현재 포즈에서 구속포즈를 만족하기 위한 선형 액추에이터의 길이 조절 량

$$\{\Delta Lp_1 \Delta Lp_2 \dots \Delta Lp_6\}^T = (J_d^T J_d)^{-1} J_d^T \{\Delta D1, \Delta D2, \Delta D3\}^T \quad (14)$$

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 위식을 세 번 실행해 모든 구속 포즈를 찾아가다. 획득된 데이터를 최적화 알고리즘에 적용해 보정 작업을 실시해 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다.

보정 시스템의 성능을 점검하기 위해 플랫폼의 출력단에 디지털 인디케이터를 Z-축 방향으로 설치하고 테이블면에 닿게 한 후 Y-축 방향으로 200 mm 이동했을 때 높이의 오차를 측정한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 운동을 생성할 때 제어기의 기구학적 변수는 설계 값, 보정한 값을 각각 적용하여 보았다.

실험결과를 설계치수를 기구학적 모델로 사용한 경우 2.5 mm의 높이오차를 가졌으나 이를 보정할 경우 0.13 mm까지 오차를 줄였으며 백래시 구간을 지나면 상대적인 오차가 20 μ m 이내로 공작기계로써의 가능성을 보여준다. 그러나 아직도 공작기계에서 요구하는 10 μ m의 정밀도를 만족시키기 위해서는 풀어야 할 과제가 많다. 정밀한 부품 가공, 조립 공차관리, 픽스처 제작, 측정

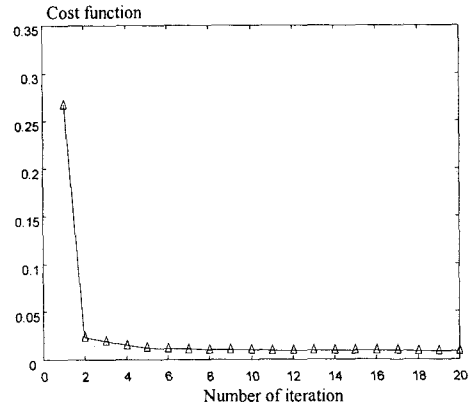


Fig. 3 Cost function vs. number of iterations.

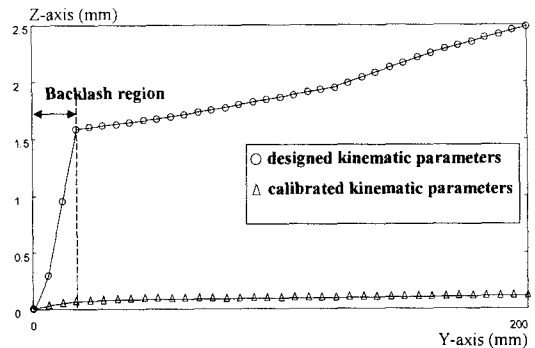


Fig. 4 Calibration results.

노이즈의 제거 등이 이뤄져야된다.

6. 결론

병렬기구의 보정작업을 위한 알고리즘을 개발하고, 이를 병렬기구형 공작기계에 적용했다. 구속연산자의 개념을 도입해 두 포즈 사이의 구속운동량을 설정하고, 이것을 만족할 때 능동 조인트의 운동량을 읽어 기구학적 모델 속에 있는 변수 값으로 구속운동량을 계산했다. 설정한 구속운동량과 비교해 오차를 구하고, 이를 최소화할 수 있는 기구학적 변수를 병렬기구의 실제 변수로 하여 보정작업을 실시했다. 구속조건을 점검하는 센서로 정밀도가 높고, 가격이 저렴한 디지털 인디케이터를 사용했으며 운동을 구속하는 픽스처로 쉽게 제작할 수 있는 평면 테이블을 하나만 사용했다. 관측성을 충분히 확보하기 위해 세 개의 디지털 인디케이터를 플랫폼에 설치해 초기 포즈의 영점을 유지하면서 구속운동을 생성함으로써 X_B 와 Y_B 축을 중심으로 한 회전운동과 Z_B 축 방향의 이동운동을 구속했다.

보정작업은 획기적으로 정밀도를 향상시켰으나 공작기계에서 요구하는 $10\ \mu\text{m}$ 의 정밀도에는 못 미쳤다. 백래시 영역이 뚜렷이 나타나며 그 영향은 $200\ \mu\text{m}$ 내외로 병렬기구가 이론과 같이 구동되고있지 않음을 보여주었다. 그러나 백래시 구역을 벗어나면 상대 정밀도는 $20\ \mu\text{m}$ 이내로 요구되는 정밀도에 근접하고 있으며 반복정밀도도 $2\ \mu\text{m}$ 이내로 아주 높다. 위 연구결과로부터 병렬기구 보정의 가능성과 어려움을 발견하게된다. 향후 연구과제는 백래시를 극소화할 수 있는 정밀한 기구 제작이 이뤄져야하며, 조인트좌표 상에서 또는 직각좌표 상에서 백래시를 예측하고, 보상할 수는 알고리즘이 개발되어야하고, 다음으로 노이즈를 보상할 수 있는 연구가 병렬기구의 특성에 맞게 이뤄져야한다.

후기

이 논문은 2000년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

참고문헌

- (1) 이민기, 최병오, 김태성, 박근우, 2000, "병렬기구형 CNC 공작기계의 개발," 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp. 535-540.
- (2) J. M. Hollerbach, 1989, "A survey of kinematic calibration," The Robot Rev. I.O. Khatib et al., Eds. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 207-242.
- (3) Min Ki Lee and Kun Woo Park, 1999, "Kinematic and Dynamic Analysis of a Double Parallel Manipulator for Enlarging Workspace and Avoiding Singularities", IEEE Trans. on Robot. and Automat., Vol.15, No.6, pp. 1024-1034.
- (4) H. Zhuang, J. Yan, and O. Masory, 1998, "Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing kinematic residuals," J. Robot. Syst., Vol. 15, No. 7, pp. 395-405.
- (5) W. Wampler, J. M. Hollerbach, and T. Arai, 1995, "An implicit loop method for kinematic calibration and its application to closed-chain mechanisms," IEEE Trans. Robot. Automat., Vol. 11, pp. 710-724.
- (6) S. Desnard, W. Khalil, 1999, "Calibration of parallel robots using two inclinometers," Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Robot. Automat. Detroit, Michigan, pp. 1758-1763.
- (7) H. Zhuang, K. Wang and S. Roth, 1995, "Simultaneous calibration of a robot and a hand-mounted camera." IEEE Trans. Robot. Automat., Vol. 11, No. 5, pp. 649-660.
- (8) H. Zhuang, 1997, "Self-Calibration of Parallel Mechanisms with a Case Study on Stewart Platforms," IEEE Trans. on Robot. automat., Vol. 13, No. 3, pp. 387-397.