

여유구동 병렬기구의 기구학적 보정

정재일*, 김종원(서울대 기계항공공학부)

Kinematic Calibration Method for Redundantly Actuated Parallel Mechanisms

Jay il Jeong*, Jongwon Kim(School of Mechanical & Aerospace Engineering, SNU)

ABSTRACT

To calibrate a non-redundantly actuated parallel mechanism, one can find actual kinematic parameters by means of geometrical constraint of the mechanism's kinematic structure and measurement values. However, the calibration algorithm for a non-redundant case does not apply for a redundantly actuated parallel mechanism, because the angle error of the actuating joint varies with position and the geometrical constraint fails to be consistent. Such change of joint angle error comes from constraint torque variation with each kinematic pose (meaning position and orientation). To calibrate a redundant parallel mechanism, one therefore has to consider constraint torque equilibrium and the relationship of constraint torque to torsional deflection, in addition to geometric constraint. In this paper, we develop the calibration algorithm for a redundantly actuated parallel mechanism using these three relationships, and formulate cost functions for an optimization algorithm. As a case study, we executed the calibration of a 2-DOF parallel mechanism using the developed algorithm. Coordinate values of tool plate were measured using a laser ball bar and the actual kinematic parameters were identified with a new cost function of the optimization algorithm. Experimental results showed that the accuracy of the tool plate improved by 82% after kinematic calibration in a redundant actuation case.

Key Words: Parallel Mechanism, Redundant Actuation, Kinematic Calibration, Laser ball bar

1. 서론

여유구동 병렬기구는 특이점 문제⁽¹⁾에 의한 병렬기구의 작업공간의 축소를 해결하기 위한 방법으로, 기구의 운동자유도보다 많은 수의 구동기를 부착하여 기구를 제어하는 병렬기구로 정의된다. 병렬기구를 여유구동시키는 경우 작업영역 내부에 존재하는 특이점영역의 크기를 줄이거나 제거할 수 있어 작업영역을 늘릴 수 있는 장점을 가지고 있다.

그러나, 정밀도 측면에서 보면 운동자유도보다 많은 수의 구동기에 의하여 내력이 발생하는 문제가 새롭게 발생하게 되며, 이와 같은 내력에 의하여 기구의 정밀도가 영향을 받게 되는 단점이 있다.

따라서, 여유구동되는 병렬기구의 보정을 수행하기 위해서는 기하학적 구속조건 외에도 내력에 의한 기구자세의 변화에 대한 고찰이 필요하다. 본 연구에서는 일반적인 여유구동 병렬기구에 사용할 수 있는 기구학적 보정방법에 대한 새로운 방법론을 제시하고자 한다. 이를 위하여, 기구학적 매개변

수오차와 각 관절의 센서오차에 의한 제어오차가 말단장치의 위치 및 자세오차에 미치는 영향을 해석적으로 확인하고, 오차에 의하여 발생하는 내력과 내력에 의해 발생하는 각 관절의 비틀림변형에 대한 해석방법을 제시하고자 한다. 마지막으로, 이론을 확인하기 위하여 여유구동되는 2 자유도 병렬기구에 대하여 검증실험을 수행하여 이론을 확인한다.⁽²⁾

2. 여유구동 병렬기구의 보정이론

2.1 여유구동에 의한 오차전파관계식

현재까지 제시된 기구학적 보정방법⁽³⁻⁸⁾은 직렬기구나 여유구동되지 않는 병렬기구를 대상으로 하고 있다. Fig. 1에서 보듯이 여유구동되지 않는 병렬기구의 경우 관절 각도오차, 가공오차, 조립오차에 의한 기구학적 매개변수의 오차에 의하여 말단장치의 위치오차가 확정적으로 결정된다. 즉, 말단장치의 위치오차 혹은 수동 관절에 부착된 각도 센서로

부터 각 관절의 제어오차나 기구학적 매개변수오차를 구할 수 있다.

그러나, Fig. 2에서 보듯이 병렬기구를 여유구동시키는 경우에는 운동자유도보다 많은 수의 구동기에 의하여 대상기계에 구속력(constraint force)이 발생하여 말단장치의 위치오차가 기하학적인 구속조건만으로 구해지지 않게 된다. 기구변수의 오차가 있는 경우에 발생하는 내력은 기구의 자세에 따라 비선형적으로 변화하며, 이에 따라 각 관절에서의 비틀림 변형 또한 비선형적으로 변화하게 된다. 비선형적인 비틀림 변형은 기구자세에 따라, 각 관절이 제어지령 각도에서 임의의 각도오차를 가진다는 것을 의미하는 것이다.

이와 같이 여유구동되는 병렬기구의 오차전파관계식을 유도하기 위해서는 다음의 3 가지 관계식을 수식화할 필요가 있다.

- 구동관절에서의 내력토크와 각도오차의 관계식
- 정지평형상태에서의 내력토크의 평형 관계식
- 기하학적 제한조건에 의한 각도오차사이의 관계식

2.2 구동관절에서의 내력토크와 각도오차의 관계식

여유구동 병렬기구에서 발생하는 내력과 구동관절에서 발생하는 처짐사이의 관계식을 유도하기 위하여, 2개의 구동기로 구동되는 4절링크에 대한 해석을 해보기로 한다. 해석대상이 되는 4절링크는 기저부(base frame)에 부착되어 있는 2개의 관절이 2개의 구동기로 여유구동되는 1자유도 4절링크 구조로 이루어져 있다. 문제를 간단하게 하기 위하여 4절링크는 평면 상에 존재하며 중력의 영향은 받지 않는다고 가정한다. 또, 내력에 의해서 발생하는 처짐은 각 구동관절에서 발생하는 탄성변형에 의한 처짐이라고 가정한다. 이와 같은 가정은 일반적으로 각 구동기에 부착된 감속기의 강성이 링크의 강성보다 낮아 내력에 의하여 발생하는 기구의 탄성변형이 각 구동관절의 탄성변형으로 집중된다는 가정에 의한 것이다.

Fig. 3에 2개의 구동기에 의하여 여유구동 4절링크의 구조가 제시되어 있다. 기구학적 매개변수 오차가 없다고 가정하고 여유구동되는 2개의 구동기중 오직 1번 구동기에만 엔코더 인덱싱오차 Δq_1 이 있다고 가정한다. 이 경우 여유구동되는 4절링크의 각 구동관절에 걸리는 토크는 다음 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_1 = k_1(\Delta q_1 - dq_1), \quad \tau_4 = -k_4 dq_4 \quad (1)$$

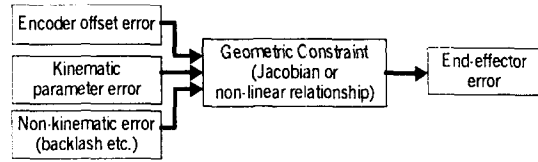


Fig. 1 Error propagation mechanism of non-redundantly actuated parallel mechanism.

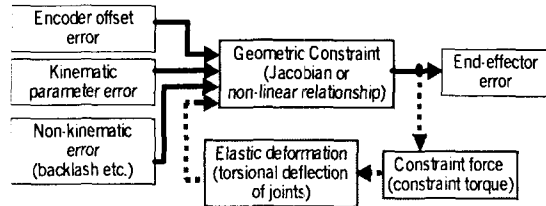


Fig. 2 Error propagation mechanism of redundantly actuated parallel mechanism.

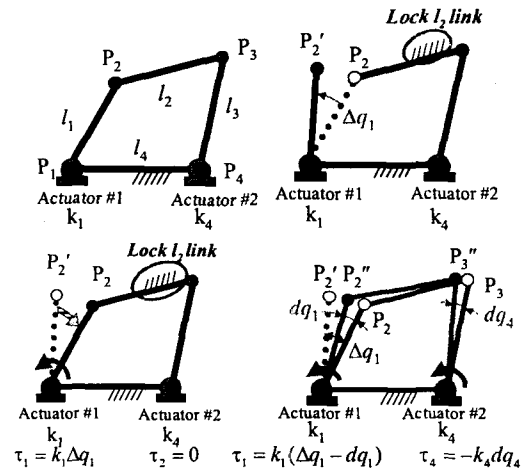


Fig. 3 Relationship between constraint torque and torsional deflection of redundantly actuated 4-bar linkage

위 식(1)은 구동기 1번이 부착된 P_1 관절의 경우 엔코더 인덱싱오차 Δq_1 이 존재하고, 구동기 2번이 부착된 P_4 관절의 경우에는 엔코더 인덱싱오차가 없다고 가정한 경우($\Delta q_4 = 0$)의 내력토크 결과이다. 즉, 일반적으로 각 구동축에 걸리는 내력토크는 엔코더 인덱싱오차와 지령각도에서 실제로 변화한 각도의 차이에 각 구동축의 비틀림강성을 곱한 값으로 나타나는 것을 알 수 있다. 여유구동 4절링크에 대한 해석을 통하여, 여유구동되는 병렬기구에서 기구학적 오차가 발생할 경우에 각 구동관절에 걸리는 독립적으로 결정할 수 있으며, 각 축에서 발생하는 내력토크는 각 구동기의 엔코더 인덱싱오차와 내력에 의해 실제로 변형된 각도사이의 차이와 관계가

있음을 알 수 있다. 이것을 일반화된 수식으로 쓰면 다음과 같다.

$$\tau_r = K(\Delta q_r - dq_r) \quad (2)$$

여기서, τ_r 은 구동기가 장착된 l 개의 관절에 걸리는 토크이며, K 는 l 개의 구동관절의 비틀림 강성을 원소로 가지는 대각 행렬(diagonal matrix)로 정의된다. Δq_r 은 구동관절에 부착된 구동기의 엔코더 인덱싱오차 벡터이며, dq_r 은 구동관절의 각도오차 벡터이다.

2.3 기하학적 제한조건에 의한 각도오차사이의 관계식

병렬기구는 링크사이에 폐연쇄(closed loop)가 존재하기 때문에 독립관절과 종속관절사이에 일정한 함수관계가 존재한다. 즉, 독립관절의 각도를 결정되게 되면, 함수관계에 의하여 종속관절의 각도가 결정되게 되는 것이다. 각도들 사이의 이러한 함수관계는 병렬기구에서의 구속조건식으로부터 구할 수 있으며, 기구학적 매개변수와 엔코더 인덱싱오차를 포함하는 구속조건식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(q_u + dq_u, q_v + dq_v, \rho + \Delta\rho) = 0, \quad (3)$$

위 식에서 $\Delta\rho$ 는 기구학적 매개변수오차, dq_u 는 독립관절에서의 각도오차벡터, dq_v 는 종속관절에서의 각도오차벡터를 나타낸다. 각 관절에서의 미소변형이 지령각도에 비하여 매우 작다고 가정하면, 식(3)은 테일러 정리의 1차 편미분항만을 고려할 경우 다음 식과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial g}{\partial q_u} dq_u + \frac{\partial g}{\partial q_v} dq_v + \frac{\partial g}{\partial \rho} \Delta\rho = 0, \quad (4)$$

종속관절에 대한 구속자코비안의 랭크가 풀랭크(full rank)인 경우(구동기 특이점이 아닌 경우)에는 종속관절에 대한 구속자코비안의 역행렬이 존재하고 이 역행렬을 식(4)에 곱하게 되면 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$dq_v = \Phi dq_u + J_p \Delta\rho \quad (5)$$

where, $\Phi = -\left(\frac{\partial g}{\partial q_v}\right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial q_u}$, $J_p = -\left(\frac{\partial g}{\partial \rho}\right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial \rho}$

식(5)는 기구학적 오차가 있을 경우의 병렬기구의 기하학적 제한조건에 의하여, 독립관절의 미

소변위와 종속관절의 미소변위사이에서 발생하는 관계를 나타내는 식이다.

또, 구동관절벡터 q_r , 전체관절벡터 q_{all} , 독립관절벡터 q_u , 종속관절벡터 q_v 사이의 관계식은 다음 식(6)과 같이 나타낸다.

$$q_r = Vq_{all} = VU \begin{bmatrix} q_u \\ q_v \end{bmatrix}, \quad (6)$$

여기서, U 는 독립관절과 종속관절의 벡터를 전체관절벡터로 바꾸는 변환행렬이며, V 는 전체관절벡터 중에서 구동관절벡터를 추출하는 행렬이다.

위와 같은 식(6)을 이용하여, 식(5)을 구동관절에서의 미소변위량과 독립관절에서의 미소변위량사이의 관계로 변환하면 다음 식(7)과 같이 표시할 수 있다.

$$dq_r = \Gamma dq_u + H \Delta\rho, \quad (7)$$

where, $\Gamma \equiv VU \begin{bmatrix} I_n \\ \Phi \end{bmatrix}$, $H \equiv VU \begin{bmatrix} 0_n \\ J_p \end{bmatrix}$

식(7)에서 살펴보면, 구동관절에서 발생하는 미소변위벡터 dq_r 은 독립관절의 미소변위벡터 dq_u 와 각 기구학적 매개변수의 오차벡터 $\Delta\rho$ 의 함수로 표시할 수 있음을 알 수 있다. 또, 구동관절과 독립관절의 미소변위사이의 관계를 나타내는 구속자코비안 Γ 와 기구학적 매개변수오차와의 관계를 나타내는 식별자코비안 H 는 기준위치에 따라 변화하게 되므로, 각 지령자세에 따라 미소변위사이의 관계가 변화하는 것을 알 수 있다.

2.4 정지평형상태에서의 내력토크 평형관계식

여유구동 병렬기구가 정적평형을 이루고 있는 상태에서, 구동기의 숫자가 운동자유도보다 많을 경우, 각 관절에 걸리는 내력토크는 유일하게 결정되지 않으며 이와 같은 문제를 힘 여유도 문제라고 한다. 그러나, 여유구동 병렬기구에 발생하는 내력은 무한개의 해를 가지지는 않지만, 서로 독립적인 해를 가지지는 것은 아니다. 즉, 여유구동되는 병렬기구의 구동관절에 걸리는 내력은 기구의 구조와 자세에 대하여 일정한 함수관계를 가지게 된다. 이와 같은 관계를 유도하기 위하여, 여유구동 병렬기구가 정적평형 상태일 경우의 내력토크와 대상기구에 가해지는 외력간의 관계를 가상일정리를 이용하여 해석한다.

가상일정리에 의하면, 정적평형상태에서 대상기구에 부가되는 외력이 미소변위에 대하여 하는 일의 양은 각 관절이 하는 일의 양과 동일하다. 이를

수식으로 쓰면 다음과 같다.

$$\tau_r^T dq_r = (Q + N(q_u))^T dx, \quad (8)$$

말단장치에서의 변위 dx 와 구동관절의 미소변위 벡터 dq_r 을 독립관절에서의 변위로 변환하면 다음과 같다.

$$\tau_r^T (\Gamma dq_u + H \Delta \rho) = (Q + N(q_u))^T J_f dq_u \quad (9)$$

위식에서 Γ 는 독립관절과 구동관절사이의 구속자코비안이며, J_f 는 독립관절 q_u 와 말단장치의 위치사이의 정방향자코비안, Q 는 외력, N 는 말단장치에서의 힘으로 변형된 중력으로 정의된다.

위 식(9)에서 링크의 길이등의 기구학적 매개변수오차 $\Delta \rho$ 는 기구의 자세에 대하여 변화하지 않는다고 가정하면, 구동관절의 각도오차를 제외한 기구의 변형이 외력이나 내력에 의해 하는 가상 일은 0 이 된다. 따라서, 식(9)는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\Gamma^T \tau_r = P, \quad (10)$$

$$\text{where, } P \equiv J_f^T (Q + N(q_u))$$

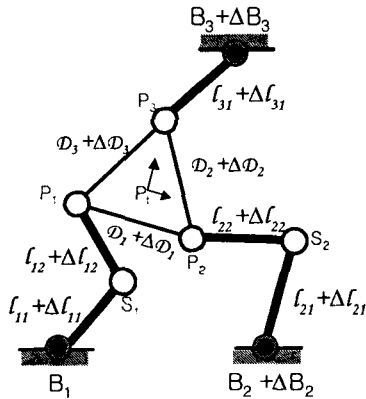


Fig. 4 Schematic of 2-DOF parallel mechanism including kinematic error

Table 1 Kinematic parameter errors for calibration

$\Delta l_{11}, \Delta l_{12}, \Delta l_{21}, \Delta l_{22}, \Delta l_{31}$	Link length error
$\Delta B_{2Y}, \Delta B_{3X}, \Delta B_{3Y}$	Base joint positional error
$\Delta D_1, \Delta D_2, \Delta D_3$	Tool plate length error
$\Delta P_{1x}, \Delta P_{1y}$	Positional error of end effector
$\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3$	Encoder indexing errors

2.5 여유구동 병렬기구의 오차전파관계식 수식화와 최적화 관계식의 유도

위에서 유도된 식(2), (7), (10)을 이용하여, 여유구동 병렬기구의 각 오차 원인과 변형된 기구자세사이의 관계식을 구하면, 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dq_r = \Lambda \Delta q_r + (I - \Lambda) H \Delta \rho - \Gamma (\Gamma^T K \Gamma)^{-1} P \quad (11)$$

$$\text{where, } \Lambda \equiv \Gamma (\Gamma^T K \Gamma)^{-1} \Gamma^T K$$

즉, 엔코더 인덱싱오차 Δq_r 과 기구학적 매개변수오차 $\Delta \rho$ 에 의한 여유구동 병렬기구의 자세오차를 식(11)로부터 계산할 수 있다.

위 식(11)을 이용하면, 일정한 엔코더 인덱싱오차와 기구학적 매개변수오차에 대한 전체 관절의 각도오차를 계산할 수 있다. 병렬기구의 정기구학식의 경우 독립관절의 값을 이용하여 해석적인 해를 구하기 힘들지만 기구를 구성하는 전체 관절의 값을 아는 경우에는 해석적인 해를 구할 수 있다. 따라서, 오차를 포함하는 말단장치의 위치 좌표를 계산할 수 있으므로, 이 경우의 최적화 목적함수는 다음 식(12)와 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_{\Delta q_r, \Delta \rho} \sum_{i=1}^N \|e_{t,i}\|^2 &= \min_{\Delta q_r, \Delta \rho} \sum_{i=1}^N \left(\|\hat{P}_{t,i} - (P_{t,i} + dP_{t,i})\|^2 \right) \\ &= \min_{\Delta q_r, \Delta \rho} \sum_{i=1}^N \left(\|\hat{P}_{t,i} - h(q_u, \rho + \Delta \rho, \Delta q_r, P)\|^2 \right) \end{aligned} \quad (12)$$

3. Case Study: 여유구동 2 자유도 병렬기구의 보정

3.1 2 자유도 병렬기구의 제한조건식

여유구동 병렬기구의 보정이론을 검증하기 위하여, 평면상에서 2 자유도로 운동하는 기구⁽⁹⁾를 대상으로 실험을 수행하였다. 기구는 지지부에 부착된 3 개의 관절에 서보모터가 부착되어 여유구동을 수행하게 된다. Fig. 4 에 엔코더 인덱싱오차와 기구학적 오차를 포함하는 2 자유도 병렬기구의 개념도를 제시하였으며, 각 오차를 Table 1 에 제시하였다.

오차를 포함하는 2 자유도 병렬기구의 제한조건식은 다음 식(13), (14)와 같이 나타난다. 이 식(13), (14)를 편미분하여, 구속자코비안 Γ , 식별 자코비안 H 를 각각 수식화할 수 있다.

$$g(q) = 0 : \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|P_1 - P_2\|^2 - (D_1 + \Delta D_1)^2 \\ \|P_2 - P_3\|^2 - (D_2 + \Delta D_2)^2 \\ \|P_3 - P_1\|^2 - (D_3 + \Delta D_3)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$P_i = \left[\begin{array}{l} (l_{i1} + \Delta l_{i1}) \cos(q_i + dq_i) + (l_{i2} + \Delta l_{i2}) \cos(q_i + dq_i + q_{i+3} + dq_{i+3}) \\ (l_{i1} + \Delta l_{i1}) \sin(q_i + dq_i) + (l_{i2} + \Delta l_{i2}) \sin(q_i + dq_i + q_{i+3} + dq_{i+3}) \end{array} \right] + B_i + \Delta B_i \quad (i=1,2,3, q_6=0, l_{32}=0) \quad (14)$$

3.2 실험대상기계

보정실험을 위하여, Fig. 5 와 같은 실제 기구를 제작하였다. 실험대상기계 각부의 설계변수는 Table 2 와 같다. 각 구동축은 서보모터에 의하여 제어되며, 하모닉드라이브를 이용하여 구동토크 증폭을 수행한다.

기저부에 부착된 구동축의 강성은 실험을 통하여 측정하였으며, 그 결과는 Table 3 과 같다. 이와 같이 측정된 각 구동축의 강성값은 식(11)의 K 행렬을 결정하는 데 사용된다.

3.3 레이저 볼바를 이용한 위치오차의 측정

Fig. 6 과 같이 여유구동 2 자유도 병렬기구의 전체작업영역에 대하여 총 35 점의 측정점을 결정하였다. 레이저 볼바를 이용하여 각 측정점에서의 위치결정정밀도를 측정하였다. Fig. 7 과 같이 대상기계 상단에 레이저 볼바의 볼소켓을 장치하고 3 변측정법을 이용하여, 측정을 수행하였다.

측정을 수행한 결과가 Fig. 9 에 보정전 측정값으로 제시되어 있다. X 축방향 위치오차, Y 축방향 위치오차, 측정위치와 지령위치사이의 거리오차의 3 가지 방법으로 각 측정점에서의 위치결정오차를 표시하였다. 측정결과 X 축방향으로 -0.213mm 에서 1.272mm , Y 축방향으로 -1.200mm 에서 0.452mm 의 위치결정오차가 존재하는 것을 확인하였으며, 이 오차는 거리오차로 최소 0.263mm , 최대 1.416mm 의 값으로 나타난다.

이와 같이 측정된 각 측정점에서의 거리오차와 실험으로 구한 강성값을 이용하여 식(12)의 최적화 목적함수를 구성한 후 기구학적 매개변수 오차를 구한 값을 Fig. 8 에 제시하였으며, 보정을 수행한 결과가 Fig. 9 에 보정후 측정값으로 제시하였다.

보정을 수행한 결과 거리오차 기준으로 보정전 1.416mm 의 위치결정정밀도 오차가 0.243mm 로 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이 값은 82%의 위치결정정밀도 향상을 의미한다.



Fig. 5 Photograph of 2-DOF experimental stand.

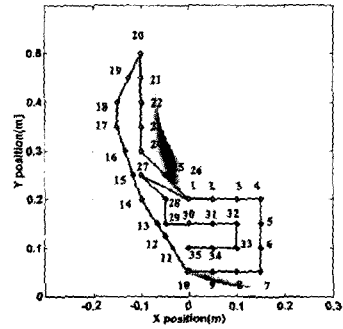


Fig. 6 Measuring points on whole workspace.

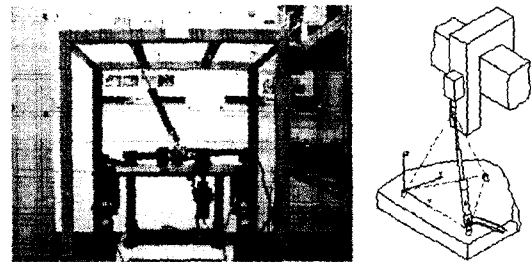


Fig. 7 Laser Ball Bar measurement setup.

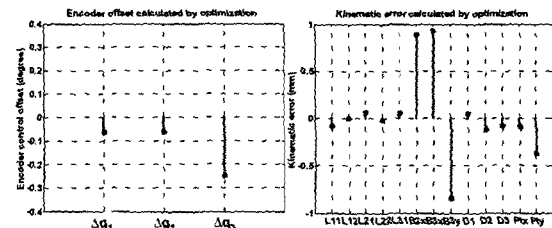


Fig. 8 Kinematic parameter error found by optimization

Table 2 Specification of 2-DOF experimental stand.

Legend	Meaning	Value
D	A side of tool platform	215 mm
L	Length of link	280 mm
B_1	1 st actuating joint	(-300mm, 0mm)
B_2	2 nd actuating joint	(300mm, 0mm)
B_3	3 rd actuating joint	(150mm, 420mm)

Table 3 Torsional stiffness of actuating joints.

Actuator No.	Torsional stiffness (Nm/radian)
1	8360
2	7750
3	8390

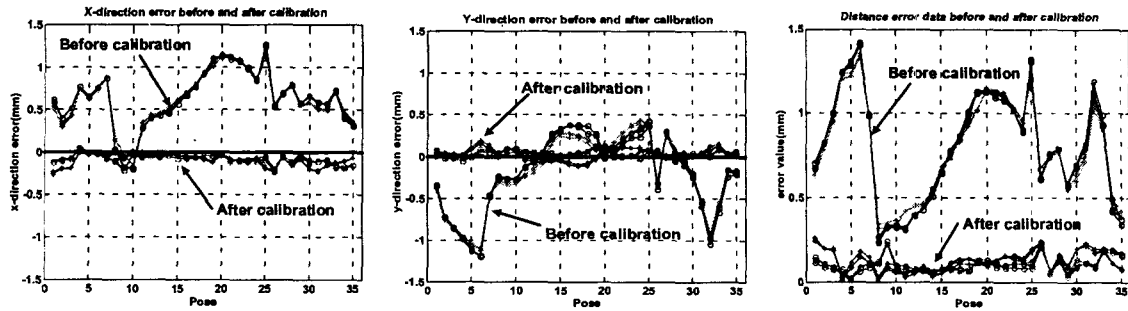


Fig. 9 Comparison for accuracy and repeatability before and after calibration

4. 결론

여유구동되는 병렬기구의 기구학적 매개변수 오차나 각 구동기의 엔코더 인덱싱오차가 있는 경우 운동자유도를 초과하는 구동기에 의하여 기구에는 내력이 발생하게 되며, 기구의 자세가 내력 평형 상태로 변화하게 된다. 따라서, 여유구동되는 병렬기구의 보정을 수행하기 위해서는 기구의 구조에 의한 구속조건 외에도 여유구동시에 발생하는 내력에 대한 해석과 내력에 의해 발생하는 변형에 대한 해석이 필요하다.

이를 위하여, 본 논문에서는 여유구동 병렬기구에 기구학적 오차나 엔코더 인덱싱오차가 발생하였을 경우, 이들 오차가 기구자세에 영향을 미치는 여유구동 병렬기구의 오차전파 메커니즘에 대한 해석을 수행하였다. 유도된 여유구동 병렬기구의 오차전파 메커니즘으로부터 여유구동 병렬기구의 보정을 위한 최적화 목적함수를 구성하였으며, 제시된 이론적인 해석을 검증하기 위하여 3 개의 구동기로 구동되는 2 자유도 평면형 병렬기구에 대한 보정실험을 수행하였다. 보정을 위하여 각 구동기의 정적강성을 실험으로 구하였으며, 말단장치의 위치좌표를 레이저볼바를 이용하여 측정하였다. 여유구동 2 자유도 병렬기구의 보정을 수행한 결과, 각 측정점에서 기준값과의 거리오차가 보정전의 1.416mm 에서 오차보정후에 0.243mm 로 약 82%만큼 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 과학기술부에서 주관하는 국가지정연구실 사업과 서울대학교 BK21 프로그램에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. Park, F.C. and Kim, J.W., 1999, "Singularity Analysis of Closed Kinematic Chains," *AMSE J. Mechanical Design*, 121(1), pp. 32-38.
2. 정재일, 2002, "여유구동 병렬기구의 기구학적 보정," 공학박사논문, 서울대학교.
3. Patel, A.J., 1998, "Error analysis and accuracy enhancement of a hexpod machine tool," Ph.D Thesis, Northwestern University. Evanston, Illinois.
4. Hollerbach, J.M., and Wampler, C.W., 1996, "The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods," *Int. J. Robotics Res.*, 15(6), pp. 573-591.
5. Bennett, D.J. and Hollerbach, J.M., 1989, "Autonomous Calibration of a Single Loop Closed Kinematic Chain formed by Manipulators with Passive Endpoint Constraints," *IEEE Trans. Robotics Autom.*, 7(5), pp. 597-605.
6. Wampler, C.W., Hollerbach, J.M., Arai, T., 1995, "An Implicit Loop Method for Kinematic Calibration and its Application to Closed Chain Mechanisms," *IEEE Trans. Robotics Autom.*, 11(5), pp. 710-724.
7. Iurascu, C.C. and Park, F.C., 2002, "Kinematic Calibration of Robots Containing Closed Loops," *AMSE J. Mechanical Design*, in press.
8. Zhuang, H. 1995, "Self-Calibration of Parallel Mechanisms with a Case Study on Stewart Platforms," *IEEE Trans. Robotics Autom.*, 13(3), pp. 387-397.
9. Gosselin, C.M., 1996, "Kinematische und Statische Analyse eines Ebenen Parallelen Manipulators mit dem Freiheitsgrad Zwei," *Mechanism Machine Theory*, 31(2), pp. 149-160.