

Levenberg-Marquardt 방법을 이용한 육면형 병렬기구의 설치 오차 보정

임승룡*, 임현규**, 최우천***, 송재복***, 홍대희***

Installation Error Calibration by Using Levenberg-Marquardt Method on a Cubic Parallel Manipulator

Seung Reung Lim*, Hyun Kyu Lim**, Woo Chun Choi***, Jae-Bok Song*** and Dae Hie Hong***

ABSTRACT

A parallel manipulator has high stiffness and all the joint errors on the device are not accumulated at the end-effector unlike a serial manipulator. These are the reasons why the parallel manipulator has been widely used in many fields of industry. In the parallel manipulator, it is very important to predict the exact pose of the end-effector when we want to control the end-effector motion. Installation errors have to be determined in order to predict and control the actual position and pose of the end-effector. This paper presents an algorithm to find the whole 36 joint error components with joint clearance errors and measurement errors considered, when a link length measurement sensor is used and data more than 36 times are acquired for 36 different configurations. A simulation test using this algorithm is performed with a Matlab program which uses the Levenberg-Marquardt method that is known to be efficient for non-linear optimization.

Key Words : Cubic Parallel Device(육면형 병렬기구), Error Calibration(오차 보정), Error Equation(오차식), Installation Error(설치 오차), Clearance Error(간극 오차), Length Measurement(길이 측정)

1. 서론

로봇의 작업 수행의 궁극적인 목적은 주어진 프로그램에 의해 말단부가 기구학적으로 정확한 위치로 이동하는 것이다. 하지만 로봇은 각종 오차요소가 내재되어 있기 때문에 이러한 오차 요소를 설계 단계부터 충분히 고려하여야 하며, 로봇을 만든 이후에도 각종 조인트의 위치가 실제의 설계치와 다름을 인정하고, 원하는 로봇의 작업을 하기 위해서, 각종 오차 요인을 기구학적으로 보

정해 주어야 한다. 병렬 구조 로봇은 직렬 구조 로봇에 비해 상대적으로 높은 정밀도와 강성을 지니고 있지만, 폐구조의 특징으로 여러 개의 조인트의 오차가 플랫폼 원점에 어떠한 형태로 나타날지 예상하기 위해서는 복잡한 기구학 식을 풀어야만 한다. 병렬 기구에서 나타날 수 있는 오차는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 기하학적으로 모델링이 가능한 오차(제작 오차, 설치 오차 등)와 기하학적으로 모델링할 수 없는 오차(마모, 열 효과에 의한 오차 등)이다. 기하학적으로 모델링할

☞ 2002년 7월 19일 접수
* 고려대학교 대학원 기계공학과
** 현대 중공업
*** 고려대학교 기계공학과

수 없는 오차 즉 비기하학적 오차는 모델링 하기 어렵기 때문에 보정하는데도 어려움이 있다. 하지만, 기하학적 오차는 각기 다른 오차 요소를 식으로 표현할 수 있고, 이것을 이용하여 기구학적 보정에 관한 식을 이용하면 보정이 가능하다.

현재까지 알려진 로봇 보정의 방법에는 직렬 기구, 병렬 기구 모두 엔드 이펙터의 위치나 자세를 측정하는 것이 일반적이다.

위치와 자세를 측정하는 방법에는 외부 센서⁽¹⁾ 중에서 레이저 트래킹을 이용하는 방법⁽²⁾, 경의의⁽³⁾(theodolite)를 이용하는 방법, 카메라를 이용하는 방법⁽²⁾이 있다. 또한 기구학적 보정에 있어서는 Zaung 과 Roth 의 최적화 이론을 이용하는 방법⁽⁴⁾과, Geng 과 Haynes 의 선형화 방식을 이용하는 방법⁽⁵⁾이 있다. 또한 길이 측정 센서를 이용한 병렬 기구의 기하학적 보정이 테일러 전개식을 이용한 비용 함수를 최소화하는 방법⁽⁶⁾ 등으로 시도가 되었다. 그러나, 정확한 설치 오차의 모든 성분을 구하기 보다는 측정 횟수에 대한 오차의 감소를 확인하는 데 그 한계가 있었다.

본 연구에서는 조인트 간극 오차가 실제 링크 길이 측정에 미치는 영향을 고려하여, 프로그램에서 측정값을 수정하는 인자를 제시하였고, 실제 설치 오차와 계산된 설치 오차를 비교할 수 있었다. 그리고, 서로 다른 자세에서의 단순한 길이 센서의 측정만으로 조인트의 설치 오차의 모든 성분을 구할 수 있었다. 또한, 이 과정에서 비선형 비용함수의 최적화에 효율적인 능력을 보이는 Levenberg-Marquardt 방법을 적용하여 알고리즘을 보다 견고히 하였다. 본 논문은 조인트에서 발생하는 모든 오차를 고려한 후, 설치 오차 값의 모든 성분 값을 구하는 효율적인 알고리즘을 제시한다. 이로써 향후 플랫폼의 제어에서 설치 오차 값을 입력하여, 보다 효율적인 플랫폼의 위치 제어를 할 수 있게 하고, 이러한 설치 오차로 인한 플랫폼 원점의 오차를 예측하여 보정할 수 있게 한다.

2. 육면형 병렬 기구

2.1 구조

본 연구에 사용된 병렬기구는 Fig. 1 에서처럼 3 개의 링크가 z 축 방향으로 플랫폼을 지지하고

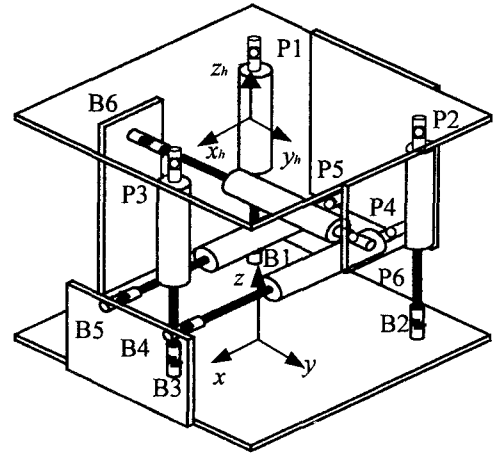


Fig. 1 A proposed cubic parallel manipulator

있고, 2 개의 링크가 x 축 방향으로, 1 개의 링크가 y 축 방향으로 연결되어 있다. 링크는 볼스크루와 너트로 이루어져 있고, 베이스 측 링크의 끝단에 유니버설 조인트가 연결되어 있고, 플랫폼 측 링크의 끝 단에는 볼 조인트가 연결되어 있다. 링크의 길이는 모터로 볼스크루를 회전시켜 너트를 직선 운동시킴으로써 변화된다.

2.2 기구학 식

육면형 병렬기구의 기구학 모델은 두 가지 모델이 있다. 첫째, 링크 양끝 단의 설치 오차와 유니버설 조인트, 볼 조인트의 간극이 없고, 링크의 양 끝점이 항상 고정된 점으로 취급하고, 또한 링크 길이 방향의 오차가 전혀 없다고 가정하는 공칭 모델이고, 둘째는 링크 양끝 점에 오차가 존재하고, 링크 길이에도 백래시 등의 영향으로 오차가 존재하는 것으로 취급하는 오차 모델이다. 두 가지 모델 모두 역 기구학과 순기구학 해를 모두 구해야 한다. 순기구학은 조인트 변수가 주어졌을 경우 Cartesian space 에서 엔드 이펙터의 위치를 구하는 문제로, 육면형 병렬기구의 경우는 조인트 변수가 링크의 길이가 되므로, 주어진 6 개의 링크 길이에 대해 플랫폼의 위치와 방위(pose)를 구하는 것이다.

역 기구학은 주어진 엔드이펙터의 위치와 방위에 대해 조인트 변수를 구하는 문제로, 주어진

플랫폼의 위치와 방위에 대해 링크의 길이를 결정하는 것이다.

공칭 모델에 대해서는 베이스 측 유니버설 조인트의 중심 위치는 베이스 좌표계 {B}에 대해서, b_i 로 표현하였고, 플랫폼 측 볼조인트의 중심 위치는 플랫폼 좌표계 {P}에 대해서, p_i 로 표현할 수 있다. 베이스 좌표계는 고정 좌표계로 xyz로 설정하고, 운동 좌표계인 플랫폼 좌표계는 $x_h y_h z_h$ 로 설정한다.

그리고, 플랫폼의 자세를 기술하는 회전행렬을 R 이라 하고, 다음과 같이 기술된다.

$$R = \begin{bmatrix} c_\beta c_\alpha & c_\beta s_\alpha - s_\beta c_\alpha & c_\beta c_\alpha + s_\beta s_\alpha \\ s_\beta c_\alpha & s_\beta s_\alpha + c_\beta c_\alpha & s_\beta s_\alpha - c_\beta c_\alpha \\ -s_\beta & c_\beta & c_\beta c_\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

회전 행렬은 R 은 기준 좌표계의 x 축에 대하여 α 만큼 회전하고, 기준 좌표계의 y 축에 대하여 β 만큼, 최종적으로 기준 좌표계의 z 축에 대하여 γ 만큼 회전시킨 결과이다. R 을 베이스 좌표계에 기준한 플랫폼의 중심을 표현한 회전 행렬이라 하면, ${}^B p_i$ 를 베이스 좌표계로 표현할 수 있다(Fig. 2 참조).

$$s_i = R^B p_i \quad (2)$$

Fig. 2에서 링크의 길이 q_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$q_i = t + s_i - b_i \quad (3)$$

여기서 t 는 베이스 좌표계에 기준한 플랫폼 중심의 위치 벡터이고, b_i 는 베이스 좌표계에 기준한 i 번째 링크 끝단에 위치한 베이스 측 유니버설 조인트의 중심까지의 위치 벡터이다. 링크의 길이 벡터인 q_i 는 링크 길이 l_i 와 링크 길이 방향의 단위 벡터인 z_i 로 이루어진다.

$$q_i = l_i z_i \quad (4)$$

역기구학은 플랫폼의 위치와 자세에 관한 정

보를 알고 있을 경우, 링크의 길이를 구하는 것이다. 식(2)와 식(3)을 식(4)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$l_i z_i = q_i = t + R^B p_i - b_i \quad (5)$$

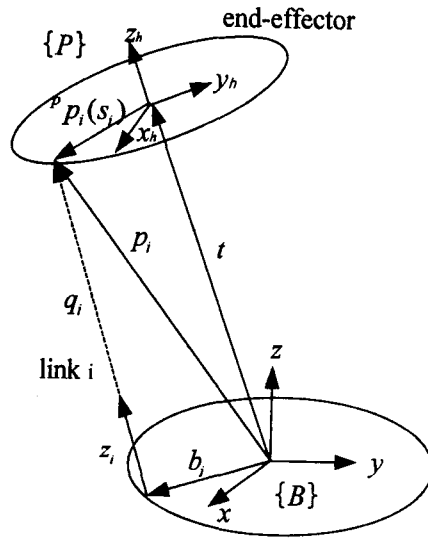


Fig. 2 Vectors related to a link

식(5)에서, q_i 가 주어진 경우 베이스 좌표계 중심에서 플랫폼 좌표계 중심까지의 병진 행렬과 회전 행렬 성분을 구하는 것이다. 이것은 수학적으로는 병진 행렬의 각 축방향 성분 3개, 회전 행렬에 있어서 각 축을 중심으로 회전하는 각도 성분 3개의 모두 6개의 정보로부터 6개의 링크 길이를 구하는 것이다.

순기구학은 플랫폼의 링크 길이를 알고 있을 경우, 플랫폼의 자세와 위치를 구하는 것이다. 본 논문에서는 초기 플랫폼의 위치를 알고 있다는 전제 하에 식(5)가 링크 길이에 대한 음함수 형태로 표현되는 점을 이용하여 Newton-Raphson 방법으로 해를 구하였다.

3. 기본 오차식

2절에서 기술했던 식(5)의 양변을 미분하면 다음 식과 같다.

$$\delta l_i z_i + l_i \delta z_i = \delta t + \delta R^p p_i + R \delta^p p_i - \delta b_i \quad (6)$$

한편 δR 는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta R = R_{\alpha} R = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\omega_z & \delta\omega_x \\ \delta\omega_z & 0 & -\delta\omega_y \\ -\delta\omega_x & \delta\omega_y & 0 \end{bmatrix} R \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \delta l_i z_i + l_i \delta z_i &= \delta t + R_{\alpha} s_i + R \delta^p p_i - \delta b_i \\ &= \delta t + \delta \Omega \times s_i + R \delta^p p_i - \delta b_i \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)을 δl_i 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\delta l_i = z_i^T \delta t + (s_i \times z_i)^T \delta \Omega + z_i^T R \delta^p p_i - z_i^T \delta b_i \quad (9)$$

$$\delta l_i = \begin{bmatrix} z_i^T & (s_i \times z_i)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta t \\ \delta \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_i^T R & -z_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta^p p_i \\ \delta b_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$$J_1 = \begin{bmatrix} z_i^T & (s_i \times z_i)^T \end{bmatrix}, \quad \delta x = \begin{bmatrix} \delta t \\ \delta \Omega \end{bmatrix}, \quad J_2 = \begin{bmatrix} z_i^T R & -z_i^T \end{bmatrix},$$

$$\delta p = \begin{bmatrix} \delta^p p_i \\ \delta b_i \end{bmatrix} \text{ 라고 정의하면, 식(10)은 다음과 같이}$$

정리할 수 있다.

$$\delta l_i = J_1 \delta x + J_2 \delta p \quad (11)$$

식(11)을 δx 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$\delta x = J_1^{-1} \delta l_i - J_1^{-1} J_2 \delta p \quad (12)$$

식(12)를 살펴보면 δx 는 플랫폼 엔드이펙터의 위치오차와 방위오차를 나타내는 (6×1) 벡터이고, J_1 은 링크의 길이 방향 단위 벡터와 링크의 길이 방향 단위 벡터와 플랫폼 원점으로부터의 볼 조인트 중심까지의 벡터와의 외적으로 이루어진

(6×6) 행렬이다. δl_i 은 링크의 길이방향 오차로 (6×1) 벡터이고, J_2 는 링크 길이 방향 단위 벡터와 회전행렬의 내적과, 링크 길이 방향 단위 벡터로 이루어진 (6×36) 행렬이다. δp 는 조인트의 설치 오차로 (36×1) 벡터이다. 식(12)는 링크의 길이 오차와 36 개의 조인트 오차 성분을 알고 있으면, 플랫폼 엔드이펙터의 6 개의 오차(위치 오차 3 개, 방위 오차 3 개)를 구할 수 있음을 의미한다. 즉 베이스 프레임을 기준으로 한 식(5)에서 조인트의 설치 오차와 링크의 길이 오차가 플랫폼 엔드이펙터의 오차에 미치는 영향을 식으로 나타낸 것이 식(12)이다. 본 논문에서는 실제 제작한 기구에서 링크 길이 방향의 볼-스크루의 백래시가 없으므로 링크 길이의 옅섯 오차는 제외하였고, 다만 각 조인트의 간극 오차만이 링크에 작용하는 힘의 방향에 따라 길이 방향에 영향을 주므로, 조인트의 간극 오차를 링크의 길이 오차 성분으로 변환하여 계산하였다⁽⁷⁾. 즉 링크의 길이 옅섯 오차는 제 5 장 수치예제에서는 없는 것으로 계산하였다.

4. 오차 보정 알고리즘

본 논문에서 제시한 오차 보정 방법은 설치 오차와 조인트의 간극 오차 그리고 측정 시의 노이즈를 고려하여 36 번 이상의 자세에서 측정한 값으로부터 조인트 오차와 노이즈 성분을 제거하여, 12 개의 조인트의 설치 오차를 구하는 과정이다. 프로그램을 위한 보정 알고리즘 단계는 다음과 같다.

(1) 공칭 조인트의 위치를 입력한다. (설계 시 주어진 값)

(2) 실제 7 번째 링크인 센서의 길이($l_{a,7,j}$)를 36 개 이상의 형상에 대해 측정한다. 실제의 링크 길이는 측정해야 하는 값이나 프로그램 상에서 합리적인 방법으로 구했고, 그 과정은 다음과 같다.

① 설치 오차로 인한 조인트의 위치를 가정하여 입력(설치 오차 값 입력).

② 36 가지 이상의 자세에 대하여, 조인트의 간극변화를 고려한 링크 길이를 구함(설치 오차와 조인트 간극을 고려한 실제 링크 길이를 의미한다. 이 경우 링크에 작용하는 힘을 구한 다음에, 조인트 간극에 의해 변화한 링크 길이의 미소 크기와 방향을 구할 수 있

- 다).
- ③ ②에서의 T 와 R 을 순기구학을 이용해서 구함.
 - ④ T, R 을 이용하여, $l_{a,7,j}$ 의 36 가지 이상의 경우에 관해 구함($j \geq 36$).
 - ⑤ 측정 시, 약간의 측정 오차가 있다고 가정하고, 노이즈 성분을 포함시킴. 특정 자세에서 여러 번의 측정을 하면 측정 노이즈를 줄일 수 있다(프로그램에서는 랜덤 함수를 사용).

(3) (2)에서 구한 값(측정 값)은 조인트의 간극 오차가 포함된 값이므로 직접 이용할 수 없다. 그러므로, 포함된 6 개의 링크 식에서 간극 오차를 분리한다. 간극 오차는 측정된 링크의 길이에서 구한 간극 오차의 값만큼 링크에서 분리하고, 이 때의 조인트 입력 값은 설치 오차와 간극 오차가 없는 상태에서의 조인트의 공칭 위치를 대입하여, 기구학 식을 이용해서 구한다.

$$l_{n,i,j} = l_{a,i,j} - \delta l_{c,i,j}, \quad i=1,2,\dots,6, \quad j \geq 36 \quad (13)$$

이 때, $l_{a,i,j}$ 는 j 번째 플랫폼 형상에서, i 번째 링크의 양 끝 조인트의 오차를 포함한 실제 길이이고, $\delta l_{c,i,j}$ 는 j 번째 형상에서, i 번째 링크의 양 끝 조인트의 간극 오차 때문에 변화된 길이 오차이다. 또한 $l_{n,i,j}$ 는 j 번째 형상에서 i 번째 링크의 간극 오차가 제거된 순수한 실제 양끝 조인트의 중심에서 중심까지의 거리이다.

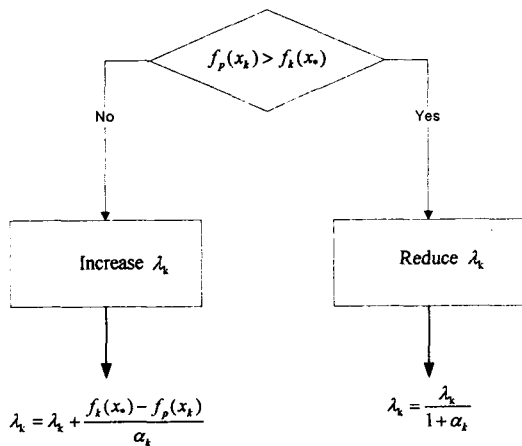


Fig. 3 Flow chart of λ_k in LMA

식(13)의 결과는 설치 오차만 남아있는 36 가지 이상의 자세에서의 6 개의 링크 식이다. (13)식의 각 경우에서 T 와 R 을 역기구학을 이용하여 구한다. 즉 이 값은 설치 오차만 존재할 경우의 T, R 이다. 구한 T, R 을 이용하여, 실제의 7 번째 링크의 36 개 이상의 자세에서의 거리를 구할 수 있다.

$$l_{aa,7,j} = l_{a,7,j} - \delta l_{c,7,j}, \quad j \geq 36 \quad (14)$$

이 때, $\delta l_{c,7,j}$ 는 j 번째 형상에서 각 6 개의 링크 양 끝단의 조인트의 간극 오차로 인한 측정 센서의 길이 오차 값이다. (14)식을 이용하면 조인트의 간극 오차를 제외한 설치 오차에 의한 값에 기인한 36 개보다 많은 서로 독립적인 경우에 있어서의 추가적인 7 번째 링크의 길이($l_{aa,7,j}$)를 구할 수 있다.

(4) 설치 오차를 변수로 놓고, j 번째 형상에서 측정 센서의 길이($l_{ca,7,j}$)를 구한다. 이 경우, 조인트 오차의 36 개 성분은 아직 모르는 변수 값이다. 계산으로 구하는 설치 오차를 포함하는 $l_{a,7,j}$ 는 다음과 같다.

- ① 설치 오차로 인한 조인트의 위치 변수로 입력 후, T 와 R 을 구한 후, 설치 오차가 없을 경우의 T 와 R 과 비교하여 $\delta T, \delta R$ 을 구한다. 혹은 단순히 조인트 설치 오차 값을 이용하여, $\delta T, \delta R$ 을 구한다.
- ② ① 에서 구한 $\delta T, \delta R$ 을 이용해서 j 번째 형상에서 센서의 길이에 미치는 미소 길이($\delta l_{7,j}$)를 구한다.
- ③ 36 가지 이상의 자세에서, 계산 값으로 구한 추가적인 7 번째 링크인 센서의 실제 측정 길이를 구한다.

$$l_{c,7,j} = l_{7,j} + \delta l_{7,j}, \quad j \geq 36 \quad (15)$$

이 때, $l_{7,j}$ 는 조인트의 설치 오차가 존재하지 않을 경우의 7 번째 링크인 센서 측정 길이이다.

비용 함수를 정의하고, 비용 함수가 최소가 되는 설치 오차의 변수 36 개를 구한다. 이때 Levenberg-Marquardt algorithm 을 사용한다.

$$F = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m \geq 36} (l_{c,7,j} - l_{aa,7,j})^2 \quad (16)$$

5. Levenberg-Marquardt Algorithm

Levenberg-Marquardt algorithm(LMA)은 Gauss-Newton algorithm 의 특이한 형태로 이해할 수 있다. 이 방법은 다음과 같은 문제의 해를 찾는 방법으로 사용이 될 수 있다.

$$(J(x_k)^T J(x_k) + \lambda_k I) d_k = -J(x_k) F(x_k) \quad (17)$$

여기서, λ_k 는 스칼라 값으로 d_k 의 크기와 방향을 결정한다. λ_k 가 0 이면 (17)식은 Gauss-Newton algorithm 와 동일하게 된다. λ_k 가 무한대로 증가함에 따라, d_k 는 영 벡터(a vector of zeros) 혹은 급격한 하강 방향으로 향한다. 즉 λ_k 가 충분히 큰 경우 다음 식이 성립한다.

$$F(x_k + d_k) < F(x_k) \quad (18)$$

Levenberg-Marquardt 방법의 적용에서 주로 어렵게 간주되는 부분은 λ_k 의 크기를 제어하는 효과적인 방법이다. 이 방법이 적용되는 것은 자승값의 선형 합($f_p(x_k)$)과 3 차원적으로 보간이 된 값($f_k(x_k)$)을 예측하는 경우로 함수 $f(x)$ 의 상대적인 비 선형성을 평가하기 위함이다. 그러므로 λ_k 의 크기는 각각의 반복에서 결정이 된다. 자승값의 선형 합은 다음 두 식으로 표현이 된다.

$$F_p(x_k) = (J(x_{k-1}))^T d_{k-1} + F(x_{k-1}) \quad (19)$$

$$f_p(x_k) = F_p(x_k)^T F_p(x_k) \quad (20)$$

$f_k(x_k)$ 는 $f(x_k)$ 와 $f(x_{k-1})$ 를 3 차원적으로 보간하여 얻는 값이다. λ_k 의 증가 혹은 감소를 나타내는 공식을 그림으로 나타내면 Fig. 3 과 같다. 단계 길이 매개변수(α_k) 또한 이러한 보간을 통해서 얻을 수 있다. 만약 $f_p(x_k)$ 가 $f_k(x_k)$ 보다 크다면, λ_k 는 감소될 것이고, 반대로 $f_p(x_k)$ 가 $f_k(x_k)$

보다 작다면, λ_k 는 증가할 것이다. 이렇게 하는 이유는 $f_p(x_k)$ 와 $f_k(x_k)$ 의 차이가 Gauss-Newton 방법과 선형성의 효율을 측정하기 때문이다. λ_k 를 새롭게 하면서 식(17)의 해는 탐색 방향(d_k)를 얻는 데 사용된다.

6. 수치 예제

본 논문에서 제안한 병렬 기구의 보정 방법을 검증하기 위해 matlab 을 이용하여 프로그램을 작성하였다. 식(16)의 비용함수를 구하는 것과, Levenberg-Marquardt 방법을 사용하는 것은 프로그램 내에 Matlab 의 "lsqnonlin"라는 내장 함수를 이용하였다. 예제에 사용된 육면형 병렬 기구의 각 조인트의 공칭 위치(설계 값)은 Table 1 과 같고, 수치 예제에서 구하고자 하는 설치 오차 값은 Table 2 와 같다. 프로그램에서 단지 한 개의 부가적인 링크 길이를 측정 센서로 사용하여 36 개 이상의 자세에서 각각의 링크 길이를 구한 후, Table 2 에 기술된 각 조인트의 설치 오차를 구하는 것이 프로그램의 목적이다. 측정 방법은 베이스부를 확대해서 설계상의 플랫폼 원점과의 길이 방향으로 여분의 측정 링크 역할을 하는 길이 센서를 연결된 Fig. 4 와 같이 부착한 다음, 플랫폼이 회전 행렬의 변화 없이 반 시계 방향으로 반경 10cm 의 원을 도는 동안 0° 에서 360° 까지 10° 간격으로, 36 개 위치에서 길이를 측정한다.

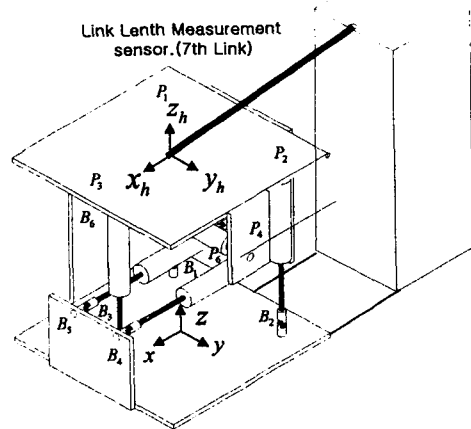


Fig. 4 Configuration for measurement of additional link length

Table 1 Nominal joint positions of the cubic parallel manipulator

링크	Base 좌표(mm)			Platform 좌표(mm)		
	x	y	z	x _h	y _h	z _h
1	-140	-140	28	-140	-140	-28
2	-140	140	28	-140	140	-28
3	140	0	28	140	0	-28
4	177	70	130	-177	70	-280
5	177	-70	130	-177	-70	-280
6	0	-205	280	0	177	-140
센서	-200	500	500	-200	205	-5

Table 2 Installation errors of the joints

링크	Base 측 조인트 설치 오차(μm)			Platform 측 조인트 설치 오차(μm)		
	Δx	Δy	Δz	Δx_h	Δy_h	Δz_h
1	13.7	1.2	89.4	93.8	66.8	37.0
2	19.9	29.9	66.1	80.3	64.7	44.5
3	28.4	46.9	6.5	79.5	72.1	79.5
4	98.8	58.3	42.3	105.7	62.3	88.0
5	51.6	33.4	43.3	27.3	108.0	27.1
6	22.6	58.0	76.0	35.2	97.6	73.7

또한, 조인트의 간극 오차를 구로 모델링⁽⁷⁾ 한 후, 구형 간극 오차의 반경을 $10\mu\text{m}$ 로 가정하였고, 주어진 플랫폼의 자세에서 링크에 작용하는 힘의 방향을 고려하여, 측정된 링크 길이는 구형 조인트 간극 오차의 영향을 받은 결과 값이다. 조인트 간극에 의한 길이 변화는 프로그램에서 제거할 수 있다. Table 3 은 실제 36 가지 자세에서 7 번째 링크를 길이 센서로 사용한 후, 프로그램을 이용하여 구한 설치 오차 값이다. 이 경우, 측정 오차가 포함되어, 정확히 Table 2 와 정확히 일치하는 값을 구할 수는 없지만, 실험의 횟수를 증가시키면 측정 오차에 의한 노이즈는 줄어들 것이다. 측정 오차 값은 $\pm 10\mu\text{m}$ 미만에서 matlab 의 랜덤 함수를 사용하였다. Table 3 에 제시한 프로그램을 이용하여 구한 조인트 오차의 결과 값을 실제의 값과 비교하기 위해 오차의 값에 절대값(norm)을 취한 후 그래프로 비교하여 Fig. 5 와 Fig. 6 에 나타내었고, 각각의 12 개 조인트의 세가지 성분에 대해 그래프를 그리는 것을 보다 간단히 하기 위해,

각 조인트 별로 norm)을 취해 결과를 나타내었다.

Table 3 Calculated installation errors of the joints

링크	Base 측 조인트 설치 오차(μm)			Platform 측 조인트 설치 오차(μm)		
	Δx	Δy	Δz	Δx_h	Δy_h	Δz_h
1	13.4	9.0	78.7	99.1	67.1	47.7
2	20.3	30.3	81.0	79.9	64.3	29.6
3	28.4	46.9	6.0	79.5	72.1	80.0
4	113.0	57.9	42.3	91.5	62.7	88.0
5	37.0	33.8	43.3	41.9	107.6	27.1
6	22.9	68.3	75.7	34.9	87.3	74.0

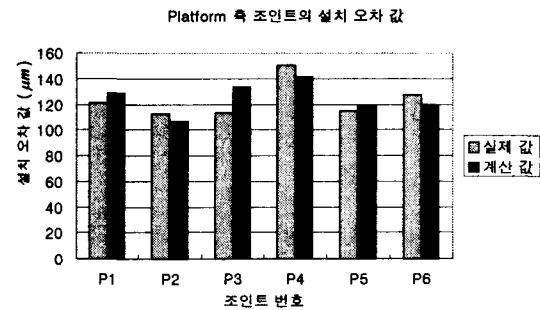


Fig. 5 Installation errors of the joints on the platform

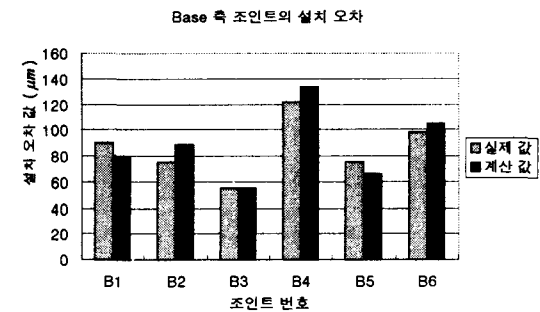


Fig. 6 Installation errors of the joints on the base

7. 결론

지금까지 발표된 병렬기구의 오차 보정 연구는 단순히 조인트의 설치 오차 값만을 고려하여, 설치 오차의 각 성분 별 크기를 구하는 것이 아니

라 단순한 절대 크기를 구하는 것이었다. 또한 파라메타 선정에 있어서도, 자코비안의 의존성을 고려하여야 하는 단점이 있었다. 본 논문은 조인트 오차의 간극과 측정 오차 값을 고려하여 구한 36 개 이상의 링크 길이 센서 값만을 이용하여, 설치 오차의 12 개의 x, y, z 세 가지 성분을 모두 추적하는 알고리즘을 제시하였다. 또한 이 과정에서 비선형 비용함수의 최적화에 효율적인 능력을 보이는 Levenberg-Marquardt 방법을 적용하여 알고리즘을 보다 견고히 하였다. 대부분의 실제 설치 오차 값과 계산된 설치 오차 값은 오차 범위 $\pm 10\%$ 내에서 대부분 일치함을 보여주고 있다. 특히 베이스 측 3 번 조인트의 경우는 거의 정확하게 일치하고 있음을 보여준다. 이 결과는 측정 오차를 $\pm 10\mu\text{m}$ 미만에서 랜덤 함수로 주었기 때문에 나타나는 결과이다. 만약 측정 횟수를 보다 많이 하여, 측정 오차를 줄이면 결과는 더욱 정확히 나올 것으로 예측된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초(과제번호: 1999-1-304-003-3)에 의해 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. H. Zhuang, "Self-Calibration of Parallel Mechanism with a Case Study on Stewart Platform," IEEE transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, No. 3, pp. 387-397, 1997.
2. B. W. Mooring, Z. S. Roth, and M. Dries, "Fundamentals of Manipulator Calibration," New York, John Wiley & Sons, Inc., pp. 243-254, 1991.
3. H. Zhuang, O. Masory, and J. Yan, "Kinematic Calibration of a Stewart Platform Using Pose Measurements Obtained by a Single Theodolite," IEEE transactions on Robotics and Automation, pp. 329-334, 1995.
4. H. Zhaung, Zvi. S. Roth, "Method for Kinematic Calibration of Stewart Platforms," Journal of Robotics Systems, Vol. 10, No. 3, pp391-405, 1993.
5. Z. J. Geng and L. S. Haynes, "An Effective Kinematic Calibration Method for Stewart

- Platforms," ISRAM, pp. 87-92, 1994.
6. 최우천, 임현규, "길이 측정 센서를 이용한 병렬기구의 기하학적 오차 보정," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 11 호, pp. 94-100, 2000.
7. S. R. Lim, W.C. Choi, J. Song, and D. Hong, "Error Model and Accuracy Analysis of a Cubic Parallel Device," International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 2, No. 4, pp 75-80, 2001.