

육면형 병렬 기구에서의 조인트 오차의 영향

임승룡*(고려대 대학원 기계공학과), 최우천(고려대 기계공학과)

Effect of Joint Errors Analysis for a Cubic Parallel Device

Seung Reung Lim(Graduate School, Korea Univ.), Woo Chun Choi(Korea Univ.)

ABSTRACT

There are many sources of errors in the parallel device. This study investigates the effect of a clearance error at a U-joint on the position and orientation errors of the platform of a new parallel device, cubic parallel manipulator. In this study, the limits of errors can be estimated for given conditions.

Key Words : Cubic Parallel Device(육면형 병렬기구), Link(링크), Error Source(오차요소), Position Error(위치오차), Orientation Error(방위오차), Universal Joint(유니버설 조인트)

1. 서론

일반적으로 산업 현장에서 사용되는 공작기계는 주로 직렬형 구조로 되어 있다. 직렬형 구조는 말단부까지 운동을 전달하는 동안 오차가 누적되어 고정밀을 구현하기 어렵다. 이러한 직렬형 구조의 단점을 극복하기 위해 병렬형 구조가 연구되고 있다. 병렬형 구조는 플랫폼과 베이스가 2 개 이상의 직렬형 부속 관절에 의해 연결되어 폐회로를 형성하며, 서로의 운동을 구속하는 형태로 이루어 진다. 개회로 형태의 직렬 기구는 작업 영역이 크고 동작의 유연성이 요구되는 일에 사용되나, 관성력, 원심력, 중력의 영향이 크며, 관절마다 구동오차가 누적되어 말단부의 위치오차가 비교적 크게 발생한다. 이에 비해 폐회로 기구인 병렬 기구는 동작의 유연성이나 작업 영역은 작으나, 구조적으로 여러 개의 링크로 연결되어 있어서 말단부의 운동이 여러 개의 관절들의 구속방정식을 만족해야 하므로 각 조인트에서의 오차가 한 방향으로 누적되지 않아 말단부의 오차가 작다. 그리고 병렬형 구조는 여러 링크가 하중을 분산 지지하여 강성이 매우 크므로 고하중이 요구되는 작업에 적합하다. 이러한 병렬 기구의 구조적인 장점 때문에 최근에 공작 기계에 사용하는 것을 목적으로 한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적인 형태의 병렬형 기구에 대해서는 Masory 등⁽¹⁾이 가공오차, 설치오차, 링크의 유격 등을 고려하여 공칭오차 모델을 제시하였고, 이후

Ehmann 등⁽²⁾은 기구학식의 미분값에 의해 오차를 분석하였다. Wang 등⁽³⁾은 1 자유도를 갖는 링크 요소에 대한 모델링을 실시하였고, 볼 조인트의 오차를 D-H 변환을 이용해 수학적으로 유도하였다. Satori 등⁽⁴⁾은 기하학적 오차 측정 방법과 오차에 대한 정보의 일반화에 대해 연구하였다. Arai 등⁽⁵⁾은 스튜어트 플랫폼에서의 조인트 변위 오차와 말단부의 정밀도에 관한 모델을 제시하고 순기구학과 역기구학을 적용하여 말단부의 타원체 형상의 오차 분포를 유도하였다.

본 연구는 육면형 병렬기구의 오차를 기하학적으로 모델링하고, 타 연구에서 그다지 고려되지 않았던 조인트에서의 오차와 기구 형상이 병렬기구의 말단부의 오차에 미치는 영향을 다루고, 플랫폼의 위치 오차와 방위 오차를 예측할 수 있게 하였다.

2. 구조와 오차 모델

2.1 구조

Fig. 1 에서처럼 본 연구에 사용된 병렬기구는 3 개의 링크가 z 축 방향으로 플랫폼을 지지하고 있고, 2 개의 링크가 x 축 방향으로, 1 개의 링크가 y 축 방향으로 연결되어 있다. 링크는 볼스크루와 너트로 이루어져 있고, 양끝에 유니버설 조인트가 연결되어 있다. 링크의 길이는 모터로 볼스크루를 회전시켜 너트를 직선 운동시킴으로써 변화된다.

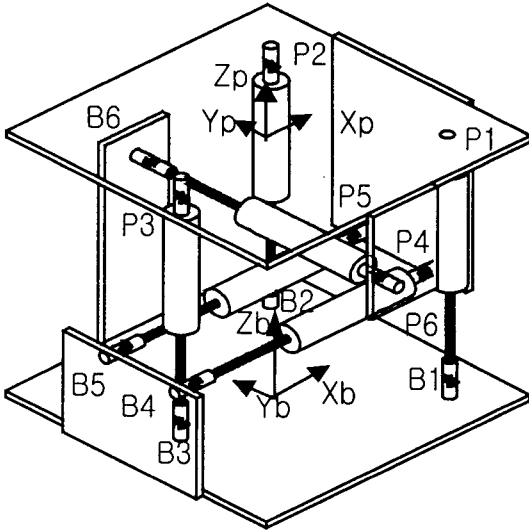


Fig. 1 Schematic of a proposed cubic parallel manipulator.

2.2 오차 모델

하나의 링크에 대해 오차 요소를 포함시켜 벡터 체인을 그리면 Fig. 2 와 같다. 여기서 $\{B\}, \{P\}$ 는 베이스와 플랫폼의 원점이다. $\{B_n\}, \{P_n\}$ 은 오차가 존재하지 않을 경우 베이스와 플랫폼에 연결되는 점을 나타낸다. 실제로 $\{B_n\}$ 은 제작의 불완전함으로 인해 발생하는 가공오차 b_m 에 의해 $\{B_m\}$ 으로 이동한다. 또한 $\{B_i\}$ 은 유니버설 조인트를 베이스에 설치할 때 오프셋으로 인해 발생하는 오차 δb_i 를 고려한 후의 좌표값이다. c_i 는 베이스에 부착된 유니버설 조인트의 오차로 인해 발생하는 오차 성분이고, c_i 까지 고려한 후의 좌표값이 $\{B_{ki}\}$ 이다. 링크의 길이는 l_i 이고, 볼스크루의 백래시 오차는 $\lambda_i l_i$ 로 표현된다. d_i 는 링크 설치 시 발생하는 오프셋 오차이다. 플랫폼에서 대해서도 같은 방법으로 플랫폼의 원점 $\{P\}$ 를 기준으로 하여 유니버설 조인트의 공칭 위치인 $\{P_n\}$ 을 지정한다. 실제의 오차 모델에서 $\{P_n\}$ 은 제작의 불완전함으로 인해 발생하는 가공오차 p_m 에 의해 $\{P_m\}$ 으로 이동한다. 또한 $\{B_i\}$ 은 유니버설 조인트를 베이스에 설치할 때 오프셋으로 인해 발생하는 오차 δp_i 를 고려한 후의 좌표값이다. e_i 는 베이스에 부착된 유니버설 조인트의 오차로 인해 발생하는 오차 성분이고, e_i 까지

고려한 후의 좌표값이 $\{P_{ki}\}$ 이다. 위의 오차들은 다음의 식을 만족한다.

$$b_n + b_m + \delta b_i + c_i + l_i + \lambda_i l_i + d_i - e_i - \delta p_i - p_m - b_n - q = 0 \quad (1)$$

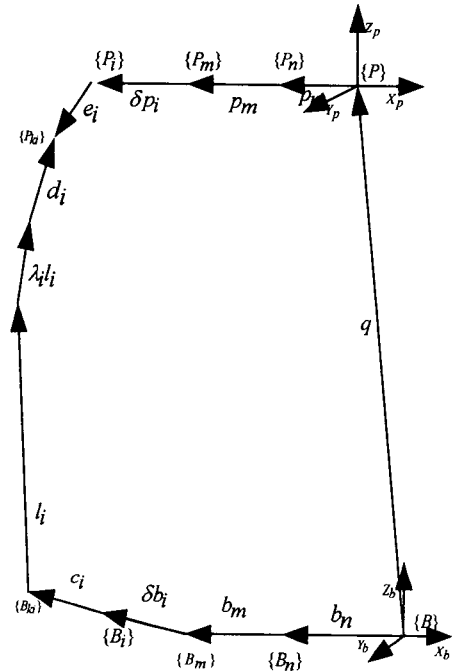


Fig. 2 Actual vector chain for a link.

유니버설 조인트가 베이스와 플랫폼에 설치되면 식 (1)에서 c_i 와 e_i 를 제외한 다른 오차들은 고정되고 측정 가능하다. 본 연구에서는 링크의 백래시 오차와 설치오차는 무시하고, 유니버설 조인트에서의 간극 크기에 의한 오차를 고려하여, 이들이 플랫폼의 위치 오차와 방위 오차에 미치는 영향을 다룬다. 유니버설 조인트에는 두개의 축이 있고, 이 축은 홀에 조립되어 있다. 축과 홀이 상대운동을 하므로, 이들 사이에는 간극이 존재한다. 이 간극으로 인해 유니버설 조인트 중심은 이상적인 위치에서 벗어나게 되고, 이 오차가 플랫폼의 오차에 영향을 준다. 유니버설 조인트를 Fig. 3 과 같이 모델링할 수 있다. Fig. 3 은 유니버설 조인트 내부의 축의 운동을 제한하는 간극 때문에 유니버설 조인트의 두 축의 운동은 일정한 반경의 원으로 제한된다. 따라서 유니버설 조인트의 중심의 운동은 일정 반경의 구로 제한된다. 즉, 조인트 중심은 구의 내부의 임의의 위치에 놓이게 된다. 베이스에 연결된 유니버설 조인트에서의 구의 반경을 C_b 라 둔다.

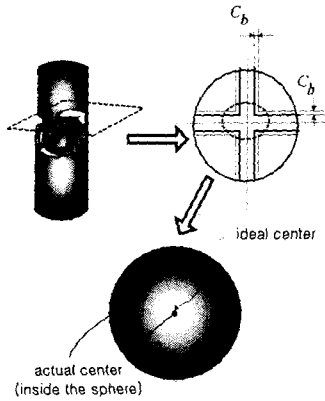


Fig. 3 Clearance of a U-joint and position error of the joint center.

이때 조인트 오차는 볼스크루로 연결되어 플랫폼과 연결된 조인트에 전달된다. 플랫폼에 연결된 유니버설 조인트에도 같은 반경을 가진 구의 오차가 존재한다. 베이스 측 유니버설 조인트로부터 전파된 오차를 포함시키면, 새로운 구 오차가 생기고, 이 구의 반경은 C_b 의 두 배인 C_p 가 된다.

2.2 오차 해석

동일한 유니버설 조인트를 사용한다면, 플랫폼 상의 유니버설 조인트의 중심점인 P1, P2, P3, P4, P5, P6는 반경이 C_p 인 구 내부에 존재하게 된다. 이 중심점들은 플랫폼에 고정된 점들이므로 상대적인 위치가 고정되어 있다. 그러므로 6 점이 구 내부에 존재하면서 상대적인 위치를 유지해야만, 이 조합이 실제로 발생 가능하다. 이렇게 발생 가능한 조합으로부터 플랫폼의 원점과 방향을 구할 수 있다. 먼저 P1 내부의 임의의 점 P11을 선택한 다음, P2의 구 내부에 있고, 길이가 $\overline{P1P2}$ 인 점들을 구하고 이 점들의 집합을 Q라 한다. $\overline{P11Q}$ 에서 일정한 거

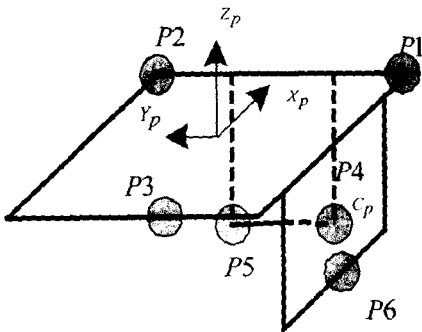


Fig. 4 Error ranges of U-joint centers on platform.

리에 있고, P3의 구에 존재하는 점들의 집합인 T를 구한다. 이렇게 구한 세 점으로부터 평면이 결정된다. 구해진 평면으로부터 기하학적 조건을 만족하는 점 P14, P15, P16를 구한다. P14, P15, P16가 P4, P5, P6로부터 일정한 오차 영역 C_p 내부에 모두 있으면, {P11, Q, T}은 실제로 존재할 수 있는 점이므로, 이 세 점으로부터 새로운 플랫폼의 원점과 방향을 구할 수 있고, 이로부터 플랫폼의 위치 오차와 방위 오차를 구할 수 있다.

3. Case Study

MATHEMATICA를 사용하여 병렬기구의 초기 위치에서의 오차해석을 연구하였다. 초기 조건으로 플랫폼의 원점은 베이스에서 z 방향으로 400mm 상에 위치하며 α, β, γ 모두 0이다. 사용된 조인트 중심점의 좌표값은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Coordinates of the joints centers.

중심점	좌표
P1	(b, -a, 0)
P2	(b, a, 0)
P3	(-b, 0, 0)
P4	(c, -e, -d)
P5	(c, e, -d)
P6	(0, -f, -g)

$a=160\text{mm}$, $b=140\text{mm}$, $c=195\text{mm}$, $d=270\text{mm}$, $e=55\text{mm}$, $f=195\text{mm}$, $g=120\text{mm}$, $C_p=1.2\text{mm}$

Fig. 5는 a, b, c, d, e, f, g를 변화시키면서 x축 방향의 회전각 α , y축 방향의 회전각 β , z축 방향의 회전각 γ 의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 5(a)는 a를 160mm에서 260mm로 변화시키면서, α, β, γ 의 변화에 대해 나타낸 것이다. a가 160mm일 경우, α 는 -0.00436rad 에서 $+0.00436\text{rad}$ 의 오차 한계를 갖는다. 또한 β 는 -0.00436rad 에서 $+0.00436\text{rad}$ 의 오차 한계를 갖고, γ 는 -0.00564rad 에서 $+0.00564\text{rad}$ 의 오차 한계를 갖는다. 그래프에서는 편의 상 (+)값만을 표시하였다. a를 증가시키면 α 는 점차 감소하나, β 와 γ 에는 영향을 주지 않음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 b를 140mm에서 340mm까지 변화시키면서 α, β, γ 의 변화를 나타낸 것이다. 이 경우에 초기에는 γ 만이 점차 감소하나 b가 300mm 이후부터는 β 도 감소한다. 이것은 플랫폼이 중심으로부터 멀어질수록 방위 오차의 한계도 임계값 이하가 되면 영향을 받는다는 것을 보여주며, 다음 그림도 같은 경향을 나타냄을 알 수 있다. 위치 오차의 한계 값은 유니

버설 조인트의 간극 오차에 의해 결정되고, 초기 위치에서는 $-C_p$ 에서 $+C_p$ 의 오차 한계를 갖는다. 위치 오차는 유니버설 조인트의 간극오차의 반경 C_p 에 의해 한계가 결정되므로 그래프로 나타내지 않았다.

4. 결론

본 연구는 일반적인 병렬기구와는 다소 다른 육면 병렬기구에서 유니버설 조인트에서의 간극 오차가 플랫폼의 위치와 방위 오차에 미치는 영향을 알아보았다. 위치오차는 플랫폼에 설치된 유니버설 조인트의 반경 C_p 에 의해 결정되며, 방위오차는 유니버설 조인트 간의 거리에 의해 오차의 크기에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 또한 세 개의 서로 다른 평면 위에 존재하는 유니버설 조인트의 중심은 서로간의 오차 한계를 제한하는 요소로 작용함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 주어진 조건으로부터 오차의 한계를 예측할 수 있었다.

참고문헌

1. O. Masory, J. Wang, "On the Accuracy of a Stewart Platform – Part I The Effect of Manufacturing Tolerances," IEEE Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 114-120, 1993.
2. K. F. Ehmann, A. J. Patel, "Volumetric Error Analysis of a Stewart Platform-Based Machine Tool," Annals of the CIRP, Vol. 46, pp. 287-290, 1997.
3. S. M. Wang, K. F. Ehmann, "Error Model and Accuracy Analysis of A Six-DOF Stewart Platform," Manufacturing Science and Engineering, Vol. 2, pp. 519-530, 1995.
4. S. Satori, G. X. Zhang, "Geometric Error Measurement and Compensation of Machines," Annals of the CIRP, Vol. 44, pp.599-609, 1995.
5. T. Roooponen and T. Arai, "Accuracy Analysis of a Modified Stewart Platform," IEEE Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, pp.521-525, 1995.

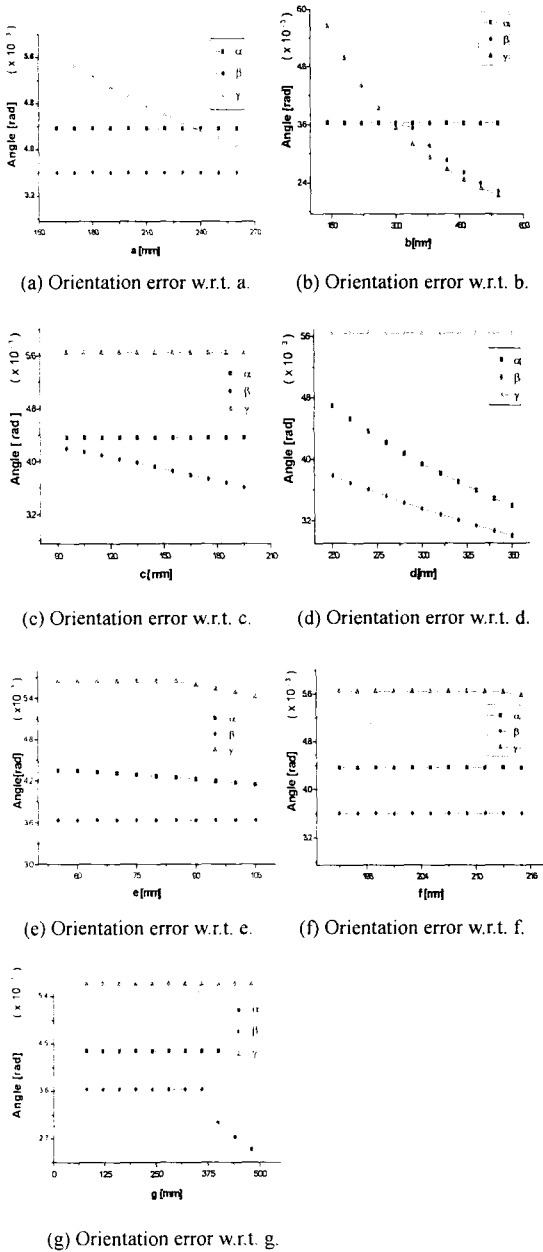


Fig. 5 Orientation errors of the end-effector for parameter variation.