

병렬구조 로봇 캘리브레이션

Robot Calibration Algorithm for Closed-Chain Manipulators

*Zhou Jian¹, 이용호¹, #강희준², 김성락³

Zhou Jian¹, Y. H. Lee¹, *H. J. Kang(hjkang@ulsan.ac.kr)², S. R. Kim³

¹울산대학교 대학원, ²울산대학교 전기전자정보시스템공학부, ³현대중공업 기전연구소

Key words : Robot Calibration, Close-Chain Manipulators, Tree Structured Open Chain

1. 서론

병렬 구조를 포함하는 로봇에 대한 캘리브레이션 연구는 여러 연구자에 의해서 진행되어 왔다[1,2]. 본 논문에서는 병렬구조(5 bar planar mechanism)를 가진 6 자유도 로봇에서 그 병렬 구조를 구성하는 링크 파라미터 및 관절 강성 파라미터를 캘리브레이션하는 방법을 제시한다. 그 방법은 다음과 같다: 1) 5 bar 병렬구조에서 발생하는 구속식을 이용하여 활성관절각으로 비활성 관절각을 구하는 Five Bar Position Analysis 2) 비활성관절각과 5 bar 를 구성하는 링크 파라미터를 활성인자로 고려하여 그들 사이의 Jacobian 을 구하는 Five Bar Velocity Analysis 3) Fig. 1 과 같이, 폐회로 구조의 한 점을 절개하여 2 개의 Tree Structured Open Chain 을 만들고, 그 첫번째 Open chain 의 Jacobian 관계식에서 첫번째 Open chain 에 포함된 3 번째 비활성 관절을 5 bar 의 활성링크 파라미터로 교체하여 전체 기구학적 캘리브레이션 식을 생성하는 Total Kinematic Calibration 4) Open Chain 들에서 얻어진 Gravity torque 를 Virtual Work 원리를 적용하여 활성 Gravity Torque 로 변환한 후, 본 연구자의 기존 연구[3]를 따라 관절강성 포함하는 캘리브레이션 식을 도출 한다. 본 논문에서는 제시된 방법에 따라 기술하고 그 방법을 HX200 Robot 에 적용하여 알고리즘의 유용성을 입증하고자 한다.

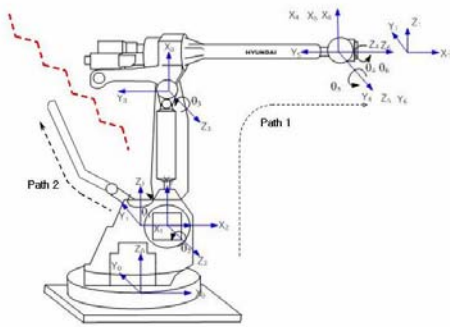


Fig. 1 Tree Structured Open Chain

2. Five Bar Position Analysis

병렬구조 로봇의 캘리브레이션의 첫단계로서 우선 5 bar 에서 주어진 활성관절각에 대한 비활성 관절각을 구하는 과정이 필요하다. 그 과정은 다음과 같다. Fig. 2 의 5 bar 의 구속식을 이용하여, 주어진 링크 길이와 활성관절로 가정된 θ_1, θ_4 의 각도값(로봇 2,3 축의 모터)으로부터 5 bar 내의 3 개의 비활성 관절 각도 $\theta_2, \theta_3, \theta_x$ 를 구하고자 한다.

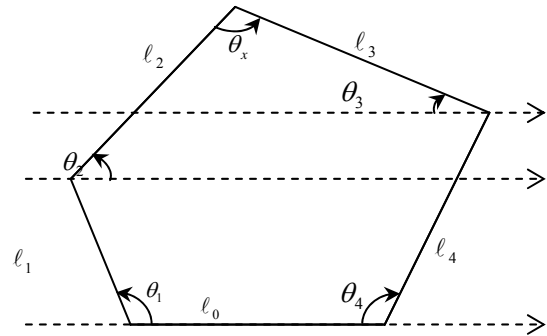


Fig. 2 General Five Bar Analysis

모든 링크는 평면에 놓여 있고, θ_1 의 회전축을 원점으로 생각한다면 다음 식과 같은 구속식을 세울 수 있다.

$$l_1 C_1 + l_2 C_2 + l_3 C_3 + l_4 C_4 = l_0 \tag{1}$$

$$l_1 S_1 + l_2 S_2 - l_3 S_3 - l_4 S_4 = 0$$

위 구속식으로부터 알려진 값을 우변으로 넘겨 상수로 계산할 수 있고, 구하려는 변수에 대해서 정리하면 식(2)를 만들 수 있다.

$$l_2 C_2 + l_3 C_3 = K_2, \quad K_2 = l_0 - l_1 C_1 - l_4 C_4 \tag{2}$$

$$l_2 S_2 - l_3 S_3 = K_3, \quad K_3 = -l_1 S_1 + l_4 S_4$$

삼각함수의 방정식을 풀어내기 위해 상수항들을 식(3)으로 정의하면,

$$M = -2K_2 l_3, N = -2K_3 l_3, P = l_2^2 - K_2^2 - K_3^2 - l_3^2 \tag{3}$$

최종적으로 다음 식(4),(5),(6)과 같이 비활성 관절각 구할 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{M}{N}\right)$$

$$\sin(\alpha + \theta_3) = \frac{P}{\sqrt{M^2 + N^2}} = D \tag{4}$$

$$\cos(\alpha + \theta_3) = \pm \sqrt{1 - D^2} = D^*$$

$$\therefore \theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{D}{D^*}\right) - \alpha$$

± 2 개 해 존재하지만 Geometry 고려 +해 선정

$$C_2 = \frac{K_2 - l_3 C_3}{l_2}$$

$$S_2 = \frac{K_3 - l_3 S_3}{l_2} \tag{5}$$

$$\therefore \theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{S_2}{C_2}\right)$$

$$\therefore \theta_x = \pi - \theta_2 - \theta_3 \tag{6}$$

3. Five Bar Velocity Analysis

병렬 로봇에서 두 개의 조인트가 한 점에서 만나는(그 곳의 링크 길이는 0 이다) 구조를 다음의 Fig. 2 와 같다.

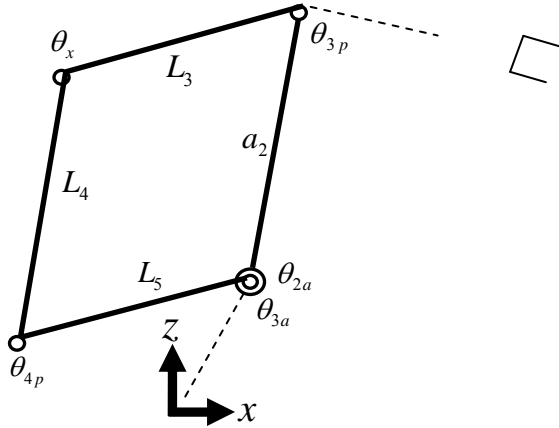


Fig. 3 Robot Five Link Structure

Five Bar의 유일한 구조를 결정 하기 위하여 링크 L3 를 주어진 값으로 고정하고, 나머지 변수들을 캘리브레이션을 위한 파라미터로 사용한다. 두 경로는 한점에서 만나므로 다음과 같은 구속식을 만족한다. a2와 L3를 지나는 경로를 path1 이라 하고 L5와 L4를 지나는 경로를 path2 라고 한다면, 식(7)

$$\begin{cases} \delta X_{path1} = J_{\theta_{2a}} \delta \theta_{2a} + J_{a_2} \delta a_2 + J_{\theta_{3p}} \delta \theta_{3p} \\ \delta X_{path2} = J_{\theta_{3a}} \delta \theta_{3a} + J_{L_5} \delta L_5 + J_{\theta_{4p}} \delta \theta_{4p} + J_{L_4} \delta L_4 \end{cases} \quad (7)$$

식(7)을 각도(theta3p, theta4p)에 대해서 정리하고, 행렬의 연산에서, theta3p에 대한 Jacobian을 theta2a의 Jacobian으로 변환하여 J_{\theta_{2a}} 로 표시. 정리하면, 다음 식(8)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta \theta_{3p} \\ \delta \theta_{4p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{\theta_{2a}}^{\theta_{3p}} & J_{\theta_{3a}}^{\theta_{3p}} & J_{a_2}^{\theta_{3p}} & J_{L_4}^{\theta_{3p}} & J_{L_5}^{\theta_{3p}} \\ J_{\theta_{2a}}^{\theta_{4p}} & J_{\theta_{3a}}^{\theta_{4p}} & J_{a_2}^{\theta_{4p}} & J_{L_4}^{\theta_{4p}} & J_{L_5}^{\theta_{4p}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \theta_{2a} \\ \delta \theta_{3a} \\ \delta a_2 \\ \delta L_4 \\ \delta L_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

4. Total Kinematic Parameter Calibration

패시브 각도를 구하기 위한 파라미터가 3 개 추가되었고, 이 중에서 a2는 1st 경로의 기구학적 캘리브레이션에서 원래 고려했던 파라미터이므로, 2nd 경로의 길이에 대한 두 개에 대한 파라미터(L4, L5)가 추가되었다. 이 것을 일반적인 시리얼 로봇의 캘리브레이션을 위한 식(9)

$$\begin{aligned} \Delta X &= \frac{\partial}{\partial \Phi} f(\phi) \\ &= \frac{\partial f}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial f}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial f}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial f}{\partial \theta} \Delta \theta \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta X = J_{\phi} \Delta \phi$$

$$\Delta \Phi = [\Delta a \quad \Delta \alpha \quad \Delta \theta \quad \Delta d]^T, \quad \Delta X = X_m - X_c$$

Xm: 로봇의 실제 위치 값
Xc: Forward Kinematics으로 계산된 값

위의 식(9)에 식(8)을 사용 하여 ΔΦ 다시 정의 한 결과 식(10) 이 나온다.

$$\Delta X = J_{\phi} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & J_{a_2}^{\theta_{3p}} & \dots & J_{\theta_{3a}}^{\theta_{3p}} & J_{\theta_{3a}}^{\theta_{3p}} & \dots & J_{L_4}^{\theta_{3p}} & J_{L_5}^{\theta_{3p}} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \delta a_2 \\ \vdots \\ \delta \theta_{2a} \\ \delta \theta_{3a} \\ \vdots \\ \delta L_4 \\ \delta L_5 \end{bmatrix} \quad (10)$$

5. Stiffness Included Robot Calibration

Open Chain 들에서 얻어진 Gravity torque 를 Virtual Work 원리를 적용하여 활성 Gravity Torque 로 변환한 후, 본 연구자의 기존 연구[3]를 따라 관절강성 포함하는 캘리브레이션 식을 도출하면 다음과 같다.

$$\Delta X = \begin{bmatrix} J_{\phi} & J_{\theta}[\tau] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \phi \\ 1/K \end{bmatrix} = J_{\Phi} \Delta \Phi \quad (11)$$

병렬 링크의 파라미터 및 스티프니스 파라미터를 포함하는 전체 캘리브레이션 파라미터 계산 과정을 다음과 같이 간단히 요약할 수 있다.

- Step 1. Parameter define(Φ)
- Step 2. Five bar velocity analysis
- Step 3. compute Xc, Ci
- Step 4. Compute τ
- Step 5. Δφ = (J_{\phi}^T J_{\phi} + λI)^{-1} J_{\phi}^T ΔX
- Step 6. Φ_{i+1} = Φ_i + ΔΦ
- Step 7. Five bar position analysis
- Back to Step 1

이와 같은 과정을 수렴조건을 만족할 때까지 반복하여 최종적인 관련 파라미터를 구할 수 있다. 아래 Table 1 은 HX165 로봇에 대한 캘리브레이션 결과이고, 제시된 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있었다.

Table 1. Robot Calibration Results for HX165 Robot

Result	Kinematic only		Stiffness	
	Eavg	Emax	Eavg	Emax
Without L4,L5	0.470	0.825	0.357	0.881
With L4,L5	0.373	0.745	0.225	0.389

6. 결론

본 논문에서는 병렬구조(5 bar planar mechanism)를 가진 6 자유도 로봇에서 그 병렬 구조를 구성하는 링크 파라미터 및 관절 강성 파라미터를 캘리브레이션하는 방법을 제시하고 실험을 통하여 그 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

참고문헌

1. C. Wampler, T. Arai, "Calibration of robots having kinematic closed loops using nonlinear least-squares estimation," IFTOMM symposium, Nagoya, Japan, 1992.
2. G. Alici, B. Shirinzadeh, "Kinematic identification of a closed-chain manipulator using laser interferometry based sensing technique", Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 332-337, 2003.
3. 강희준, 신성원, 노영식, 서영수, 임현규, 김동혁., "위치 정밀도 향상을 위한 관절강성 파라미터 포함 로봇 캘리브레이션," 제어로봇시스템학회 논문지 14 권, 4 호, pp. 406-410, 2008.