

단힌 형태의 역기구학 해를 갖는 매니퓰레이터의 정밀도 개선 알고리즘

An Accuracy Improvement Algorithm for the Manipulators with Closed-Form Inverse Kinematic Solutions

조혜경, 조성호
(Hye-Kyung Cho and Sung-Ho Cho)

Abstract : This paper presents an efficient algorithm for including the kinematic calibration data into the motion controller to improve the positioning accuracy of the manipulators. Rather than spending several iterations for finding the inverse solution of the calibrated kinematics, our approach requires only the nominal inverse solution and the calibrated forward kinematics for providing a better position command promptly. Thus, real-time application is guaranteed whenever the manipulator's nominal inverse solution can be expressed in a closed form. Experimental results show that the line tracking performances can be remarkably improved by employing our algorithm.

Keywords : accuracy improvement, calibrated inverse kinematic solutions

I. 서론

정밀도(accuracy)는 로봇의 성능을 평가하는 가장 중요한 척도 중의 하나이다. 따라서, 정밀한 로봇을 만들기 위한 노력은 기구설계 및 제작과정의 개선과 제어기 성능향상의 측면에서 지속적으로 병행되어 왔다. 이러한 분야의 대표적인 연구로 기구학적 캘리브레이션(kinematic calibration)[1]-[8]을 들 수 있는데, 이는 로봇 엔드-이펙터(end-effector: 이후 손끝으로 표기함)의 위치와 각 관절 구동 명령 사이의 정확한 관계를 알아내고자 하는 것으로, 캘리브레이션을 통해 얻은 기구학 모델로부터 좀 더 정확한 제어 명령을 계산하면, 광역 위치오차(global positioning errors)를 반복정밀도 오차(repeatability errors)의 수준으로 감소시킬 수 있다는 결과가 발표되고 있다.

그런데, 캘리브레이션을 통해 로봇의 정확한 기구학 모델을 구한 경우도 이를 실제 로봇 제어기에 반영하는 것은 쉽지 않다. 왜냐하면, 캘리브레이션에 사용된 기구학 모델이 실제 로봇을 정확히 표현할수록, 이를 이용하기 위해서는 많은 연산비용(computational costs)이 부가적으로 요구되기 때문이다. 특히, 역기구학(inverse kinematics)이 단힌 해(closed-form solution)를 갖도록 설계된 매니퓰레이터에서는 이러한 부가적인 연산비용이 무시할 수 없는 문제를 야기한다. 왜냐하면 단순한 모델을 가능하게 했던 가정들이 성립하지 않게 됨에 따라 단힌 형태로 표현되는 역기구학을 이용할 수 없게 되므로 수치적인 방법(numerical methods)으로 역기구학을 구하기 위한 별도의 준비가 필요하며, 이는 역기구학이 단힌 해를 갖도록 설계하면서 얻고자 했던 장점들을 포기해야 함을 의미하기 때문이다.

따라서, 역기구학이 단힌 해를 갖도록 설계된 매니퓰레

이터들의 제어기에서는 빠른 시간 내에 안정된 위치 명령을 계산하기 위하여 주로 다음과 같은 근사(approximation)방법을 이용한다. 1)역기구학이 단힌 형태로 유지되는 범위 내에서 캘리브레이션을 통해 찾은 기구학 파라미터들의 일부만을 제어기에 포함시킨다. 2)자세(orientation)를 결정하는 관절각(6축 로봇의 경우 보통 4-6축)들의 값을 관절보간(joint interpolation)등의 단순한 방법으로 먼저 구한다고 가정하고, 이를 토대로 위치를 결정하는 관절들에 대한 해를 단힌 형태로 유도하여 이용한다. 위의 방법들을 이용하면 역기구학의 해는 빠른 시간 내에 구할 수 있으나, 1)의 경우 찾아낸 파라미터를 충분히 이용하지 못하므로 위치 및 자세 성분에 전반적으로 오차가 남아 있게 되며, 2)의 방법은 손끝의 위치 성분만 만족시키는 해가 출력된다.

본 논문에서는 정확한 기구학을 얻기 위한 모델링(modelling)과 파라미터 식별(parameter identification)에 집중하던 기존의 캘리브레이션 연구들과 달리, 알아낸 기구학 파라미터를 제어기에 효과적으로 포함시켜 정밀도를 향상시킬 수 있는 방법을 제시한다. 순방향 기구학(forward kinematics)은 모델이 복잡해지더라도 일정한 시간 이내에 계산할 수 있다는 점에 착안하여, 순방향 기구학을 계산할 때는 정확한 캘리브레이션 모델을 이용하여 공칭 기구학 모델(nominal kinematic model)이 갖는 오차가 보상될 수 있도록 한다. 반면, 역기구학을 계산할 때에는 기구설계 시에 유도한 공칭 역기구학 방정식(nominal inverse kinematic equations)을 그대로 이용하므로, 역기구학이 단힌 해를 갖도록 설계된 매니퓰레이터에서는 빠른 시간 내에 더욱 정확한 제어 명령을 계산할 수 있게 된다. 또한, 제안된 정밀도 개선방법을 실제 로봇 제어기에 적용하여 직선추적(line tracking) 성능을 측정함으로써 그 유용성을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2장에서는 역기구학이 단힌 해를 갖도록 설계된 매니퓰레이터를 대상으로 캘리브레이션된 기구학 모델에 기초한 정밀도 개선 문제

접수일자 : 2000. 2. 29., 수정완료 : 2000. 8. 1.

조혜경 : 한성대학교 정보전산학부

조성호 : 고등기술연구원 생산기술연구실

를 기술하고, 3장에서 직선 이동 시 공칭 역기구학을 그대로 이용하는 효과적인 정밀도 개선 알고리즘을 제시한다. 4장에서는 제시된 알고리즘을 적용하여 직선 추적 성능을 평가한 실험 결과가 제시되며, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 문제의 설정

문제의 기술에 앞서 제안된 방법이 적용될 매니플레이터에 대해 다음과 같이 가정한다. 1) 대상 매니플레이터의 공칭 기구학 모델(nominal kinematic model)로부터 순방향(forward kinematics) 및 역방향 기구학의 해가 닫힌 형태로 유도되어 있다. 2) 공칭 기구학 모델과 실제와의 차이는 제작 및 조립과정의 작은 기계적 오차에 의한 것으로, 그 차이가 크지 않다. 또한, 각 관절의 모터 제어기(motor controller)가 갖는 오차는 무시한다.

본 논문에서 캘리브레이션을 이용한 정밀도 개선 문제를 다루는 기본적인 개념은 다음과 같다. 우리가 기구 설계 시 유도한 공칭 기구학 모델을 이용하여 로봇을 직각좌표 공간(Cartesian space) 내의 특정 위치 x 로 이동시킨다고 가정하자. 기구학 모델이 완벽하지 않으므로 x 에 대한 역기구학(inverse kinematics)의 해를 구하여 로봇을 구동하면 로봇은 x 가 아니라 x 근처의 가까운 다른 곳에 위치하게 된다. 그런데, x 가 로봇의 작업공간(workspace) 내에 위치하고 있다면 로봇이 정확히 x 에 위치하도록 만드는 관절각이 존재하므로, x 대신 $x + \Delta x$ 에 대한 역기구학을 이용할 때 결과적으로 로봇이 x 에 위치하게 만드는 Δx 가 존재한다고 할 수 있다. 즉, 우리가 모든 위치에서 적절히 Δx 를 구할 수 있다면, 간단한 형태의 공칭 역기구학을 이용하면서도 캘리브레이션을 통해 얻은 복잡한 역기구학을 풀어 로봇을 구동하는 것과 같은 효과를 낼 수 있다.

F_n 및 F_n^{-1} 를 각각 공칭 순기구학(nominal forward kinematics) 및 역기구학 방정식이라 하자. 그러면, 직각좌표 공간에서의 위치 및 자세벡터 $x \in R^6$ 와 로봇의 각 관절 벡터 $q_n \in R^k$ 는 다음의 관계식 $x = F_n(q_n)$ 또는 $q_n = F_n^{-1}(x)$ 로 표현되며, 여기서, k 는 로봇의 자유도(degrees of freedom)를 나타낸다. 또한, 캘리브레이션을 통해 구한 좀 더 정확한 기구학 F_c 및 역기구학 F_c^{-1} 를 도입하면 같은 위치 x 에 대해 다른 관절각이 대응되게 되며, 이를 q_c 라 하면 이들 사이의 관계는 $x = F_c(q_c)$ 또는 $q_c = F_c^{-1}(x)$ 로 표현된다. 이 때, q_n 과 q_c 는 두 관절벡터의 차 Δq 를 도입하여

$$q_c = q_n + \Delta q \quad (1)$$

로 표현될 수 있다.

위 관계식들을 적용하여 공칭 역기구학으로부터 캘리브레이션된 역기구학(calibrated inverse kinematics)의 해를 구하는 문제를 정확화하면 다음과 같다.

문제 1 : 위치 x 에 대해,

$$F_n^{-1}(x + \Delta x) = F_c^{-1}(x) = q_c \quad (2)$$

를 만족하는 Δx 를 구하라.

즉, 공칭 역기구학에 적절한 오프셋(offset) Δx 를 더하여

구한 해가 캘리브레이션된 역기구학의 해와 같아지도록 만드는 Δx 를 구하는 문제가 된다. Δx 는 (1)과 (2)를 이용하여

$$\begin{aligned} \Delta x &= F_n(q_c) - x \\ &= F_n(q_n + \Delta q) - F_n(q_n) \end{aligned} \quad (3)$$

로 표현되는데, Δx 를 분석적인 형태로 유도할 수 없으므로 적절한 근사화(approximation) 방법이 필요하다. 다음 장에서 이에 관하여 논한다.

III. 정밀도 개선 알고리즘

이 장에서는 문제 1에 표현된 역기구학의 근사해(approximate solution)를 구하는 방법을 제안한다. 정확한 역기구학의 해를 구하기 위한 효과적인 방법은 이미 많은 연구에서 다루었으나 반복적인 계산(iteration)에 의존한 수치해(numerical solution)의 형태로 주어진다. 오프라인(off-line) 응용에서는 의미가 있어도 제어기 내부에 실시간으로 적용하는 데에는 문제가 있다. 따라서, 본 논문에서는 제한된 시간 내에 계산할 수 있으면서도 성능이 우수한 근사해를 제안한다. (3)에서 볼 수 있듯이 Δx 를 정확히 표현하기 위해서는 캘리브레이션된 역기구학의 해 q_c 를 필요로 하는데, 이것을 미리 안다는 것은 이미 원하는 답을 얻었음을 의미하므로, 우리가 닫힌 형태로 구할 수 있는 항목들로부터 Δx 를 구하기 위한 적절한 근사화 과정이 필요하다. F_c^{-1} 를 제외한 F_n , F_n^{-1} 및 F_c 가 닫힌 형태로 계산될 수 있으므로 이들을 이용하여 다음과 같이 근사화한다.

공칭 기구학 모델과 실제와의 차이가 크지 않으므로 Δq 의 크기가 매우 작다고 가정할 수 있고, 이 경우 특정 관절각 q 에서 Δq 만큼 이동한 위치에 대해 일차 근사화(first-order approximation)가 가능하므로

$$F(q + \Delta q) - F(q) \approx F(q) - F(q - \Delta q)$$

가 성립한다. 즉, 특정 위치에서 관절이 Δq 만큼 미소 이동(infinitesimal movement)한 것으로 인한 직각좌표 공간에서의 위치오차벡터는 $-\Delta q$ 만큼 이동한 경우와 크기는 같고 반대 방향이라 할 수 있다. 그러면 Δx 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta x &\approx F_n(q_n) - F_n(q_n - \Delta q) \\ &\approx F_c(q_c) - F_c(q_c - \Delta q) \\ &= x - F_c(q_n) \\ &= \bar{\Delta x} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, (4)의 첫째 식은 로봇이 x 에서 $-\Delta q$ 만큼 회전함으로 인하여 발생한 직각좌표 공간에서의 이동량을 공칭기구학을 이용하여 표현한 것이고, 둘째 식은 캘리브레이션된 기구학을 이용하여 표현한 것이다.

Δx 와 이를 근사화한 $\bar{\Delta x}$ 와의 관계를 그림으로 표현하

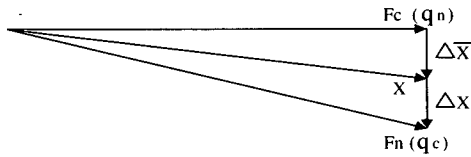


그림 1 $\Delta \bar{x}$ 를 이용한 Δx 의 근사화.

Fig. 1. Approximation of Δx with $\Delta \bar{x}$.

면 그림 1과 같다. $\Delta \bar{x}$ 의 계산에는 캘리브레이션을 통해 얻은 기구학의 순방향 방정식이 이용되는데, 순방향 방정식은 모델이 매우 복잡한 경우도 정해진 시간 내에 계산할 수 있으므로 실시간으로 적용할 수 있다. 이와 같은 근사화를 통해 표현된 역기구학 관계를 F_c^{-1} , 또, 그 해를 \bar{q}_c 라 하자. 그러면, 본 논문에서 제안하는 역기구학의 근사해는

$$\bar{q}_c = F_c^{-1}(x) = F_n^{-1}(x + \Delta \bar{x}) \quad (5)$$

로 표현된다.

위의 근사화에 대한 물리적인 의미는 다음과 같다. 우리가 공칭 역기구학을 이용하여 로봇을 x 로 이동시키고자 하면 공칭 역기구학의 해 q_n 이 갖는 오차로 인해 로봇은 x 근처의 다른 점에 위치하게 된다. 만일, 우리가 매우 정확한 기구학 모델을 알고 있다면 로봇의 현재 위치가 $F_c(q_n)$ 으로 표현되므로 우리는 q_n 에 의해 로봇이 목표 위치 x 와 어느 정도 떨어져 있게 되는가를 알 수 있다. 이 거리가 $\Delta \bar{x}$ 이며, 공칭 역기구학을 이용하는 경우 발생하는 광역위치오차(global positioning error)에 해당된다. 이제 x 대신 $x + \Delta \bar{x}$ 를 이용하여 공칭 역기구학을 다시 풀면 로봇은 $F_c(q_n)$ 으로부터 거의 $\Delta \bar{x}$ 만큼 전진한 점에 위치하게 되고, 따라서 x 에 매우 인접하게 된다. 물론 이 경우도 로봇은 정확히 x 에 도달하지 못하는데, 이는 공칭 기구학이 갖는 오차로 인해 로봇이 정확히 $\Delta \bar{x}$ 만큼 더 이동하지 못하기 때문이다. 하지만, 이 경우 x 에 대한 광역 위치 정밀도(global positioning accuracy)는 $\Delta \bar{x}$ 자체가 아니라, 로봇이 $\Delta \bar{x}$ 만큼 추가로 이동하면서 발생한 오차에 의해 결정되므로 정밀도가 매우 크게 향상된다. 즉, 로봇이 x 에 얼마나 접근하는가 하는 정도는 $\Delta \bar{x}$ 만큼의 이동에 대한 공칭 기구학의 상대 정밀도(relative accuracy)에 의해 결정된다. 이 때, 캘리브레이션을 통해 얻은 파라미터의 일부를 역기구학이 닫힌 형태로 유지되는 범위 내에서 공칭 기구학에 반영하면 공칭 기구학의 정밀도가 개선되므로, 근사화를 통해 구한 해의 성능이 더욱 향상된다.

그런데, 근사해 \bar{q}_c 가 공칭역기구학을 이용하는 q_n 보다 이상적으로 얻고자 하는 q_c 에 매우 근접한 해임은 분명하지만 근사화된 \bar{q}_c 를 역기구학의 해로 이용하는 데에는 한 가지 문제가 있다. (5)에 표현된 근사화된 역기구학은 대응되는 순방향 모델을 갖고 있지 않다. 즉,

$$F_c(\bar{q}_c) = x$$

를 만족하는 \bar{F}_c 를 해석적인 형태로 유도할 수 없으므로 F_c 를 이용할 수 밖에 없는데, 이는 순방향과 역방향 기구학의 모델이 유사하지만 정확히 일치하지 않음을 의미한다. 즉, 임의의 관절각 q 에 대해

$$F_c^{-1}(F_c(q)) \neq q$$

가 되므로, 이로 인하여 처음 직선 이동을 시작할 때 이동이 약간 부자연스럽게 되거나, 목표 위치가 관절각으로 주어진 직선 운동의 경우 최종 관절각을 정확히 만족시키기 어려워지는 문제가 발생한다. 또한, 이러한 현상은 반복정밀도의 악화를 초래할 수도 있다. 따라서, 이동을 시작할 때 근사해로 부드럽게 연결시키는 과정이나, 직선의 끝에서는 근사해가 아닌 정확한 역기구학의 해를 이용하여 문제점을 보완하는 과정이 필요하다. 정확한 역기구학의 해는 계산 시간만 충분히 확보된다면 위에서 설명한 근사화 과정을 반복적으로 적용하여 쉽게 구할 수 있고, 이동을 시작하기 전에 목표 위치에 대해서만 미리 계산하면 되므로 반복횟수에 따른 계산 시간의 제약을 고려할 필요가 없다.

다음은 정확한 역기구학의 해를 구하는 과정이다. 계산 시간이 충분한 경우 (5)로 주어진 근사화 과정을 반복하면 $\Delta \bar{x}$ 는 0으로 접근하게 되며, 이 때 공칭역기구학을 통해 얻은 해는 캘리브레이션 된 역기구학의 해와 같아지게 되어, 선행 연구들[8][10]에서와 유사한 역기구학의 해를 구하는 방법을 제공한다.

캘리브레이션 된 역기구학의 해

Step 1 : 목표위치 x 를 입력으로 공칭 역기구학을 풀어 q_n 을 구한다.

Step 2 : 캘리브레이션 모델의 순기구학으로부터 관절각이 q_n 일 때 로봇의 실제 위치 $F_c(q_n)$ 을 구한다.

Step 3 : 오차 $|\Delta \bar{x}| = |x - F_c(q_n)| > \epsilon$ 이면 $x \leftarrow x + \Delta \bar{x}$ 로 하고 Step 1로 간다. 아니면, Step 4로 간다.

Step 4 : q_n 을 출력한다.

여기서, ϵ 은 요구되는 정밀도에 적합한 작은 상수로 결정한다. 이러한 과정을 반복하면 공칭 역기구학의 해 q_n 이 캘리브레이션된 역기구학의 해 q_c 에 수렴하게 되며, 요구되는 정밀도 이하로 제어 성능을 향상시킬 수 있다.

마지막으로 직선경로계획을 위해 본 연구에서 제안하는 정밀도 개선 알고리즘을 요약하면 다음과 같다. 기존의 경로계획과의 차이는 이동 중에는 실시간 적용을 보장하기 위해 근사화된 역기구학을 이용하므로, 이동의 시작(Step 1)과 끝(Step 6)에서 정확한 역기구학의 해와 부드럽게 연결하는 단계가 추가된다. Step 1부터 Step 3은 출발 전의 준비과정이며 Step 4부터 이동이 시작된다.

역기구학의 근사해를 이용한 정밀도 개선 알고리즘

Step 1 : 목표 위치가 x_f 로 주어진 경우는 $q_{cf} = F_c^{-1}(x_f)$ 를 구한다. x_f 목표 위치가 q_{cf} 로 주어진 경우는 $x_f = F_c(q_{cf})$ 를 구한다.

Step 2 : 현재 관절각 q_s 로부터 $x_s = F_c(q_s)$ 를 구한다.

Step 3 : $x_k = \lambda x_f + (1-\lambda)x_s$ 로 직선을 따라가는 경우 점을 생성할 매개변수 λ 의 프로파일 생성을 준비한다.

Step 4 : $\lambda = 0$ 에 대응하는 $\overline{F_c^{-1}}(x_s)$ 를 풀어 하위 제어기로 전송한다. q_s 와 $\overline{F_c^{-1}}(x_s)$ 의 차이가 크면 몇 개의 샘플링 구간에 나누어 전송한다.

Step 5 : $0 < \lambda \leq 1$ 구간에서 이동속도에 따라 $q_{ck} = \overline{F_c^{-1}}(x_k)$ 를 풀어 하위 제어기로 전송한다.

Step 6 : q_{cf} 를 하위 제어기로 전송한다. q_{cf} 와 $\overline{F_c^{-1}}(x_f)$ 의 차이가 크면 몇 개의 샘플링 구간에 나누어 전송한다.

IV. 실험 결과

제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 고등기술연구원에서 제작한 6축 아크 용접용 로봇 Rokey와 레이저 추적기(laser tracker) LTD500을 이용하여 직선 추적 성능을 측정하였다. Rokey는 본체중량 60Kg, 가반중량 5Kg의 소형 로봇이며, 개략적인 사양은 그림 2에서 볼 수 있다.

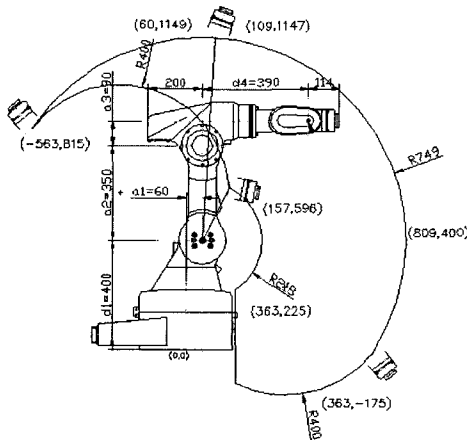


그림 2. Rokey의 작업 영역.

Fig. 2. Workspace of Rokey.

위치 측정에 이용된 레이저 추적기의 측정 오차는 5m 기준 $\pm 0.05\text{mm}$ 이다. 정밀도 확인을 위해 직선추적실험을 택한 이유는 다음과 같다. 만일, 유한개의 정해진 위치에서의 정밀도만 중요시되는 작업이라면 복잡한 캘리브레이션 모델을 굳이 제어기 내에 포함시키지 않고도 위치보정이 가능하다. 즉, 오프라인(off-line)으로 캘리브레이션된 역기구학의 해를 미리 구한 후 해당 위치로 이동할 때 저장된 관절각을 이용하면 된다. 그런데, 직선이나 원호와 같이 주어진 경로를 따라 이동하는 경우에는 위치제어명령을 계산할 때마다 추적하려는 경로 위의 점에 대한 역기구학의 해를 구해야 하므로, 제어기 내에 포함된 역기구학의 오차가 크면 추적 성능이 저하된다. 즉, 긴 직선을 이동하는 경우 직선의 중앙 부근으로 갈수록 직선으로부터 이탈(deviation)이 심해지며, 직경이 작은 원이나 로봇 손 끝의 자세가 많이 변경되는 경로에서는 특히 심각한 오차를 초래한다.

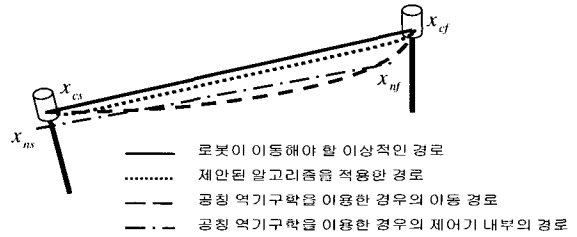


그림 3. 공칭 역기구학을 이용한 직선 이동시의 경로 이탈 현상과 제안된 알고리즘을 통한 개선.

Fig. 3. Deviation from the straight line when the nominal kinematic model is employed, and the improvement through the proposed method.

그림 3은 이와 같은 현상을 개념적으로 설명한다. 로봇을 x_{cs} 로부터 x_{cf} 까지 직선을 따라 이동시키려 한다. 경로의 양쪽 끝에 해당하는 관절각은 오프라인으로 정확히 구하고 내부 제어기에는 공칭 기구학 모델을 그대로 사용한다고 가정한다. 경로의 양쪽 끝에서의 저장된 관절각을 이용하여 공칭 순방향 기구학을 풀면 로봇의 실제 위치와는 다른 x_{ms} 및 x_{mf} 가 계산되고, 제어기 내부에서는 x_{ms} 와 x_{mf} 사이의 직선을 따라 움직이는 경로가 공칭 역기구학을 이용하여 생성된다. 그러나 공칭 기구학 모델의 오차로 인하여 실제 로봇은 왜선과 같이 휘어진 경로로 이동하게 된다. 이와 같이, 추적 성능은 캘리브레이션의 결과를 제어기 내에 포함시키지 않고는 개선될 수 없으므로 긴 직선을 추적하는 실험으로 본 연구 결과의 유용성을 검증하고자 한다. 물론 정확한 역기구학의 해가 아니라 근사해가 이용되므로 약간의 오차는 남아 있으나 점선으로 보인 것과 같이 경로 이탈의 정도가 매우 개선될 수 있다.

캘리브레이션을 위한 기구학 모델로 가장 고전적인 것은 D-H 변환(transformation)[9]을 정의하는 4 개의 파라미터를 이용하는 것이다. 그런데, D-H 모델은 인접한 두 축이 평행한 경우의 특이문제(singularity problem)를 야기하므로 이를 개선하기 위해 평행한 축들이 이루는 평면과 직각방향의 회전변환 β 를 추가하는 방법[10][11]이 보편적으로 이용되고 있으며, 최근에는 특이 문제가 없는 직선 표현 방법에 근거를 둔 CPC 모델[12]과 같은 접근방법들도 이용되고 있다. 본 논문에서는 [11]의 모델을 이용하였으며, 이 경우 인접한 두 관절 $\{i-1\}$ 과 $\{i\}$ 사이의 동차변환행렬(homogeneous transformation matrix)은

$${}^{i-1}T_i = Rot_z(\theta_i)Trans(a_i, 0, d_i)Rot_x(a_i)Rot_y(\beta_i)$$

로 표현된다. 캘리브레이션은 작업공간 내에 고르게 분포된 96 곳의 위치 데이터를 측정하여 수행되었다. 자세한 캘리브레이션 절차는 본 논문에서 다루고자 하는 범주를 벗어나므로 생략한다. Rokey의 공칭 기구학 파라미터와 캘리브레이션을 통해 얻은 기구학 파라미터들은 표 1에서 볼 수 있다. 실험에 이용된 로봇은 공칭 기구학 모델만을 이용하여 제어할 경우 y축을 따라 움직일 때 특히 심한 경로 이탈을 보였으므로, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 효

용성을 검증하기 위하여 y축을 따라 840mm를 이동하는 다음의 두 경로를 실험대상으로 선정하였다.

표 1. Rokey의 기구학 파라미터.

Table 1. Kinematic parameters of Rokey.

	Nominal Parameter					Calibrated Parameter				
	$\Delta\theta$	α_i	d_i	a_i	β_i	$\Delta\theta$	α_i	d_i	a_i	β_i
1	0.0	90.0	400.0	60.0	0.0	0.00	90.01	400.0	59.11	0.73
2	0.0	0.0	0.0	350.0	0.0	0.25	0.21	0.0	350.65	0.02
3	0.0	90.0	0.0	80.0	0.0	-0.37	89.79	0.0	79.58	0.16
4	0.0	90.0	390.0	0.0	0.0	0.00	89.94	390.00	0.46	0.32
5	0.0	90.0	0.0	0.0	0.0	0.00	90.11	0.0	0.0	0.13
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.00

단위 mm, deg

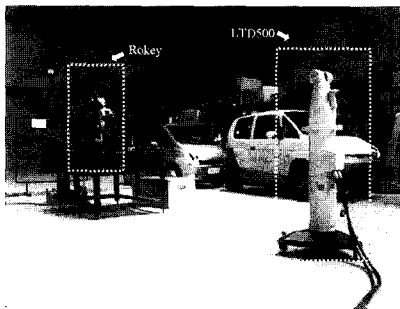


그림 4. 로봇과 측정기가 배치된 실험 환경.

Fig. 4. Experimental Environment.

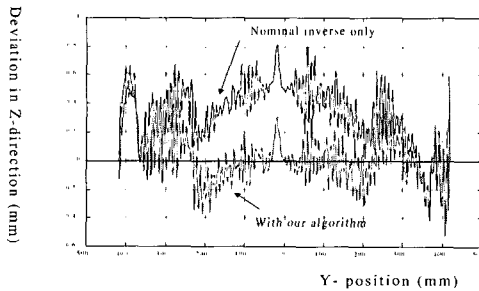


그림 5. 경로 1에 대한 측정 결과 : 공칭 역기구학을 적용한 경우와 제안된 알고리즘의 비교.

Fig. 5. Experimental results for path 1 : nominal inverse solution vs. our solution.

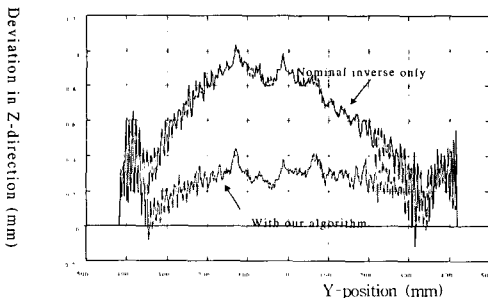


그림 6. 경로 2에 대한 측정 결과 : 공칭 역기구학을 적용한 경우와 제안된 알고리즘의 비교.

Fig. 6. Experimental results for path 2 : nominal inverse solution vs. our solution.

- 경로 1 : (820,420,124) - (820,-420,124) 단위:mm
- 경로 2 : (600,420,124) - (600,-420,124)

그림 4는 로봇과 레이저 추적기가 배치된 실험 환경에 대한 사진을 보여 준다. 그림 5에는 첫째 경로에 대한 yz-평면에서의 측정 결과가 나타나 있다. 그림에서 0으로 표시된 수평축이 이상적으로 추적해야 할 경로이고, 공칭 역기구학만을 이용한 경우의 이동 경로와 제안된 정밀도 개선 알고리즘을 적용한 경우의 결과를 비교할 수 있다. 제안된 알고리즘의 적용 후에 나타난 오차에는 정확한 역기구학 대신 근사 역기구학을 사용함으로써 인해 발생한 오차, 캘리브레이션 모델에 포함되지 않은 기계적 오차, 제어기 성능에 따른 오차, 측정 오차 등이 복합적으로 포함되어 있어 정밀도가 개선된 정도를 정량적으로 나타내기는 어려우나 공칭 역기구학을 사용한 경우 -0.4mm ~ 0.8mm 정도 직선에서 벗어나던 것이 제안된 알고리즘을 적용하여 -0.3mm ~ 0.3mm 정도로 감소했다. 그림 6은 경로 2에 대한 실험 결과를 보여 준다. 이 경로에서는 제안된 알고리즘을 적용함으로써 경로 이탈이 줄어드는 현상이 더욱 두드러지게 나타나, 이상적인 경로로부터의 최대 오차가 1.0mm에서 0.4mm로 크게 감소하였다.

추적성능 향상을 위한 추가적인 연산비용으로는 대략 공칭 역기구학 실행시간의 2배가 추가로 요구된다. 공칭 역기구학의 해가 주어졌을 때 이를 개선하여 좀 더 정확한 해를 얻기 위해서는 순기구학 한 번, 역기구학 한 번을 더 계산해야 하기 때문이다. 본 실험에 이용된 제어기에서는 16ms를 주기로 DSP 모듈에 위치 명령을 전송하는데, 80486 CPU를 탑재한 제어기에서 용접작업을 위한 추가적인 연산을 수행하면서도 제안된 알고리즘을 실행하는 데 아무런 무리가 없었다. 만일 계산 시간을 충분히 확보할 수 있는 환경이라면, 제안된 보정 알고리즘을 2회 반복하여 역기구학의 해를 구함으로써 정밀도를 더욱 개선시킬 수 있을 것으로 예상된다. 정밀도나 추적성능의 향상은 단지 기구학적 캘리브레이션만으로 해결될 수 있는 문제는 아니지만, Rokey와 같은 소형 용접 로봇에서의 적용 효과로부터 판단할 때, 상대적으로 크기가 큰 로봇들에 있어서는 정밀도 향상에 더욱 크게 기여할 것으로 기대된다.

V. 결론

본 논문에서는 기구학적 캘리브레이션의 결과를 이용하여 로봇의 정밀도를 개선하는 효과적인 알고리즘을 제시하였다. 제안된 방법은 캘리브레이션 결과를 이용하여 별도의 역기구학 방정식을 유도하지 않고 기구설계 시에 유도된 공칭 역기구학 방정식을 그대로 이용하므로, 역기구학이 닫힌 해를 갖도록 설계된 매니퓰레이터에 적용할 경우 실시간 구현이 가능하였다. 제안된 정밀도 개선방법을 실제 로봇 제어기에 적용하여 긴 직선의 추적성능(line tracking performance)을 측정한 결과, 직선에서부터의 최대 이탈거리가 현저히 감소하는 것으로 확인되었다. 실험은 소형 용접로봇을 대상으로 이루어졌으나, 상대적으로 크기가 큰 로봇들에서는 그 성과가 더욱 두드러질 것으로 기대된다.

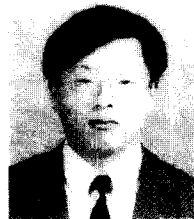
참고문헌

- [1] J. H. Borm and C. H. Meng, "Determination of optimal measurement configurations for robot calibration based on observability measure," *International J. of Robotics Research*, vol. 10, no. 1, pp. 51-63, Feb., 1991.
- [2] J. H. Borm and J. C. Choi, "Improvement of local position accuracy of robots for off-line programming," *KSME Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 31-38, 1992.
- [3] D. E. Whitney, C. A. Lozinski, and J. M. Rourke, "Industrial robot forward calibration method and results", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 108, no. 1, pp. 1-8, 1986.
- [4] G. Duellen and K. Schroer, "Robot calibration -- method and results," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 8, no. 4, pp. 223-231, 1991.
- [5] D. H. Kim, K. H. Cook, and J. H. Oh, "Identification and compensation of a robot kinematic parameter for positioning accuracy improvement," *Robotica*, vol. 9, no. 1, pp. 99-105, 1991.
- [6] M. J. Er, S. B. Chang, and C. S. Huang, "An approach toward non-contact coordinate measurements for robotic manipulators," *Proc. of the fifth Int'l Conf. on Control, Automation, Robotics, and Vision*, pp. 1518-1522, singapore, Dec., 1998.
- [7] J. M. Hollerbach and C. W. Wampler, "The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods," *Int'l J. of Robotics Research*, vol. 15, no. 6, pp. 573-591, Dec., 1996.
- [8] R. P. Judd and A. B. Knasinski, "A technique to calibrate industrial robots with experimental verification," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 1, pp. 20-30, Feb., 1990.
- [9] K. S. Fu *et al.*, *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill, 1987.
- [10] B. Karan and M. Vukobratovic, "Calibration and accuracy of manipulation robot models-an overview," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 29, no. 3, pp. 479-500, 1994.
- [11] S. A. Hayati and M. Mirmirani, "Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators," *J. of Robotic Systems*, vol. 2 no. 4 pp. 397-413, 1985.
- [12] H. Zhuang, L. K. Wang, and Z. S. Roth, "Error-model-based robot calibration using a modified CPC model," *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 10, no. 4, 1993.



조혜경

1987년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 동 대학원 석사(1989), 동 대학원 박사(1994). 1994년~1995년 서울대 제어계측신기술연구센터 연구원. 1995년~1996년 고등기술연구원 선임 연구원. 1996년~현재 한성대학교 정보전산학부 조교수. 관심분야는 산업용로봇제어, 다중로봇 협력제어, 궤적 최적화 알고리즘, 이동 로봇의 주행 알고리즘.



조성호

1994년 금오공과대학교 생산기계공학과 졸업. 동 대학원 기계설계공학과 석사(1996). 1996년 ~ 현재 고등기술연구원 주임연구원. 관심분야는 산업용 로봇설계, 오프라인 프로그래밍.