

폐루프 역기구학 알고리즘의 추종 제어 비교 연구

이상엽¹, 박수한¹, 장근우¹, 김상현¹, 김승연¹, 박재홍^{1,2}

¹서울대학교, ²차세대융합기술원

Comparative study of tracking control with closed loop inverse kinematics algorithm

Lee Sang Yup¹, Park Suhan¹, Jang Keunwoo¹, Kim Sanghyun¹, Kim Seungyeon¹,
Park Jaeheung^{1,2}

¹Seoul National University, ²Advanced Institute of Convergence Technology
e-mail: sangyup8378, psh117, jkw0701, ggory15, ksy0711, park73@snu.ac.kr

요 약

폐루프 역기구학은 말단 장치의 추종 오차를 고려한 수치적 역기구학 방법이다. 폐루프 역기구학은 관절 궤적 생성기로 사용되지만, 일부 학술 자료에서는 되먹임 항에 로봇 상태를 반영하여 제어기로 사용한다. 본 논문에서는 두 알고리즘의 제어 성능을 비교하고 각 한계점을 파악한다. 알고리즘의 적용에는 7자유도 매니퓰레이터를 이용해 이루어졌다.

1. 서론

역기구학이란 원하는 위치와 방위로 로봇의 말단 장치를 움직이기 위해 각 관절의 각도를 계산하는 방법이다. 자코비안을 이용한 수치적 방법의 경우, 어떤 보간법을 사용하더라도 각 수치 적분 단계에서 작은 오차가 누적되어 정확한 해로부터 멀어지게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 말단 장치의 추종 오차를 고려한 폐루프 역기구학(Closed-Loop Inverse Kinematics, CLIK)이 제안되었다.

폐루프 역기구학은 관절 궤적 생성기(Joint Trajectory Reconstruction)로 소개된다[1]. 하지만 일부 학술 자료에서는 되먹임 항에 로봇의 측정된 상태를 반영하여 제어기로 사용되기도 하였다[2]. 그러나 기존 연구에서는 폐루프 역기구학의 각 알고리즘에 대해 성능과 한계점을 비교 분석한 연구가 부족했다. 그러므로 본 논문에서는 두 가지 알고리즘을 이용했을 때의 로봇 제어 성능을 추종 오차로 비교하고 각 알고리즘의 한계점을 논의한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 폐루프 역기구학을 이용한 두 알고리즘을 설명한다. 3장에서는 7자유도 로봇 매니퓰레이터 Panda[3]에 각 알고리즘을 적용한 실험 결과를 담고 있으며, 4장에서 본 논문을 결론짓는다.

2. 본론

2.1 폐루프 역기구학

자코비안 역행렬을 이용하여 로봇의 역기구학을 계산할 수 있다. 이때 폐루프 역기구학은 수치 적분에서 생기는 드리프트를 줄이기 위해 추종 오차($e = x_d - x$)에 비례하는 되먹임 항을 추가하여 식 (1)과 같이 표현한다. 로봇 제어 시스템은 이산화된

$q_d[k], x_d[k]$ 으로 구성되어 있으며 수치 적분은 식 (2)와 같이 표현한다.

$$\dot{q}_d = J^+(q)(\dot{x}_d + K(x_d - x)) \quad (1)$$

$$q_d[k+1] = q_d[k] + \dot{q}_d[k]\Delta t \quad (2)$$

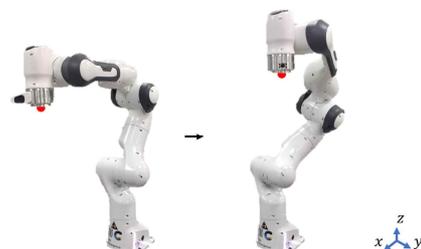
q_d 는 목표 관절 각도, x 는 말단 장치의 위치 및 방위, x_d 는 말단 장치의 목표 위치 및 방위, \dot{x}_d 는 말단 장치의 목표 위치 및 방위 속도, K 는 되먹임 이득 값, $J^+(q)$ 는 q 를 이용해 구한 자코비안의 우-의사역행렬을 의미한다. k 는 음이 아닌 정수, Δt 는 제어 주기, $q_d[k] := q_d(k\Delta t)$ 이다.

2.2 관절 궤적 생성 알고리즘

관절 궤적 생성 알고리즘은 작업 공간에 대해 주어진 궤적을 관절 공간에 대한 궤적으로 생성하는 알고리즘이다. 되먹임 항으로 인하여 목표 위치 및 방위와 목표 관절 각도의 정기구학 사이의 오차를 줄일 수 있다.

$$\dot{q}_d[k] = J^+(q_d[k])(\dot{x}_d[k] + K(x_d[k] - f(q_d[k]))) \quad (3)$$

$f(q[k])$ 는 $q[k]$ 와 정기구학을 이용해 구한 말단 장치의 위치 및 방위, $q[k] := q(k\Delta t)$, $x_d[k] := x_d(k\Delta t)$, $\dot{x}_d[k] := \dot{x}_d(k\Delta t)$ 를 의미한다.



[그림 1] Initial pose and target pose of Panda end-effector

(단위: mm)	$K = 10$	$K = 20$	$K = 1500$
관절 궤적 생성 알고리즘	0.0328	0.0348	0.0425
로봇 상태를 반영한 제어 알고리즘	0.0037	0.0030	발산

[표 1] Steady-state error tracking performance for each CLIK algorithm

2.3 로봇 상태를 반영한 제어 알고리즘

로봇 상태를 반영한 제어 알고리즘은 측정된 로봇 관절 각도($\hat{q}[k]$)를 사용하여 다음 제어 주기의 목표 관절 각도($q_d[k+1]$)를 계산한다. 따라서 관절 제어기가 추종하지 못한 오차가 되먹임 항에 포함된다.

$$\dot{q}_d[k] = J^+(\hat{q}[k])(\dot{x}_d[k] + K(x_d[k] - f(\hat{q}[k]))) \quad (4)$$

3. 실험 결과

3.1 추종 제어 실험

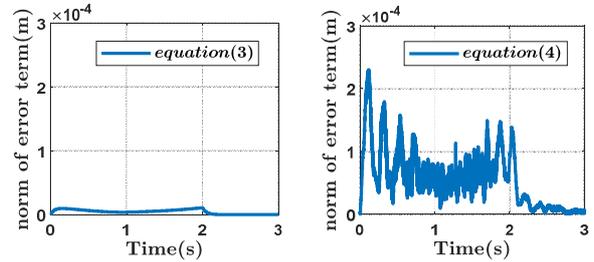
7자유도 매니퓰레이터 Panda에 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 실험했다. 초기 위치는 x, y, z 방향으로 (0.385, 0.000, 0.623)이고 2초 동안 목표 위치인 x, y, z 방향 (0.185, 0.200, 0.723)으로 움직였다[그림 1]. 목표 방위는 초기 방위에서 z 축 기준으로 45도 회전이다. 로봇의 제어 입력은 위치 값이고, 제어 주기는 1000 Hz이다.

[그림 2]에서는 식 (4)의 추종 오차 항에 진동이 있음을 알 수 있다. [그림 3]은 목표 관절 속도 그래프의 일부분이다. [그림 3]에서는 식 (4)의 \dot{q}_d 에 진동이 있음을 알 수 있다. 식 (4)는 외란과 잡음이 되먹임 항에 반영되어 \dot{q}_d 에 진동이 생긴다. 식 (4)의 되먹임 이득 값이 20을 넘으면 q 가 발산하는 불안정성을 보이는 것은 되먹임 항의 진동이 심해지기 때문으로 판단된다. 반면에 식 (3)은 진동이 없어 안정성을 유지하여 큰 되먹임 이득 값도 사용할 수 있었고, 되먹임 이득 값의 한계점을 계산할 수 있어 설정하기 간편했다.

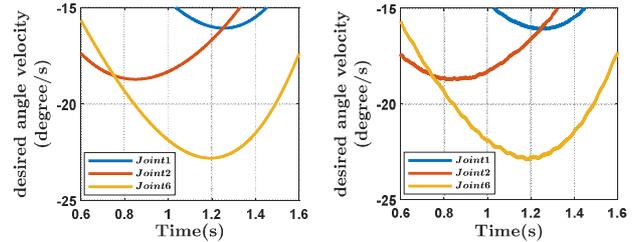
3.2 각 알고리즘의 한계점

[표 1]은 말단 장치 위치의 정상상태 추종 오차이다. 식 (4)를 이용한 경우의 추종 오차가 더 작았고, 이는 링크의 처짐, 마찰, 제어기의 성능 부족 등으로 인하여 생기는 제어 오차가 되먹임 항을 통해 보상되기 때문으로 판단된다. 식 (3)의 정상상태 추종 오차는 더 컸고, 이 오차는 관절 위치 제어기의 성능에 따라 달라진다.

식 (3)을 사용하기 위해서는 이전 제어 주기의 목표 관절 각도에 대한 자코비안과 정기구학을 제어 주기마다 추가로 계산해야 한다. 왜냐하면, 대부분의 로봇 제어기는 현재 관절 각도를 사용해서 계산되는 자코비안과 말단 장치의 자세만을 제공하기 때문이다. 하지만 식 (4)는 로봇 제어기가 제공하는 정보만으로 구성할 수 있어 계산 이득을 본다.



[그림 2] norm of error term of each CLIK algorithm (K=20)



[그림 3] Part of desired angle velocity graph when K=20 (Left: equation 3, Right: equation 4)

4. 결론

본 논문에서는 페루프 역기구학이 두 방식으로 사용되고 있음에 주목하여, 관절 궤적 생성 알고리즘과 로봇 상태를 반영한 제어 알고리즘의 비교가 필요함을 제안했다. 그리고 실제 로봇 실험을 통해 각 알고리즘의 추종 오차와 한계점을 비교하였다.

실험적으로 얻은 적절한 이득 값을 사용할 경우 두 방식 모두 안정적으로 목표를 추종하는 성능을 보였다. 관절 궤적 생성 알고리즘의 정상상태 추종 오차는 로봇의 관절 위치 제어기의 성능에 좌우된다. 그리고 로봇 상태를 반영한 제어 알고리즘을 사용할 경우 계산 이득이 있지만, 로봇의 과도 운동 중 되먹임 항에 진동이 있다. 진동은 되먹임 이득 값을 크게 설정하지 못하는 원인으로 판단된다. 하지만 추종 오차가 되먹임을 통해 줄어들 수 있어서 상대적으로 더 작은 정상상태 추종 오차를 가졌다.

후기

이 연구는 2018년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (“10077538”)

참고문헌

- [1] S. Chiaverini, G. Oriolo, I. D. Walker, “Kinematically redundant manipulators,” Springer handbook of robotics, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 245-268, 2008.
- [2] S. Tarbouriech, B. Navarro, P. Fraise, A. Crosnier, A. Cherubini, “Dual-arm relative tasks performance using sparse kinematic control,” In IROS: Intelligent Robots and Systems, 2018
- [3] <https://www.franka.de/panda/>