

시간 지연 추정을 이용한 로봇 매니퓰레이터의 충돌 감지 방법

이준영*, 장원보*, 김무림*
한국로봇융합연구원 *

A Impulse-Detection Method Using Time-Delay Estimation For Robot Manipulators

Junyoung Lee*, Won-Bo Jang*, Maolin Jin*
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence*

Abstract - 본 논문은 시간 지연 추정을 이용한 제어기법(TDC, Time-delay control)을 이용하여 로봇매니퓰레이터를 위한 충격 감지 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 TDC를 이용할 때 로봇 매니퓰레이터의 상태변수와 자코비안 행렬을 이용하여 추가적인 외력 측정 장치가 없이 간단히 충격량의 계산이 가능하다는 장점이 있다. 이는 매니퓰레이터와 환경이 접촉 시 편리한 적용가능성을 제공하기 때문에 다양한 매니퓰레이터의 어플리케이션에 적합하다. 제안하는 알고리즘의 효과는 시뮬레이션을 통해 증명된다.

는 모터에 인가할 전류에 상응하는 토크로 제어기에서 직접 얻거나 추정하는 것이 가능하다. 간단한 표현을 위해 시간 t 는 생략하였다.

관성 계인 행렬을 의미하는 $\bar{M} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 상수 대각행렬이며, 이를 (1)에 적용하게 되면 다음과 같은 수식으로 표현이 된다.

$$\begin{aligned} \bar{M}\ddot{q} + N(q, \dot{q}, \ddot{q}) &= \tau \quad (2) \\ N(q, \dot{q}, \ddot{q}) &= [M(q) - \bar{M}]\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + F(q, \dot{q}) + \tau_d \quad (3) \end{aligned}$$

로봇동역학(2)를 제어하기 위한 제어입력은 일반적으로 아래와 같이 구성가능하다.

$$\tau = \hat{N} + \bar{M}u \quad (4)$$

동역학 계산을 피하기 위해 TDC를 사용할 때 \hat{N} 은 추정 값으로 시간지연추정기법(Time-delay estimation)를 통해 간단히 계산이 가능하다[1]. u 는 원하는 제어목적을 달성하기 위한 입력이다. 시간지연추정 기법을 이용 시, 현재시간 t 에서 $\hat{N}(t)$ 를 구하기 위해 한 제어 샘플 주기(Δt) 이전의 순간 $t - \Delta t$ 에서의 $N_{(t-\Delta t)}$ 을 이용해 추정 가능하다. 이는 식(2)으로부터 식(5)와 같이 계산될 수 있다.

$$N \approx \hat{N}(t) = N_{(t-\Delta t)} = \tau_{(t-\Delta t)} - \bar{M}\ddot{q}_{(t-\Delta t)}. \quad (5)$$

추가적으로 로봇에 원하는 모션의 입력하기 위해 식(4)의 u 에 오차동역학의 할당이 필요하다. 이를 위해, 위치오차벡터 $e \in \mathbb{R}^n$ 는 $e = q_d - q$ 로 정의한다. $q_d \in \mathbb{R}^n$ 는 사용자가 원하는 관절각도이고 q 는 실제 관절각도이다. $u = \ddot{q}_d + K_D\dot{e} + K_P e$ 로 정의한다. $N - N_{(t-\Delta t)} = 0$ 이면, 사용자는 식(5)를 통해 아래와 같은 원하는 오차동역학을 얻는다.

$$\ddot{e} + K_D\dot{e} + K_P e = 0 \quad (6)$$

여기서 $K_D, K_P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 양의 상수 대각행렬의 형태를 가지며, 원하는 댐핑 및 스프링 상수와 관련된 피드백 계인 행렬이다. 따라서, 시간지연추정기법(5)와 오차동역학(6)을 이용하면, 시간지연제어(1)은 다음의 식으로 표현된다.

$$\tau = \tau_{t-\Delta t} - \bar{M}\ddot{q}_{t-\Delta t} + \bar{M}(\ddot{q}_d + K_D\dot{e} + K_P e) \quad (7)$$

1. 서 론

로봇매니퓰레이터는 다양한 분야에 적용가능하며, 환경과의 상호작용을 요구한다. 이러한 작업은 접촉과 비접촉 작업으로 구분 가능하며, 최근에는 접촉 작업에 대한 수요가 상당히 증가하고 있다. 이러한 작업을 위해 협동 로봇과 같이 환경 및 사람과의 접촉이 용이한 로봇에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

로봇과 사람 또는 환경이 접촉할 경우, 접촉점에서의 상호작용을 위해 로봇 말단에서 환경에 가하는 힘을 제어하거나 운동의 구속이 필요하다. 이는 로봇이 비접촉에서 접촉으로 넘어가는 천이과정을 요구한다. 이 때, 로봇이 환경과의 상호작용을 위해 접근을 하고, 로봇말단과 접촉지점의 위치오차 등에 의해 충돌이 발생하게 된다. 이러한 충돌에 의해 사람이 다치거나 로봇 말단의 장치 및 작업 대상의 손상을 유발할 수 있다.

이를 극복하기 위해 충격량을 산출하고 힘 제어를 수행하는 것이 필요하다. 하지만 충격량을 계산 하는 것은 로봇에 추가적으로 외력 측정 장치를 요구하거나 복잡한 연산을 필요로 하는 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해 본 논문의 목적은 로봇의 말단과 환경사이의 충격량을 간단히 계산하는 것에 있다.

본 논문은 시간지연추정을 이용한 제어기법을 기반으로 하여 로봇의 동역학 계산을 피하고 힘/토크센서가 없는 조건에서 간단히 충격량을 계산할 수 있는 방법을 제안한다. 제어기법에 사용되는 상태 변수와 로봇의 기구학을 이용한 자코비안 행렬을 이용하여 충격량은 간단히 계산이 된다.

2. 본 론

2.1 시간지연추정을 이용한 제어기법(Time-Delay Control)

n -Degrees of freedom(DOF) 로봇 매니퓰레이터의 동역학 식은 관절 공간에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) + F(q, \dot{q}) + \tau_d = \tau \quad (1)$$

여기에서 $q \in \mathbb{R}^n$ 는 관절각도로 구성된 위치벡터를 의미하고, $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 관절 공간에서의 관성행렬, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ 는 관절 공간에서의 코리올리 및 원심력(Coriolis & Centrifugal torques), $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 는 관절 공간에서의 중력을 의미한다. 그리고 $\tau_d \in \mathbb{R}^n$ 는 외란을 포함한 모델링 되지 않는 동역학 항, $\tau \in \mathbb{R}^n$ 는 각 관절에 인가되는 제어 입력을 의미한다. 이 때, τ

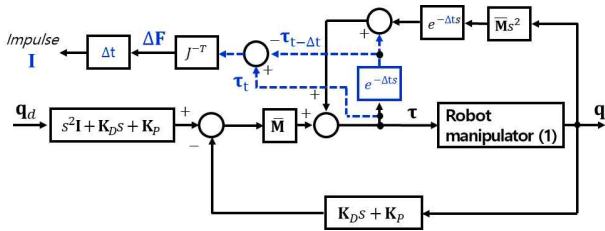
2.1.1 충격량 계산 방법

로봇 매니퓰레이터의 충격량 계산을 위해, TDC (7)를 이용해 제어시스템을 구성하고 매니퓰레이터의 기구학을 기반으로 자코비안 행렬과 매니퓰레이터의 상태변수를 이용하여 충격량을 계산 한다. 제안하는 충격량 계산방법을 포함하는 시스템은 그림 1과 같이 표현된다.

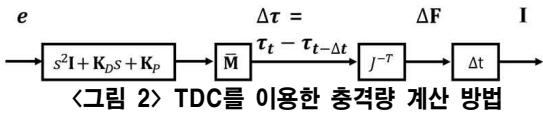
그림1에서 현재시점 t 에서 제어입력(관절토크) τ 와 한 샘플 구간 전 시점 $t - \Delta t$ 에서의 $\tau_{t-\Delta t}$ 을 이용해 로봇의 말단에 작용하는 힘을 구하면 아래와 같다.

$$\Delta F_t = F_t - F_{t-\Delta t} = J^{-T}(\tau_t - \tau_{t-\Delta t}) \quad (8)$$

여기서 $F \in \mathbb{R}^m$ 는 로봇의 말단에 작용하는 힘을 의미하고



〈그림 1〉 TDC를 이용한 충격량 계산 블록다이어그램



〈그림 2〉 TDC를 이용한 충격량 계산 방법

$J \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 는 로봇의 자코비안 행렬을 나타낸다. 충격이 발생 시 로봇의 각 관절에 발생하는 위치오차 e 는 일시적으로 큰 값을 가지며 이것은 상당히 변화된 제어입력 τ_t 을 생성한다. 따라서 충격이 발생 시 (8)에 의해 ΔF_t 로 계산이 된다.

이 때, ΔF_t 를 이용한 충격량 I 은 다음의 식을 통해 계산된다.

$$I = \Delta F_t \Delta t \quad (9)$$

2.1.2 위치기반의 충격량 계산 접근

식(9)는 관절 각도, 각속도, 각가속도 기반의 접근이 가능하다. 식(7)은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\tau_t - \tau_{t-\Delta t} = \overline{M}(\ddot{q}_d - \ddot{q}_{t-\Delta t} + K_D \dot{e} + K_P e) \quad (10)$$

식(10)을 이용하면 식(8)은 아래와 같이 나타난다.

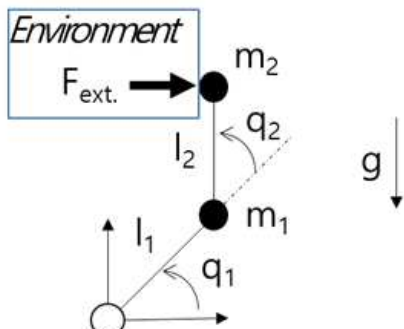
$$I = [J^{-T} \overline{M}(\ddot{q}_d - \ddot{q}_{t-\Delta t} + K_D \dot{e} + K_P e)] \Delta t \quad (11)$$

위 식(11)은 TDC기반의 제어기에서 사용하는 제어입력 τ 의 차이 대신 관절의 위치를 기반으로 충격량 계산이 가능함을 알 수 있다.

2.2. 시뮬레이션

2.2.1 충격량 계산 시뮬레이션 환경

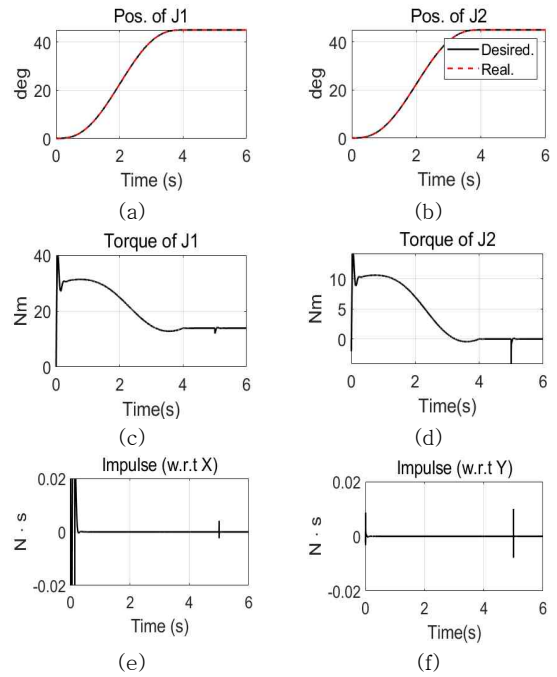
그림3과 같이 2자유도 매니퓰레이터의 시뮬레이션 모델[2]을 이용하여 시뮬레이션이 수행되었다. 중력가속도는 $g = 9.81 \text{ m/sec}^2$ 이고 로봇의 파라미터는 각 링크에 대해 질량- $m_1 = m_2 = 1 \text{ kg}$, 링크길이- $l_1 = l_2 = 1 \text{ m}$ 로 정의되었다. 로봇의 경로는 5차 다항식을 이용해 두 관절을 모두 0 deg에서 45deg로 이동을 하며 5초인 순간에 충돌이 일어난다.



〈그림 3〉 시뮬레이션 환경. 2DOF 매니퓰레이터

2.2.1 충격량 계산 시뮬레이션 결과

매니퓰레이터가 5초일 때 환경과 충돌을 일으킨다. 로봇의 말단이 X방향으로 20N의 힘(F_{ext})을 받게 된다. 이 순간 식(10) 또는 (11)을 통해 충격량(I)를 계산하였다. 시뮬레이션 결과는 그림4에서 나타난다. 각 관절이 원하는(desired)경로로 잘 움직인다. 5초에 발생하는 충돌에 의해 제어입력(토크)은 영향을 받는다. 이 때 식(11)을 계산하여 충격량이 계산되었다.



〈그림 4〉 충격량 시뮬레이션 결과

그림(4) (e)와 (f)에서 보듯이 로봇의 말단에 가해지는 충격량의 계산 결과는 실제로 가해진 힘 F_{ext} 와 비례관계로 나타나지는 않는다. 이는 식(3)에 의해 나타났듯이 로봇의 비선형 및 알려지지 않은 항들에 의한 영향을 받기 때문이다. 그럼에도 불구하고 본 논문의 의미는 외부 토크/힘 센서없이 간접적으로 충격량을 계산할 수 있다는 것에 있다. 실험적으로 충격량 계산하고 기준 값을 설정함으로써 매니퓰레이터의 구동에 이용될 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 시간지연추정을 이용한 제어기법을 기반으로 충격량을 구하는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 관절각도 기반의 변수들을 통해 간접적으로 충격량을 구하기 때문에 외력추정을 위한 장치를 요구하지 않는 장점이 있다. 로봇의 알려지지 않은 동역학에 영향을 받기 때문에 정확한 충격량과는 차이가 있음에도 불구하고 실험적 분석을 통해 역시 값을 설정하여 협동로봇이나 산업용 매니퓰레이터에 적용이 가능하다. 향후 연구에서는 제안한 알고리즘을 실제 로봇 활용 현장에 적용하고 보다 정확한 충격량을 구하기 위해 로봇 동역학을 분석하여 연구를 확장할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 로봇산업핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 1415177995, 가반하중 500g 고정밀 협동로봇 기술 개발)

[참 고 문 헌]

- [1] T. C. Hsia and L. S. Gao, "A Robot manipulator control using decentralized linear time-invariant time-delayed joint controllers," ICRA 1990.
- [2] Craig, John J. Introduction to robotics: mechanics and control. Pearson Educacion, 2005.