

직교좌표계 가속도 외란 추정을 통한 충돌 감지 알고리즘 개발

Development of Collision Detection Method Using Estimation of Cartesian Space Acceleration Disturbance

정 병 진^{1,2}, 문 형 필⁺

Byung-jin Jung^{1,2}, Hyungpil Moon⁺

Abstract In this paper, we propose a new collision detection algorithm for human-robot collaboration. We use an IMU sensor located at the tip of the manipulator and the kinematic behavior of the manipulator to detect the unexpected collision between the robotic manipulator and environment. Unlike other method, the developed algorithm uses only the kinematic relationship between the manipulator joint and the end effector. Therefore, the collision estimation signal is not affected by the error of the dynamics model. The proposed collision detection algorithm detects the collision by comparing the estimated acceleration of the end effector derived from the position, velocity and acceleration trajectories of the robot joints with the actual acceleration measured by the sensor. In simulation, we compare the performance of our method with the conventional Residual Observer (ROB). Our method is less sensitive to the load variation because of the independency on the dynamic modeling of the manipulator.

Keywords Double Actuator Unit, Position/Force Control, Collision Safety, Force Estimation

1. 서 론

최근 10년간 로봇과 인간의 물리적 협동을 이용한 서비스를 구현하기 위해 다양한 분야에 걸쳐 관련 연구가 증가하고 있다. 인간과 로봇이 같은 작업 공간을 공유할 때, 가장 중요한 것은 바로 작업자의 안전이다. 특히 안전 확보에 있어서는 예기치 않은 접촉 상황에 대한 인식 및 대응 능력이 무엇보다도 중요하다. 인간과 로봇의 충돌은 10~15 ms 이내의 짧은 시간 동안 큰 접촉력이 전달

되는 특징을 가지고 있다^[1]. 반면, [2]에서 조사된 인간의 접촉에 대한 반응 속도는 100 ms 이내로, 인간의 반사신경에 의한 반응만으로는 충돌에 원활한 대응이 어려운 것을 알 수 있다.

인간의 반응만으로 충돌 상황에서의 안전을 보장하기 어려운 문제를 해결하기 위하여 충돌 상황을 인식하고 적절한 대응을 수행하는 로봇 설계 및 제어 기술들이 연구되고 있다^[3-6,9]. 이들 중 가장 직관적인 것은 로봇과 외부 환경과의 관계를 인식하는 센서들(Exteroceptive sensors)을 사용하는 방법이다^[4]. 그러나, 이러한 방법들은 추가적인 하드웨어에 의한 비용 상승이나 주변 환경 인식에 복잡한 연산 과정이 들어가는 단점이 존재한다.

이러한 단점을 보완한 방법으로 로봇 제어를 위해 필요한, 로봇 상태를 인식하는 센서만(Proprioceptive Sensor)

Received : Jul. 7. 2017; Revised : Aug. 5. 2017; Accepted : Aug. 14. 2017

※This work supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. 2016R1A2B4010880)

⁺Corresponding author: Mechanical Engineering, Sunkyunkwan University, Chuncheon-dong, Jangan-gu Suwon, Gyeonggi-Do, Korea (hyungpil@skku.edu)

¹Mechanical Engineering, Sunkyunkwan University (jbjsin@skku.edu)

²Korea Electronics Technology Institute (jbjsin@keti.re.kr)

을 이용한 충돌 감지 방법이 연구되었다^{5,6)}. 대표적으로 A. D. Luca는 로봇의 일반화 운동량(Generalized Momentum)을 이용하여 충돌에 의한 접촉외란을 감지하는 알고리즘(Residual Observer, ROB)을 제시하였다. ROB는 운동량을 이용한 로봇 동역학 모델에서 외란을 1차 필터로 감지해 내는 기법이다. 하지만 기존의 ROB에서 로봇 동역학적 모델링 오차는 충돌과 관계 없이 외란 추정값에 영향을 미치기에, 충돌이 발생하지 않은 상황에서 외란 추정 신호가 한계치(threshold)를 넘어서는 ‘false alarm’을 발생시키는 원인이 된다. 반대로 한계치 범위를 넓힐 경우에는 충돌 감지 성능의 저하를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 손목의 F/T 센서를 통해 작업물에 의한 외란을 보상하거나⁷⁾ 모델링 오차의 주파수 특성을 이용하여 충돌에 의한 외란을 구분하는 알고리즘⁸⁾이 제시되기도 하였다.

본 논문에서는 이러한 동역학 모델링 오차에 의한 영향을 근본적으로 제거하기 위하여 외란 추정 과정에 동역학을 사용하지 않는 충돌 감지 알고리즘을 제안한다. 제안되는 알고리즘에서 충돌 감지 신호는 매니플레이터의 툴중점(Tool Center Point, TCP)에 장착된 가속도 센서의 데이터와 로봇의 가속도 기구학에 의해 계산된 TCP 가속도 추정값 사이의 비교를 통해 산출된다.

본 논문은 매니플레이터의 가속도 기구학 및 가속도 기반 충돌 감지 알고리즘, 시뮬레이션을 통한 평가를 소개하는 본문과, 그에 대한 고찰을 담은 결론으로 구성되어 있다.

2. 본 론

논문의 이해를 돕기 위하여 대표적인 충돌 인식 알고리즘인 ROB (Residual Observer)⁶⁾의 특성을 간략하게 서술하고자 한다.

2.1 ROB

협동 로봇에 많이 응용되는 ROB를 이용한 외란 추정⁶⁾에 있어서, 매니플레이터의 조인트 중 i 번째 조인트에서 계산된 외란 토크 성분 $\hat{\tau}_i$ 는 충돌 외란에 의한 조인트

별 토크 성분인 τ_{ext-i} 와 Laplace domain 상에서 식 (1)과 같은 저역 필터 관계를 가진다.

$$\hat{\tau}_i = \frac{L_i}{L_i + s} \tau_{ext-i} \quad (1)$$

이때 L_i 는 i 번째 조인트의 ROB에 사용된 Q필터의 필터 상수를 의미한다.

이러한 ROB 및 이와 유사한 충돌 감지 알고리즘들^{6,9)}은 로봇의 동역학 모델이 실제 로봇의 동역학과 일치하는 경우에는 외란에 의한 조인트 토크를 성공적으로 추정할 수 있다. 하지만, 실제 작업 환경에서는 작업물의 종류나 파지 형태에 따라 로봇의 동역학이 변화하며, 이에 따라 모델링 오차의 영향 d_{moe-i} 가 식 (9)과 같이 각 축 별 외란 추정값에 추가된다.

$$\hat{\tau}_{i-err} = \frac{L_i}{L_i + s} (\tau_{ext-i} + d_{moe-i}) \quad (2)$$

2.2 Cartesian Acceleration Observer (CAOB)

매니플레이터가 직교좌표 공간 상에서 움직일 때, 매니플레이터의 속도 기구학은 식 (3)과 같이 자코비안($J_n(\theta)$)을 이용하여 표현된다. 이때 \dot{x}_n 은 Global 좌표계 상에서의 TCP 속도를, ω_n 는 조인트 속도를 나타내는 열벡터이다. 아래첨자 n 은 충돌이 없는 상황을 의미한다. 매니플레이터의 위치 제어가 충분한 성능을 가지고 있다면, 매니플레이터의 TCP 속도는 사전에 계획된 경로 \dot{x}_{cmd} 와 일치하는 것으로 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_n &= J(\theta_n)\omega_n \\ (\dot{x}_{cmd} &= \dot{x}_n) \end{aligned} \quad (3)$$

이때 식 (3)에서 가속도에 관한 정보를 얻기 위하여 미분하면 식 (4)를 얻을 수 있다. 변수 α_n 은 매니플레이터 조인트의 가속도 경로를 의미한다.

$$\begin{aligned} a_n &= \dot{J}(\theta_n, \omega_n)\omega_n + J(\theta_n)\alpha_n \\ (a_n &= \ddot{x}_n, \alpha_n = \dot{\omega}_n) \end{aligned} \quad (4)$$

매니퓰레이터 TCP에 장착된 가속도 센서는 TCP의 가속도를 TCP 좌표계 상에서 표현한다. 센서 데이터 a_s 와 가속도 경로 a_n 의 관계는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 변수 ${}^B{}_T R$ 는 TCP 좌표계와 Global 좌표계 사이의 회전행렬이다.

$$a_s = {}^B{}_T R a_n \quad (5)$$

이러한 상황에서 매니퓰레이터와 외부 환경 사이에 충돌이 발생하면 접촉력이 매니퓰레이터의 링크에 작용하게 된다. 이때 충돌 지점은 식 (6)과 같은 관계에 따라서 외란에 의한 가속도를 얻게 된다.

$$a_c = \frac{F_c}{m_v} \quad (6)$$

이때 m_v 는 매니퓰레이터의 유효 질량을 의미하며 식 (14)와 같이 정의된다. 식 (7)에 있어서 $M(q)$ 는 매니퓰레이터의 관성행렬을, $J(q)$ 는 TCP 까지의 자코비안을, $J_v(q)$ 는 접촉 지점까지의 자코비안을 의미한다.

$$\frac{1}{m_v} = J_v^T(q)(J(q)M^{-1}(q)J^T(q))J_v(q) \quad (7)$$

일반적으로 Base가 고정되어 있고 엔드 이펙터가 구속되어 있지 않은 Open-Chain 매니퓰레이터의 링크 위치점의 가속도는 매니퓰레이터 TCP에 위치한 센서의 가속도 변화를 일으키게 된다. 이때 충돌에 의한 가속도가 추가된 센서 데이터는 a_{col} 로 정의하며, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{col} = {}^B{}_T R(a_n + d) \quad (8)$$

변수 d 는 Global 좌표계에서 표현한 충돌에 의한

TCP 가속도 영향을 나타낸 변수이다.

충돌 발생 시, 식 (8)과 같이 기존 운동 경로에 따른 가속도와 충돌에 의한 가속도가 함께 측정될 때, 식 (4)을 이용하여 식 (9)와 같이 d 를 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} d &= R^T a_{col} - a_n \\ d &= R^T a_{col} - (\dot{J}(\theta_n, \omega_n)\omega_n + J(\theta_n)\alpha_n) \end{aligned} \quad (9)$$

매니퓰레이터의 기구학을 이용하여 결과적으로 얻어진 가속도 센싱값과 외란의 관계인 (9)는 동역학을 이용해 얻은 비행 로봇의 외력 추정식^[9]과 유사한 형태를 지닌다. 그러나 본 논문에서는 [9]와 달리 기구학적 관계만을 고려하였기에, 질량 모델에 오차가 존재할 때에도 추정값의 오차 없이 강인한 충돌 감지가 가능하다.

이때, 충돌에 의한 가속도 변화량 d 를 계산하기 위하여 식 (10)과 같은 관측기를 제시할 수 있다. 이때 아래첨자 c 는 충돌 상황에서 센서를 통해 얻어진 로봇의상태 데이터를 의미한다. 제어기의 위치 제어 오차 및 충돌 순간의 기구 변화를 추정에 반영하기 위하여 해당 데이터를 추정에 사용한다. 이후 본 논문에서 이는 직교좌표 가속도 관측기(Cartesian Acceleration Observer, CAOB)로 정의한다.

$$d = R^T a_{col} - (\dot{J}(\theta_c, \omega_c)\omega_c + J(\theta_c)\alpha_n) \quad (10)$$

2.3 시뮬레이션을 통한 알고리즘 검증

시뮬레이션 환경은 Fig. 1에 표현한 것과 같이 1-dof

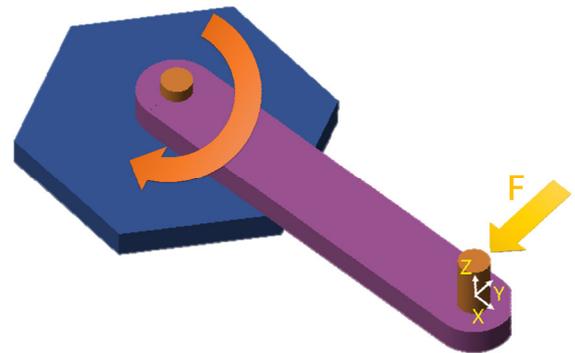


Fig. 1. Simulation model for collision detection

매니플레이터에 대하여 MATLAB을 이용하여 구성되었다. 1축 매니플레이터의 끝단에 장착된 가속도 센서는 함께 표시된 TCP 좌표계 방향의 가속도를 측정한다. 충돌에 의한 외란은 시뮬레이션 경과 시간 0.5 sec 시점에서 링크의 TCP에 15 ms의 짧은 시간 동안 힘을 가하는 것으로 모사한다. 이때 모델링되지 않은 작업물을 모사하기 위하여 1축 매니플레이터의 TCP에는 추가적인 질량이 부착되며, Fig. 1의 노란 색 원통은 이를 표현한다.

시뮬레이션은 5 kHz 주기로 수행되었으며, 조인트 제어에는 1 kHz 주기로 동작하는 PD 제어를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 1축 매니플레이터의 링크 질량은 5 kg, 무게중심은 0.5 m 길이 링크의 중심인 회전 중심으로부터 반지름 방향으로 0.25 m에 위치한다. 또한,

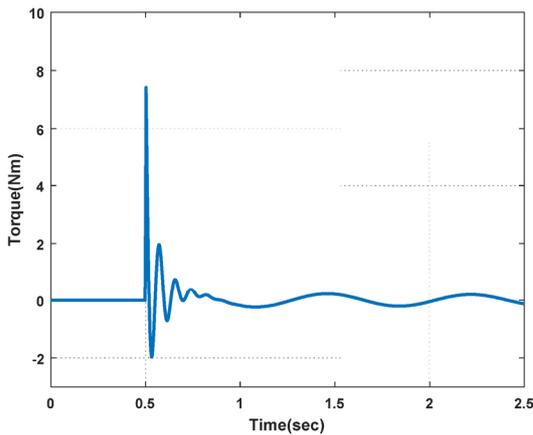


Fig. 2. Collision detection result (ROB)

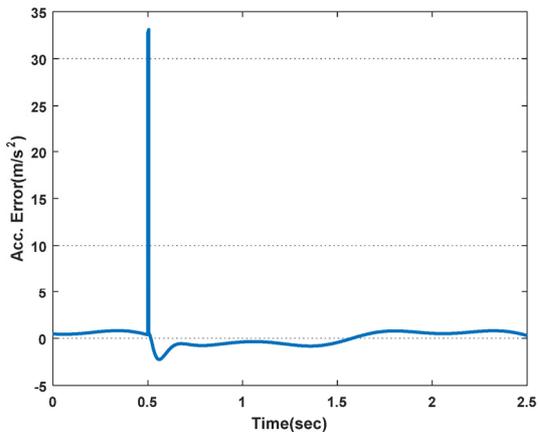


Fig. 3. Collision detection result (CAOB)

TCP의 추가적인 질량은 1 kg이며, 부착 위치는 링크의 회전 중심으로부터 0.5 m이다. 또한, 알고리즘의 성능 비교를 위하여 CAOB의 시뮬레이션 환경과 유사한 1-dof 매니플레이터에 대한 ROB의 MATLAB 시뮬레이션을 함께 수행하였다.

실험 결과, ROB의 경우 Fig. 2과 같은 외란에 의한 조인트 토크를 얻을 수 있다. 충돌 시점인 0.5 sec 시점에서 발생하는 약 7 Nm 가량의 충돌에 의한 급격하고 큰 진폭을 뚜렷이 확인할 수 있다. 그러나 작업물에 의한 모델링 오차의 영향이 충돌 이후 최대 ± 2 Nm 가량의 진폭으로 나타나게 된다. 이는 충돌에 의한 결과값에 비해 약 28%의 오차로서, 실제 로봇에 적용할 경우, False alarm 방지를 위한 Threshold 증대로 이어지게 되며 결과적으로 충돌 감지 성능의 저하를 가져오게 된다.

CAOB에서는 Fig. 3과 같은 끝단 가속도 추정값 오차의 데이터를 얻을 수 있다. 충돌 시점인 0.5 sec 시점에서 발생하는 약 33 m/s^2 가량의 충돌에 의한 급격하고 큰 진폭을 뚜렷이 확인할 수 있다. ROB를 이용한 실험과 달리, 충돌이 발생하지 않은 상태의 가속도 오차값은 약 $\pm 2 \text{ m/s}^2$, 6%의 범위로 매우 작음을 알 수 있다. 이러한 가속도 오차는 제어기 성능에 따라 달라질 수 있으며, 적절한 제어기를 사용할 경우 더욱 민감한 충돌 감지가 가능하다.

3. 결 론

본 논문에서 제시된 가속도 기반 충돌 감지 알고리즘 (CAOB)은 매니플레이터 TCP의 가속도 측정값과 매니플레이터 조인트의 가속도 경로로부터 추정된 TCP 가속도 경로를 비교함으로써 충돌을 감지한다. 기존의 Residual 기반 외란 관측기(Residual Observer, ROB)는 전류 센서를 이용함으로써 낮은 비용과 큰 하드웨어 변경 없이 간단히 매니플레이터 시스템에 적용할 수 있는 점을 강점으로 가지지만, 액추에이터의 마찰 및 동역학 모델링 오차 등의 영향에 의하여 충돌 감지 성능이 저하될 수 있다. MATLAB 시뮬레이션을 이용한 본 논문에서 제시된 CAOB와 기존의 ROB와의 비교 실험 결과, CAOB는 동역학 모델링 및 조인트 토크 측정 오차 등에 의한

충돌 감지 신호의 왜곡 가능성을 제거할 수 있음을 확인하였다. 결론적으로 본 논문에서 제시된 CAOB는 기존의 산업용 매니퓰레이터에 적용할 경우 ROB와 같이 매우 낮은 적용 비용 및 하드웨어 적용의 용이성이라는 강점을 가짐과 동시에, ROB에 비해 모델링 오차 등에 의한 외란에도 높은 강인성을 보이는 장점을 가진다. 차후 실제 다축 매니퓰레이터에 대한 확장 적용 및 실험을 통한 성능 평가를 수행하고자 한다.

또한, 본 논문에서 제시한 외란 감지기의 특성 중 제어기 특성의 영향을 받는다는 점은 CAOB를 제어기의 성능을 평가하는 용도로 사용할 수 있는 가능성을 의미한다. 차후 CAOB의 출력값에서 제어기 성능에 의한 영향과 충돌에 의한 영향을 분리하는 방법에 대한 연구를 수행하고자 한다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1A2B4010880).

References

- [1] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer, and G. Hirzinger, "Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing," *Robotics: Science and Systems*, pp. 217-224, 2007.
- [2] P.P. Lele, D.C. Sinclair, and G. Weddell, "The reaction time to touch," *The Journal of Physiology*, vol. 123 no. 1, pp. 187-203, 1954.
- [3] T.O. Yeon. "Development of humanoid joint module for safe human-robot interaction," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 9 no. 4, pp. 264-271, 2014.
- [4] W. Lihui, B. Schmidt, and A.Y.C. Nee, "Vision-guided active collision avoidance for human-robot collaborations," *Manufacturing Letters*, Vol. 1, No. 1 pp. 5-8, 2013.
- [5] M. Nakao, K. Ohnishi, and K. Miyachi, "A robust decentralized joint control based on interference estimation," *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1987, pp. 326-331.
- [6] A.D. Luca and R. Mattone, "Sensorless robot collision

detection and hybrid force/motion control," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 999-1004.

- [7] D. Alessandro and F. Flacco. "Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration." *Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on. IEEE, 2012, pp 288-295.
- [8] B.J. Jung, J.C. Koo, H.R. Choi, and H. Moon, "Human-robot collision detection under modeling uncertainty using frequency boundary of manipulator dynamics," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, no. 11, 2014, pp. 4389-4395.
- [9] T. Teodor and S. Haddadin, "A unified framework for external wrench estimation, interaction control and collision reflexes for flying robots." *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2014, pp. 4197-4024.



정병진

2011 성균관대학교 기계공학과(공학사)
2011~2017 성균관대학교 기계공학과(공학박사)
2017~현재 전자부품연구원 지능로보틱스 연구센터 재직 중

관심분야: Physical Human-Robot Interaction, Safe Manipulator



문형필

1996 포항공과대학교 기계공학과(공학사)
1998 포항공과대학교 기계공학과(공학석사)
2005 Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor. (공학박사)
2008~현재 성균관대학교 부교수 재직 중

관심분야: Robotic Manipulation, Polymer-based sensor and actuators, Visual recognition