

벤더블 정전용량 기반 근접 센서 로봇의 실시간 적응형 반응 제어 프레임워크

A Real-Time Adaptive Reactive Control Framework Using a Bendable Capacitive Proximity Sensor

한성진¹ · 강현창² · 성혁제² · 송영빈² · 최혁렬[†]

Sungjin Han¹, Hyunchang Kang², Hyukjae Sung², Youngbin Song²,
HyoukRyeol Choi[†]

Abstract: We present a real-time adaptive reactive control framework for safe human–robot interaction (HRI) based on a bendable capacitive proximity sensor that conforms to flat and curved robot surfaces. A kerf-patterned electrode enables robust mounting on AMRs (Autonomous Mobile Robots) and Manipulators, while model-based fusion with a ToF (Time-of-Flight) sensor linearizes and denoises distance estimates. The sensor is integrated on a manipulator. The signals are preprocessed on the MCU and streamed via CAN to ROS. In ROS, a monitoring node checks distance thresholds, and a safety state logic cancels active trajectory goals when an obstacle is detected. Experiments with quintic-polynomial trajectories confirmed that the joint velocities converged to zero when an obstacle approached the sensor. The proposed architecture offers a practical safety layer for HRI and can be extended to distance-keeping and reactive obstacles.

Keywords: Capacitive Proximity Sensor, Human-robot Interaction (HRI), Robot Skin

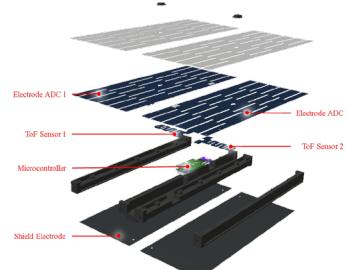
1. 서 론

최근 인간–로봇 상호작용(Human-Robot Interaction, HRI)의 중요성이 대두됨에 따라 협동 로봇이 외부 환경을 인식할 수 있는 센서 개발이 연구 주제로 부각되고 있다. 안전한 인간–로봇 상호작용을 위해 tactile, force, vision 감지 기술이 사용되고 있다. tactile, force 센서는 물체와의 거리를 감지하는 것이 아니라 접촉 후의 상태 변화만을 감지한다. 따라서 접촉 이전의 정보가 부족하기 때문에 접촉을 방지하기에는 적합하지 않다. vision 센서는 작업자에 의한 로봇의 가려짐으로 인해 사각지대가 존재해 HRI에는 적합하지 않다. 일반적인 센서는 로봇의 형상에 따라 개별적으로 설계해야 하므로 부착

위치가 달라질 때마다 구조 변경이 필요하다. 본 연구에서는 평면과 곡면 모두에 부착이 가능하여 별도의 설계 변경 없이 다양한 로봇 플랫폼에 적용할 수 있는 정전용량형 근접센서를 제작하고 실시간 적응형 제어 프레임워크를 제안한다[1].

2. Bendable 근접 센서 제작

제작된 센서는 AMR(Autonomous Mobile Robot), Manipulator에 부착 가능하도록 제작해 감지 사각을 줄이고, 추가 하드웨어 변경 없이 로봇의 근접 감지를 범위를 넓힌다. 개발된 근접 센서는 [Fig. 1]과 같은 구조를 가지고 있다.



[Fig. 1] Structure of the bendable capacitive proximity sensor

* This work was supported by the Technology Innovation Program Development Program-Development of Next-Generation Intelligent Semiconductor Technology (RS-2024-00407393, Development of SoC integrated robot safety sensor platform equipped with real-time collision detection and avoidance intelligence) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)

1. School of Intelligent Robotics, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (sungjinhan@g.skku.edu)

2. School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

† Associate Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea(choihyoukryeol@gmail.com)

총 2개의 정전용량형 센서가 하나의 프레임에 부착되어 있다. 각 정전용량형 센서는 레이어에는 kerf pattern이 적용되어 [Fig. 2]과 같이 자유롭게 bending-Flat 구조 변경이 가능하다.



[Fig. 2] Capacitive proximity sensor configuration (a) Sensor in flat configuration; (b) Sensor in bending configuration

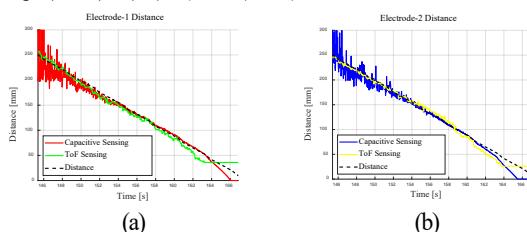
정전용량형 센서는 전기장을 이용해 물체의 접근을 감지한다. 근거리 감지 성능과 넓은 시야각을 가지지만, 정전용량과 거리간 비선형성이 발생해 정확한 거리 측정이 어렵다. ToF(Time-of-Flight) 센서는 장거리 감지와 정확한 거리 측정이 가능하다. 하지만 시야각이 좁고 근거리에서는 사각지대가 있다. 따라서 정전용량형 센서와 ToF 센서를 결합해 정전용량 센서의 비선형성 문제를 해결한다. 두 센서의 중첩되는 시야각에 들어왔을 때 ToF 센서가 측정한 거리 값 Y 와 정전용량 값 X 를 데이터 쌍 $X \in x_i, Y \in y_i$ 로 수집한다. 수집된 데이터를 다음 지수 방정식 모델로 근사하면 식 (1)과 같다.

$$X = a \cdot e^{b \cdot Y} \quad (1)$$

여기서 a, b 는 물체의 물리적 특성에 따라 달라지는 상수이고 수집된 데이터 쌍에 최소 제곱법을 적용해 최적의 a, b 값을 동적으로 추정한다. a, b 가 결정되면 식 (1)을 로그 함수식으로 변형해 식 (2)와 같이 정확한 거리를 추정한다[1].

$$Y = \frac{1}{b} (\ln X - \ln a) \quad (2)$$

정전용량 ASIC (FDC2214)에서 측정된 신호는 I²C 통신을 거쳐 MCU에서 처리되며, 최종 데이터는 CAN 버스를 통해 외부로 전송된다. 실험 결과 [Fig. 3]은 각 정전용량형 센서의 감지 범위를 나타내며, 약 200 mm의 안정적인 감지 범위를 가진다.



[Fig. 3] Measured distance of each electrode. (a) Electrode 1; (b) Electrode 2

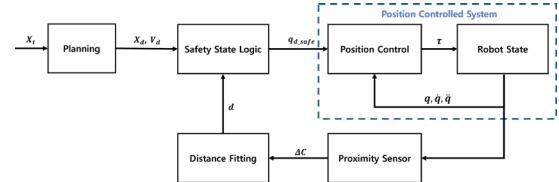
제작된 근접센서는 평면, 곡면에 부착이 가능하도록 제작되어 [Fig. 4]와 같이 AMR 및 Manipulator에 부착이 가능함을 보여준다.



[Fig. 4] Installation of the bendable proximity sensor on robotic platforms: Sensor mounted on the manipulator; (b) Sensor mounted on the AMR

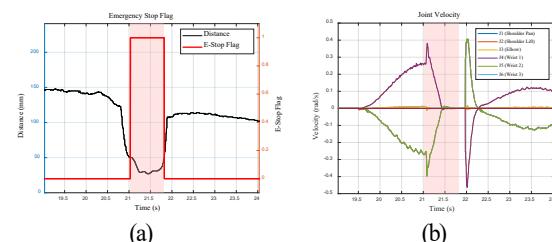
3. 적응형 반응 제어 프레임워크

제작된 근접 센서는 로봇 링크에 부착이 되어 주변 물체를 실시간으로 감지한다. 선형화 된 거리 데이터 기반으로 비상시 로봇을 즉시 정지시키는 안전 제어 프레임워크를 제안한다. 제안된 제어 프레임워크는 [Fig. 5]과 같다.



[Fig. 5] Architecture of adaptive reactive control framework

로봇의 경로계획은 quintic polynomial을 이용해 부드럽고 시간 최적화된 궤적을 생성한다. 근접센서는 CAN 통신을 통해 100 Hz 주기로 거리 데이터를 전송 ROS 노드에서 이를 구독하여 실시간으로 모니터링한다. 측정된 거리는 Safety State Logic에서 임계 값과 비교되어 로봇의 비상정지 신호를 결정한다. 비상정지 조건이 만족되면, 즉시 모든 궤적 목표를 취소하여 로봇의 동작을 멈추게 된다. 다음 [Fig. 6]은 비상정지 신호가 발생한 순간, 로봇의 속도가 0으로 수렴하는 실제 실험 결과를 보여준다.



[Fig. 6] Experimental results of the proposed adaptive reactive control framework (a) Sensor distance and emergency stop flag; (b) Joint velocity response.

실험 결과 제안한 적응형 반응 제어 프레임워크는 물

체가 근접 센서로 가까이 다가갈 때 거리 정보가 임계 값 이하로 감지되는 순간 로봇의 모든 관절 속도를 빠르게 0으로 수렴시켰다. 이를 통해 제안 시스템이 인간-로봇 상호작용 환경에서 충돌 이전 단계에서 즉각적인 정지가 가능한 실시간 안전 제어 성능을 갖출을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 HRI를 위한 bendable 구조의 근접센서를 제작하고, 이를 Manipulator에 장착하여 ROS 기반 제어 환경을 구축하였다. 제작된 센서를 이용해 quintic polynomial 궤적 계획과 safety state logic을 결합한 적응형 반응 제어 프레임워크를 구성하였으며, 근접센서의 거리 데이터를 활용한 비상정지 동작을 실험적으로 검증하였다. 향후에는 본 프레임워크를 확장하여, 로봇이 사람과 안전 거리를 유지하며 작업을 지속할 수 있는 avoidance control 프레임워크로 발전시킬 예정이다.

References

- [1] S. E. Navarro, A. M. Martinez, J. M. Gandarias, J. A. Corrales, F. A. Candelas, and F. Torres, "Proximity Perception in Human-Centered Robotics: A Survey on Sensing Systems and Applications," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, no. 3, pp. 1599-1620, June 2022, doi: 10.1109/TRO.2021.3111786.
- [2] H. Yim, H. Kang, T. D. Nguyen, and H. R. Choi, "Electromagnetic Field & ToF Sensor Fusion for Advanced Perceptual Capability of Robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 4846-4853, May 2024, doi: 10.1109/LRA.2024.3386455.