

안전한 인간-로봇 상호작용(HRI)을 위한 정전용량 기반의 비접촉식 근접센서 플랫폼 개발

Development of a Capacitive Proximity Sensor Platform for Safe Human-Robot Interaction (HRI)

송영빈¹, 강현창¹, 성혁제¹ · 한성진² · 최혁렬[†]

Young Bin Song¹, Hyun Chang Kang¹, Hyuk Jae Sung¹ · Sung Jin Han² · Hyouk Ryeol Choi[†]

Abstract: This paper proposes a modular capacitive proximity sensor platform for collision prevention in collaborative robots. The sensor can be mounted on robot arms of various diameters and maintains stable performance through a two-channel environmental drift compensation method. The compensated output is converted into distance using a nonlinear regression model. Experiments show that the proposed method reduces signal variation by 98.87 % under temperature changes from 5 to 50 °C. When integrated with a UR10 robot, the sensor achieved reliable proximity detection within 20 cm and successfully triggered an emergency stop at a 10 cm threshold. These results demonstrate the feasibility of the sensor as a real-time safety component for Human-Robot Interaction(HRI).

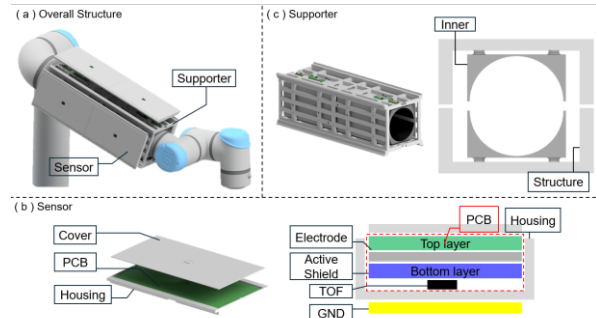
Keywords: Proximity Sensor, Capacitive Sensor, HRI

1. 서 론

최근 인간과 로봇이 동일한 공간에서 협업하는 사례가 증가함에 따라, 로봇으로부터 인간의 안전을 보장하기 위한 충돌 안전 센서 플랫폼의 중요성이 커지고 있다. 현재 로봇 안전 시스템에는 토크 센서, 터치 센서 등이 사용되고 있으나, 이들은 모두 접촉 이후에만 반응하기 때문에 물리적 충돌이 발생한 이후에야 제어가 이루어진다는 한계가 있다. 이에 비해 정전용량 기반 근접센서는 전기장을 이용해 비 접촉 상태에서 사전 감지가 가능하며, 기존 센서의 한계를 극복하고 사전 예방형 안전 제어를 실현할 수 있다. [1], [2].

본 연구에서는 이러한 필요성에 따라, 협동로봇의 충돌을 사전에 감지할 수 있는 정전용량 기반 근접센서를 제안한다.

2. 센서 Configuration



[Fig. 1] (a) Overall structure (b) Sensor (c) Supporter

본 센서는 [Fig. 1(a)]처럼 센서부와 서포터부로 구성된다. 센서부는 [Fig. 1(b)]와 같으며, Top Layer에는 측정을 위한 전극을 배치하고, Bottom Layer에는 Active Shield으로 전극과 그라운드 간의 기생 정전용량을 최소화하였다. 이를 통해 전기장의 방향성을 제어하고 감지 깊이를 향상시켰다.

서포터부는 [Fig. 1(c)]와 같이, Structure와 Inner로 구성되며, 직경 D=82-90 cm 범위의 협동로봇 및 모바일 로봇에 장착이 가능하도록 모듈화 하여, 높은 적용성을 확보하였다.

제안된 정전용량 기반 근접센서는 single-ended 구조로 설계되었으며, 전기장을 방사하여 센서와 물체 사

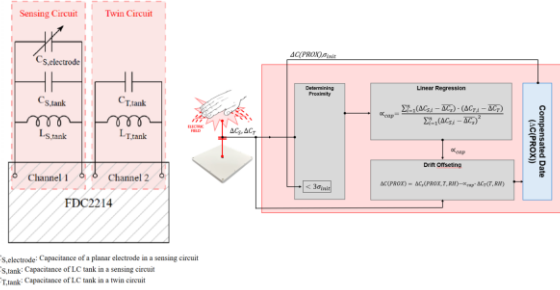
※ This work was supported by the Technology Innovation Program Development Program-Development of Next-Generation Intelligent Semiconductor Technology (RS-2024-00407393, Development of SoC integrated robot safety sensor platform equipped with real-time collision detection and avoidance intelligence)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

1. School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (dudqls10@g.skku.edu)

2. School of Intelligent Robotics, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

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

이에 형성되는 정전용량의 변화를 감지함으로써 거리 정보를 추정한다.



[Fig. 2] environmental compensation algorithm

정전용량 기반 근접센서는 온도와 습도 변화에 의해 저주파 드리프트가 발생하며, 장시간 동작 시 센싱 오차가 누적된다. 이를 보상하기 위해 본 연구에서는 [Fig. 2]와 같이 2채널 기반 환경 보상 구조를 적용하였다. 두 채널의 출력은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta C(PROX, T, RH) = C_{S,0} + \Delta C_S(PROX) + \Delta C_S(T) + \Delta C_S(RH) \quad (1)$$

$$\Delta C(T, RH) = C_{T,0} + \Delta C_T(T) + \Delta C_T(RH) \quad (2)$$

채널 1은 ‘식 (1)’ 와 같이, 근접 정보와 환경 드리프트가 함께 포함된 신호를 출력하며, 채널 2는 ‘식 (2)’ 와 같이, 환경 요인만을 분리 측정한다. 두 신호의 차이를 이용해 온도와 습도에 의해 발생한 드리프트를 실시간으로 제거한다.

최종적으로 보정된 전극 신호는 ‘식 (3)’ 의 비선형 회귀식을 통해 ‘Distance’ 로 변환된다.

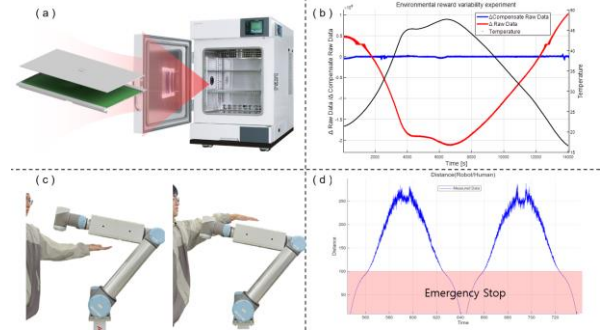
$$Distance = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x) \quad (3)$$

3. 실험 결과

[Fig. 3]은 제안된 센서를 환경 보상 실험 결과 및 UR10 협동로봇에 장착하여 수행한 거리 측정 실험을 보여준다.

센서를 온도 챔버에 위치시키고 5-50°C 의 온도 변화를 적용하여 출력을 측정하였다. 보상 알고리즘 적용 결과, 센서 출력 변동성이 약 98.87% 감소하였다.

보상된 신호를 UR10에 센서를 적용하고 거리를 측정 한 결과, 20 cm 이내 범위에서 안정적이고 반복 가능한 근접 감지 성능을 보였다.



[Fig. 3] a) Temperature chamber test environment

b) Environmental compensation algorithm results

c) Distance & stopping test environment

d) Distance & stopping results

임계 거리인 약 10 cm 이하 접근 시 로봇 비상정지가 정상적으로 동작하였으며, 이를 통해 본 센서가 실시간 안전 대응이 가능한 HRI용 근접 센서로 활용 가능함을 입증하였다.

4. 결론

본 연구에서는 협동로봇의 충돌 안전성을 높이기 위해 정전용량 기반 근접센서를 플랫폼화 하였다. 센서는 모듈형 구조로 설계되어 다양한 로봇 직경에 장착 가능하며, 온도 보상을 통해 환경 변화에도 안정적인 감지 성능을 유지한다. 실험 결과, 근접 감지와 비상정지 연동이 정상적으로 동작하여 HRI 환경에서의 안전성을 확인하였다. 향후에는 본 센서를 활용한 회피 제어 기반의 안전·효율 통합 로봇 제어 구조를 개발할 예정이다.

References

- [1] Seung Jae Moon et al, “Real-Time Obstacle Avoidance Using Dual-Type Proximity Sensor for Safe Human-Robot Interaction,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 8021–8028, 2021.
- [2] Hongsik Yim et al, “Electromagnetic Field & ToF Sensor Fusion for Advanced Perceptual Capability of Robots,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 4846–4854, 2024.