

유연 촉각 센서를 이용한 로봇 그리퍼의 미끄러짐 감지

Slip Detection of Robot Gripper with Flexible Tactile Sensor

서지원¹, 이주경¹, 이석¹, 이경창^{2,✉}
Ji Won Seo¹, Ju Kyoung Lee¹, Suk Lee¹, and Kyung Chang Lee^{2,✉}

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.)

² 부경대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong Nat'l Univ.)

✉ Corresponding author: gcleee@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-6332

Manuscript received: 2013.12.4 / Revised: 2013.12.26 / Accepted: 2014.1.21

In this paper, we design a gripping force control system using tactile sensor to prevent slip when gripper tries to grasp and lift an object. We use a flexible tactile sensor for measuring uniplanar pressure on gripper's finger and develop an algorithm to detect the onset of slip using the sensor output. We also use a flexible pressure sensor to measure the normal force. In addition, various signal processing techniques are used to reduce noise included in the sensor output. A 3-finger gripper is used to grasp and lift up a cylindrical object. The tactile sensor is attached on one of fingers, and sends output signals to detect slip. Whenever the sensor signal is similar to the slip pattern, gripper force is increased. In conclusion, this research shows that slip can be detected using the tactile sensor and we can control gripping force to eliminate slip between gripper and object.

Key Words: Tactile sensor (촉각 센서), Robot Gripper (로봇 그리퍼), Force Feedback Control (힘 피드백 제어), Slip Detection (미끄러짐 감지)

1. 서론

로봇이 이미 사람들의 일을 대신하여 인간의 삶의 질을 높이고 있지만, 산업이 발전함에 따라 단순한 작업뿐만 아니라 더 복잡하고 유동적으로 변하는 환경에 스스로 대처하는 로봇을 개발하려고 연구하고 있다.^{1,4} 기존 상용 로봇들은 사용자의 명령을 받아 프로세스를 처리하기 때문에 작업 환경에 변화가 생기면 대처하는 것이 불가능하다. 이런 상황을 극복하기 위해 외부의 자극을 전기적인 신호로 변환시키는 센서를 사용하여 사용자의 명령과 함께 센서 입력을 이용하여 변화되는 환경에 적응하는 로봇을 만들 수 있다. 로봇에 적용되는 센서는 물체와 거리를 측정할 수 있는 적외선

이나 초음파 센서, 특정 가스를 감지하는 가스 센서, 가속도나 관성을 감지하는 가속도 센서와 자이로 센서, 힘 또는 압력을 감지하는 스트레인 게이지, 압력 센서 등이 있다.

압력 센서는 센서에 가해지는 압력에 따라 출력이 변하는 센서이다. 하지만 단일 압력 센서로는 좁은 범위에 가해지는 압력만을 감지할 수 있기 때문에 넓은 범위에 대해 가해지는 압력을 측정할 수 없다. 이러한 이유로 넓은 범위에 작용하는 압력을 부분적으로 측정하기 위해 압력 센서를 여러 개 나열하여 압력을 측정하는 센서를 촉각 센서라 한다. 이러한 촉각 센서를 그리퍼 표면에 부착함으로써, 사람이 물체를 질 때 받아들이는 압력과 비슷한 정보를 얻을 수 있다.

인간이 물체를 쥐는 행동에서 촉각의 역할은 아주 중요하다. 의학계의 한 예로서 말초 신경이 손상된 환자가 물건을 잡기 위하여 손을 뺀 것은 아무 문제가 없었지만 물체를 안정적으로 쥐는 행동은 힘들다는 연구가 있었다.⁵ 이것을 다시 해석하면 눈으로 보고 물체를 인식하여 잡는 위치는 결정할 수 있지만, 촉각 피드백 정보가 없이는 얼마나 힘을 주어야 하는지 알 수 없다는 것이다. 따라서 로봇에 적용하면 물체를 인식하는 것이 가능하더라도 손가락 표면에서 감지되는 센서의 정보가 없다면 지능적인 힘 제어가 불가능할 것이다. 특히 산업 현장에서 물체를 운반하는데 많이 쓰이는 그리퍼가 물체를 잡을 때, 그리퍼와 표면 사이의 마찰력이 부족해서 미끄러짐이 발생할 수 있다. Wettels⁶는 유전체를 채운 그리퍼를 이용하여 수평력 (Tangential Force)을 측정하였으며, Chaturanga⁷는 압력 센서와 가속도 센서를 부착한 손가락 모형을 이용하여 물체 표면의 거칠기를 측정하는 등 외국에서는 수직력 측정 외의 많은 분야에서 연구가 진행되고 있지만 국내에서는 연구가 미비한 실정이다.

본 논문은 촉각 센서 피드백을 이용하여 미끄러짐을 감지하고, 이 현상을 방지하는 그리퍼의 힘을 제어하는 시스템을 설계하였다. 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 압력 감응 재료로 만들어진 유연 촉각 센서와 피드백 신호를 처리하기 위한 신호 처리 보드에 대해 설명하고, 3장에서는 촉각 센서를 부착한 그리퍼를 이용한 미끄러짐 감지 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 실험을 통해 미끄러짐을 방지하는 그리퍼 제어 시스템을 검증하고, 마지막 5장에서 결론을 맺는다.

2. 유연 촉각 센서와 신호 처리 보드

2.1 유연 촉각 센서

촉각은 크게 3종류로 분류할 수 있다. 피부에 맞는 저항력을 느끼는 근감각(Kinesthetic Sensation), 물체의 질감과 형상감, 온도를 느끼는 온각, 통증을 느끼는 통각을 포함한 체성 감각(Somato Sensation), 그리고 관성을 느끼는 평형 감각(Vestibular Sensation)으로 나뉜다.⁸ 이 중에 근감각을 담당하는 압력 센서 어레이로 만들어진 촉각 센서의 종류를 나열하면 실리콘 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기반 기술의 촉각 센서, 폴리머 MEMS 기반 기술의 촉각 센서, 나노(Nano) 구조

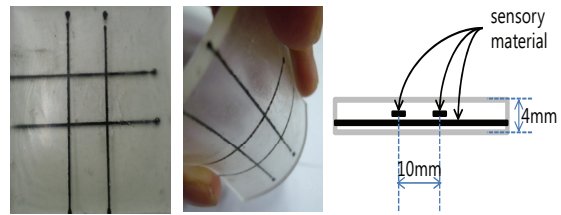


Fig. 1 Flexible tactile sensor

재료 기반의 촉각 센서, 그리고 압력 감응 재료 기반의 촉각센서가 있다. 반도체와 MEMS 소자에 가장 많이 사용하는 재료 중 하나인 실리콘은 도핑 공정에 따라 저항 값을 조절할 수 있는 장점이 있다. 하지만 실리콘 재료는 유연성이 없고 취성 재료이기 때문에 깨지기 쉬운 단점이 있다. 이와 달리 폴리머 MEMS 기반 기술의 촉각 센서는 매우 유연하지만 필름 자체의 구조적인 취약성을 가지는 단점이 있다. 나노 구조 재료 기반의 촉각 센서는 보다 높은 성능을 기대할 수 있지만, 넓은 면적으로 구현하기에는 어려움이 많고, 고성능의 신호 처리 회로가 필요한 단점이 존재한다. 압력 감응 재료 기반의 촉각 센서는 고무와 같은 소재에 전도성 물질을 섞어서 센서부로 이용하며, 유연성이 뛰어나고, 센서를 둘러싸는 물질에 따라 사람의 피부와 같은 탄성을 구현할 수도 있으며, 센서 가공 공정이 쉬운 장점이 있다. 또한 그리퍼의 끝단에 장착되어야 하기 때문에 유연성이 충분한 센서를 사용할 필요가 있으며, 다른 촉각 센서보다 출력의 수가 적기 때문에 구성이 용이한 장점이 있다.^{9,10}

Fig. 1은 본 논문에서 사용된 압력 감응 재료 기반의 유연 촉각 센서를 나타내었다.¹¹ 고무와 같은 탄성을 가지는 UV(Ultra Violet) 경화 소재로 감싸져 있으며, 압력 감응 물질은 MWCNTs(Multi-walled carbon nanotubes)와 TangoPlus의 혼합물이다.¹² 센서의 두께는 4mm이고, 평행한 센서 부분 사이의 거리는 10mm이며, 직교되는 부분에는 차이를 두어 만나지 않게 제작되었다. 본 센서는 전도성 물질이 센서 부분에 섞여 있기 때문에 Fig. 2와 같이 압력을 가하면 전도성 물질이 뭉치게 되어 저항이 낮아지며, 반대의 경우에는 저항이 높아진다. 다만 압력이 증감되는 속도에 따라 저항의 변화 수치가 달라지며, 저항이 높아진 후에도 전도성 물질이 분산되며 서서히 낮아지는 특성을 가지고 있다.

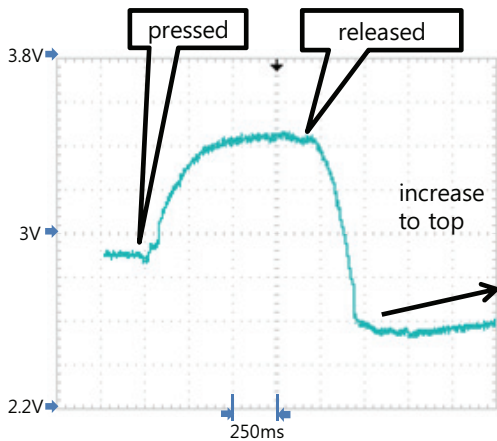


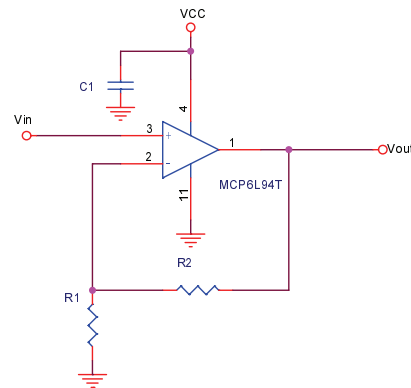
Fig. 2 Tactile sensor behavior according to the pressure

2.2 아날로그 신호 처리

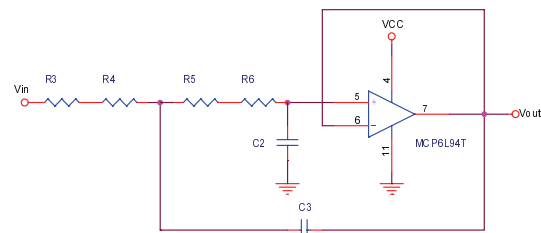
본 센서는 전도성 물질을 섞은 압력 감응 재료를 사용하였기 때문에 압력 변화에 아주 민감하게 반응하여 센서 잡음이 발생하여 잡음 제거 필터가 필요하다. 또한 저항이 변화하는 범위가 매우 커서(수십 MΩ ~ 수십 kΩ) 출력이 매우 낮기 때문에 신호 증폭 회로가 필요하다. 먼저 센서의 저항 수치를 검출하기 위해 전압을 검출하는 간단한 회로를 구성하였다. 센서의 저항의 증감 변화를 관찰하기 위해 아무런 압력이 가해지지 않고 안정된 평형 상태일 때, 100kΩ의 가변 저항으로 기본 입력에 대해 중간의 출력이 나오도록 조절한다. 산출된 기본 출력은 Fig. 3(a)인 비반전 증폭 회로와 Fig. 3(b)인 저역 통과 필터 회로로 구성하였고, 이를 거쳐 메인 제어기에서 수신되어 아날로그 신호가 디지털 신호로 저장된다.

본 논문에서는 4개의 OP-AMP를 이용하여 증폭-필터-필터-증폭의 회로를 구성하였다. 증폭 회로는 비반전 증폭 회로를 사용하였다. 본 논문에서 첫 번째 증폭회로는 5배의 증폭률을 가지도록 설정하였으며, 두 번째 증폭회로 또한 5배의 증폭률을 가지도록 설정하여 총 25배의 증폭률을 가지도록 설정하였다. 두 개의 증폭 회로를 분리한 이유는 신호 증폭 시에 잡음까지 함께 증폭되어 회로의 안정성이 떨어지기 때문이며, 두 번의 필터를 거쳐 잡음을 제거한 후에 필터링 된 신호를 한번 더 증폭하도록 하였다.

저역 통과 필터는 차단 주파수보다 낮은 주파수의 신호는 통과시키고, 차단 주파수보다 높은 주파수의 신호는 차단시키는 필터로서 차단주파수



(a) Non-inverting amplifier circuit



(b) Low pass filter circuit

Fig. 3 Signal processing circuits

를 설정한다. 이 필터를 통과한 신호는 100kHz의 차단주파수를 가지도록 한다. 이와 같은 설정은 적절한 신호를 얻기 위한 시행착오를 통하여 얻어진 것이다.

3. 촉각 센서를 이용한 미끄러짐 검출

3.1 하드웨어 구성

촉각 센서를 이용하여 물체와 그리퍼 사이의 미끄러짐을 감지하기 위해 하드웨어를 Fig. 4와 같이 구성하였다. 메인 제어기는 서브 제어기로의 명령 전달, 필터를 거쳐 들어오는 센서들의 신호 데이터 수집, 수집된 데이터를 가공하여 변환, 시스템을 위한 연산 등을 수행한다. 서브 제어기에서는 그리퍼 제어 인터페이스를 담당하며, 메인 제어기에서 입력된 신호로 그리퍼를 제어한다. 그리퍼는 RS-485 통신을 이용해 들어온 명령을 받고 그리퍼의 구성 요소인 각 모터의 내부에 있는 제어기가 명령을 받고 모터를 구동시킨다. 그리퍼의 모터가 움직임으로써 그리퍼에 부착되어 있는 촉각 센서와 압력 센서가 물체와의 접촉하면서 센서의 저항이 변화한다. 여기서 사용된 상용 압력 센

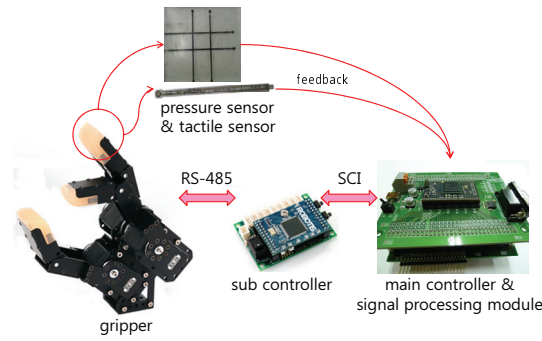


Fig. 4 Hardware structure of tactile sensor based gripper force control system

서는 박막형 압력 센서인 Tecscan사의 FlexiForce (0~11kg)이다. 촉각 센서는 미끄러짐을 감지하는 역할이며, 압력 센서는 물체의 유무를 감지하는 역할이다. 이 때, 센서를 통해 출력되는 신호는 매우 작고, 노이즈가 많이 포함되어 있기 때문에 이를 해결하기 위해, 신호를 증폭하는 비반전 증폭 회로와 노이즈를 제거하는 필터 회로를 거친다. 노이즈가 제거되고 증폭된 신호가 다시 메인 제어기로 들어가는 구조를 가지고 있다. 센서와 그리퍼 사이는 물리적으로 연결되어 있으며, 나머지 모든 연결은 전기적으로 연결되어 있다.

3.2 촉각 센서의 미끄러짐 검출

그리퍼가 물체를 쥐면, 촉각 센서 표면에서 마찰이 발생한다. 물체가 미끄러짐이 발생할 때, 마찰력에 변화가 생기며 촉각 센서 피드백 신호 또한 변하게 된다. 물체가 미끄러지지 않을 때, 물체의 무게 외에 아무런 외력이 존재하지 않는다면 마찰력은 그리퍼의 악력에 비례하며 이때의 마찰력은 양쪽에서 손가락이 지탱하고 있기 때문에 식 (1)과 같은 정지 마찰력이다.

$$F_t = \frac{1}{2}mg \tag{1}$$

F_t 는 그리퍼의 손가락 표면에 평행하고, 수직 방향으로 작용하는 힘, 즉, 마찰력이며, m 은 물체의 무게, g 는 중력 가속도이다. 이 때, F_t 가 최대 정지 마찰력을 넘어서면 미끄러짐이 발생하며 정지 마찰력이 운동 마찰력으로 바뀐다. 최대 정지 마찰력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{t_max} = \mu F_n \tag{2}$$

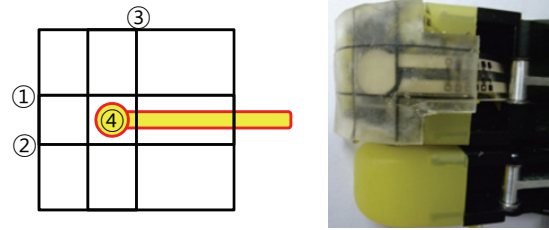


Fig. 5 Gripper's finger with tactile sensor

여기서 μ 는 최대 정지 마찰 계수이며, F_n 은 그리퍼의 손가락 표면에 수직으로 작용하는 힘, 즉, 그리퍼의 악력이다. 식(1)과 식(2)를 보면 그리퍼의 악력과 관계하여 물체와 그리퍼 사이의 최대 정지 마찰력이 증가한다. 따라서 그리퍼의 힘 제어를 통해 물체가 미끄러지는 현상을 방지할 수 있다.

Fig. 5의 좌측 부분은 실험에 사용된 센서의 구조를 보여주고 있다. 탄성 재질 내부에 압력 감응 재료가 수평 방향 두 줄로 삽입되어 있고(①, ②), 수직 방향으로도 두 줄로 삽입되어 있다. 수직 방향의 압력 감응 재료 중 ③번만이 실험에 사용되었고, 나머지 하나는 설치 위치로 인해 별다른 출력력 변화를 보여주지 않았기 때문에 제외되었다. 마지막으로 ④로 표시된 부분은 악력을 측정하기 위한 압력 센서이다. 이렇게 만들어진 센서가 그리퍼 손가락에 설치된 모습이 Fig. 5의 우측에 나타나 있다.

Fig. 6은 미끄러짐이 발생할 때, 센서의 데이터와 그 미분 값을 표현한 것이다. 센서의 데이터 그래프에서 세로축은 5V 전압을 65536의 분해능으로 구분한 값이고, 가로축은 한 구간 당 10ms의 시간을 가지는 샘플링 횟수를 나타내었다.

Fig. 6(a)는 미끄러짐을 발생시킨 센서의 데이터를 실시간으로 표현한 것이다. ㉑ 구간의 시작부터 힘이 가해졌으며, 이 구간에서는 촉각 센서의 유연성과 정지 마찰력으로 인해 센서가 일그러짐으로써 나타나는 현상으로 추정된다. 실제로 미끄러짐이 발생하는 순간은 ㉒ 구간의 시작 지점으로, 변형이 일어났던 센서에 가해지는 마찰력이 정지 마찰력에서 운동 마찰력으로 전환된다. 이 순간 센서의 탄성력을 받아 원상 복구 되는 도중 충격으로 인해 센서의 출력이 증가하는 것으로 추정된다. 하지만 이 구간은 아주 작게 나타나기 때문에 센서 자체의 잡음과 혼동될 수 있다. 이러한 이유로 저자가 미끄러짐을 감지하는 구간은 ㉓ 구간이다. 이 구간은 이전에 받았던 충격에 비해 운동

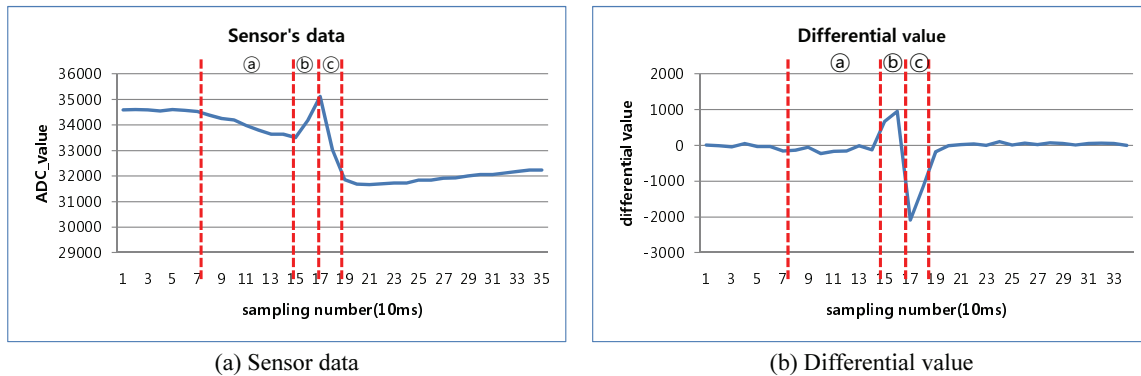


Fig. 6 Data and differential value of flexible tactile sensor

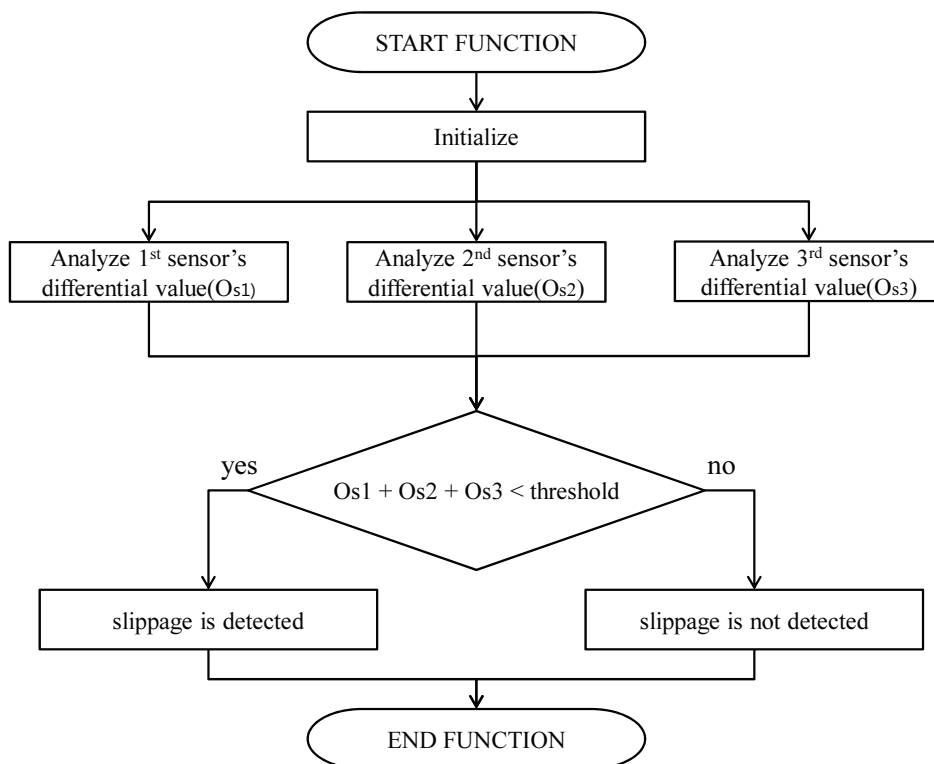


Fig. 7 Flow chart for slip detection

마찰력이 작기 때문에 센서의 출력이 급격하게 감소되는 것으로 판단된다. 이 현상을 구분하기 위하여 센서 데이터의 미분 값을 이용한다. Fig. 6(b)의 © 구간에서 미분 값이 아주 낮은 것을 볼 수 있다.

촉각 센서가 접이 아닌 면에 작용하는 압력을 감지한다는 점을 이용하여 Fig. 7의 순서도와 같은

방법으로 미끄러짐을 감지한다. 이 순서도는 각 센서의 데이터를 미분한 다음 이 미분 값을 모두 합하여 이 수치가 한계점 이하로 낮아지면 미끄러짐이 있다고 판단한다. 따라서 1~3번 센서에 작용하는 압력이 고르게 퍼져있을 때는 물론, 어느 한 쪽으로 치우쳐져 있다고 하더라도 미끄러짐을 측정할 수 있다.

4. 미끄러짐 방지 시스템의 성능 평가

4.1 그리퍼 제어 시스템

Fig. 8은 촉각 센서를 이용한 그리퍼의 물체 쥐기 및 피드백 신호를 이용한 그리퍼의 힘 제어를 통한 미끄러짐 방지의 순서도를 나타내고 있다. 순서도의 시작은 준비 단계로 제어기 내의 모든 함수들과 변수들을 초기화(Initialize) 하고, 물체를 잡기 위해 그리퍼의 위치 파라미터를 조절하여 물체를 서서히 쥐는 행동을 한다. 그리고 그리퍼가 물체를 쥐는 초기 힘은 센서가 반응할 수 있는 충분한 힘으로 설정한다. 촉각 센서와 그리퍼 사이에 삽입된 압력 센서를 이용하여 물체의 유무를 감지한다. 이 때, 물체의 위치는 3번 센서의 방향과 평행하며, 맞는 위치로 설정한다.

물체를 잡는데 성공하면 1ms의 주기로 촉각 센서의 신호를 받는다. 이때, 촉각 센서의 신호에 잡음이 많이 섞여있기 때문에 잡음의 최소화를 위해 증폭-필터-필터-증폭 순의 신호 처리 모듈을 거치게 된다. 노이즈 제거용 필터를 거쳤다 하더라도 노이즈는 존재한다. 이러한 이유로 수신된 데이터를 바로 미분하면 미분 값이 매우 심하게 진동하기 때문에 신호의 이동 평균(Moving Average)을 미분하여 신호의 증감을 구분한다. 물체를 잡은 다음 제어기는 촉각 센서 피드백 신호를 미분하여 얻은 수치를 통해 미끄러짐의 유무를 확인한다. 미끄러짐 유무에 따라 나뉘는 두 가지 상황의 첫 번째로 미끄러짐이 발생하여 힘이 충분하지 않다면 힘을 점점 늘려나가면서 미끄러짐이 발생하지 않는 순간을 찾는다. 미끄러짐이 감지되지 않는 최종 힘을 찾으면 그 힘을 유지하며 물체를 쥔다. 두 번째로 미끄러짐이 발생하지 않아 힘이 충분히 주어졌다고 판단하면 초기 힘을 그대로 이용하여 물체를 쥔다.

4.2 실험 결과

힘과 미끄러짐 감지를 위한 촉각 센서 기반 로봇 그리퍼 제어 시스템의 실험을 위하여, 본 논문에서는 물체를 잡고 그리퍼를 위 아래로 움직여 물체와 접촉면 사이에 미끄러짐이 발생하는지 측정 한 후에 미끄러짐 패턴 감지 기능을 이용하여 미끄러짐을 감지하였다. 미끄러짐을 감지하면 물체를 쥐는 힘을 증가시키며, 미끄러짐이 발생하지 않는다면 물체를 들어 올린다. 이 실험을 통해 미

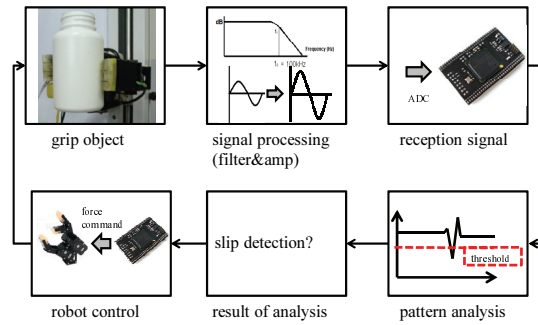


Fig. 8 Gripper control using slip pattern analysis

끄러짐 없이 그리퍼가 물체를 들어 올릴 수 있는 최소의 힘을 구할 수 있다.

본 논문에서는 실험을 위해 원통형의 물체를 이용하였으며, 내부에 일정한 무게를 가진 추를 담을 수 있게 하였다. 실험 모형의 무게는 100g이며 500g의 추를 이용하여 실험하였다. 먼저 센서의 데이터를 이동평균을 이용하여 잡음을 안정화시키고, 그 결과를 미분한 값을 그래프로 나타내었다. 세로축은 3개 센서의 출력을 각각 이동 평균한 후 미분 값의 합을 나타낸 값이고, 가로축은 10ms 주기의 샘플링 횟수이다. 이동 평균의 미분 값이 한계점(Threshold) 이하로 떨어질 때를 미끄러짐이 감지되는 것으로 정의하였다. 미끄러짐이 감지될 때마다 임펄스 신호를 발생시켜 미끄러짐의 유무를 보기 쉽게 표현하였다. 임펄스 값이 1이 되면 그리퍼의 토크를 10씩 상승시켜 준다. 여기서 토크의 단위는 2.7N·m를 1024의 분해능을 가지는 값을 사용한다.

Fig. 9는 촉각 센서에서 나오는 피드백 신호의 이동평균을 미분한 값이다. 한 번의 이동평균은 1ms의 주기로 10개의 데이터를 샘플링 하였기 때문에 본 그래프의 샘플링 횟수 1당 약 10ms의 시간을 보여준다. Fig. 10에서는 Fig. 9의 그래프의 값이 한계점 이하의 수치를 보이기 시작했을 때마다 임펄스 신호로 표시하였다. 이 때, 신호가 바로 0으로 복귀하지 않고 유지되기도 하는데 이는 한번 미끄러짐에 힘 상승이 여러 번 반복되지 않게 하기 위해 미분 값이 한계점 이상으로 복구될 때까지 값을 1로 유지시켰다. Fig. 11에서 보이는 것과 같이 Fig. 10의 신호가 나올 때마다 토크의 입력 수치가 10씩 증가하였으며, 220 이후에는 미끄러짐이 발생하지 않았다.

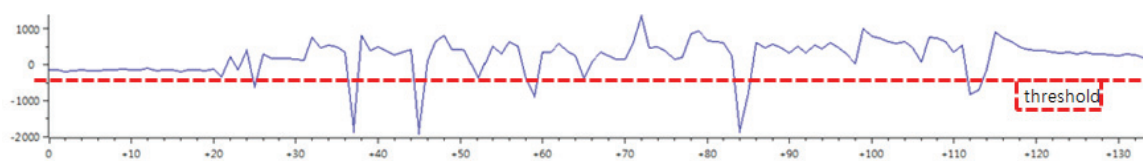


Fig. 9 Slip detection using differential value of tactile signal

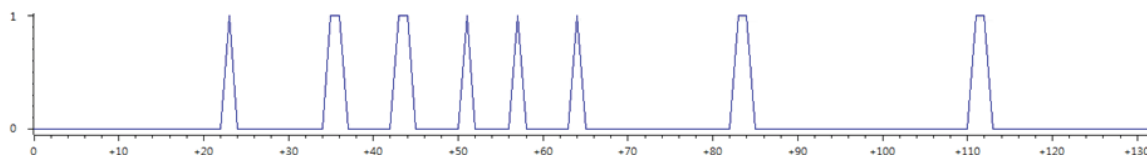


Fig. 10 Impulse signal for slip detection

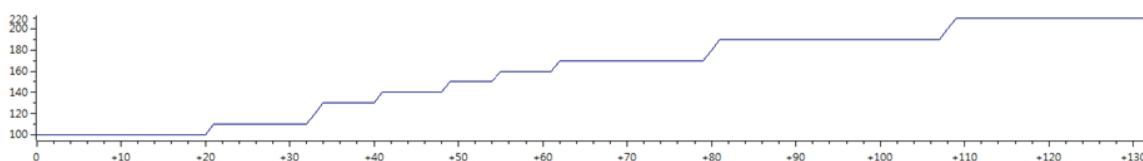


Fig. 11 Gripper's force input

5. 결론

본 논문에서는 로봇 그리퍼가 물체를 옮기기 위해 물체와 그리퍼 사이의 미끄러짐을 촉각 센서 피드백을 이용하여 감지하였으며, 이를 방지하는 시스템을 구성하고 실험을 통하여 시스템의 성능을 검증하였다. 이를 위하여 미끄러짐이 발생할 시, 촉각 센서의 피드백 패턴 분석을 하였다. 그리고 미끄러짐 감지를 이용하여 그리퍼의 힘을 증감시켜 미끄러짐을 방지하기 위한 알고리즘을 구성하였다. 특히 미끄러짐이 발생할 정도로 초기 힘이 약할 때와 미끄러짐이 발생하지 않는 충분히 강할 때를 구분하여 힘을 제어하는 방법을 제안하였으며, 실험 결과, 미끄러짐이 발생하지 않는 최소의 힘을 구할 수 있었다.

국내에서 촉각 센서에 대한 연구는 많이 이루어지고 있지 않다. 하지만 첨단 지능형 로봇을 구현하기 위해서는 면적에 대한 압력뿐만 아니라 수평력, 압력이 가해지는 위치까지 측정할 수 있는 촉각 센서에 대한 연구가 필수적이다. 본 연구는 산업 현장에서 그리퍼를 이용함에 있어서 물체의 미끄러짐을 방지하는 시스템에 촉각 센서의 적용이 가능하다. 향후, 대상 물체의 무게와 질감 등에 대한 연구와 병렬 로봇과의 연동 연구, 촉각 센서

의 전도성 물질 구조 변경 등 다양한 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 부품소재 국제협력 사업으로 지원된 연구임. 또한, 공동연구에 참여하여 촉각센서 제작에 도움을 주신 Univ. of Akron 최재원 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Yussof, H., Ohka, M., Suzuki, H., and Morisawa, N., "Tactile Sensing-based Control Algorithm for Real-Time Grasp Synthesis in Object Manipulation Tasks of Humanoid Robot Fingers," Proc. of the 17th IEEE International Symposium on In Robot and Human Interactive Communication(RO-MAN), pp. 377-382, 2008.
2. Romano, J. M., Hsiao, K., Niemeyer, G., Chitta, S., and Kuchenbecker, K. J., "Human-Inspired Robotic Grasp Control with Tactile Sensing," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 27, No. 6, pp. 1067-1079, 2011.

3. Weiss, L. E., Sanderson, A. C., and Neuman, C. P., "Dynamic Sensor-based Control of Robots with Visual Feedback," *Robotics and Automation, IEEE Journal*, Vol. RA-3, No. 5, pp. 404-417, 1987.
4. Kim, G. S., Shin, H. J., and Kim, H. M., "Development of Intelligent Robot Hand with Three Finger Force Sensors," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 26, No. 1, pp. 89-96, 2009.
5. Rothwell, J. C., Traub, M. M., Day, B. L., Obeso, J. A., Thomas, P. K., and Marsden, C. D., "Manual Motor Performance in a Deafferented Man," *Brain*, Vol. 105, pp. 515-542, 1982.
6. Wettels, N., Parnandi, A. R., Moon, J. H., Loeb, G. E., and Sukhatme, G. S., "Grip Control Using Biomimetic Tactile Sensing Systems," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 14, No. 6, pp. 718-723, 2009.
7. Chaturanga, K. V. D. S., Ho, V. A., and Hirai, S., "A Biomimetic Fingertip that Detects Force and Vibration Modalities and Its Application to Surface Identification," *Proc. of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 575-581, 2012.
8. Kang, D. I., "Research and Development Trend of Tactile Sensor," *Proc. of the Korean Society of Mechanical Engineers on Dynamics and Control in Autumn Workshop Speech Book*, pp. 86-98, 2003.
9. Kim, J. H., Lee, J. I., Park, Y. K., Kim, M. S., and Kang, D. I., "Development of Tactile Sensor and Its Application," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 21, No. 9, pp. 20-25, 2004.
10. Kim, M. S., Park, Y. K., and Kwon, S. Y., "Tactile Devices that Mimics Human's Sensory System," *Physics and High Technology*, pp. 15-22, 2010.
11. Vatani, M., Engeberg, E. D., and Choi, J. W., "Force and Slip Detection with Direct-Write Compliant Tactile Sensors using Multi-Walled Carbon Nanotube/Polymer Composites," *Sensor and Actuators A*, Vol. 195, pp. 90-97, 2013.
12. Woo, S. G., Vatani, M., Lee, I. H., Choi, J. W., and Cho, H. Y., "Fabrication Process of Flexible Sensor using MWCNTs," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 545-546, 2013.