

---

# 적응제어를 위한 Manipulator의 미끄럼 감지 알고리즘에 관한 연구

이 영재\*

A Study On Slippage Sensing Algorithm of Manipulator for An  
Adaptive Control

Young-Jae Lee\*

## Abstract

As the technology of industrial automation using robot system grows the rapid advance, productivity improvement and decrease in number of maintenance, management occur in many fields. Therefore, more various and intelligent robot motions are needed without human being help. Considering this situation, the need of robot with various, fast and safe acting sensors are demanded. In these sensings, the slippage sensing gives us specific information between ripper and object while grasps the object.

In this paper, we proposed new slippage sensing algorithm for various and intelligent robot motion. So, optimal grasping force control and compensation of position error is possible for an adaptive task execution using adaptive control.

## I. 서 론

로봇을 사용한 산업 자동화 기술의 눈부신 발전으로 인하여 생산성 향상과 수율의 개선, 유지, 보수율 감소 등 많은 혁신이 일어나고 있다.

로봇을 사용한 저장, 이동, 가공, 포장의 프로세서의 자동화뿐만 아니라 핵발전소 심해탐사 우주 탐험 등과 같이 위험하고 힘든 환경에서도 로봇의

다양하고 지능적인 작업 수행 필요성이 대두되었다. 이같은 작업은 외부 환경의 변화를 항상 감시해야 하며 상황 변화에 따른 적절한 대응이 필요하기 때문에 시각, 촉각, 압각, 미끄럼각등 다양한 감각 센싱 기능을 로봇에게 부여하게 되었다. [1][2][3][4][5]

특히 촉각의 경우엔 로봇의 손끝 발끝등 외부 환경의 경계 영역에 설치되어서 복잡한 작업 수행에 필요한 위치, 힘 제어방식에 큰 역할을 담당하게 되었다

---

\* 신성 전문대학 전자과 전임강사  
접수일자 : 1998년 9월 4일

미끄럼 센서는 파지 동작을 결정하는 결정적인 역할을 하는 센서로 Ueda가[1] 개발한 Rubber roller와 Prob Tip을 사용한 센서 등 여러 가지가 개발되어 있으나 구조가 기계적으로 복잡하고 작업 정밀도나 파지력 감지 등 미흡한 점이 많다.[1][3]

따라서 본 논문에서는 압각에 비례한 콘더턴스를 갖는 FSR 센서를 사용하여 기존의 미끄럼 감지 알고리즘과[1][2] 달리 논리연산과 좌표변환을 이용한 새로운 미끄럼 감지 알고리즘을 사용하여 미끄럼 유, 무, 방향 등을 감지해 환경변화에 따른 응통성 있는 적응제어를 통하여 로봇이 최적작업을 수행하는데 기여하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다

2장은 로봇의 촉각센서 기능에 대하여 설명하고 3장은 미끄럼 검출 방법을, 4, 5, 6장에서는 본 논문이 제안한 미끄럼각 감지 알고리즘을 시뮬레이션과 실험을 통해서 확인해 보고 7장에서는 결론을 맺는다.

## II. 로봇의 촉각센서

로봇의 손끝, 보행 로봇의 발끝 등 외부 환경과의 경계 영역에 설치되어 시각센서와 함께 로봇의 지능화를 꾀하는데 중요한 센서이다. 촉각센서는 인간으로 말하면 피부감각에 대응하는 센서이다.

산업용 로봇에 사용되고 있는 촉각센서로는 로봇에 요구되는 기능이나 센서자체의 검출 방법 등에 의해서 접촉센서, 압각센서, 역각센서, 미끄럼센서로 분류할 수 있다.[1][3][6]

### 1. 촉각센서의 종류[1][3][6]

#### 1) 접촉각 센서

로봇의 손이나 몸체의 일부가 외부의 물체에 접촉하는 것을 감지하는 감각으로 기본적으로 로봇이 대상물에 접촉되는가 여부의 정보를 센서 출력으로 얻는다.

#### 2) 압각(압력감각) 센서

주로 로봇 Finger의 내면에 부착되는 감각으로서 대상물을 잡을 때의 접촉면의 수직방향의 파지력을 감지한다.

- ⓐ 파지력(쥐는힘)의 조정 : Manipulator의 한가지 동작인 대상물을 쥐는 동작을 물체의 형상에 따라 적절한 힘으로 쥐게 하기 위한 것으로 대상을 파괴하지 않고 또 대상을 미끄러 떨어뜨리지 않게 쥐는 힘을 조정하기 위한 기능.
- ⓑ 대상물체의 인식 : 대상물에 스치며 대상을 인식하는 본래의 촉각 기능을 하는 것으로 대상물의 형상, 딱딱한가의 여부 등 대상물의 물성을 인식.

#### 3) 역각 센서

로봇의 손목이나 팔을 구동할 때에 외부에 있는 물체 또는 외력에 상대적으로 발생하는 항력을 감지하는 감각이다.

로봇 매니퓰레이터 손목의 힘을 측정할 수 있다면 여러 가지 작업을 하는데 편리하다. 작업 공간 속에서 손을 움직였을 때 물체가 존재한다면 손에 만져지므로 손목에 오는 부딪힘에 대한 반작용 힘의 측정으로 물체의 존재와 그 위치를 확인 할 수 있다. 또한 조립 작업을 할 때에 정밀한 끼워 맞춤을 손목에 오는 힘을 감지함으로써 이를 수 있고 목표 물체를 다른 물체에 결합시킬 때에도 결합에 가해지는 힘을 측정함으로써 완전히 결합이 되었는지를 확인 할 수 있다.

#### 4) 미끄럼각 센서

로봇의 손에 파악된 목표물이 파악 접촉면을 따라 미끄러짐에 의해 일어나는 움직임을 감지하는 감각이다.

## 2. 촉각센서가 갖추어야 할 조건[1][3]

- 1) 센서 표면이 순응성과 내구성이 있어야 한다.
- 2) 히스테리시스 없이 반복 작업에도 안정적인 출력을 가져야 한다.
- 3) 소형, 경량이며 응용화로가 간단해야 한다.
- 4) 잡음에 강해야 한다.

## III. 미끄럼 검출방법[1][2][3][4][5][6]

- 1) 미끄럼을 일으키는 대상물에 의해 눌려지고 있

- 는 틀러가 회전하는 것으로서 검출하는 방법.
- 2) 대상물체 표면의 거치률을 이용하여 미끄럼 운동을 검출하는 방법.
  - 3) 물체를 들어올릴 때 미끄러짐이 발생하면 로봇 손끝에 작용하는 하중이 변화 한다는 원리를 이용한 방법.
  - 4) 특별한 미끄럼각 센서를 사용하지 않고 다른 촉각센서로부터 미끄럼을 추론하는 방법.
  - 5) 분포형 접촉각 센서, 압각 센서 등 다른 촉각 센서의 출력신호를 분석하여 간접적으로 미끄럼을 추론하는 방법.

#### IV. 미끄럼 감지 알고리즘

##### 1. 물체 파지시 미끄럼 알고리즘

step 1) Sensor data를 0, 1로 2분화 한다.

$$t_{ij} = 0; \text{ if } t_{min} \leq t < t_{threshold}$$

$$t_{ij} = 1; \text{ if } t_{threshold} \leq t < t_{max}$$

step 2) moment와 총 접촉 면적( A )을 구한다.

$$m_{pq} = \sum_i \sum_j i^p j^q t_{ij}$$

$$A = m_{00} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} t_{ij}$$

step 3) Center of area를 구한다.

$$i_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} i * t_{ij}$$

$$j_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} \frac{1}{A} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} j * t_{ij}$$

step 4) step 1 ~ step 3작업 반복해 이를 데이터와 Exclusive OR 논리연산과 중심점을 비교해 파지력을 조정한다.

```
if(X_OR_result <= Taxel_threshold ::(C2 - C1) <= Center_threshold))grasp_ok();
else grasping_force_increase_until_ok;
```

##### 2. 미끄럼을 이용한 파지력 제어

매니퓰레이터가 손끝으로 대상물을 쥐고 들어올리는 것을 생각하면 마찰계수  $\mu$ 의 값은 임의적으

로 결정되는 것이 아니라 대상물의 표면이나 재질에 의존하기 때문에  $\mu$ 를 측정하여 쥐는 힘을 제어하는 방법은 불가능에 가깝다. 따라서 Gripper 끝과 대상물간의 미끄럼을 이용하여 파지력 제어를 할 수 있다.

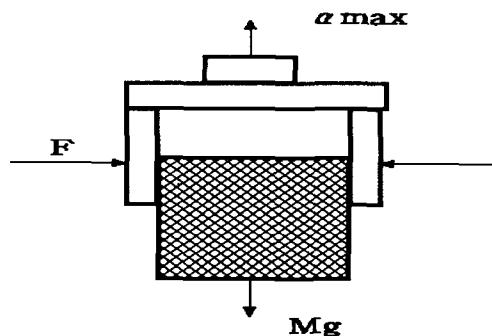


그림 1. 미끄럼을 이용한 파지력 제어

Fig. 1 Control of grasping force control using slippage

대상물 질량 : M

손끝과 대상물간의 마찰계수 :  $\mu$

쥐는 힘 : F

들어올릴 때 최대가속도 :  $\alpha_{max}$

미끄러지지 않는 조건 :  $Mg < \mu F$ , where  $\alpha_{max}=0$

쥐는 힘  $F = Mg/u + \Delta F$

##### 3. 상, 하 이동시 미끄럼 발생과 파지력 제어

	구간	작업	속도	비교
d	a	점착업	정지	미끄럼 발생구간
c	a→b	수직이동	가속	아랫방향 미끄럼발생구간
b	b→c	수직이동	등속	
a	c→d	수직이동	감속	윗방향 미끄럼 발생구간
	d	점착업	정지	

그림 2. 이동구간

Fig. 2 Moving section

그림2, 표1의 구간별 작업 및 가, 감속시 발생할 수 있는 미끄럼을 나타낸 것으로 제어속도의 a→b 구간에서 가속시 발생할 수 있는 미끄럼 방지를 위

한 파지력 제어는 식 1과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\mu F}{F} > M(a+g) + \Delta F \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$c \rightarrow d$  구간에서 감속시 발생할 수 있는 미끄럼 방지를 위한 파지력 제어는 식 2와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{uF}{F} > M(g-a) + \Delta F \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

#### 4. 상, 하 이동시 미끄럼 갑지 알고리즘

step 1) Sensor data를 0, 1로 2분화 한다.

$$t_{ij} = 0; \text{ if } t_{\min} \leq t < t_{threshold}$$

step 2) moment와 총 접촉 면적( A )을 구한다.

$$m_{pq} = \sum_i \sum_j i^p j^q t_{ij}$$

$$A = m_{00} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} t_{ij}$$

step 3) Center of area를 구한다.

$$i_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} i * t_{ij}$$

$$j_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} \frac{1}{A} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} j * t_{ij}$$

step 4) step 1 ~ step 3 작업 반복해 이들 데이터  
와 Exclusive OR 논리연산을 행하고 중  
심점을 비교해 파지력을 조정한다.

```

if(X-OR_result <=Taxel_threshold ::(C2 - C1)
<=Center_threshold))task_ok(); else grasping_
force increase until ok(); step

```

step 5) 마무리 작업시 X-OR 연산 결과를 근거로  
좌표변환을 해 새로운 중심점을 찾아서  
이동량을 구해 이동량 만큼 보상제어를  
수행한다.

## V. Simulation

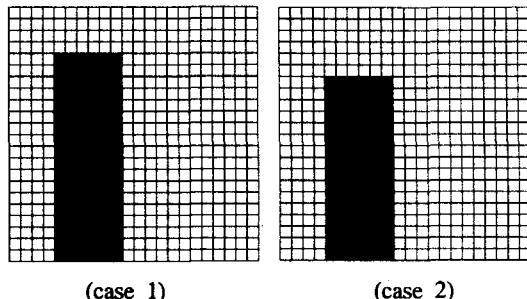


표 2. 미끄럼 Simulation 결과  
Table 2. Result of Slippage Simulation

상태	Simulation Result
미끄럼:2 (taxel)	미끄럼 량 (case1→case2) 2
결과(error)	0

(case 3)

그림 3. Simulation 결과  
Fig. 3 Result of simulation

그림 3은 아래에서 위로 가속을 한 경우에 발생한 에러로 가정해 16 by 6 taxels 크기의 작업 대상체를 사용해 Simulation을 한 경우로 제안한 알고리즘을 사용해 case1의 중심점 C1(13.50, 6.50)을 구하고 case2의 중심점 C2(12.50, 6.50)를 구해 두 영상의 X-OR 하면 case 3과 같은 row 2 taxel, column 6 taxels를 구할 수 있다. 이때 C1, C2의 좌표 값을 살펴보면 y축은 변화가 없으나 x축으로 변동이 있으므로 x축 변동량 만큼 변환해 새로운 좌표를 구하고 그 중심점의 차를 구하면 2 taxels를 구할 수 있다. 또한 이를 근거로 마무리 작업시 2 taxels 만큼의 움직임 에러를 고려해 보상제어를 할 수 있다.

## VI. 실험

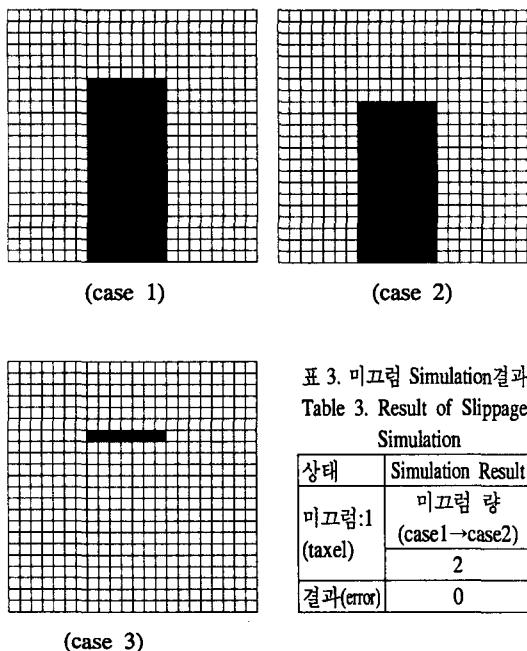


그림 4. 미끄럼 실험  
Fig. 4 Test of slippage

그림 4는 16 by 7 taxels 크기의 작업 대상체를 사용해 실험을 한 경우로 case1의 중심점 C1(13.50, 10.0)을 구하고 case2의 중심점 C2(14.0, 10.0)를 구해 두 영상의 X-OR 하면 case 3과 같은 row 1 taxels, column 7 taxels를 구할 수 있다. 이때 제안한 알고리즘을 사용해 미끄럼량 1 taxel을 정확하게 감지 할 수 있었고 파지력 증가로 인해 더 이상의 미끄럼이 발생하지 않았다. 또한 제안한 알고리즘을 사용해 점 작업시 최적의 파지력을 결정할 수 있고 입력 데이터의 Threshold level에 따라서 파지력의 결정에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 급감속 가속을 하는 경우 외엔 상하 이동시 1 taxel 이하로 나타나는 경우가 많았다.

FSR Sensor의 경우 Array Type의 Sensor이기 때문에 미소한 회전이 발생되면 최소 인접 센서가 45도 방향으로 항상 직선 형태가 되지 않기 때문에

파지력을 적절하게 조절해 회전발생을 상,하 이동시  
방지 할 수 있었다.

## VII. 결 론

로봇의 작업시 발생할 수 있는 미끄럼 예러 감지 알고리즘을 제안하고 이를 simulation과 실험을 통해 Manipulator가 환경변화를 인지하고 적응제어를 통해 이에 적절하게 대응하는 것을 확인해 보았다.

또한 제안한 알고리즘을 사용해 파지한 경우 급감, 가속인 경우를 제외하고는 미끄럼, 회전등의 움직임 error가 잘 발생하지 않아서 초기 파지력 결정이 안정한 작업의 근간이 됨을 알 수 있었다. 특히 에러량을 마무리 작업에 고려해 제어를 한다면 최적 작업수행이 가능하리라 기대된다. 그러나 고도의 정밀 작업을 위해 미소한 회전량 감지, 보상 및 작업대상체의 물성 등을 고려한 지능제어는 앞으로 해결해야 할 과제이다.

## 참고문헌

- [1] Russel, R.A. Robot tactile sensing, Prentice Hall 1990, pp86-98
  - [2] Young-jae Lee, Chol Kwon, Jong-ho Park, Mingon Park, "A Tactile sensing algorithm in an adaptive Task Execution for an Intelligent Manipulator", SICE International session, Japan 1994, pp 867 ~ pp870
  - [3] Russel, R.A. , "Tactile sensing and grasp security", Proceedings of IEEE International Workshop on Emerging Technologies and Factory Automation August 11-14, 1992 Melbourne, pp. 458-462
  - [4] Kensuke Hasegawa, "Role of Tactile Sensor in the Robot", Journal of the Robotics Society of Japan Vol. 2. No. 5. 1984
  - [5] Howard R. Nicholls, "Advanced Tactile sensing for Robotics", World scientific press (Vol. 5), 1992.
  - [6] 황규섭 편저, 센서응용기술, 기전 연구사 1994



이영재(李永在)  
1980년 3월~1984년 2월 충남  
대학교 공업교육대학 전자  
교육 공학과 졸업  
1986년 1월~1995년 12월 LG 전자  
부품(주) 연구소(선임 연구원)  
1992년 9월~1994년 8월 연세대학원 전자공학과  
석사졸업  
1996년 3월~1998년 2월 경희대학원 전자공학과  
박사과정수료  
1996년 3월~현재 신성전문대학 전자과 전임강사