

論文99-36T-3-10

Tactile 영상을 이용한 매니퓰레이터의 그리퍼 힘제어에 관한 연구 (A Study On Gripper Force Control Of Manipulator Using Tactile Image)

李永在*, 朴榮泰**

(Young Jae Lee and Young Tae Park)

要約

본 논문에서는 매니퓰레이터로 작업체 이동시 이동방향 가, 감속에 따른 미끄럼, 회전등의 위치에러 방지를 위한 그리퍼 힘 제어를 작업계획도를 설정해 구간별로 알아본다. 또한 작업체와 매니퓰레이터사이에 가장 정확한 정보를 제공할 수 있는 tactile 센서를 그리퍼에 부착해 연속적으로 tactile 영상 데이터 추론을 통해 미끄럼과 회전을 감지한다. 계산된 파지력과 감지된 애러량 비교를 통해 보상제어와 이를 응용한 최적의 파지력을 구할 수 있다.

tactile 센서로는 압각센서인 FSR(Force Sensing Resistor)을 사용해 22×22 센서회로를 구성하였다. 전 처리로써 연속적인 taxel 수를 문턱값으로 설정해 필터링 작업을 하였고, 모멘트 메씨드를 감지 알고리즘으로 사용해 실험하였다.

Abstract

When manipulator moves the objects, the object position error can be occurred because of acceleration or negative acceleration according to the direction. So we make manipulator working path for establishing optimal gripper force control preventing occurrence of object position error. And we attached the tactile sensor on the gripper of manipulator which gives us very specific information between manipulator and object. Reasoning of continuous tactile image data, manipulator can sense rotation and slippage and change the grasping force that corrects calculated grasping force and compensation can be possible of the object position error.

We use the FSR(Force Sensing Resistor)sensor which consists of 22 by 22 taxels and continuous taxel number is used for filtering and using the moment method for sensing algorithm in our experiment.

I. 서론

최근 국제 경쟁력 강화를 위하여 산업용 로봇을 활용해 생산력 향상에 기여하는 많은 연구가 진행 중이

다. 특히 자동생산, 자동조립, 자동측정 등 부품을 생산, 조립, 분류 평가하는데 있어서 산업용 로봇의 역할은 그 중요성을 더해 가고 있다.

지금까지의 산업용 로봇은 단순하고 반복적인 작업을 미리 정해진 순서대로 수행함으로써 인간의 노동력을 대신해 주고 있으나, 핵발전소, 심해탐사, 우주 탐험 등과 같이 위험하고 힘든 환경뿐만 아니라 초정밀 가공 등 다양하고 지능적인 작업 수행의 필요성이 대두되었다.

이러한 작업은 외부 환경의 변화를 항상 감시해야

* 正會員, 신성대학 電子科

(Dept. of Electronics, Shin Sung College)

** 正會員, 경희대학교 電子工學科

(Dept. of Electronics Eng., Kyung Hee University)

接受日字: 1999年1月20日, 수정완료일: 1999年3月17日

하며, 상황 변화에 따른 적절한 대응을 필요로 하기 때문에 시각, 촉각, 압각, 미끄럼각 등 다양한 감각 센싱기능을 로봇에게 부여하게 되었다.^{[1] [2] [3] [4] [5]}

Railbert와 Tise가 resistive와 conductive를 사용하여 구성한 tactile 센서는 내구성과 넓은 측정 범위를 가지고 있으나 히스테리시스가 있고 구현 하드웨어가 복잡하며^{[1] [4]} Ueda 등은 롤러(roller)와 팁(tip)을 사용하여^[4] 미끄럼 감지센서를 구현하였으나 센서를 로봇에 장착하여 사용하기에는 크기, 무게, 응답속도 등 아직은 많은 제약 사항이 있다.

따라서 본논문에서는 폴리머 thick 필름 디바이스(Polymer thick film device)를 사용해 만든 경량의 FSR 센서를 매니퓰레이터의 그리퍼에 부착하여 작업대상체의 미끄럼, 회전감지를 구현해 보고, 설정된 매니퓰레이터의 작업 계획도에 따라 구간별로 계산된 파지력과 감지된 에러량을 이용해 작업수행 에러를 최소화할 수 있는 방법을 제안해 본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 시스템 구성에 관하여 기술하고 제 3장에서는 센서 접촉면 인식 방법을, 제 4장에서는 그리퍼 힘 제어에 대하여 논한다. 제 5장에서는 FSR 실험과 결과를 고찰하고, 제 6장에서는 결론을 맺는다.

II. 시스템 구성

FSR 센서는 폴리머 thick 필름 디바이스(Polymer thick film device)를 사용해서 만든 것으로 힘이 증가해감에 따라서 저항값이 감소하는 특성을 가지고 있다. 또한 FSR 센서는 전도 고무(conductive rubber)에 비해 히스테리시스가 적으며, 피조 필름(piezo film)보다는 진동이나 열에 대하여 덜 예민하여 tactile 감지센서로 많이 사용되고 있다.

그림 1은 tactile 센싱을 위한 시스템 구성도로 tactile 센서는 22×22의 매트릭스 구성으로 되어 있으므로 22행에 대한 22열 출력 감지를 위해 행, 열의 어드레스회로 이를 제어하는 I/O 보드, 센서 기준 입력 전압을 위한 D/A 컨버터, 센서출력 감지를 위한 A/D 컨버터, 매니퓰레이터의 제어를 담당하는 매니퓰레이터 제어부, 센서와의 원활한 인터페이스를 위한 버퍼앰프와 잡음 제거를 위한 필터회로 등으로 구성했다.

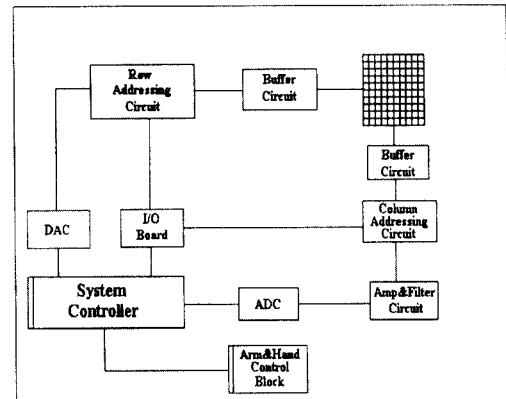


그림 1. 시스템 구성도
Fig. 1. System Configuration.

사용된 FSR 센서의 입력감지 범위는 700g~7000g, 저항의 변화는 50kΩ~550kΩ이며 기준입력 전압으로는 0.5V, 12bit A/D 컨버터를 사용했다.

III. 센서 접촉면 인식방법

보통 센서의 경우에 인식되는 표면의 종류는 센서의 구조와 접촉면의 특성에 따라서 점, 평면, 곡면 등으로 구분된다.

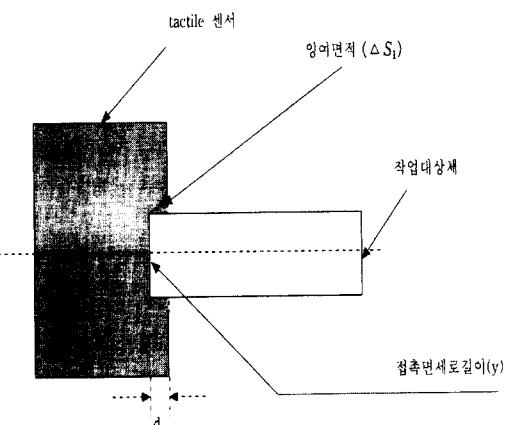


그림 2. 센서와 작업대상체
Fig. 2. Sensor and object.

센서에 직육면체의 물체로 가압 할 경우, 센서는 압력을 받는 동시에 압력에 의한 변위가 발생하게 된다. 이를 고려해 접촉 면적을 구해 보면(S : 면적, x : 직육면체 작업체의 접촉면 가로길이, y : 직육면체 작업체의 접촉면 세로길이, a : 센서변위, ΔS_1 : 잉여면적)

$$S = xy + x \cdot a + y \cdot a + \Delta S_1 \quad (1)$$

$$F = -\frac{M}{\mu} (a + g) + \Delta F_{s1} \quad (4)$$

식 (1)에서 d 는 변위를 나타내며, ΔS_1 는 그림 2에 서 보는 것 같이 변위에 의한 잉여면적으로 이로 인해 tactile 출력 영상은 원래 작업체 센서 접촉면 크기와 다르게 나타난다. 특히 압력 크기에 따라서 잉여면적 이 넓어질 수 있으므로 정확한 인지를 위한 전처리로 필터링이 필요하다. 접촉면이 구인 경우와 원뿔인 경우 잉여면적을 고려한 접촉면적 S_2 , S_3 를 구해 보면 식 (2), (3)과 같다.

(r : 반지름, a : 변위, ΔS_2 : 구 잉여면적 ΔS_3 : 원뿔 잉여면적)

$$S_2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot d + \Delta S_2 \quad (2)$$

$$S_3 = \pi \cdot r \cdot \sqrt{r^2 + d^2} + \Delta S_3 \quad (3)$$

IV. 그리퍼 힘 제어

매니퓰레이터가 그림 3과 같은 작업계획도에 따라 작업을 수행하는 경우 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$, $g \rightarrow h \rightarrow i \rightarrow j$ (제 1구간) 영역은 하중과 가, 감속에 따른 미끄럼 발생 가능 영역, $d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g$ (제 2구간) 구간은 회전 발생 가능 영역으로 구분할 수 있다. 이 경우 그리퍼 파지력을 다음과 같이 구할 수 있다.

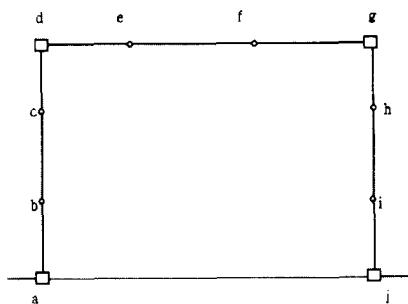


그림 3. 작업 계획도

Fig. 3. Work planning path.

1. 제 1구간 미끄럼 제어

a : 가속도 ΔF_{s1} : 추가되는 힘 M : 질량

μ : 마찰계수 F : 파지력 g : 중력 가속도

$$\mu F \geq M(a + g)$$

$$uF \geq M(g - a)$$

$$F = -\frac{M}{\mu} (g - a) + \Delta F_{s2} \quad (5)$$

2. 제 2 구간 회전 제어

2.1 그리퍼 방향 이동

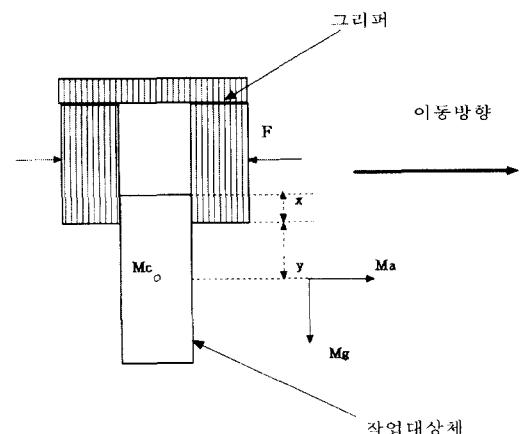


그림 4. 그리퍼 회전제어 I

Fig. 4. Gripper rotation control I.

μ : 마찰계수, F : 파지력, Mc : 무게 중심

x : 그리퍼의 물체 접촉 길이

y : 그리퍼와 물체 중심과의 거리

g : 중력 가속도, ΔF_{r1} : 추가되는 힘

$$\mu F \geq Mg$$

$$F = -\frac{Mg}{\mu} + \Delta F_{r1} \quad (6)$$

$$F \geq Ma$$

$$F = Ma + \Delta F_{r2} \quad (7)$$

$$F \cdot x \geq Ma \cdot y$$

$$F = Ma \cdot \frac{y}{x} + \Delta F_{r3} \quad (8)$$

2.2 물체 방향 이동

c1 : 그리퍼 중심에서 물체까지 거리

r : 그리퍼 면적소, F : 파지력,

ΔF_{r4} : 추가 되는 힘

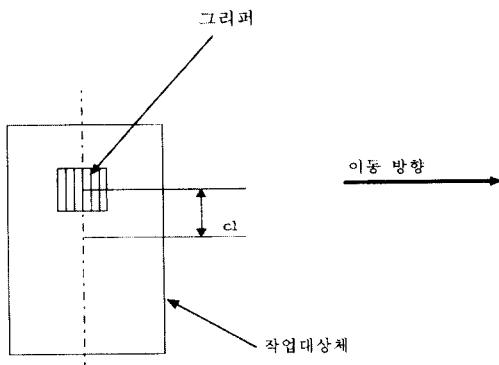


그림 5. 그리퍼 회전 제어 II
Fig. 5. Gripper rotation control II.

$$\int_A \mu F \cdot r \cdot dA \geq (Ma) \cdot c_1$$

$$F = (\int_A \mu \cdot r \cdot dA)^{-1} \cdot (Ma) \cdot c_1 + \Delta F_{\text{d}} \quad (9)$$

작업계획도(그림 3 참조)에 따른 그리퍼 힘제어를 구간별로 나누어 분석해 보았다. 미끄럼 제어의 경우 가속, 감속에 따른 변화량과 질량의 곱 보다 큰값으로 파지력을 설정해야 하므로 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다. 그림 4, 5는 작업체 이동방향에 따른 회전제어를 그림으로 나타낸 것으로, 그림 4는 그리퍼 이동방향의 경우로 그리퍼에 직접 작업체의 회전력이 전달되는 것을 고려해 식 (6), (7), (8)로 파지력을 나타낼 수 있으며, 이 세개의 식을 만족하는 가장 큰 값으로 파지력을 설정한다. 그림 5는 물체방향 이동경우로 작업체가 방해물 없이 회전이 발생할 수 있다. 이 경우는 접촉면적을 고려해 파지력을 식 (9)로 나타낼 수 있다. 그러나 정확한 작업 수행을 위해 방향과 가, 감속에 따른 파지력뿐 아니라 점 작업 후 작업중 그리퍼와 작업체의 상태정보가 필요하므로 tactile 센서를 그리퍼에 부착하고 계속적인 tactile 영상 정보데이터의 감시가 필요하다.

V. FSR 실험

22×22 taxel^[1] 크기의 FSR 센서회로를 구성해 그리퍼에 부착하고 4×10 크기의 직육면체를 작업대상체로 설정하여 실험하였다.

1. FSR 출력

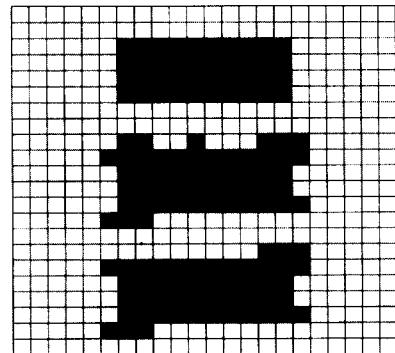


그림 6. FSR 출력
Fig. 6. Output of FSR.

그림 6은 4×10 크기의 직육면체 모양을 갖는 작업대상체의 taxel^[1] 출력을 나타낸 것이다. 첫 번째 영상의 경우 이상적인 직육면체 예상 출력을 나타낸 것이며, 두 번째 영상은 실제의 tactile 영상 출력을 나타낸 것이다. 이 영상을 살펴보면 예지 부분에 잉여 taxel이 뭉쳐 있음을 알 수 있다. 이는 식 (1)의 ΔS_i 에 해당하는 것으로 적절한 필터링 작업이 필요하다. 필터링 방법으로 여러 가지가 있으나, 이 경우는 행 (Row), 열(Column)에 연속적인 taxel 수를 기준으로 설정하여 필터링 하였다. 그림 6의 경우 3개 이상의 연속적인 taxel을 문턱값(Thresholding value)으로 설정하여 필터링을 구현하였다. 세 번째 영상은 행 필터링을, 그림 7의 첫번째 영상은 열 필터링을 구현 한 것으로 두 번째 영상과 비교해 볼 때 원래의 영상과 많이 근접해 있음을 알 수 있다. 그림 7의 두 번째 영상은 이상적인 출력 영상과 필터링이 끝난 후의 영상을 비교해 그 차를 구한 것이다.

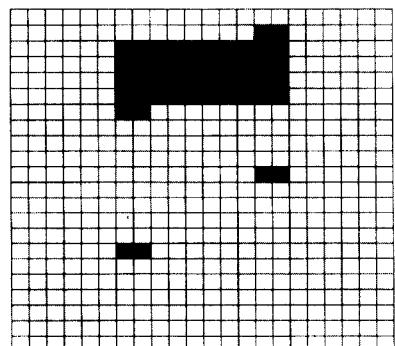


그림 7. 필터링 결과와 원 영상과의 차
Fig. 7. Result of filtering and difference of ideal output.

표 1. 필터링 결과

Table 1. Result of filtering.

항 목	필터링 전	필터링 후
taxel 수[40]	52	44
에러율(잉여 taxel수/ 이상적taxel수)	30 %	10 %

그림 8의 첫 번째 영상은 그림 2와 같은 크기의 작업 대상체의 taxel 출력을 나타낸 것으로 같은 크기, 종류의 작업체라도 좌지역과 표면 상태 등 환경 조건에 따라 다른 형상을 출력함을 알 수 있다. 이 경우도 그림 6에서 적용한 필터링을 적용하면 그림 8의 두 번째, 세 번째 영상을 얻을 수 있다.

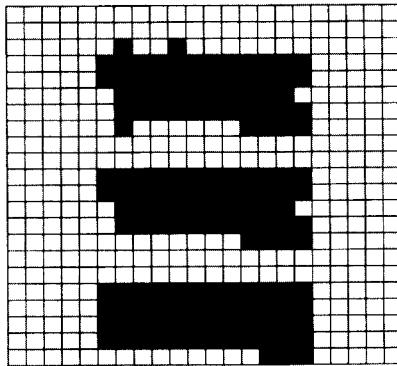


그림 8. 다른 FSR 출력

Fig. 8. Other output of FSR.

표 2. 필터링 결과

Table 2. Result of filtering.

항 목	필터링 전	필터링 후
taxel 수[40]	52	43
에러율(잉여 taxel수/ 이상적taxel 수)	30 %	7.5 %

2. Tactile sensing 알고리즘

회전 미끄럼 등을 인지하는 방법으로 모멘트 메써드(Moment method)^[1]와 에지 앤 라인 메써드(Edge and line method)^{[2][3]} 등 여러 가지가 있으나, 여기에서는 작업체 변위량이 taxel 센서 범주 내에서 움직임을 감지하므로 모멘트 메써드를 사용하였다.

t_{ij} : i번째 열, j번째 행의 taxel 출력

m_{pq} : 면적 모멘트(moment of area)

m_{10} : j(행)에 대한 면적A의 모멘트(1차 모멘트)

m_{01} : i(열)에 대한 면적A의 모멘트(1차 모멘트)

m_{11} : i(열), j(행)에 대한 면적A의 관성적(product of inertia)

m_{20} : j(행)에 대한 면적A의 관성 모멘트(2차 모멘트)

m_{02} : i(열)에 대한 면적A의 관성 모멘트(2차 모멘트)

m_{00} : 총면적 (total area of contact)

$$m_{10} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} i \cdot t_{ij}$$

$$m_{01} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} j \cdot t_{ij}$$

$$m_{11} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} i \cdot j \cdot t_{ij}$$

$$m_{20} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} i^2 \cdot t_{ij}$$

$$m_{02} = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} j^2 \cdot t_{ij}$$

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

step 1) 센서 데이터를 0, 1로 2분화 한다.

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

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

step 2) 모멘트와 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) 중심점을 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) 최소 관성 모멘트를 구한다.

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2(m_{00} * m_{11} - m_{10} * m_{01})}{(m_{00} m_{20} - m_{10}^2) - (m_{00} m_{02} - m_{01}^2)} \right]$$

step 5) 다음 입력된 데이터 값에서 상기와 같은 순서로 중심과 최소 관성 모멘트를 구한 후에 이들의 차로써 변동량을 구한다.

$$C_d = C(i_1, j_1) - C(i_0, j_0)$$

$$\theta_d = \theta_1 - \theta_0$$

미끄럼이나 회전등의 위치에러 발생시 즉, C_d θ_d 의 값이 문턱값 이상인 경우 작업체 위치에러를 감지할 수 있고, 그리퍼 파지력을 조정해 더 이상의 에러가 발생하지 않도록 방지 할 수 있으며, 작업 마무리 단계에서 이 에러량(C_d θ_d)을 고려해 작업을 종료하므로 최적작업 수행을 구현할 수 있으며, 반복작업인 경우 계산된 파지력에 환경에러 요인을 고려한 파지력으로 작업수행 에러를 최소화 할 수 있다.

3. 미끄럼 및 회전 실험

필터링한 초기 영상을 얻고 매니퓰레이터의 이동작업과 동시에 계속적인 tactile 영상 데이터 값을 추론하여 미끄럼 및 회전등의 움직임 에러를 감지하여 에러량을 계산하였다.

3.1 미끄럼 감지 실험

그림 9는 미끄럼 발생시 필터링한 결과를 나타낸 것으로 아래 방향으로 미끄럼이 발생한 것을 알 수 있다. 이때 tactile sensing 알고리즘을 적용해 보면 그

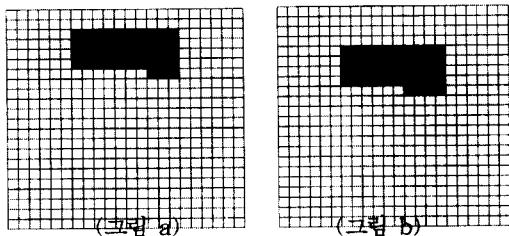


그림 9. FSR의 미끄럼 출력

Fig. 9. Slippage output of FSR.

림 a, b의 중심점 Ca(3.67, 10.74), Cb(5.73, 10.77)이므로 2.05로 약 2 taxel의 미끄럼이 발생 했음을 알 수 있다. 그림 b는 그림 a와 달리 1개의 taxel이 아래 부분에 증가됨을 알 수 있다. 이는 미끄럼이 발생하면

서 taxel 형상이 변화한 것으로 작업환경, 대상체 및 위치 에러 발생으로 인한 그리퍼 파지력 증가로 인한 현상으로 에러위치 감지에 영향을 줄 수 있으나, 여러 번의 실험을 통하여 확인해 보면 초기 미끄럼을 이용한 파지력으로 첨작업을 한 경우 미끄럼 발생 빈도에 따른 형상 변화는 미소하게 발생하였다.

3.2 회전 감지 실험

그림 10은 작업체가 11.3도 정도의 회전 발생시 출력을 나타낸 것으로 미끄럼 발생시 보다 더 많은 잉여 출력이 발생됨을 알 수 있다. 이는 회전시 잉여면적의 변동되면서 더 많은 taxel에 영향을 주기 때문으로 필터링 작업 수행시 어려움이 따른다. 이 경우 행, 열의 문턱 taxel 수를 미끄럼과 같이 3으로 설정하여 첫 번째 영상을 필터링해 보면 두 번째 영상과 세 번째 영상과 같은 출력을 얻을 수 있으며, 이를 tactile sensing 알고리즘을 적용하여 계산해 보면 9.9도가 된다. 따라서 1.4도 정도의 차이가 발생한다. 이같은 현상은 잉여면적을 최소화하려는 필터링 기법, 회전에 의한 잉여면적 변동, 에러감지에 따른 그리퍼 파지력 증가 등의 에러가 누적되어 생기는 결과이다.

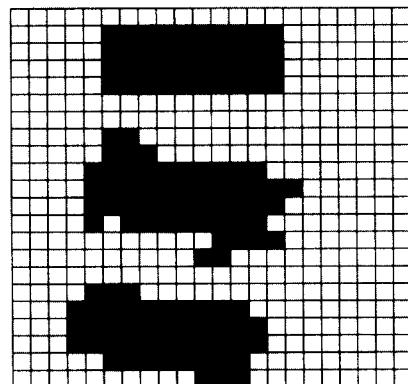


그림 10. FSR의 회전 출력

Fig. 10. Rotation output of FSR.

실험 3.1, 3.2를 통하여 미끄럼 및 회전 감지 실험을 종합해 보면 미끄럼의 경우 taxel 위치변동에 따른 감지 및 에러량(C_d)을 정확하게 인지할 수 있었고, 회전 발생시엔 누적 에러에 따른 오차가 발생하였으나, 에러량(θ_d) 감지가 가능했다. 따라서 FSR의 tactile 영상 데이터를 추론해 작업중 작업체와 그리퍼간의 상태정보를 이용하면 계산에 의한 파지력보다 정확한 파

지력제어가 가능하고, 파지력 조정을 통한 위치에러 방지, 작업에러량($C_d \theta_a$)에 따른 보상 등 매니퓰레이터의 작업 수행능력을 향상시킬 수 있다. 또한 초기 좁은 작업의 경우, 파지전 아무리 정확한 위치 정보가 주어지더라도 파지시 오차가 발생한다는 점을 고려해야한다. 이 경우도 FSR의 tactile 영상 데이터를 추론해 작업체의 위치, 접촉점에서의 힘의 분포, 미끄럼 등을 이용해 파지하면 초기 발생 에러를 최소화 할 수 있다.

VI. 결 론

매니퓰레이터의 최적 작업수행 구현을 위해 작업계획도를 설정하고 구간별 가, 감속에 따른 그리퍼 힘제어량을 구해보고, 그리퍼에 22×22 FSR 센서를 부착하여 작업시 발생하는 미끄럼 및 회전 등 작업체의 위치에러량을 모멘트 메써드를 사용하여 감지해 보았다. 계산된 파지력과 감지된 에러량 비교를 통해 보상제어와 이를 응용한 최적의 파지력을 구할 수 있었다. 정확한 이동량 감지를 위해 작업환경 및 작업대상체에 따른 FSR 출력 문턱값 설정과 임여면적을 최소화하기 위한 필터링 값 설정작업이 필요했다. 필터링한 초기 영상과 에러 발생후 필터링한 영상의 taxel 수가 다른 경우도 발생했으나, 그 변화량이 미소해 큰 영향은 미치지 않았다. 또한 초기 작업시 미끄럼 감지를 이용한 파지력으로 제어한 경우, 위치에러가 자주 발생하지 않았으며, 발생한 경우라도 FSR 센서를 사용한 에러감지를 통해 보상제어가 가능하였다.

앞으로의 과제로는 작업체 물리적 특성을 고려한 다양한 감지 알고리즘과 경량의 작고 조밀한 센서의 개발로 이를 이용한 다기능 지능형 로봇의 개발도 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Howard R Nicholls, Advanced tactile sensing for robotics, World Scientific Series Vol5, 1992
- [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] 이영재, 박영태, "Invariant 특성과 Taxel 수를 고려한 Tactile sensing 알고리즘에 관한 연구", 한국해양정보통신학회 1997 pp. 129-134
- [4] Russel, R.A., Robot tactile sensing, Prentice Hall 1990
- [5] Kensuke Hasegawa, "Role of Tactile Sensor in the Robot", Journal of the Robotics Society of Japan Vol. 2. No. 5. 1984

저 자 소 개



李永在(正會員)

1984년 2월 충남 대학교 공업교육대학 전자교육공학과 졸업(공학사), 1986년 1월~1995년 12월 LG전자 부품(주) 연구소(선임 연구원), 1994년 8월 연세 대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 1998년 2월 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료, 1996년 3월~현재 신성 대학 전자과 전임강사 근무중. 주 관심 분야는 컴퓨터 비전, 패턴인식, 계측 및 정보처리



朴榮泰(正會員)

1979년 2월 서울대학교 전자공학과(학사), 1981년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(硕사), 1989년 12월 University of California, Irvine 전기 및 컴퓨터공학과(Ph.D.), 1990년 1월~1990년 7월 University of California, Irvine(Post Doc.), 1990년 7월~1991년 2월 Innovision Medical Inc., 1991년 6월~1992년 1월 대우통신 중앙연구소, 1992년 3월~현재 경희대학교 전자공학과(부교수). 주 관심 분야는 컴퓨터 비전, 패턴인식, 신경회로망 학습이론 등임.