

논문 2010-47SC-4-8

쥐 수염을 모델로 하는 수염 촉각 센서의 물체 표면 거칠기 구별에 관한 연구

(Surface Roughness Discrimination with Whisker Tactile Sensors
Modeling Rodent Whiskers)

백 승 훈*, 김 대 은**

(Seunghun Baek and DaeEun Kim)

요 약

설치류는 수염을 통해서 물체를 인식하는 능력을 갖추고 있다. 단연 설치류뿐만 아니라 많은 수의 포유류가 사물을 인식하는데 수염을 이용하지만 특히 설치류는 수염을 통해서 마이크로미터 단위의 표면의 거칠기 차이도 구별 할 수 있다. 설치류는 수염을 앞, 뒤로 능동적으로 움직이며 물체의 모양이나 표면의 거칠기, 패턴 따위를 판별한다. 실제 쥐 수염에는 수염뿌리 가까운 모낭 안에 수많은 신경이 모여 있어서 수염이 떨리거나 구부러질 때의 신호를 받아들인다. 쥐의 이러한 능력을 모방하여, 본 논문에서는 마이크로폰을 이용하여 쥐 수염 센서를 제작하고 제작한 수염 센서를 통해 물체 표면의 거칠기에 대한 정보를 얻고자 한다.

Abstract

Rodents can recognize objects by using their whiskers. Not only rodents but also mammals use their whiskers to recognize objects. However, rodents can discriminate surface roughness in micrometer resolution throughout their whisker sensing. Rats can distinguish a target object's shape, roughness and surface pattern by moving their whisker back and forth freely. Mechanoreceptors surrounding the whisker in their follicle measure deflection and vibration of the whisker. In this paper, we designed biomimetic whiskers modeling rodent whiskers and showed the characteristic properties to extract the information of surface roughness.

Keywords: Biomimetic Whiskers, Biorobotics, Tactile sensor, Microphone sensor

I. 서 론

로봇의 촉각 센서 연구는 많이 진행되어 왔는데, 표면과의 접촉을 통한 표면의 매끄러움 또는 거칠기를

판별하는데, 그 주안점이 되어 왔다. 그에 대한 센서는 힘 센서, 스트레인 게이지 등을 통한 접촉이 대부분이었는데, 동물 수염을 모델로 하는 수염 센서 형태의 연구가 최근 관심 분야가 되고 있다. 이러한 연구의 하나로 쥐 수염을 모델로 하여, 마이크로폰을 이용한 수염 센서의 개발을 본 연구팀은 진행해왔다. 본 논문은 수염 센서를 통한 표면 거칠기, 패턴을 인지하는 방법을 소개한다.

설치류는 수염을 이용해 물체를 인식하고 구별하는 능력을 갖고 있다. 특히 쥐는 수염을 통하여 마이크로미터 단위의 표면의 거칠기 차이도 구별할 수 있다^[1]. 쥐 수염의 특성을 이용한 촉각 센서 연구가 있어 왔는

* 학생회원, 연세대학교 기계공학과
(Yonsei University)

** 정회원-교신저자, 연세대학교 전기전자공학과
(Yonsei University)

※ 이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-331-D00183).

접수일자: 2009년12월10일, 수정완료일: 2010년7월1일

데^[2-3], 쥐 수염을 모델로 한 센서를 통해 물체의 거리, 모양을 분별할 수 있고^[2-3], 물체의 표면 패턴을 인식할 수 있음이 밝혀졌다^[3]. 또한, 마이크로폰 센서를 이용한 수염촉각 센서의 개발과 형상인식의 가능성을 보여 왔다^[4-6]. 마이크로폰을 이용한 쥐 수염 센서를 사용하여 물체 표면의 거칠기를 해석한 연구도 있었지만 물체의 표면 특성과 쥐 수염자체의 특성을 따로 고려하지는 않았다. 쥐가 수염을 통해서 사물의 표면으로부터 도출해 내는 정보에는 쥐 수염자체의 고유진동으로부터 발생하는 정보 역시 섞여 있으며 이는 구별되어야 한다. 마이크로폰을 이용한 수염 촉각센서로 사물의 거칠기 특성을 판별하는 작업을 수행하는데, 쥐 수염 자체의 고유진동수를 고려하며 정확한 사물의 거칠기에 대한 정보를 분석하는 방법을 제안하도록 한다.

II. 본 론

1. 쥐 수염의 생물학적 분석

실제 쥐 수염은 수염 자체에는 신경이 없어서 센서의 기능은 하지 못하고, 수염뿌리 부분의 모낭 안에 수많은 반응 신경이 있어 수염의 움직임에 따른 신호를 받아들인다^[6]. 쥐는 그림 1에서 보이는 것과 같이 주둥이 주변에 일렬로 늘어 세운 수염을 가지고 있으며, 수염을 앞뒤로 능동적으로 움직이며 사물에 대한 정보를 얻을 수 있다. 수염뿌리의 모낭안에 있는 센서들은 수염의 휘는 각도의 변위량과 변위 속도에 반응하고, 변위량은 수염이 물체에 닿는 거리에 반비례한다는 사실이 알려졌다^[2].



그림 1. 쥐 수염 [3]

Fig. 1. Rodent whiskers (reprinted from [3]).

2. 쥐 수염 센서의 이론적 분석

수염을 이용한 물체 인식 방법에는 수동적인 방법과

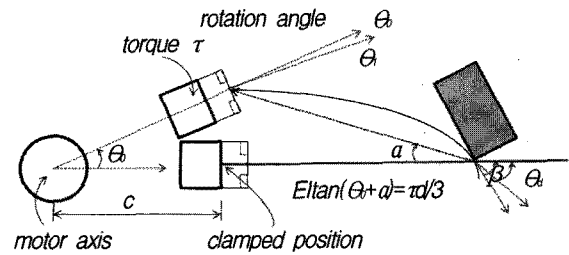


그림 2. 능동적 센싱의 구조 [3]

Fig. 2. Scheme of Active sensing (reprinted from [3]).

능동적인 방법이 있는데, 근육의 움직임으로 수염을 능동적으로 움직여 물체의 정보를 알아내는 방법이 능동적인 센싱(active sensing) 방법이다. 물체의 인식과 정보 습득을 위해서는 능동적인 센싱 방법이 우수한 효과를 보인다고 알려져 있다^[2]. 이 사실은 설치류가 왜 능동적인 수염의 움직임을 통하여 물체를 인식하는 행동을 하는지를 역으로 설명해 줄 수 있다.

그림 2에 도식화 되어있는 능동적 센싱은 힘(force) 대신 토크(torque)가 사용되고, 빔의 휘는 각도는 물체가 닿는 거리 요소만으로 결정된다. 능동적인 센싱의 경우에는 수염을 움직일 때의 각도와 토크 사이의 일정한 비례식이 성립하므로 실험을 통해 이를 구현 할 때에는 센서와 모터와의 관계를 고려해 주어야 한다. 실제 센서를 구현할 때에는 모터의 토크는 고정된 값으로 두고 센서값의 변화를 비교하여 공간정보를 얻는다.

이론적인 접근은 수식 1과 같이 Beam theory에서 Beam의 휘어짐과 진동은 베르누이 오일러(Bernoulli-Euler) 식으로 계산할 수 있다.

$$\frac{\delta^2}{\delta x^2} \left[EI(x) \frac{\delta^2 y}{\delta x^2}(x, t) \right] + \delta A(x) \frac{\delta^2 y}{\delta t^2}(x, t) = f(x, t) \quad (1)$$

베르누이 오일러식의 해석을 통해 수염에 대한 모델링이 가능한데, 쥐 수염의 능동적인 센싱에서 수염의 뿌리는 고정점이고 수염의 끝부분은 구속을 받지 않기 때문에 free-fixed 조건으로 보고 주어진 토크 τ에서 빔의 휘어진 각도를 유도해 낼 수 있다^[3][수식 2].

$$EI \kappa \theta = \frac{\tau}{2d} x^2 - \tau x + \frac{1}{3} \tau d \quad (2)$$

능동적인 센싱으로 물체를 인식할 때, 쥐수염 센서의 토크는 수염이 회전하면서 작용하는 힘을 나타낸다. 이는 모터에서 가해주는 토크이기 때문에 우리가 이미

알고 있거나 상수로 놓을 수 있다. 쥐 수염이 마이크로폰과 부착되어 있는 위치는 빔의 시작점으로 볼 수 있기 때문에 $x=0$ 으로 둘 수 있다. 따라서 베르누이오일러 방정식에서 4개의 변수(θ, x, τ, d) 중 3개의 값(θ, x, τ)을 설정할 수 있거나 알고 있기 때문에 빔의 힘의 작용점 d 를 계산 할 수 있다. 즉, 물체와의 거리를 계산 할 수 있다.

3. 쥐 수염 센서의 설계

가. 쥐 수염 제작

설치류의 수염은 수염의 끝으로 갈수록 폭이 좁아지는 형상을 하고 있다. 이러한 형상은 쥐 수염의 전체적인 질량에 영향을 미칠뿐더러 수염의 진동 발생 시 댐핑(damping)에도 영향을 끼치게 된다. 선형의 캔틸레버 빔(cantilever beam)과 좁아지는 형상의 빔에 대한 식과 이 두 빔의 free-fixed 상태에서의 진동 비교 실험을 살펴보면 끝으로 갈수록 폭이 좁아지는 형태의 빔이 감쇠가 더 효과적으로 됨을 알 수 있다. 수염 센서의 운용에 있어서 수염의 여진(餘震)은 불필요한 신호를 발생하기 때문에 효과적인 감쇠가 요구된다. 따라서 수염은 끝으로 갈수록 좁아지는 형상을 하는 것이 진동 감쇠에 있어서 효과적이며, 이는 현재 쥐 수염이 갖고 있는 형상에 대한 설명이 되기도 한다.

선형의 철사나 광섬유로 쥐 수염을 모사하여 실험을 진행하였는데^[4,6], 광섬유로 수염을 모사할 경우 그 형태는 원통형이며 수염처럼 끝으로 갈 수 록 가늘어 지는 형태로 성형이 불가능하다. 따라서 폴리에틸렌수지로 실제 쥐 수염을 모사하여 사용하였다. 지름 3mm의 폴리에틸렌수지를 높은 온도 가열하여 시편의 끝에 추를 다는 방식으로 인장력을 가하여 제작하였다.

나. 마이크로폰을 이용한 수염 센서 제작

마이크로폰은 음파의 물리적 진동을 받아들여 이를 신호로 변환하는 장치이다. 진동을 받아들이는 부분에 쥐 수염을 부착하면 쥐 수염의 떨림이 소리의 진동과 같은 역할을 하기 때문에 이에 상응한 신호를 받아들일 수 있다. 마이크로폰은 이물질과 노이즈를 제거하기 위한 보호막이 씌워져 있는데 그림 3과 같이 이를 벗겨내고 수염을 부착한 다음에 접착물질로 고정을 시켜줌으로써 쥐 수염 센서를 제작할 수 있다.

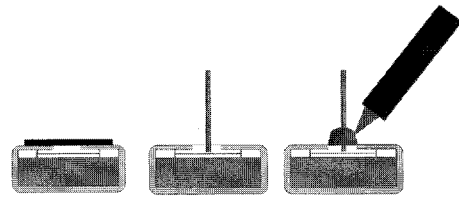


그림 3. 수염 센서의 제작
Fig. 3. Design of whisker sensor.

다. 수염센서의 실험 설계

쥐의 능동적인 수염의 움직임은 모사하기 위하여 수염의 뿌리 부분은 피봇(pivot)으로 고정을 시키고 4-bar 링크 구조를 통하여 수염의 회전을 가능하게 하였다. 그림 4와 같이 수염 센서는 그라운드와 피봇 1에 연결이 되어있고, 피봇 2에서 발생하는 토크가 링크 1, 2, 3을 거치면서 센서의 토크로 변환된다. DC모터가 아닌 서보모터를 사용하였을 때 발생하는 진동의 문제는 서보모터에서 쥐 수염까지의 링크구조를 거치는 과정에서 감쇠되는 효과를 보여줄 수 있다.

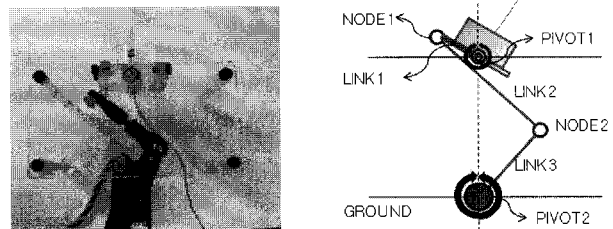


그림 4. 쥐 수염의 능동적인 움직임을 모사한 실험장비
Fig. 4. Active sensing equipment modeling rodents' whisking.

III. 실험

1. 쥐 수염 센서의 물체 표면 인식

쥐가 수염을 통해 물체의 표면을 인식할 때 수염이 물체의 요철을 긁는 동안 물체와 수염간의 미끄러짐과 접촉이 번갈아 일어나게 된다. 물체의 표면을 확대해보면 요철이 반복적으로 나있으며 쥐의 수염은 요철의 반복적인 패턴을 긁음으로써 발생하는 진동을 받아들여 표면의 패턴을 인식한다. 물체의 표면은 재질에 따라 다르기 때문에 수염에 전해지는 진동 역시 물체의 특성을 지니게 되고 이 특성을 인지함으로써 표면의 성질을 구별하게 된다. 쥐 수염이 물체의 표면을 읽는 과정에는 접촉과 접촉 사이 즉, 이탈의 순간에 수염이 진동을 하게 된다. 수염의 자유진동과 동시에 물체의 표면과의

표 1. 사포의 고르기

Table 1. The property of sandpapers.

| 명 칭 | average particle diameter(um) |
|-------|-------------------------------|
| AA60 | 269 |
| AA100 | 162 |

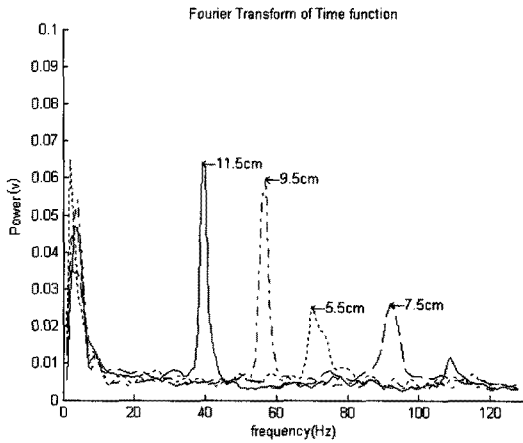
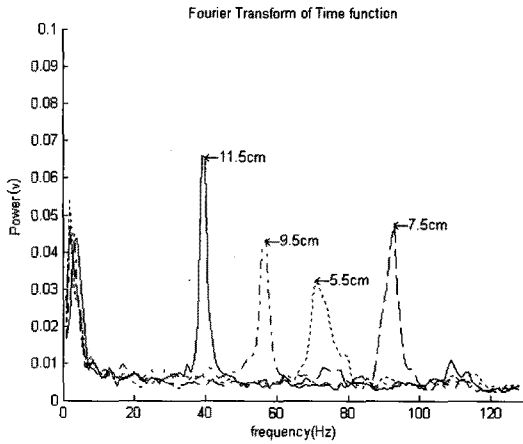


그림 5. 사포 거칠기 FFT 그래프 (상) AA60 (하)AA100
Fig. 5. FFT graph for surface texture of sandpapers (Top) AA60 (Bottom) AA100 FFT Graph.

접촉에서 수염의 길이와 재질에 따라 고유진동수가 발생한다. 쥐 수염으로 물체의 표면을 긁게 되면 몇 개의 특정 주파수 대역이 나타나는데, 이 주파수 대역에서 쥐 수염의 고유진동 주파수를 제외한 나머지 주파수 대역이 물체의 특성을 나타냄을 알 수 있다. 물체 표면의 거칠기에 대한 주파수를 찾기 위해서는 다른 특성을 가진 몇 개의 쥐 수염으로 동일한 물체의 표면을 읽고, 여기서 공통적으로 나타나는 주파수 대역을 찾으려 한다.

실험은 11.5cm, 9.5cm, 7.5cm, 5.5cm 길이의 쥐 수염을 고르기가 다른 두 개의 사포 AA60와 AA100 표면에 긁는 것과, 5.5cm 길이의 쥐 수염 센서로 5mm, 10mm 간격의 철 격자 (막대 형태) 측각 정보를 얻을 수 있었다. 수

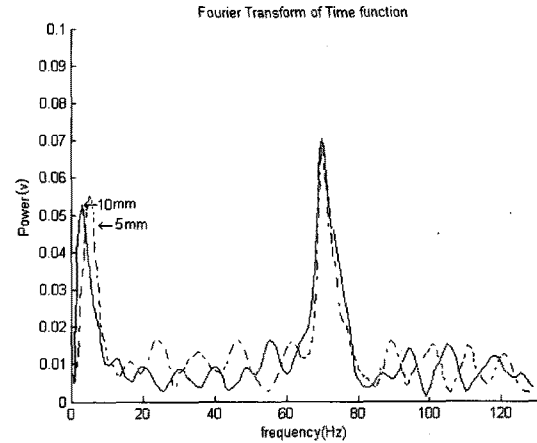


그림 6. 10mm, 5mm 격자의 FFT 그래프
Fig. 6. FFT Graph of 10mm, 5mm lattice.

표 2. 재질에 따른 주파수 대역

Table 2. Frequency domain of whisker and texture.

| 길 이 | 주파수 | 길 이 | 주파수 |
|--------|---------|-------|---------|
| 11.5cm | 39±2 Hz | 7.5cm | 92±4 Hz |
| 9.5cm | 57±3 Hz | 5.5cm | 70±3 Hz |

염이 능동적으로 좌우로 움직임에 따라 해당 간격으로 떨어진 격자를 임펄스 형태의 충격이 전달되게 된다. 실험은 10회 반복하여 이들의 평균값을 Fast Fourier Transform(FFT)변환을 통해 주파수 대역으로 표시하였다. 가로축은 주파수 대역을 나타내고 세로축은 주파수 대역에 대한 신호의 세기에 해당한다. 모터 속도를 변화 시킴으로써 다양한 주파수 대역 결과를 얻을 수 있는데, 여기에서는 서보 모터의 특성상 고정된 속도에 따른 결과만을 다루고 있다.

IV. 결 과

실험결과 그림 5에서와 같이 쥐 수염 길이에 따라 주파수 영역이 다르게 나타난다. 쥐 수염의 길이에 따라 수염에서 발생하는 고유진동수가 반영된 것인데, 표에서와 같이 각각의 길이의 쥐 수염에서 나타나는 고유진동수와는 달리 0~10Hz에 해당하는 부분에서는 수염의 길이에 상관없이 공통의 주파수 영역을 보이고 있다. 이는 물체 표면의 거칠기에 해당하는 특성을 나타낸다고 볼 수 있다. 사포 AA60과 AA100은 표면 입자사이의 거리가 각각 269um, 162um로 100um 차이가 나지만 제작한 쥐 수염 센서로는 구별되지 않는다. 폴리에틸렌 수지로 쥐 수염을 모사하여 수염센서를 제작하였지만 굵기가 1.5mm~2.0mm에 이르며 이는 쥐 수염의 굵기

의 7~10배에 해당한다. 제작한 쥐 수염과 실제 쥐 수염의 굵기 차이 때문에 반응할 수 있는 물체 표면의 거칠기에 차이를 보이게 된다.

쥐 수염 센서로 물체 표면의 거칠기 차이를 구별하는 실험의 모사를 위해 요철을 확대하여 5mm와 10mm 간격으로 두고 쥐 수염센서로 읽는 실험을 하였다. 결과는 그림 6과 같이 5mm의 간격의 격자와 10mm간격의 격자의 주파수 분포가 달라짐을 알 수 있다. 같은 쥐 수염센서로 실험을 하였기 때문에 70Hz부근에서 발생하는 쥐 수염의 고유진동수는 일치하지만 0~10Hz에서 주파수의 차이를 보인다. 수염을 움직이는 속도를 동일하게 두었을 때 5mm간격의 격자는 쥐 수염과 접촉되는 빈도가 10mm의 그것에 비해 작으므로 주파수가 높게 나타난다.

V. 결 론

쥐 수염의 특징을 바탕으로 쥐 수염 센서를 제작하였다. 쥐는 능동적으로 수염을 움직일 수 있고 수염 자체보다 수염뿌리 부분의 감각기관으로 수염의 휘어짐과 떨림을 통해 정보를 얻는다. 이와 같은 쥐 수염의 특징은 구조와 구현이 간단하여 센서로 개발할 수 있으며, 특히 이동 로봇과 같은 소형 로봇에 탑재하여 거리 측정과 물체의 모양을 구별하는 센서로 쓰기에 적합하다. 수염센서를 통해 들어오는 신호에서 쥐 수염자체의 고유진동수를 뺀 나머지 주파수 영역을 분석하여 물체 표면의 거칠기를 판별하는 연구를 진행하였다. 실험을 통해 쥐 수염 센서로 물체를 판독하면 대상물에 상관없이 쥐 수염 자체의 고유 진동수는 일정하게 나오지만 물체 표면의 거칠기에 따라 주파수 영역이 다르게 나오는 것을 알 수 있다. 쥐 수염센서로 표면의 거칠기 판별을 통해 물체의 특성을 도출하면 이동 로봇의 거리센서 뿐만 아니라 물체를 구분하는 센서로서 활용범위를 넓힐 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] G.E. Carvell, D.J. Simons, Biometric analyses of vibrissal tactile discrimination in the rat, *The Journal of Neuroscience* 10 (8) (1990) 2638 - 2648.
- [2] D. Kim, R. Moeller, "A biomimetic whisker for texture discrimination and distance estimation," *From Animals to Animats 8, Proceedings of the International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior*, MIT Press, 2004, pp. 140-149
- [3] D. Kim, R. Moeller, "Biomimetic whiskers for shape recognition," *Robotics and Autonomous System* 55, 2007. pp 229-243
- [4] D. Kim and R. Moeller, "Passive Sensing and Active Sensing of a biomimetic whisker," *Proceedings of Int. Conf. on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, pp. 282-288, MIT Press, 2006.
- [5] M. Fend, Whisker-based texture discrimination on a mobile robot, in: *Proceedings of the European Conf. on Artificial Life*, Springer Verlag, 2005, pp. 302-311.
- [6] 백승훈, 김대은, "쥐 수염 센서를 모델로 하는 수염 촉각 센서 연구", *로봇공학회 논문지 제4권 1호 (통권11호)* pp.34-42, 2009.

 저 자 소 개



백 승 훈(학생회원)
 2009년 연세대학교 기계공학과
 학사 졸업.
 <주관심분야 : 바이오로보틱스,
 로봇 메카니즘>



김 대 은(정회원)-교신저자
 1989년 서울대학교 컴퓨터공학과
 학사 졸업.
 1993년 The University of
 Michigan, Ann Arbor,
 USA 석사

2002년 The University of Edinburgh, UK, 박사
 2002년 Max Planck Institute for Human
 Cognitive & Brain Sciences, Cognitive
 Robotics, Research Scientist
 2007년~현재 연세대학교 전기전자공학과 조교수
 <주관심분야 : 바이오로보틱스, 인공지능, 인공생
 명, 신경과학, 인지과학>