

촉각 질감의 물리적 성질 측정 시스템 개발

박연규, 강대입, 송후근
한국표준과학연구원 역학연구부 힘그룹
대전 유성우체국 사서함 102 호
ykpark@kriss.re.kr

Measuring system for physical properties of texture

Y.-K. Park, D.-I. Kang, and H.-K. Song
Force Group, Division of Mechanical Metrology,
Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)
P.O.Box 102, Yusong, Taejon
ykpark@kriss.re.kr

요 약

본 논문은 촉각의 객관화를 위한 촉각 물리 요소의 측정 장치에 대하여 다루고 있다. 촉감을 대표할 수 있는 물리량으로 표면 거칠기, 표면 마찰 계수, 컴플라이언스를 선정하였으며, 이를 측정할 수 있는 시스템을 제작하였다. 제작된 시스템을 실제의 측정에 적용해 보았으며, 측정 결과들로부터 본 시스템의 타당성을 검증할 수 있었다.

1. 서 론

인간은 신체의 일부가 다른 물체와 접촉할 때 촉감을 느끼게 되는데, 이는 시각, 청각, 후각, 미각과 더불어 오감중의 하나로서 인간 감성에 중요한 영향을 미치는 요소이다. 촉감이 비록 감성적 차원에서 정의될 수 있는 양이긴 하지만, 이를 공학에 적용하여 감성적 측면을 고려한 제품을 개발하기 위해서는 촉감의 객관화가 반드시 필요한 상황이다. 이는 촉감을 기술할 수 있는 물리량의 측정을 통하여 달성될 수 있을 것이다.

촉감의 측정과 관련된 선행 연구를 살펴

보면, 먼저 로보트를 연구하는 사람들은 촉감을 물체를 잡을 수 있는 파지의 관점에서 접근하였으며 이에 대한 연구를 수행하였다 [1, 2]. 반면에 섬유를 연구하는 사람들은 촉감을 질감의 관점으로 파악하였고, 이와 관련된 물리량들을 측정하고자 하였다[3, 4]. 또한, 촉감에 대한 연구는 압 진단 등의 의료분야에서도 활발히 이어져 왔다[5, 6]. 촉감을 측정하기 위한 다양한 형태의 센서가 개발되었는데, 대표적인 것으로는 어레이를 사용하여 공간 정보를 측정하는 형태와[1, 6], 하나의 센서를 이동시켜가며 촉각 정보를 측정하는 형태를 들 수 있다[7].

본 논문에서는 촉감을 대표할 수 있는 물리량으로 표면 거칠기, 표면 마찰 계수, 컴플라이언스(compliance)를 선정하고, 이를 측정할 수 있는 시스템의 구현에 대하여 다루고자 한다.

2. 촉각 측정 장치의 구조 및 기능

인간이 물체의 촉감을 감지할 때, 물체의 표면을 손으로 훑으면서 그 질감을 느끼게 된다. 즉, 사람은 대상물에 대한 상대적인

운동을 통해 물체의 표면 정보를 취득하는 것이다. 이는 적은 수의 센서를 사용하여 넓은 영역의 정보를 취득할 수 있는 효과적인 방법이다. 본 연구에서는 이러한 방법을 촉각 측정 시스템에 도입하고자 한다. 그 결과, 본 측정 시스템에서는 해석하고자 하는 시편이 고정된 센서에 대하여 상대운동을 할 수 있도록 설계되었다.

시편의 표면 정보가 모든 방향에 대하여 동일하다면, 즉 방향성을 갖지 않는다면, 이를 해석하기 위한 측정 시스템은 한 방향으로의 상대운동만으로도 충분한 결과를 도출할 수 있을 것이다. 그러나, 직물의 예에서와 같이 시편의 표면 특성이 방향성을 갖는다면, 이를 해석하기 위한 측정 시스템은 그 방향성을 분석할 수 있도록 여러 방향의 운동을 수행할 수 있어야 한다. 따라서, 본 측정 시스템에서 해석 시편은 하나의 평면상에서 임의의 방향으로 운동을 할 수 있도록 설계되었다.

촉감에 영향을 미치는 물리량들로서는 표면 특성과 압축 특성을 들 수 있다. 표면 특성은 다시 표면 거칠기와 마찰 특성으로 나뉘어 질 수 있으며, 압축 특성은 부드러운 정도를 나타내는 콤플라이언스(compliance)로 대별될 수 있다. 표면 거칠기를 측정하기 위해서는 기본적으로 시편 표면에서의 미세 변위 측정을 수행하여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 레이저를 이용한 변위 센서를 사용하였다.

마찰 특성, 즉 마찰 계수는 시편 운동 평면에 대한 수직 방향 힘과 시편 운동방향을 따른 힘의 비로서 정의될 수 있으며, 이의 측정을 위하여 수직 방향과 운동 방향으로의 힘을 동시에 측정할 필요가 있다. 전술한 바와 같이 방향성을 갖는 시편의 경우, 마찰 특성 역시 각 방향에 따른 분석을 필요로 한

다. 이를 위하여 임의의 운동 방향을 따른 힘을 측정하기 위한 x, y 방향과, 수직력을 측정하기 위한 z 방향 등, 모두 세 방향으로의 힘을 측정할 수 있는 센서가 필요함을 알 수 있다. 또한, 인간이 촉감을 감지할 때 흔히 행하는 원운동을 고려할 경우 시편 역시 원운동을 할 필요가 있으며, 이를 위하여 모우먼트의 측정 또한 필요함을 알 수 있다. 따라서, 본 측정 시스템에서 마찰 특성의 파악을 위하여는 세 방향으로의 힘과 한 방향으로의 모우먼트를 측정할 수 있는 센서가 기본적으로 필요함을 알 수 있다.

시편의 콤플라이언스는 스프링 상수의 역수로 생각될 수 있다. 따라서, 이의 측정은 시편에 가해진 힘과 시편의 변형된 정도를 측정함으로써 가능할 것이다. 이의 측정은 별도의 센서 없이 거칠기 측정용 변위 센서와 마찰 계수 측정용 힘 센서를 조합하여 달성할 수 있을 것이다.

본 논문에서 개발한 촉각 측정 장치의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 해석 시편은 $x-y$ 평면상에서 자유롭게 움직일 수 있으며, 거칠기 센서와 힘 센서는 z 방향으로 움직일 수 있는 구동부에 장착되어 있음을 알 수 있다. 힘 센서에 장착된 탐침자(probe)는 시편에 직접 접촉하여 시편과 상대운동을 하며, 이 때 발생한 힘을 힘 센서로 전달해 주는 역할을 한다. 탐침자의 끝 부분은 해석 시편에 따라 단단한 재질과 부드러운 재질로 바꾸어가며 장착될 수 있다. 제작된 촉각 측정 장치의 사진은 Fig. 2와 같다.

본 측정 시스템에서 사용된 $x-y$ 구동부는 공기 베어링을 사용하여 마찰을 줄임으로써, 정속하고 정밀한 운동을 가능하게 하였다. 본 구동부는 x, y 방향으로 각각 10 cm의 범위 내에서 움직일 수 있으며, 운동 속도의 범위는 0.1 ~ 470 mm/s가 된다. 운동시 분해

능은 0.3 μm 이며, 최대로 175 N의 수직력을 견딜 수 있다. 본 구동부를 위한 제어기는 RS-232-C에 의해 컴퓨터에 연결된다.

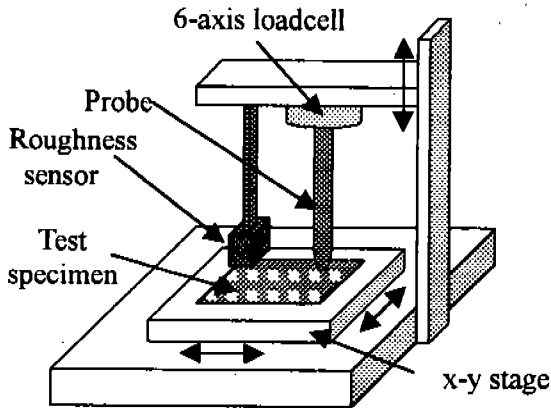
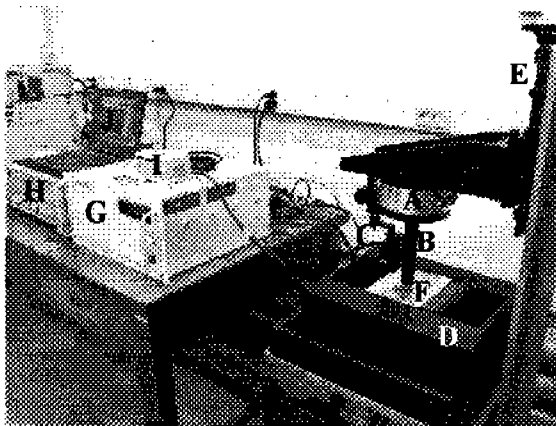


Fig. 1 Schematic diagram of the tactile measuring system



- A: 6-axis loadcell
- B: Probe
- C: Roughness sensor
- D: x-y stage
- E: z stage
- F: Test specimen
- G: x-y stage controller
- H: 6-axis loadcell amplifier
- I: Roughness sensor amplifier
- J: Computer

Fig. 2 Picture of the tactile measuring system

본 장치에 사용된 거칠기 센서는 레이저를 이용한 변위 센서로서, 최대 5 mm까지의 변위를 측정할 수 있으며, 측정 분해능은 1 μm가 된다. 힘 센서는 x, y, z 세 방향의 힘과 모우먼트를 측정할 수 있는 6축 힘-모우먼트 센서로서, 한국표준과학연구원서 자체 개발된 것이다[8]. 이는 힘과 모우먼트에 대하여 각각 200 N과 20 Nm의 측정 범위를 갖는다. 변위 센서와 힘 센서에서 측정된 신호는 HBM9012A 앰프에서 동시에 샘플링된 후 GPIB에 의해 컴퓨터로 전달된다.

3. 특성 평가 및 고찰

3-1. 표면 거칠기

표면 거칠기는 레이저 변위 센서로부터 직접 측정될 수 있다. 거칠기 센서의 성능 파악을 위하여 세 가지의 서로 다른 거칠기를 갖는 그라인딩 표준 시편에 대하여 측정을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 시편의 거칠기 정도는 전체 시편에 걸쳐 가장 큰 값과 가장 작은 값의 차이를 나타내는 R_{MAX} 값으로 표시되어 있는데, 실험에서 사용한 시편들의 거칠기는 35, 70, 100 μm 이었다. 측정시 시편의 이동 속도는 1.5 mm/s로 정하였으며, 1 mm 당 50개의 데이터를 취득하였다. 측정된 신호에 대하여 1 mm보다 긴 파장을 갖는 성분을 제거하여 표면 거칠기와 관련이 없는 공간상의 저주파 성분을 제거하고자 하였다. Fig. 3은 각 시편에 따른 거칠기의 차이를 잘 나타내고 있는데, 이를 보다 정량적으로 관찰하기 위하여 중심선 평균 거칠기 R_a 를 도입하고자 한다. 중심선 평균 거칠기는 다음과 같이 표현된다.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1)$$

여기서, $y(x)$ 는 중심선으로부터의 거리를 나타내며, L 은 측정 구간이 된다. 35, 70, 100 μm 의 시편들에 대하여 중심선 평균 거칠기는 각각 4.54, 10.32, 15.33 μm 로서, 거칠기의 차이를 분명하게 나타내고 있다.

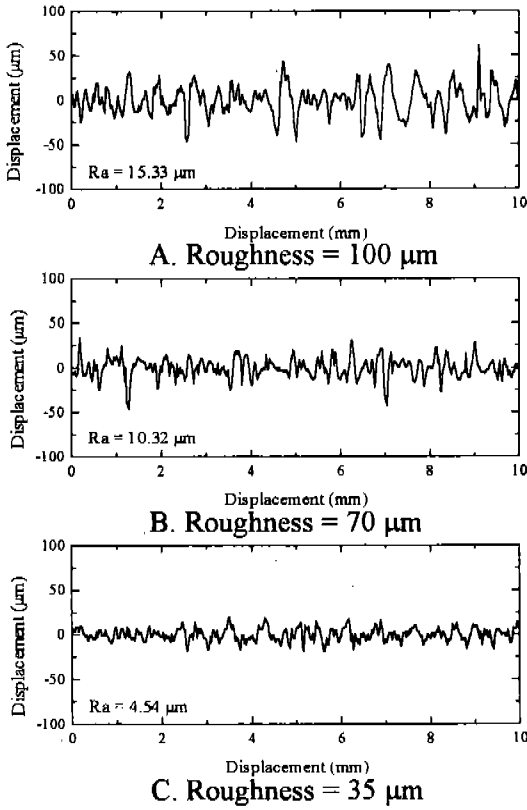


Fig. 3 Typical shapes of the surface roughness

3-2. 표면 마찰 계수

표면 마찰 계수는 상대운동에 대한 수직력과 운동방향으로의 힘 사이의 비로 정의되며, 그 표현은 다음과 같다.

$$C_f = \frac{\text{Tangential force}}{\text{Normal force}} \quad (2)$$

여기서, C_f 는 마찰 계수를 나타낸다.

표면 거칠기 측정의 경우와 마찬가지로, 마찰 계수 측정에 있어서도 35, 70, 100 μm 의 그라인딩 표준 시편들을 사용하였다. 이동

속도와 1 mm 당 데이터의 수 역시 표면 거칠기 측정시와 동일하다. 이 때, 탐침자의 끝단은 시편이 금속임을 고려하여 고무 재질의 부드러운 것을 사용하였다.

마찰 계수 측정결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 A는 100 μm 의 시편에 대하여 수직력과 운동방향으로의 힘을 측정 위치에 따라 나타내고 있는데, 측정구간은 20 mm이었다. 수직력과 운동방향으로의 힘 모두 측정 위치에 따른 변화를 보여주고 있는데, 이는 시편 중심선의 측정 위치에 따른 변화에 기인한다. 일정한 높이를 유지하고 있는 측정용 탐침자에 대하여 시편의 중심선이 변함으로써, 결과적으로 수직력의 변화를 초래하는 것이다.

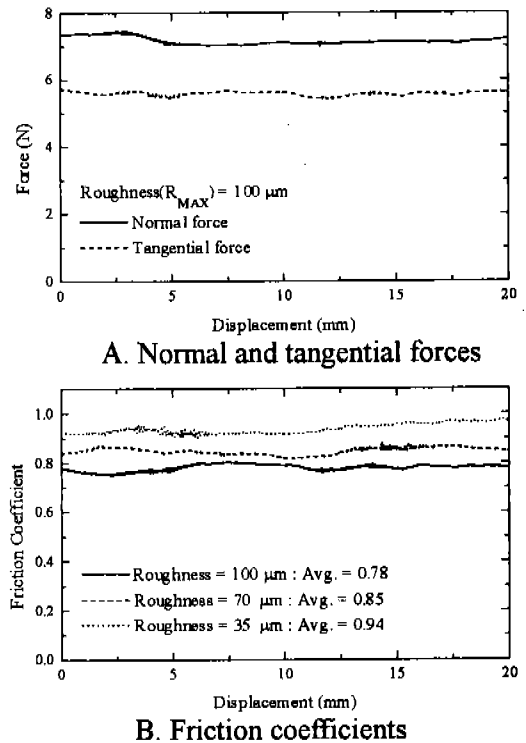


Fig. 4 Friction coefficients of the roughness specimens

Fig. 4의 B는 35, 70, 100 μm 의 시편들에 대한 마찰 계수를 나타내고 있는데, 이는 측정 위치에 따른 수직력과 운동방향으로의 힘

사이의 비로 계산되었다. 거칠기가 작을수록 마찰 계수가 커짐을 알 수 있는데, 이는 매끄러운 면일수록 마찰이 커짐을 의미하며, 물리적인 사실과 일치하는 결과이다. 측정된 마찰 계수는 1에 가까운 매우 큰 값을 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 고무와 철의 경우와 같이 부드러운 재질과 단단한 재질 사이의 상대 마찰 계수는, 작은 수직력과 낮은 상대 운동 속도의 경우 매우 크며 심지어 1보다 커질 수도 있다고 알려져 있다[9].

3.3. 컴플라이언스

시편의 부드러운 정도를 나타내는 컴플라이언스는 힘이 가해졌을 때의 시편의 변형 정도를 나타내는 상수로서, 스프링 상수의 역수가 된다. 따라서, 컴플라이언스의 측정은 시편에 가해진 힘과, 그에 의하여 시편의 변형된 정도를 측정함으로써 가능할 수 있다. 이 때, 시편과 직접 접촉하는 탐침자의 끝단이 시편에 비견될 정도로 부드럽다면, 하중이 가해질 때 시편 뿐 아니라 탐침자 끝단 역시 변형될 것이다. 이는 시편만의 변형된 정도를 측정하는 데 문제를 야기시킬 수 있는데, 이의 해결을 위하여 본 연구에서는 시편과 탐침자 끝단을 모두 스프링으로 가정하였다(Fig. 5 참조).

Fig. 5에 대한 고찰과 함께, 힘과 변위에 대한 절대량의 측정보다는 상대적인 값의 차이를 측정하는 것이 더욱 용이하다는 사실로부터, 두 번의 측정으로부터 얻어지는 시편의 스프링 상수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

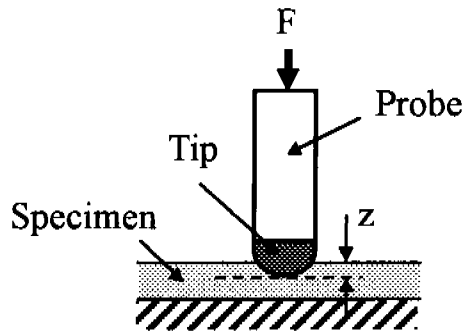
$$k_s = \frac{\Delta F}{\Delta z} \frac{k_t}{k_t - \Delta F / \Delta z} \quad (3)$$

여기서, k_s 와 k_t 는 시편과 탐침자 끝단의 스프

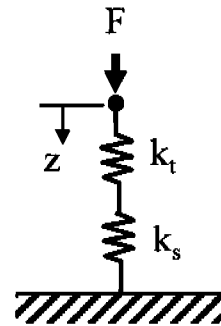
링 상수를 나타내며, ΔF 와 Δz 는 두 번의 측정에 의한 힘과 변위의 차이를 나타낸다. (3)식의 특별한 경우로 탐침자의 끝단이 시편에 비하여 단단한 재질로 만들어졌을 경우, 다음과 같이 시편의 스프링 상수를 표현할 수 있다.

$$k_s = \frac{\Delta F}{\Delta z} \quad (4)$$

시편의 컴플라이언스는 (3)식과 (4)식에 나타난 스프링 상수의 역수, 즉 $1/k_s$ 로 표현된다.



A. Concept of compliance measurement



B. Modeling of compliance measurement

Fig. 5 Illustration of compliance measuring system

(4)식의 적용성을 살펴보기 위하여, 모직 섬유와 가죽에 대하여 컴플라이언스를 측정해 보았다. 이 때, 탐침자 끝단은 철로 만들어진 것을 사용하였다. 측정 결과 상대적으

로 부드러운 재질인 모직의 경우 컴플라이언스 값은 4.57×10^{-4} m/N 으로 나타나 1.23×10^{-4} m/N 인 가죽에 비해 큰 값을 나타내었으며, 이로부터 본 연구에서 제안한 컴플라이언스의 측정 방법이 재질의 부드러운 정도 파악에 있어 정성적인 판단 근거를 제시할 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론 및 향후계획

본 연구에서는 촉감 질감을 기술할 수 있는 물리량으로, 표면 거칠기, 표면 마찰 계수, 컴플라이언스를 도입하고, 이를 측정할 수 있는 방법 및 측정 장치를 설계·제작하였다.

거칠기 시편에 대하여 표면 거칠기 및 마찰 계수를 측정하였으며, 모직과 가죽 시편에 대하여 컴플라이언스를 측정해 보았는데, 측정치들은 정성적이나마 타당한 결과를 보여주었으며, 이로부터 본 연구에서 제안한 시스템의 타당성을 검증할 수 있었다.

앞으로의 과제로는 측정의 정밀도를 향상시키기 위한 힘 센서의 보다 작은 용량으로의 교체를 들 수 있으며, 또한 단순한 스프링으로 모델링하기 어려운 직물에 대하여 부드러운 정도를 보다 정확하게 기술할 수 있는 방법을 확립하는 것이다. 보다 장기적으로 추진할 과제로는 촉감에 있어서 열전달률을 고려하는 문제가 있다.

참고문헌

[1] R.S. Fearing, "Tactile Sensing Mechanisms," *The International Journal of Robotics Research*, 9(3), pp.3-23, 1990.
 [2] M.R. Cutkosky, J.M. Jourdain, and P.K. Wright, "Skin Materials for Robotic Fingers," *IEEE*, pp.1649-1654, 1987.
 [3] S. Kawabata, *The Standardization and*

Analysis of Hand Evaluation, The Hand Evaluation and Standardization Committee, 1980.

- [4] 문지성, 권영하, 이주영, 강대임, "질감의 객관적 표현을 위한 표면 특성 측정장치의 설계," '97 한국감성과학회 연차학술대회논문집, pp.16-21, 1997.
 [5] S. Chonan, Z. Jiang, M. Tanaka, Y. Suga, and Y. Tanahashi, "Palpation Probe for Detecting Prostatic Cancer and Hypertrophy," *Proceedings of the 2nd Asian Control Conference*, pp.183-185, 1997.
 [6] R.D. Howe, W.J. Peine, D.A. Kontarinis, and J.S. Son, "Remote Palpation Technology for Surgical Applications," *The IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 14(3), pp.318-323, 1995.
 [7] R.D. Howe and M.R. Cutkosky, "Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(2), pp.140-151, 1993.
 [8] 강대임, 김갑순, 정수연, 주진원, "실험계획법을 이용한 쌍안경식 6축 로드셀의 설계 및 상호간섭 오차 평가," *대한기계학회 논문집(A)*, 21(11), pp.1921-1930, 1997.
 [9] 소다 노리무네, *마찰 이야기*, 전파과학사, pp.112-117, 1971.