

Dahl의 마찰 모델에 대한 인지적 마찰 크기의 함수 도출

Perceived Magnitude Function of Friction Rendered by Dahl's Model

임범수¹ · 최준경² · 유용재³ · 최승문^{4†}

Beomsu Lim¹, Junkyeong Choi², Yongjae Yoo³, Seungmoon Choi^{4†}

Abstract: We evaluated the effects of parameters of Dahl's friction model on human friction perception via a perception experiment using a 3-DoF force-feedback device. The experimental results indicated that the maximum magnitude of the frictional force have a critical effect in friction perception. We also derived a psychophysical model for human friction perception using the experimental results. The model fits to an exponential function very well ($R^2=0.956$), confirms the Stevens's Power Law.

Keywords: Haptics, Friction, Perception, Dahl's Friction Model, Force-Feedback Device

1. 서론

물체의 표면을 나타내기 위한 마찰 렌더링은 햅틱 렌더링의 주요 연구 분야 중 하나이다. 가상 물체의 마찰감을 재현하기 위한 다양한 수학적 모델들이 제시되어 왔는데^[1], 이러한 모델들은 매개변수를 통하여 물리적인 움직임과 손을 비롯한 물체 등에 가해지는 힘을 설명하나, 마찰력을 얼마나 강하게 느끼는지에 대한 인지적 마찰 크기와와의 관계에 대해서는 연구된 바가 없다.

이를 위하여 본 연구에서는 Dahl의 마찰 모델^[2]의 매개변수로부터 인지적 마찰 크기를 추정할 수 있는 마찰력 인지 모델을 도출하였으며, Stevens에 의해 제안된 Power Law^[3]이 성립하는 지 살펴보았다.

2. 실험 방법

18-28세 사이의 감각에 이상이 없는 19명의 피실험자(여성 10명)를 대상으로 하여, 3자유도 힘 피드백 햅틱 장치인 Force Dimension 사의 Omega-3를 사용하여 아래와 같이 마찰력을 렌더링하였다.

2.1 마찰력 렌더링 모델

실험에 사용된 가상 표면을 렌더링하기 위하여 Dahl

의 마찰 모델^[2]의 이산 벡터 모델을 사용하였다. Dahl의 마찰 모델은 현재와 이전의 장치 위치(X_k, X_{k-1}), 장치 위치의 변위 ($Y_k = |X_k - X_{k-1}|$), 이전 프록시 위치 (W_{k-1}), 그리고 마찰력을 부드럽게 변화시켜주는 알파 함수($\alpha(z)$)로부터 현재 프록시 위치(W_k)와 출력할 힘(F)을 계산한다(식 (1)). Dahl의 마찰 모델은 세 개의 매개변수가 있는데, σ 는 출력 힘의 상수이고, z_{max} 는 한 렌더링 프레임 내에서 마찰 프록시가 움직일 수 있는 최대 거리이다. z_{stick} 은 현재 마찰이 일어나는 지점인 프록시 위치로부터 슬립동 현상 중 정지 상태의 경계까지의 거리로, 이는 마찰의 슬립동 현상을 나타내기 위해 설정된다.

$$W_k = \begin{cases} X_k - \frac{X_k - W_{k-1}}{|X_k - W_{k-1}|} z_{max} \\ (if \alpha(X_k - W_{k-1})|X_k - W_{k-1}| > 1) \\ W_{k-1} + Y_k \alpha(X_k - W_{k-1})(X_k - W_{k-1}) \\ (otherwise) \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha(z) = \frac{1}{z_{max} z_{stick}^8 + z^8}$$

$$F = \sigma |X_k - W_k|$$

실험에서 가상 표면을 렌더링하기 위해 햅틱 라이브러리인 CHAI3D^[2]를 사용하였으며, 햅틱 장치의 프록시와 가상 표면 사이에 발생하는 힘을 식 (1)의 Dahl의 마찰 모델을 이용하여 계산하여 출력하였다.

1, 2. Ph. D. Student (lbs1163, adwwsd@postech.ac.kr)

3. Postdoctoral Researcher (dreamseed@postech.ac.kr)

4† Professor, Corresponding author: (choism@postech.ac.kr)

1-4. Dept. of Computer Science and Engineering, POSTECH, Korea

2.2 마찰력 렌더링 매개 변수

Omega 햅틱 장치의 출력 가능한 힘의 범위를 고려, 가능한 넓은 범위의 매개 변수의 조합을 사용할 수 있도록 하기 위하여 매개 변수를 설정하였다. [Table 1] z_{max} 는 Dahl의 모델에서 운동 마찰력이 적용되는 최대 거리이며, 힘 상수 σ 와 z_{max} 의 곱은 최대 운동 마찰력을 나타내므로 $F_m = \sigma \cdot z_{max}$ 을 정의하여 실험에 사용하였다. 또한, z_{stick} 은 마찰 인터랙션 시 발생하는 슬립의 성질을 나타내며, 정지 마찰력이 적용되는 경계 지점이다. 따라서, 새로운 매개변수로 최대 정지 마찰력과 최대 운동 마찰력의 비 $z_{ratio} = \frac{z_{stick}}{z_{max}}$ 을 정의하여 1보다 크도록 설정하였다. 이들 중 Omega 햅틱 장치의 Resolution 문제로 표현이 어려운 5개의 (z_{max} , F_m)의 조합 (0.00003, 1), (0.0001, 1), (0.00003, 1.5), (0.0001, 1.5), (0.0003, 1.5)를 실험에서 제외하고, 나머지 매개변수의 조합 총 124개를 인지 실험에 사용하였다.

[Table 1] The values of parameters for rendering friction

z_{max}	F_m	z_{ratio}
0.00003, 0.0001, 0.0003, 0.001, 0.003, 0.01	0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 1, 1.5	1.1, 1.4, 1.7, 2.0

2.3 실험 절차

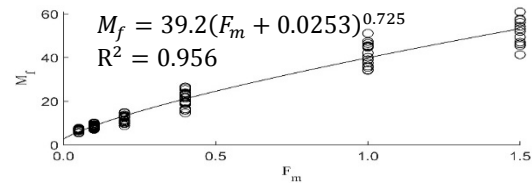
절대 크기 추정 (Absolute Magnitude Estimation) 방법을 사용하여 124 종류의 가상 표면을 31개씩 4개의 세션으로 나누어 무작위 순서로 피실험자들에게 제공하였으며, 이를 세 번 반복하여 1인당 12개의 세션을 수행하였다. 피실험자들은 각 가상 표면을 햅틱 장치를 이용하여 만지고, 느껴지는 마찰의 크기를 0보다 큰 양수로 평가하였다. 소리 차단을 위해 피험자들은 백색 소음이 재생되는 소음 차단 헤드폰(WH-H900N, Sony)을 착용하였다.

2.4 데이터 분석

각 매개변수에 대해 삼원분산분석(3-way ANOVA)과 이펙트 크기(Effect size)를 구하고, 비선형 회귀분석을 통해 Dahl의 마찰 모델의 매개변수들과 인지적 마찰 크기를 나타내는 함수를 도출하였다.

3. 결과 및 토의

삼원분산분석의 결과는 모든 매개변수가 인지적 마찰 크기와 유의미한 관계가 있다고 나타났으나, F_m 을 제외한 나머지는 이펙트 크기(η^2)가 매우 작았다 [Table 2]. 따라서, F_m 을 이용하여 함수 추정을 수행하였으며, 아래 [Fig. 1]과 같은 결과를 도출하였다.



[Fig. 1] Perceived magnitude of friction M_f (y) vs. maximum frictional force F_m (x) in Dahl's friction model. Circles: average M_f for each combination of z_{max} and z_{ratio} .

[Table 2] Results of 3-way ANOVA on the experimental results. *: statistically significant.

Source	F(df.1, df.2)	p	η^2
z_{max}	F(5, 90) = 20.08	< 0.001*	0.003
F_m	F(5, 90) = 34.25	< 0.001*	0.496**
z_{ratio}	F(3, 54) = 22.47	< 0.001*	0.003
$z_{max} : F_m$	F(20, 360) = 4.433	< 0.001*	0.004
$z_{max} : z_{ratio}$	F(15, 270) = 2.767	< 0.001*	0.001
$F_m : z_{ratio}$	F(15, 270) = 8.282	< 0.001*	0.006
$z_{max} : F_m : z_{ratio}$	F(60, 1080) = 1.587	0.00354	0.003

식 (2)는 Stevens의 Power Law [3]에 부합하며, 사람이 느끼는 마찰력의 인지적 세기는 최대 운동 마찰력 F_m 의 약 0.72자승에 비례함을 의미한다. 약 0.02의 상수는 햅틱 장치 내부의 마찰력에 해당한다 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인지 실험을 통해 Dahl의 마찰 모델^[1]의 매개변수로부터 인지적 마찰 크기를 추정할 수 있는 마찰 인지 모델을 도출하였다. 그 결과 마찰의 인지적 크기는 Stevens' Power Law^[3]에 부합함을 보였다.

사사의 글

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (2017-0-00179, 디지털콘텐츠원천기술개발)

References

- [1] Hayward, V., & Brian, A., "A new computational model of friction applied to haptic rendering," Lecture Notes in Control and Information Science, vol 250, (*Experimental Robotics VI*) pp. 403-412, 2000.
- [2] Conti, F., Morris, D., Barbagli, F., & Sewell, C. (2006). CHAI 3D. Online: <http://www.chai3d.org>.
- [3] Stevens, S. S., "On the psychophysical law," *Psychological review*, vol 64, no. 3, pp. 153, May, 1957.