

미세 역감 제시장치를 위한 실용적인 마찰력 보상 알고리즘

*남윤주¹, 박명관²

¹ 부산대학교 대학원 지능기계공학과, ² 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

Practical Friction Compensation for Minimal Force Reflecting Device

*Y. J. Nam¹, M. K. Park²

¹ Grad. Dep. of Mech. Eng., Pusan Nat'l Univ., ² Dep. of Mech. Eng. Pusan Nat'l Univ. & RIMT

Key words : Force Reflection, Friction Compensation, Haptic Device

1. 서론

햅틱(haptic) 장치는 원격 작업과 같은 실제 상황에서의 여러 물리적 감각을 사용자에게 간접적으로 제시하도록 고안된 시스템에서 매우 중요한 요소중의 하나이다. 햅틱 장치가 사용자에서 자유운동(free motion)에서 대한 느낌(free feel)을 얼마나 효과적으로 제시할 수 있는지는 햅틱 장치에 요구되는 매우 중요한 성능 중의 하나이다. 따라서 현실감(realism) 또는 투명성(transparency)으로 명명되는 이러한 성능 지수는 햅틱 장치의 설계 및 성능평가에 대한 이전 대부분의 연구의 주된 관심사였다. 이러한 투명성을 개선하기 위해서는, 햅틱 장치가 민감한 출력을 제공할 수 있어야만 한다. 그러나 마찰력, 관성력 및 백래쉬(backlash)와 같이 햅틱 장치의 불가피한 동적 특성은 이러한 요구사항을 악화시키는 주된 원인이 된다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 많은 연구자들은 마찰력을 효과적으로 제거하거나 감소시키려는 노력을 해왔다. 이때, 마찰력은 마찰력 자체뿐만 아니라 관성력 그리고 기계 부품의 백래쉬의 결합된 효과를 지칭한다.

따라서 본 연구의 주된 목적은 햅틱 장치의 투명성을 향상시키기 위해 역구동력을 효과적으로 보상할 수 있는 실용적인 알고리즘을 제시하는 것이다.

2. 햅틱 장치를 위한 마찰력 보상 알고리즘

마찰력의 영향을 갖는 시스템의 여러 성능을 개선하기 위하여, 많은 연구자들이 마찰력 모델에 관한 연구를 수행해왔다. 그 중에서 대표적인 모델은 점성 마찰, Coulomb 마찰, Karnopp 마찰, Stribeck 효과 및 이들의 결합된 형태로 주어진다.¹ 본 연구에서는 Stribeck 효과를 갖는 Coulomb 마찰 모델을 이용하였다.

Fig. 1에 제시된 바와 같이, 제시된 마찰력 모델은 다음과 같이 묘사될 수 있다. (1) 회전 속도가 '0'일 때의 마찰력은 '0'이다. (2) 운동이 시작되자마자 얻어지는 마찰력은 정지 마찰력 T_{fs} 이다. (3) 이후, 마찰력은 운동 속도와 관계없이 일정한 크기를 갖는 운동 마찰력 T_{fd} 까지 단조롭게 감소한다. 여기서 운동 마찰력의 크기는 하이브리드 햅틱 장치를 일정한 속도로 회전시킴에 의해 쉽게 얻을 수 있다. 이에 반해, 측정 신호의 양자화, 제어 샘플링 간격 및 사용된 엔코더의 분해능과 같은 이산화(discretization) 효과는 정지 마찰력의 정확한 규명을 어렵게 한다. 따라서 정지 마

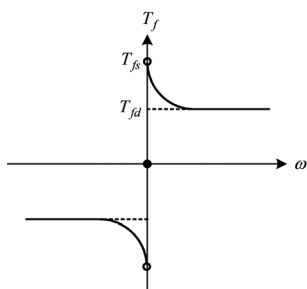


Fig. 1 Friction model: Column friction and Stribeck effect

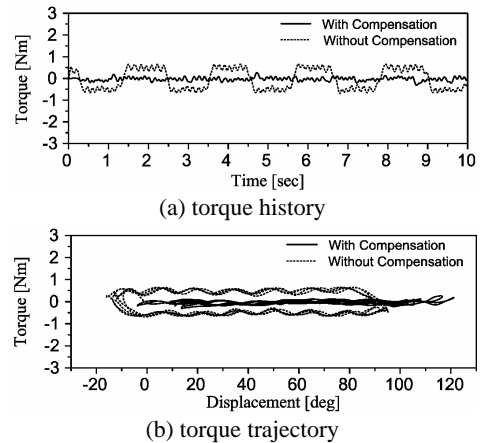


Fig. 6 Free mode test using the initial compensation model

찰력의 크기는 마찰력 보상 모델을 이용한 반복적인 실험을 통해 추정되어야 한다.

햅틱 장치가 사용자에게 자유 운동에 대한 느낌(free feel)을 제공하기 위해서는, 마찰력을 효과적으로 제거해야만 한다. 이러한 마찰력은 햅틱 장치의 구동원으로 사용되는 모터와 같은 작동기를 이용하여 적절하게 보상될 수 있다. 다시 말해서, 작동기가 마찰력과 정확하게 같은 크기의 토크를 제공할 수 있다면, 햅틱 장치의 사용자는 결코 어떠한 마찰력도 느끼지 않을 것이다.

Fig. 2는 햅틱 장치를 이용하여 자유 운동에 대해 수행한 실험 결과를 보여준다. 이때 사용된 햅틱 장치에 대한 구체적인 설명은 참고문헌 2에 제시되어 있다. Fig. 2(a)로부터, 마찰이 보상되지 않은 경우에 비해 보상된 경우가 보다 양호한 투명성을 가짐을 확인할 수 있다. 보상되지 않은 경우의 토크는 -0.816~0.766Nm의 범위를 가지는 반면, 보상된 경우의 토크는 -0.314~0.266Nm의 범위를 갖는다. 따라서 마찰력 보상기를 사용함에 의해 햅틱 장치의 마찰력은 대략 63.4%까지 효과적으로 감소되었다. Fig. 2(b)는 회전 변위에 대한 토크 분포를 보여준다. 자유 모드에서 가장 이상적인 토크 출력은 변위에 관계없이 '0'을 일정하게 유지하는 것이다. 보상기가 이용되지 않은 경우의 토크는 다소 타원형과 유사한 분포를 보이는 반면, 보상기가 이용된 경우의 토크는 이상적인 경우와 매우 유사함을 분명히 확인할 수 있다. 특히 보상되지 않은 경우에는 사용자에게 불쾌감을 줄 수 있는 토크 맥동을 동반하였다.

보상기의 사용으로 인해 투명성이 양적으로는 개선되었음에도 불구하고, 모든 피실험자들은 실제로 보상기가 이용되지 않은 경우가 오히려 더욱 부드러운 느낌을 제시한다고 진술했다. 다시 말해, 보상기가 적용된 햅틱 장치는 급격한 토크 변동(jerky feel)을 제공하였다. 만약 햅틱 장치가 사용자에게 급격한 토크 변동을 제공한다면, 이러한 장치는 비록 자유 모드에서 '0'에 가까운 출력을 제시한다 할지라도 좋은 성능을 갖는다고 평가되기 힘들다. 이것은, 햅틱 시스템에서의 마찰력이 일반적인 제어 시스템과는 다른 시각에서 평가되어야 함을 의미한다.

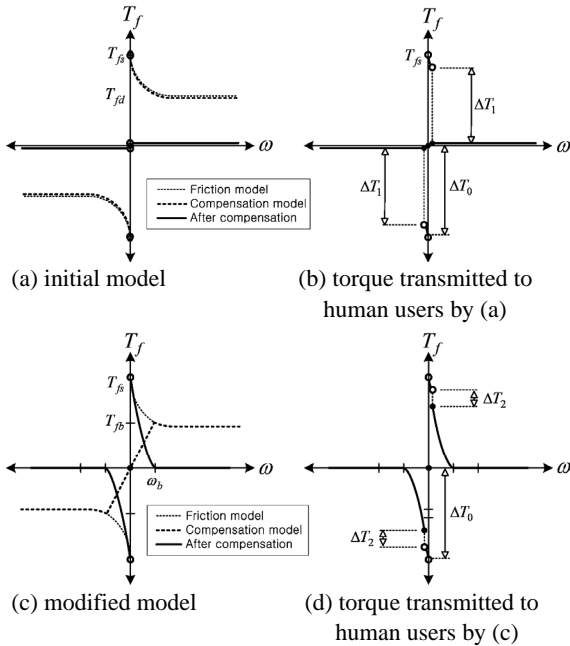


Fig. 3 Friction compensation models

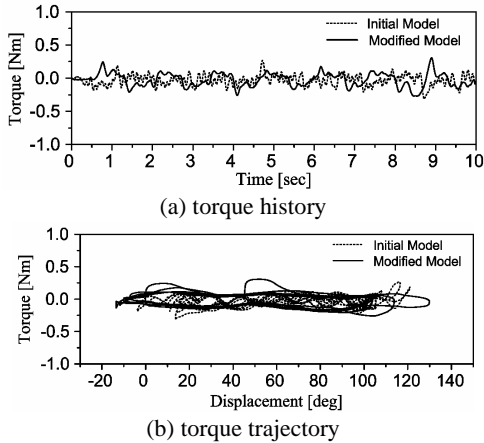


Fig. 8 Free mode test using the modified compensation model

급격한 토크 변동에 대한 주된 원인은 크게 두 가지이다. 하나는 '0'의 속도에서 마찰력이 갖는 불연속성이며, 다른 하나는 디지털 환경에서 측정된 신호에 포함된 양자화 오차, 제어 샘플링 간격 및 엔코더 분해능과 같은 이산화 효과이다. 주어진 마찰력 보상 모델이 실제 마찰력과 정확하게 일치한다고 가정하자. 그러면 마찰력은 보상기에 의해 완전하게 보상될 수 있으며, 따라서 사용자는 자유 운동에서의 느낌(*free feel*)을 느낄 것으로 기대된다. Fig. 3(a)에 도시된 바와 같이, '0'이 아닌 속도영역에서 사용자는 아무런 힘을 느끼지 못한다. 그러나 정지해 있는 손잡이를 돌리는 순간 또는 손잡이의 회전방향을 바꾸는 순간, 사용자는 불연속적인 마찰력 거동 때문에 필연적으로 정지 마찰력과 동일한 힘을 느낄 수 밖에 없다. 한편, 사용자는 '0'의 속도 근처의 마찰력을 느끼게 된다. 위치 피드백 신호를 위해 사용되는 엔코더는 그것의 제안된 분해능 때문에 어느 특정 구간에서는 운동을 감지하지 못할 수 있다. 그리고 이산화된 보상 알고리즘은 샘플링 간격에 대응하는 실제 마찰력을 적절하게 보상하지 못한다. 또한 AD 컨버터의 샘플러-홀더(*sampling-and-hold*) 장치는 측정된 연속신호에 양자화 오차를 제공하며, 이는 보상기의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 이와 같은 이산화 효과 때문에, '0'의 속도 근처 구간에서의 마찰력은 Fig. 3(b)에 제시된 바와 같이 보상될 수 없다. 따라서 제시된 마찰력 보상기는 필연적으

로 급격한 토크 변화를 사용자에게 제공할 수 밖에 없다. 햅틱 장치에서 정지 마찰력을 제거하거나 줄이는 것은 실제로 매우 힘들다. 따라서 이러한 접근은 본 연구의 주된 관심사가 아니다. 한편, 이산화 효과에 의한 급격한 토크 변화는 마찰력 보상기의 적절한 수정을 통해 효과적으로 줄일 수 있다. 역설적으로, 마찰력 보상 모델이 햅틱 장치의 실제 마찰력에 가까울수록, 토크 변동 ΔT_1 는 커지게 된다. 따라서 토크가 불연속적인 곳에서의 토크 변화를 가능한 연속적으로 만드는 것이 중요하며, 이러한 점을 고려하여 수정된 마찰력 보상 모델은 Fig. 3(c)에 제시되었다. 여기서 ω_b 는 Fig. 3(a)에서 초기의 마찰력 보상 모델이 보상하지 못하는 회전 속도 구간을 나타내는 경계 회전 속도이다. ω_b 이상의 회전속도 구간에서, 수정된 보상 모델은 실제 마찰력을 잘 보상하므로 사용자에게 자유 운동에서의 느낌을 효과적으로 제공할 수 있다. 한편 ω_b 이하의 구간에서, 수정된 모델은 회전속도의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 보상 토크를 제공한다. 수정된 보상 모델이 햅틱 장치의 실제 마찰력과는 분명한 차이를 가짐에도 불구하고, 결과적으로 햅틱 장치가 제시하는 출력 토크는 정지 마찰력으로부터 '0'까지 부드럽게 감소함을 Fig. 3(c)에서 확인할 수 있다. 수정된 마찰력 보상 모델에 이산화 효과를 고려하면 실제로 사용자는 Fig. 3(d)에 제시된 토크를 감지하게 된다. Fig. 3(d)의 토크 변동 ΔT_2 는 Fig. 3(b)의 ΔT_1 과 비교했을 때 상당히 작아졌음에 주의하자. 따라서 수정된 보상 모델을 이용함에 의해 급격한 토크 변화는 효과적으로 줄어들 것으로 기대된다. 예상했던 대로, 모든 피실험자들은 수정된 보상 모델이 이용으로 조작감이 매우 부드러워졌다고 진술했다.

Fig. 4는 수정된 마찰력 보상 모델을 이용하여 얻어진 실험 결과를 보여준다. Fig. 4(a)는 이전의 마찰력 보상 모델과 수정된 모델의 토크 변화를 보여준다. 수정된 모델을 이용한 경우의 토크가 이전 모델을 이용한 경우와 비교했을 때 더 작은 토크 변화를 가짐을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4(b)로부터, 수정된 모델을 이용한 경우의 토크 분포가 이전의 모델을 이용한 경우와 비교했을 때보다 더 균일함을 확인할 수 있다. 이러한 부드러운 토크 변화는 자유 모드에서의 느낌이 질적으로 개선되었음을 의미한다. 따라서 수정된 마찰력 보상 모델이 적용된 하이브리드 햅틱 장치는 양적인 측면뿐만 아니라 질적인 측면에서 양호한 성능을 제공한다고 결론지을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는, 햅틱 장치를 위한 마찰력 보상 알고리즘이 제안되었다. 제안된 마찰력 보상 모델을 이용함으로써, 마찰력은 양적/질적으로 보상되었으며 햅틱 장치의 투명성은 효과적으로 개선되었음을 입증하였다.

후기

본 과제는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- Richard, C. and Cutkosky, M. R., 1999, "Friction Identification for Haptic Display," *Proc. of the 1999 ASME IMECE*, DSC-7B-2, Nashville, TN.
- Nam, Y. J. Moon, Y. J., and Park, M. K., 2006, "Performance Improvement of a Rotary MR Fluid Actuator Based on Electromagnetic Design," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. (submitted in July 2006)