

리니어 모터에 근거한 능동 임피던스 구현

Implementation of Active Impedance Based on Linear Motors

이세한 (고려대 대학원), 송재복 (고려대 기계공학과), 김용일 (KIST 정보전자연구부)
 Se-Han Lee(Graduate School, Korea Univ.), Jae-Bok Song(Korea Univ.), Yong-Il Kim(KIST)

ABSTRACT

In this research a 2-dimensional motion producer based on two linear motors was developed. When the tester provides some motion through the lever attached to the upper moving part of the motion producer, it provides the arbitrary inertia, damping and stiffness characteristics without actual change in physical structure of the motion producer. That is, the active impedance is implemented by controlling input currents supplied to the linear motors. A PID controller with feedforward loop was used to control the currents and pre-processing of input velocity and acceleration signals from the encoder and the current signal from the motor driver circuit are conducted to improve the performance.

Key Words : Active Impedance(능동 임피던스), Linear Motor(리니어 모터), Current Control(전류 제어)

1. 서론

오늘날 생활 수준이 향상됨에 따라 기능만이 아니라 감성이 강조된 제품들이 주목을 받게 되었다.[1] 사용자가 제품을 사용하는 데 있어서 제품의 성능뿐 아니라 작동감까지도 중요하게 되었다. 제품의 작동감 향상을 위해서는 쾌적한 작동감을 인공적으로 표현할 수 있는 방법이 필요하게 되는데, 그 방법으로 사용자가 제품에 대하여 느끼는 감성을 조사하기 위하여 사용자와 제품의 상대적인 움직임을 제어하는 것이 요구된다. 이러한 목적으로 사용자의 작동감 형태를 측정하고 정량화하는 연구를 위하여 2축 리니어 모터로 구성되는 운동 구현기라는 장치를 개발하였다. 본 연구에서는 운동 구현기를 구성하고 있는 리니어 모터를 제어하여 사용자가 손을 사용하여 작동시키는 운동 구현기 레버의 관성량, 감쇠량 또는 강성량을 변화시키는, 즉 능동 임피던스를 구현하였다. 또한, 일반적인 관성, 감쇠, 강성에 관계된 운동 방정식을 구현하기 위해서 위에서 언급한 리니어 모터를 구동할 때 모터 드라이브의 전류를 제어하는 방식에 대해서도 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 사용자가 리니어 모터에 가하는 외력을 리니어 엔코더를 사용 감지하여 능동 관성, 감쇠, 강성을 리니어 모터의 물리적인 구조의 변경 없이 발생시켰으며, 모터에 공급되는 전류 제어함에 있어서 개선된 제어기를 제안하고 성능을 확인하였다.

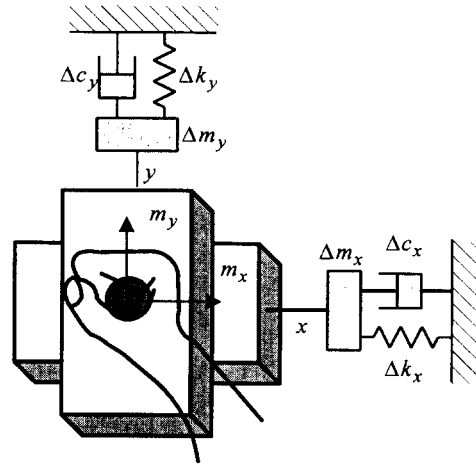


Fig.1 운동 구현기의 구조 및 능동 임피던스의 개념

2. 능동 임피던스의 구현

일반적으로 직선 운동은 회전 모터로부터의 회전 운동을 랙-피니언 등의 기구부를 사용하여 변환시켜서 얻지만, 리니어 모터에서는 직선 운동을 바로 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 리니어 모터를 Fig. 1에서와 같이 직각으로 결합하여 2축의 평면 운동을 구현할 수 있는 운동 구현기를 제작하였다. 그림에서처럼 피실험자가 운동 구현기의 레버를 손으로 잡고 움직이면, 이 형태로부터 변위, 속도, 가속도 등을 감지하여 모터의 구동 전류를 변환하여 줌으로써 원하는 능동 관성(active inertia), 능동 감쇠(active damping) 및 능동 강성(active

stiffness)을 얻을 수 있다. 이를 이용하면 관성, 강성 및 감쇠 등을 변화시키면서 사용자의 최적의 작동감을 측정하는 데 사용할 수 있다. 이 때 운동 구현기를 사용하는 데 있어서 리니어 모터 자체의 쿨롱 마찰과 점성 감쇠는 미세하므로 무시할 수 있다.

2.1 능동 관성, 감쇠, 강성

본 연구에서는 리니어 모터의 가동부가 원래 가지고 있는 관성, 감쇠, 강성, 즉 구조적인 임피던스 값을 물리적으로 변화시키지 않으면서도 리니어 모터의 가동력에 의해서 적절한 힘을 발생시켜서 실제 임피던스 값이 변하는 효과를 얻도록 하는 방법을 개발하였다. 사용자가 리니어 모터와 연결된 레버에 힘을 가해서 특정한 방향으로 가속시킬 경우에 가속도, 속도, 변위를 감지하여 다음과 같은 식을 적용하여 발생 가속도, 속도, 변위의 역방향으로 측정된 값에 추가 임피던스 량 만큼 비례하는 다음과 같은 전류를 모터에 공급한다.

$$i_m = -\frac{\Delta m}{K_T} \cdot a \quad (1)$$

$$i_c = -\frac{\Delta c}{K_T} \cdot v \quad (2)$$

$$i_k = -\frac{\Delta k}{K_T} \cdot x \quad (3)$$

이 때, i_m , i_c , i_k 는 능동 관성, 감쇠, 강성을 발생시키기 위해 필요한 각각의 전류, a , v , x 는 사용자가 발생시킨 모터의 가속도, 속도, 변위, K_T 는 모터의 토크 상수, Δm , Δc , Δk 는 부가된 능동 관성, 감쇠, 강성 값들을 나타낸다.

식 (1), (2), (3)에서와 같은 전류가 모터에 공급될 경우 최종적으로 모터의 관성은 다음 식과 같은 값으로 수정되는 효과가 발생한다.

$$M = m + \Delta m \quad (4)$$

$$C = c + \Delta c \quad (5)$$

$$K = k + \Delta k \quad (6)$$

이 때, M , C , K 는 능동 관성, 감쇠, 강성의 효과에 의해 수정된 관성, 감쇠, 강성값, m , c , k 는 리니어 모터 가동부의 원래의 관성, 감쇠, 강성값을 나타낸다.

식(1), (2), (3)의 음(-) 부호는 사용자가 발생시킨 모터의 가속도, 속도, 변위의 반대 방향으로 전류를 공급하

는 것을 의미한다. 지금까지 계산된 전류를 목표값으로 하여 모터에 공급되는 전류를 제어하게 된다.

2.2 복합 능동 임피던스

실제 순수한 관성, 감쇠 또는 강성만을 갖는 시스템은 존재하지 않는다. 그러므로 본 연구에서 각각 구현한 능동 관성, 감쇠, 강성을 복합적으로 구현해야만 실제 시스템에 좀더 근사하게 된다. 리니어 모터와 연결된 레버에 사용자가 힘을 가하여 운동을 발생시킬 경우에, 사용자는 관성에 의한 반력, 감쇠에 의한 반력 및 강성에 의한 반력 등 3가지 반력을 복합적으로 받게 된다. Newton의 운동 제3법칙인 “작용 및 반작용의 원리”에 의해서, 사용자가 시스템(리니어 모터에 연결된 레버)에 어떤 힘을 가해주면 시스템도 크기는 동일하지만, 방향이 반대인 힘을 사용자에게 가해 주게 되므로, 사용자도 시스템으로부터 힘을 받게 되며, 이 힘을 반력(또는 반작용력)이라 한다. 이를 운동 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{\text{total}} &= F_{\text{inertia}} + F_{\text{damping}} + F_{\text{stiffness}} \\ &= M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x \end{aligned} \quad (7)$$

한편, 어느 한 순간에 반력을 특정한다면 이것이 관성, 감쇠 및 강성에 의한 반력이 어떻게 구성되어 있는지를 구분할 수 없게 된다. 그러나 관성에 의한 반력은 가속도에, 감쇠에 의한 반력은 속도에, 강성에 의한 반력은 변위에 비례한다는 관찰로부터, 이러한 시간의 변화에 따른 반력의 형태를 고찰해 보면 총 반력의 성분을 구분해낼 수 있게 된다. 본 연구에서 구현된 복합 능동 임피던스는 리니어 모터에 입력되는 전류를 제어함으로써 발생된다. 이 때, 능동 임피던스는 사용자가 레버를 움직이는 형태에 따라서 구분되어 발생되는데, 각각의 능동 관성, 능동 감쇠, 능동 강성에 의한 반력은 최종적으로 사용자에게는 시간에 따른 힘의 형태로 나타난다. 따라서 앞서 구한 각각의 능동 관성, 감쇠, 강성에 해당하는 전류 성분을 모두 합산하여 리니어 모터에 인가하여야 한다. 즉, 능동 임피던스를 구현하기 위해서 요구되는 전류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_{\text{total}} &= i_M + i_C + i_K = -\frac{\Delta m}{K_T} \ddot{x} - \frac{\Delta c}{K_T} \dot{x} - \frac{\Delta k}{K_T} x \\ &= -\frac{1}{K_T} (\Delta m \cdot \ddot{x} + \Delta c \cdot \dot{x} + \Delta k \cdot x) \end{aligned} \quad (8)$$

계산된 전류 i_{total} 은 사용자가 레버에 가한 가속도, 속도, 변위에 의한 성분으로 구성되어 있다.

2.3 실험 장치

본 연구에서 사용한 실험 장치는 리니어 모터, 드라이브 회로, 제어기로 사용하는 TMS320C32 보드, 실험 장치 제어용 PC로 다음과 같이 구성되어 있다

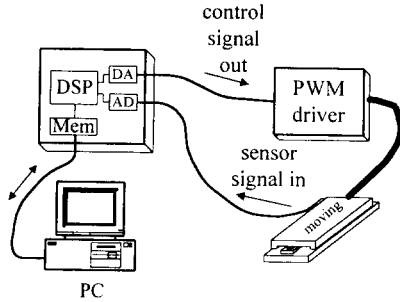


Fig. 2 실험 장치의 구성

3. 리니어 모터의 전류 제어

리니어 모터를 구동하는 일반적인 드라이버 회로의 입력은 진술한 결과에서 필요한 전류가 아니라 전압의 형태로 공급된다. 즉, 원하는 값의 전류를 공급하기 위해서는 모터에 흐르는 전류를 검출하여 리니어 모터에 인가되는 전압을 제어하게 된다. 이를 위해서 본 연구에서는 Fig. 3 과 같이 목표 전류와 실제 리니어 모터에 흐르는 전류 사이의 오차에 근거하여 비례-적분-미분 (PID) 제어기를 사용하여 모터에 인가되는 전압을 산출하게 된다. 이렇게 산출된 전압이 PWM(pulse width modulation) 방식의 리니어 모터 드라이브 회로에 입력된다.

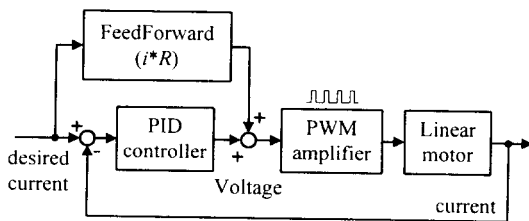


Fig. 3 전류 제어기의 구성도

3.1 전류 제어기

본 연구에서 사용된 리니어 모터 드라이브 회로의 특

성상 전류 입력이 아니므로 리니어 모터의 힘 제어를 위해서는 입력되는 전류값을 제어할 필요가 있다. 그러므로 전압 제어를 통해서 전류를 제어하게 된다. 제어기의 전류 명령 추종 성능을 개선하기 위하여 일반적인 PID 제어기에 전압과 전류의 관계를 모터의 속도를 무시하고 모터에 공급되는 전류는 단순히 모터에 인가되는 전압에만 비례한다고 가정하여 권선의 저항만을 고려한 전압-전류 관계식에 의거한 피드포워드 항을 추가하여 제어기를 구성하였다. [2]

$$\frac{i}{v_i} = \frac{1}{R} \quad (9)$$

이 때, v_i 는 모터에 입력되는 전압, i 는 모터에 공급되는 전류, R 은 모터 권선의 저항을 나타낸다.

피드포워드 항을 추가한 제어기를 사용하여 Fig. 4 와 같이 전류 추종 성능이 개선되었다.

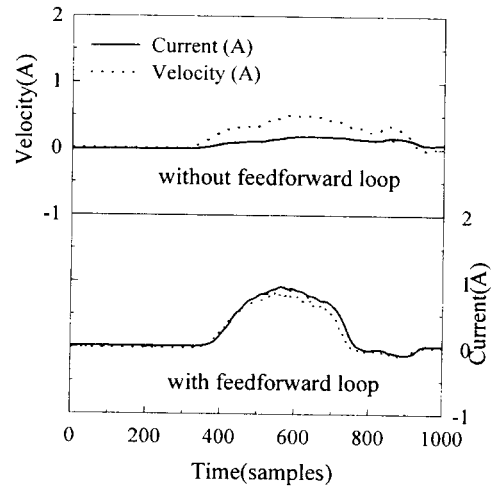


Fig. 4 피드포워드 항을 사용한 전류 추종 성능의 개선

4. 결과

사용자가 리니어 모터에 연결된 레버를 움직였을 때 사용자가 레버에 가한 변위, 속도, 가속도 등에 해당하는 힘을 전류로 환산한 값과 모터가 발생하는 반력의 크기를 의미하는 모터 공급 전류를 사용하여 다음의 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 에 각각 나타내었다. Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 의 내용은 사용자가 리니어 모터에 가한 변위, 속도, 가속도에 비례한 반력을 발생하기 위해 변위, 속도, 가

속도에 비례한 전류를 목표로 전류 제어기에 의한 모터 공급 전류를 나타낸다. Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에서 변위, 속도, 가속도에 비례한 전류가 모터에 공급되고 있어 전류에 비례한 반력이 발생되고 있음을 알 수 있다.(모터에 공급되는 전류는 이해를 돕기 위해서 역방향으로 표시하지 않고 변위, 속도, 가속도와 동일한 부호로 표시하였다.)

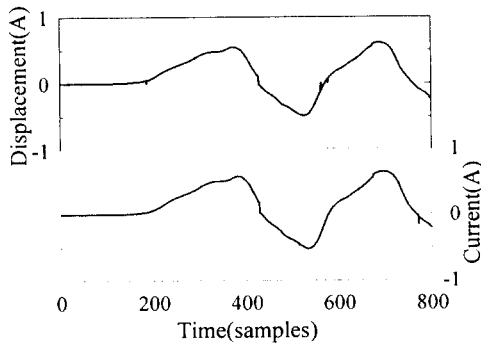


Fig. 5 능동 강성

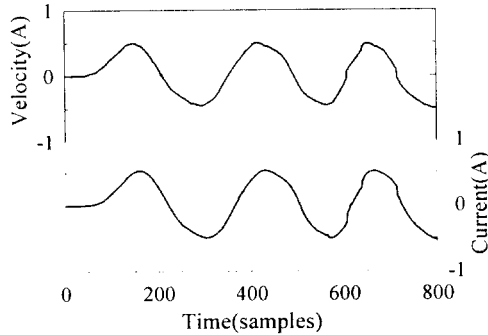


Fig. 6 능동 감쇠

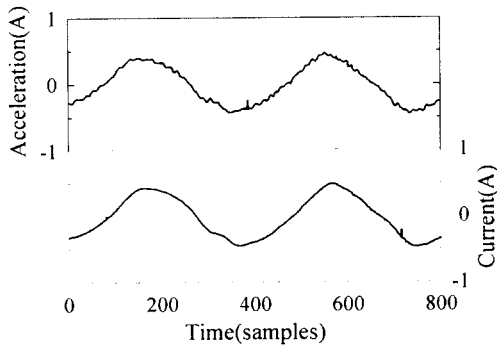


Fig. 7 능동 관성

이 때, Displacement (A), Velocity (A), Acceleration (A)는 발생 변위, 속도, 가속도에 비례하는 반력을 의미하는 목표 전류를 나타내고, Current (A)는 모터에서 실제 발생하는 반력을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서 별도의 하드웨어 추가 없이 리니어 모터와 제어기만을 사용하여, 모터 제어기의 제어 소프트웨어에 능동 임피던스 구현 알고리즘을 탑재한 소프트웨어 추가만으로 능동 관성, 감쇠, 강성을 구현하는 것이 가능함을 알 수 있었다. 본 연구의 결과를 사용하여, 현재 운동 구현기에 적용하여 능동 관성, 감쇠, 강성의 형태의 반력을 발생하여 사용자의 감각을 측정하는 데 사용하고 있으며, 가상 현실 분야에서 사용자에게 가상의 운동감을 경험하도록 반력을 발생하는 장치 개발에 응용하는 것이 가능하리라 예상된다.

후 기

이 연구는 G7 감성공학 기술개발사업의 “감성측정평가 시뮬레이터 기술 개발” 과제의 일부로 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이순요, 長町三生, “감성 인간 공학,” 양영각, pp. 3-4, 1996.
2. Benjamin C. Kuo, “Automatic Control Systems,” 7th ed., Prentice Hall, pp.775-777, 1995.