전력전자학술대회 논문집 2000. 7.19-22

초음파 모터 구동 6자유도 역감 장치를 이용한 가상 자석의 구현

김 동 옥*, 강 원 찬*, 오 금 곤**, 김 영 동**
*조선대학교 대학원 제어계측공학과, **조선대학교 전기 · 제어계측공학부 교수

Embodiment of Virtual Magnet Using a 6 DOF Force-Reflecting Haptic Interface by Ultrasonic Motors

Dong-Ok Kim*, Won-Chan Kang*, Geum-Kon Oh**, Young-Dong Kim**
*Dept of Control & Instrument Eng., Graduate School of Cho-Sun Univ.
**Dept of Electrical and Control & Instrument Eng., Cho-Sun Univ

ABSTRACT

This paper proposes virtual-magnetic system by a force-reflecting interface to drive a ultrasonic motors(USMs). To approach virtual magnet in graphic, the 6 DOF force-reflecting interfaces provides force feedback to users as if i is magnetic-force. So, users can feel real magnet Effectively to display the magnetic-force, we need the interfaces with specific characteristics such as low inertia, almost zero friction and very high stiffness. As an actuator for the interface, the USMs have many good advantages satisfied these conditions over conventional servo motors.

To estimate capability of this virtual-magnetic system, we did an experiment of magnetism based on coulomb's law. when Coulmb's low apply this experiment, it is very conformable to real magnet

1. 서 론

손의 위치 정보를 가상 현실 세계에 제공하고, 가상 현실 세계에서 가상 객체와 접촉했을 때 인간에게 다양한 역감을 전달하는 장치를 힘 반영 역감 장치(force reflecting haptic interface)라 한다[1~5]. 이러한 역감 장치의 성능을 평가하기 위해서 가상 벽, 가상 버튼과 같은 여러 가지 가상 객체를 설계하고 이에 대한 접촉 실험을 행하여 왔다[6,7]. 기존 실험에서는 가상 환경내의 가상 객체를 접촉했을 때 그 접촉 반발력에 대한 실험을 행하였다. 따라서 어떤 가상 물체에 접촉했을 때만 그 역감을 느낄 수 있었다. 하지만 실세계에서 존재하는 물체와 접촉하지 않았을 때에 생기는 역감, 즉, 자기력과 같은 보이지 않는 힘에 의한 역감은 충분히 정의되지 않았다.

본 연구에서는 가상 자석(virtual magnet)에 대한 실험을 통해 다양한 가상 객체 설계에 대해 가능성을 모의하였다. 본 실험에서 자체 제작한 역감 장치 성능 평가에서 쿨롱의 법칙에 따른 극성에 의한 반발력, 흡인력 등 자기력에 대한 실현이 가능함을 실험을 통해서 확인하였다.

이러한 실험을 위해서 자체 제작한 역감 장치는 초음파 모터 액츄에이터를 사용한다. 이로써 소형 DC 서보 모터나 마그네틱 장치를 사용으로 인한 고속 저 토크의 문제점을 해결하고, 토크 증가를 위해 케이블이나 기어의 이용으로 생기는 백러시나 구조적인 부피 및 무게의 증가 등의 단점을 보완하였다[8~11]. 무게가 크면 인간이 동작시 무게감을 느껴 현실감을 제공하기에 많은 문제점이 따르게 되기 때문이다. 역감 장치의 액츄에이터인 초음파 모터는 그 구조가 단순하고, 소형 경량이며, 저속-고토오크 특성을 지녀 직접구동(Direct Drive)방식을 채용하기에 적합한 모터이다[12~15]. 따라서 속도변환을 위해 기어나 풀리등 기계적 장치가 불필요하여 역감 장치의 무게를 현저히 줄일 수 있었다.

2. 가상 자석의 원리

쿨롱의 법칙에서 자기사이에 작용하는 흡인력(또는 반발력)은 두 자극 크기의 곱에 비례하고 자극사이 거리의 2승에 반비례한다. 그리고 두 자석의 극성이 다르면 흡인력이 같으면 반발력이 발생된다. 자석 한 개(m_1)는 움직이지 않는 고정된 자석이고 다른 한 개(m_2)의 자석은 움직일 수 있는 이동자라 했을 경우, 이동자를 손으로 쥐고 고정자쪽에 접근시키면 일정거리에 근접할 경우 극성이 다르면 흡인력이 발생하여 고정자쪽으로 힘이 끌어당기는 힘이 느껴진다. 또한 극성이 같았을때, 고정자의 반대쪽으로 밀어내는 반발력을 느낄 수 있다.

가상 자석의 원리는 초음파 모터가 입력 전원의 A상과 B상 위상차에 비례해서 속도와 토크가 커진다는 점에 주안점을 둔다. 즉, 위상차가 90°이면 정방향으로 최대가 되고 -90°이면 역방향으로 최대가 되고 위상차 0°에서 최저가 되는 특성을 적용시켰다. 여기서 자극의 크기와 극성이 고정된 m_2를 역감 장치의 위치 포인트로 설정 후, 고정자 m_1의 크기와 두 자극사이의 거리를 위상차 변화의 인수로 사용하면, 쿨롱의 법칙에 따른 토크가 발생하여 자기력과 같은 역감을 제시받고, 역감 변화도 느낄 수 있게 된다. 여기서 초음파 모터의 위상차를 (+) 혹은 (-)로 설정하게 되면 정·역제어가 가능하므로 힘의 방향을 결정할 수 있다.

고정자 m_1의 자기력이 미치는 공간 즉, 자계의 관점에서 보자면 m_1인 정의 자극으로부터 r[m] 떨어진 점 p에서 자계의 세기 H는 식(1)과 같다. 그리고 이동자 m_2가 놓여진다면 이 때 발생하는 힘 F는 식(2)와 같다. 또한 극성이 같으면 H의 방향으로, 극성이 다르면 H와 반대 방향으로 힘이 작용하게 된다. 본 논문에서는 거리 r과 고정자의 크기 m_1을 위상차 조절의 인수로 사용하였다.

$$H = \frac{1}{4\pi\mu}\ \frac{m_1}{r^2} \tag{1}$$

$$F = m_2 \cdot H \tag{2}$$

그림 1에 보인 바와 같이 두 개의 자극이 존재하는 자계의 임의의 점 p에서 이동자가 받는 힘 F는 m_1에 의해 생성되는 식(3)과 같은 자계의 세기 H_a와 m_2에 의해 생성되는 식(4)와 같은 자계의 세기 H_b의 벡터합 H에 의해 결정된다. 결과적으로 식(2)와 같은 힘이 발생한다.

$$H_a = \frac{1}{4\pi\mu}\ \frac{m_1}{r^2} \tag{3}$$

$$H_b = \frac{1}{4\pi\mu}\ \frac{m_2}{r^2} \tag{4}$$

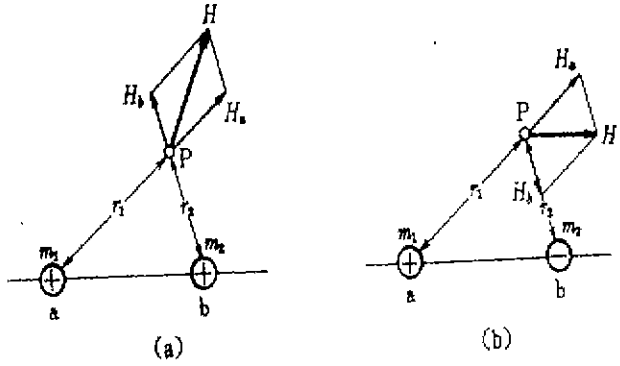


그림 1. 두 개의 자석이 존재할 때 자계의 크기

3. 6 자유도 장치

기존의 로봇 공학에서 많이 사용되어 왔던 시리얼 메커니즘은 소형이고 매우 빠른 동작 특성을 갖는 장점이 있지만, 힘을 제시할 때에는 동역학적으로 이득이 적은 단점을 지니고 있으며, 액츄에이터가 관절축상에 위치하여 조인트의 유연성을 감소시킬 뿐 아니라 관성의 증가로 인해 디바이스 자체의 강성이 감소된다. 최근에는 이런 단점을 보완시키기 위하여 가능한 많은 액츄에이터를 고정된 베이스에 부착하는 설계기법이 시도되고 있으며 좋은 동작특성을 얻기 위해 평형 메커니즘을 이용하고 있다. 본 연구에서는 평형 메커니즘을 응용하여 2개의 액츄에이터를 베이스 측면에 고정시킨 병렬구동형 2자유도(y축, z축)와 베이스 밑면에 하나의 액츄에이터를 고정시킨 1자유도(x축), 엔드이펙터에 세 개의 엔코더를 장착한 수동 3자유도로 총 6자유도의 데스크-탑형 디바이스이다. 사용되어진 액츄에이터는 엔코더 장착형 초음파 모터를 사용하여 능동 3자유도를 표현했다. 엔드이펙터의 위치는 3개의 엔코더의 출력 펄스를 통하여 계산되어지고, 이 엔드이펙터의 위치 정보에 따라 X, Y, Z축 방향의 힘을 제어한다. 모터의 토크는 가볍고 단단한 링크에 대해 직접구동방식으로 전달된다. 이 링크의 끝은 소형 엔코더 3개를 부착시켜 끝점 포인터 방향을 3차원으로 디스플레이하였다.

힘 반향 역감 장치의 외형은 그림 2와 같고 역감 장치 링크 파라미터는 표1과 같다.

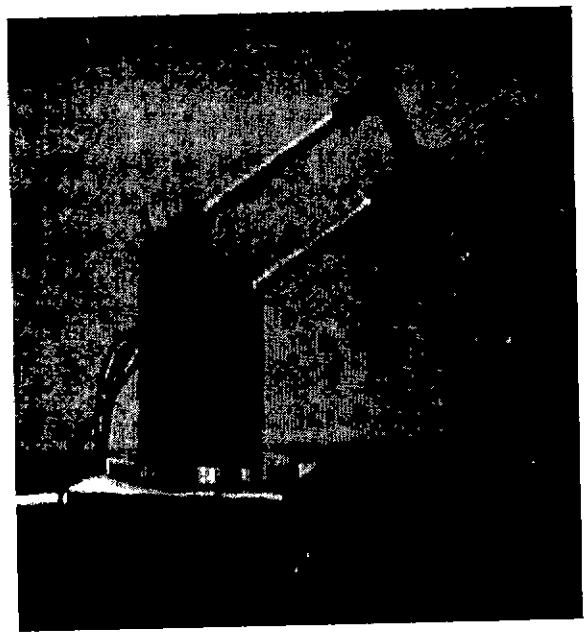


그림 2. 6자유도 힘 반향 역감 장치

표 1. 역감 장치의 링크 파라미터

Link / parameter Joint	θi	αi	ai	di
1	θ1	-π/2	0	d1
2	θ2	π	L1	0
3	θ3	π/2	L2	0
4	θ4	π/2	0	0
5	θ5	-π/2	0	0
6	θ6	0	0	0

Denavit-Hartenberg법을 적용하여 기준 좌표계에서 엔드이펙터의 작용점 위치까지 변환 행렬을 구하면 식(5)와 같다[16]. 여기서 A_0^3, A_3^6는 각각 능동 3자유도와 수동 3자유도의 변환행렬이다.

$$T_6^0 = A_0^3 \cdot A_3^6 = (A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2) \cdot (A_4^3 \cdot A_5^4 \cdot A_6^5)$$

$$= \begin{bmatrix} C_1C_2C_3 + C_1S_2S_3 & S_1 & C_1C_2S_3 - C_1S_2C_3 & L_1C_1C_2 + L_2C_1(C_2C_3 + S_2S_3) \\ S_1C_2C_3 + S_1S_2S_3 & -C_1 & S_1C_2S_3 - S_1S_2C_3 & L_1S_1C_2 + L_2S_1(C_2C_3 + S_2S_3) \\ C_2S_3 - S_2C_3 & 0 & -S_2S_3 - C_2C_3 & -L_1S_2 - L_2(S_2C_3 - C_2S_3) + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\cdot \begin{bmatrix} C_4C_5C_6 - S_4S_6 & -C_4C_5S_6 - S_4C_6 & -C_4S_5 & 0 \\ S_4C_5C_6 + C_4S_6 & -S_4C_5S_6 + C_4C_6 & -S_4S_5 & 0 \\ S_5C_6 & -S_5S_6 & C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $C_i = \cos\theta_i$, $S_i = \sin\theta_i$이다.

위 식(5)에서 능동 3자유도 변환행렬 A_0^3에 의해 작용점 P의 위치는 결정된다. 수동 3자유도 변환행렬 A_3^6은 엔드이펙터의 위치포인터의 3차원 방향을 나타낸다. 기준 좌표계에서 엔드이펙터의 작용점 P의 위치를 구하면 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1C_1C_2 + L_2C_1C_{2-3} \\ L_1S_1C_2 + L_2S_1C_{2-3} \\ -L_1S_2 - L_2S_{2-3} + d_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $C_{i-j} = \cos(\theta_i - \theta_j)$, $S_{i-j} = \sin(\theta_i - \theta_j)$이다

가상 자석과 근접해서 자계의 영향을 받게되면 가상 자기력이 PC에 의해 계산되고 이것에 비례한 토크를 발생시키도록 식(6)을 편미분하여 자코비안 행렬의 전치 행렬을 구하면 식(7)과 같고 이렇게 계산된 결과는 출력시에 이용된다.

$$J^T = \begin{bmatrix} -L_2S_1C_{2-3} - L_1S_1C_2 & L_2C_1C_{2-3} + L_1C_1C_2 & 0 \\ -L_2C_1S_{2-3} - L_1C_1S_2 & -L_2S_1S_{2-3} - L_1S_1S_2 & L_2S_1S_{2-3} \\ -L_2C_1S_{2-3} & L_2S_1S_{2-3} & L_2C_{2-3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

4. 실험 및 고찰

4.1 시스템 구성

역감 시스템은 다음과 같이 구성되어 있다.

- ◉ 역감 장치 : 정밀 제작(0.01[mm] 오차범위)
  초음파 모터(USR-60S; 日本新生工業)
  로터리 엔코더(광전식, 1000P/R)
- ◉ 엔코더 어댑터 : 4체배기
- ◉ 카운터 보드 : 16bit 4ch UP-DOWN 카운터
- ◉ PC : 펜티엄 MMX-200 under Windows 98
- ◉ 역감 장치 제어기: (pLSI1016 사용, 자체 개발)
- ◉ 전원 : Tektronix PS2521G
- ◉ 주파수 카운터 : HP33120A
- ◉ 소프트웨어 : Visual C++,
  OpenGL Library
- ◉ 파형 측정 : 500MHz Storage Oscilloscope
  (Lecroy 93542)

그림 3은 역감 장치 제어기의 블록 다이아그램을 보이고 있다. 전원 공급 회로부에서는 pLSI부에서 만든 두 개의 5V의 펄스를 2단 트랜지스터 스위칭 증폭회로와 펄스변압기(Pulse transformer)를 통해서 100Vpp를 증폭하여 초음파 모터의 A상과 B상에 각각 공급한다. 엔코더는 1회전당 1000펄스의 분해능을 가지며, 엔코더 신호는 엔코더 어댑터에서 4체배 후 사용한다.

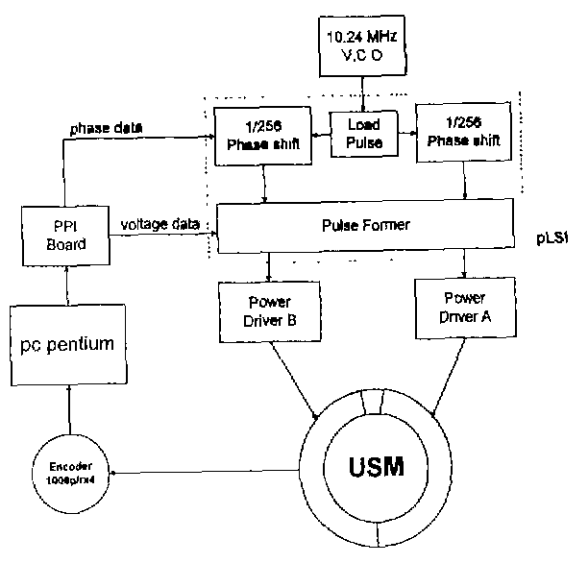


그림 3. 역감 장치 제어기의 블럭도

엔드이펙터의 위치는 이 엔코더값을 가지고 계산하며 가상 자석과의 변위를 구한 후 PC에서 가상 자기력이 구해지면 내부 토오크와 선형적인 관계를 가지는 위상차를 초음파 모터의 제어 신호로 입력해서 사용자에게 자기력과 같은 힘을 전달하게 된다. 초음파 모터는 토크센서를 사용하지 않고 위치

변화만을 피드백 신호로 사용하기 때문에 기존의 힘 궤환 제어에 비해 제어시스템을 간단히 구성할 수 있을 뿐 아니라 응답이 빠른 잇점이 있다.

4.2 가상 자석의 실험 및 고찰

본 연구에서는 역감 장치에 힘 센서를 부착하지 않았다. 역감 장치의 엔드이펙터를 잡고 직선으로 움직여서 가상 자석과 근접했을 때 사용자에게 제공되는 역감 변화를 알아보기 위해 초음파 모터의 위상차-토크가 선형 관계를 고려하여 위상차를 측정하였다. 세 개의 모터중 x축 변위를 나타내는 모터에서 위상차 변화가 두드러졌고, 나머지 y축, z축 2개의 모터의 위상차는 미세하였다. 따라서 x축 모터의 위상차를 도시하였다.

4.2.1 반발력 실험 ($m_1 \cdot m_2 > 0$ 경우)

그림 4는 고정자인 m_1과 이동자인 m_2의 극성이 같은 경우 즉, 반발력이 발생한 경우의 가상 자석 모델이다. 2장의 식(1)의 m_1의 크기를 1과 2로 설정하여 자극의 크기에 따른 자기력의 변화를 측정하였다. 자계에 속하는 r의 범위는 0에서 8까지로 정하였다. 따라서 r^2의 범위는 0~84°가 되고, 초음파 모터가 위상차 0°에서 속도와 토크가 최저이고 90°에서 최대이므로 r^2의 1레인지당 위상차 1.40625°의 변화가 일어난다. 계산된 위상차값이 90°를 초과하게되면 최대값의 크기를 90°로 제한하였다. m_2는 상수(=1)로 설정하여 실험하였다.

위상차 측정은 m_2가 자계의 영향을 받지 않는 자유공간인 위치(그림 4의 (1) 위치), 자계의 범위에 접했을 때의 위치(그림 4의 (2) 위치)와 자계에 완전히 포함된 위치(그림 4의 (3) 위치)로 나누어서 측정하였다. 또한 m_1의 크기가 1인 경우와 2인 경우의 위상차를 비교하였다.

그림 5는 자유공간(그림 4 (1)의 위치)에서 m_1의 크기에 관계없이 위상차가 0°임을 보여준다. 실제 역감 장치 동작에 있어서도 자계의 영향을 받지 않는 자유공간에서는 아무런 역감이 전달되지 않았다. 그림 6의 (a)는 m_1의 크기가 1일 때 (b)는 2일 때의 자계의 영향을 받기 시작한 부분(그림 4 (2) 위치)에 위상차 그래프이다. 그림 6의 (a)와 (b)의 위상차를 비교하면, 거리 r이 같은 위치에서 고정자 m_1의 크기를 2로 변화할 경우에 위상차가 두배로 증가하여 사용자에게 더 큰 역감을 제시하였다. 이로써 자성체의 크기에 따른 클롱의 힘이 가상 자석에서도 성립함을 알 수 있다.

그림 7은 고정자측으로 더 접근시켰을 때(그림 4의 (3)의 위치)의 위상차를 보여준다. 그림 6과 비교했을 때 거리 r이 작아짐에 따라 위상차가 증가했음을 알 수 있다. 실제로 큰 역감이 제시되어 강한 자기력이 발생됨을 느낄 수 있었다. 그림 7의 (a)는 m_1의 크기가 1인 경우의 위상차 그래프이고, (b)는 m_1의 크기가 2인 경우의 위상차 그래프이다. 그림 6에서와 마찬가지로 역시 위상차 변화가 커짐을 알 수 있다. 그림 7의 (a)의 경우 자계의 중간지점에서 최대값인 위상차 90°에 도달했다. m_2로 접근을 했어도 위상차 90°를 최대값으로 제한했기 때문에 더 이상의 위상차 변화는 없었다.

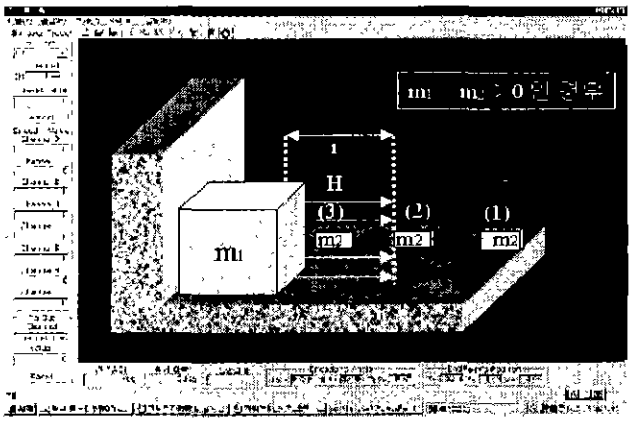


그림 4. 반발력일 때 가상 자석의 모델($m_1 \cdot m_2 > 0$)

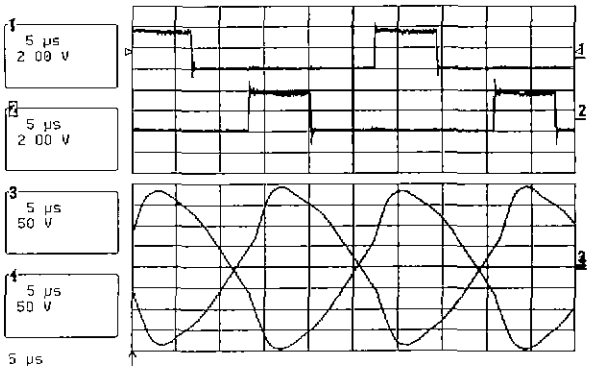
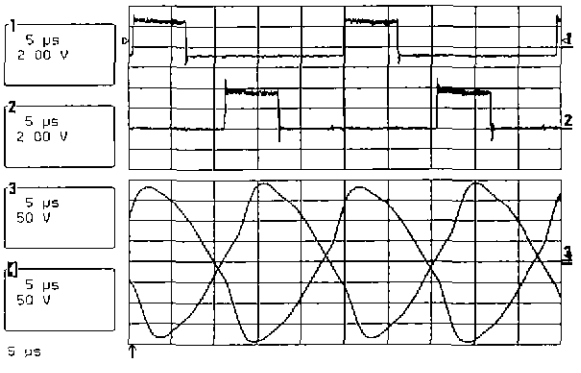
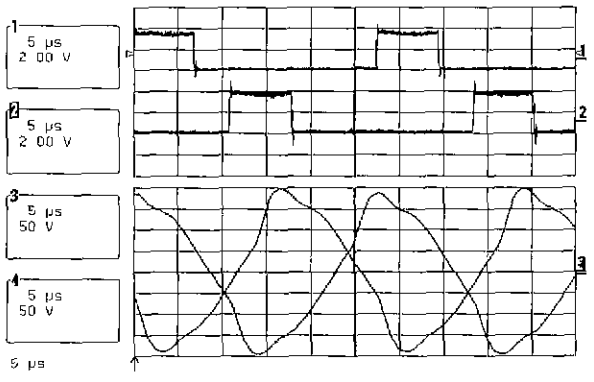


그림 5. 그림 4의 (1)위치에서 위상차(m_1=1, m_1=2)

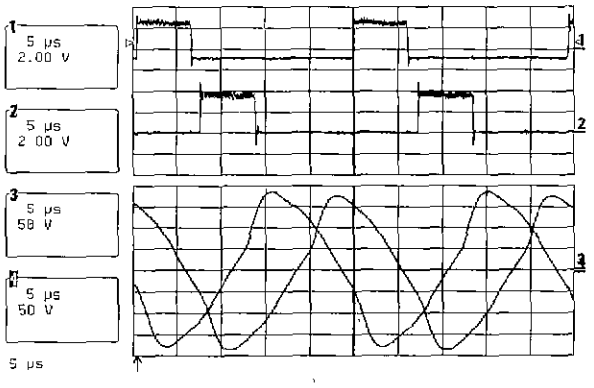


(a) m_1 = 1

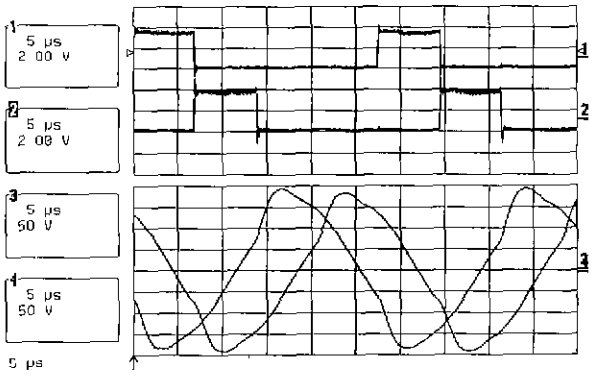


(b) $m_1 = 2$

그림 6. 그림 4의 (2)위치에서의 위상차



(a)$m_1 = 1$



(b) $m_1 = 2$

그림 7. 그림 4의 (3)위치에서 위상차

4.2.2 흡인력 실험 ($m_1 \cdot m_2 < 0$ 경우)

그림 8은 고정자인 m_1과 이동자인 m_2의 극성이 서로 다른 경우 즉, 흡인력이 발생한 경우의 가상 자석 모델이다. 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이, m_2가 자계의 영향을 받지 않는 자유공간에서는 반발력 실험과 마찬가지로 위상차는 0°여서 역감 장치에는 아무런 역감도 제시되지 않았다. 이동자가 자계의 영향을 받는 범위에 접했을 경우 위상차가 계속 90°까지 증가해서 고정자와 달라붙게 된다. 고정자와 접촉이 감지되면 역감 장치는 벽과 같은 역감을 제시하였고, 반대 방향으로 분리시키려할 때 다시 m_1방향으로 역감을 제시하였다. 따라서 사용자는 마치 자석이 끌어당기는 힘을 받았다. 그림 10은 이동자 m_2가 고정자 m_1에 접촉할 때 위상차를 측정한 것이다. 이 때의 위상차는 (-)로 반발력 실험과 비교했을 때 힘 방향이 반대임을 알 수 있었다.

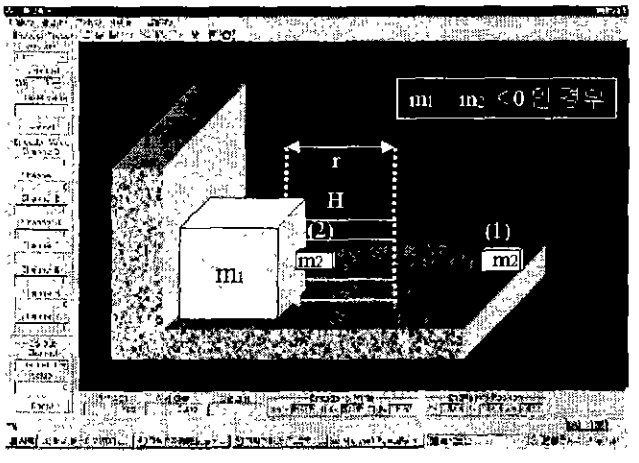


그림 8. 흡인력일 때 가상 자석의 모델($m_1 \cdot m_2 < 0$)

그림 9. 그림 8의 (1)위치에서 위상차 (자유공간)

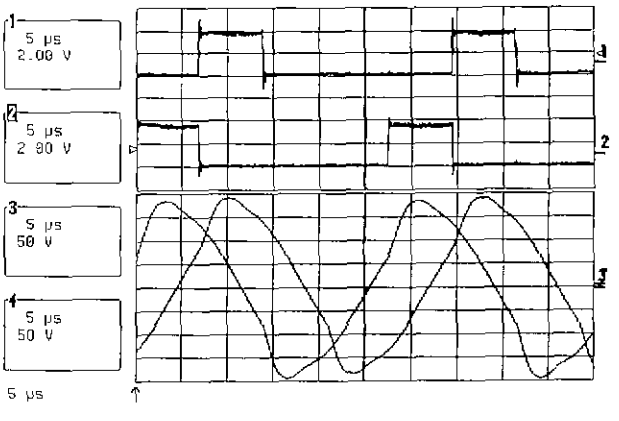


그림 10. 그림 8의 (2)위치에서 위상차 (m_1=1)

5. 결 론

본 논문에서는 저속이며 고 토크와 빠른 응답 특성을 지닌 초음파 모터를 사용하여 직접구동방식으로 능동적 3자유도 수동적 3자유도를 지닌 평행 링크 구조의 힘 반영 역감 장치를 제작하였다. 이를 기구학적인 해석과 함께 가상 자기력이 발생하면 속도에 비례한 토크를 발생시키도록 자코비안 행렬을 유도하였다. 이 역감 장치는 모든 모터를 디바이스의 베이스에 부착한 간단한 구조로 관성의 영향을 거의 받지 않으며 작업 공간이 넓은 장점을 갖고 있다. 가상 자석 실험에서는 극성을 변화시켜 흡인력과 반발력에 대한 실험을 행하였고, 두 자극 사이의 거리와 자극의 크기를 변화시켜 쿨롱의 법칙을 적용할 수 있었다. 가상 자기력의 변화를 위상차를 통해서 알 수 있었다. 가상 자석 실험으로 으로써 가상 객체와의 접촉 작업에서만 실험했던 역감 제시를 가상 자기력과 같은 비접촉시에도 가능함을 새로운 각도에서 수행하였다.

추후 연구 수행은 자유로운 3차원 그래픽 표현과 고정자와 이동자의 거리, 크기, 극성과 함께 두 자성체사이의 매질에 대한 투자율 반영과 접촉 표면에 대한 마찰력까지 고려한 좀 더 정밀하고 현실감 있는 가상 자석 시스템을 개발하고자 하며, 그 밖의 다양한 가상 객체 설계를 행하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] Gradecki, J. : The Virtual Reality, New York : John Wiley & Sons, 1994

[2] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "Force Reflecting Interface" U.S Patent pending. Field Oct 1, 1993.

[3] Donald F. Green and J. Kenneth Salisbury, "Soil Simulation with a PHANToM", PROC of the 3th PHANToM Users Group Workshop. MIT, pp. 22-25, 1998.

[4] Massie, T. H. and Salisbury, J. K., "The PHANToM Haptic Interface : A Device for Probing Virtual Objects," Proc. of ASME Winter Annual Meeting, Chicago, 1994.

[5] M. A. Srinivasan and Salisbury, J. K., "Phantom-based Haptic Interaction with Virtual Object" http://www.ai.mit.edu/projects/handarm-haptics/haptics.html, 1999

[6] 신 덕, 오금곤, 김영동, "초음파 모터를 이용한 힘 반영 촉각장치", 照明·電氣設備學會論文誌 第13卷 第1號 1999年 2月

[7] 강원찬, 김동옥, 신석두, 김영동, "3자유도 힘 반향 역감 장치", 電力電子學會 論文誌 第4卷 第5號 1999年 10月

[8] Iwata, H.: Pen Based Haptic Virtual Environment. VRAIS '93. pp. 287-292, 1993.

[9] Sarcos, Inc. : Manufacturers of the Sarcos Exoskrlrton. Salt Lake City, Utah.

[10] Massie, T. H : Design of a Three Degree of Freedom Force-Reflecting Haptic Interface. M.S. Thesis. Dept. of Electrical Engineering, MIT, 1993.

[11] ZIlles, C, "Haptic Rendering with the Toolhandle Haptic Interface," M.S. Thesis, Dept. of Mechanical Engreeing, MIT, 1995.

[12] Sashida, T. and Kenjo, T. : An Introduction to Ultrasonic Motors. Oxford : Clarendon Press, 1993.

[13] 千住智信·仆良淨·上里勝實·大態 · 速度制御を用いた超音波モータ速度制御. 日本電氣學會産業應用部門全國大會. 77-82, 1993.

[14] Kato, A., Ito, K. and Ito, M. : Adjustable Complient Motion of Ultrasonic Motor. Journal of Robotics and Mechatronics. Vol. 5, No. 5, 1993.

[15] 김 영동, 오금곤 · "초음파 모터의 위상차 제어" 조명·전기설비학회지, 66-74, 1996,

[16] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee, Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligence, McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1991