

양방향 제어를 이용한 가상환경에서의 팔운동감 제시

정웅철, 민두기(고려대 대학원), 송재복(고려대 공대), 김용일(KIST 영상미디어센터)

Reproduction of Arm Kinesthetic Sense in Virtual Environment Using Bilateral Control

Woong-Chul Chung, Doo-Gie Min(Graduate School, Korea Univ.),
Jae-Bok Song(Korea Univ.), Yong-Yil Kim(Imaging Media Research Center, KIST)

Human feels kinesthetic sense in response to the force acted on him. In order to represent kinesthetic sense, a force is analyzed as mechanical impedance (i.e., stiffness or damping) and implemented by active impedance control. In this research, a 3-dimensional arm motion generator is developed to present various mechanical impedance characteristics to an operator. An introduction of virtual reality provides not only a visual effect in virtual environment but also the change in force synchronized with the visual effect in real time.

1. 서론

사람은 시각적 제시를 통해 실제로 운동하지 않는 경우에도 마치 운동하는 듯한 감성을 느끼게 된다. 이 때, 시각적 제시와 실시간으로 연동하는 외부 영향이 사람에게 적용되면, 운동하는 듯한 감성을 극대화시킬 수 있다. 본 논문에서는 인간이 손으로 잡고 있는 물체의 움직임으로 인하여 유발되는 이러한 감성을 운동감이라고 정의한다. 운동감은 시청각 다음으로 인간의 경험을 지배하는 요소로, 사람이 느끼는 피부 감각의 13%가 가속도 및 진동이라는 통계도 있다.(1)

최근 자전거 주행 시뮬레이터의 개발을 통해 보다 가상 환경에서 사실적인 운동감의 경험을 가능하게 하는 연구가 진행되었다.(2) 그러나 인간의 감성에 대한 연구가 기반이 되었을 때, 보다 사실적인 운동감의 제시가 가능해진다.

본 연구에서는 정량화된 감성 데이터를 기반으로(3), 가상 환경에서 노를 젓는 팔 운동감을 능동 임피던스 제어를 통해 제시할 수 있는 운동감 제시 시스템을 구축하였다. 2 장에서는 팔운동감 제시기, 3 장에서는 능동 임피던스, 4 장에서는 통합 시스템의 구축, 5 장에서 결론에 대해 기술한다.

2. 팔운동감 제시기

2.1 팔운동감 제시기의 설계

본 연구에서는 3 차원 공간상에서 자연스러운 임의의 운동이 가능한 팔운동감 제시기를 개발하여, 팔운

동감의 제시를 수행하였다. 기존의 마스터암 형태의 팔운동감 제시기는 착용한 상태에서의 움직임은 그렇지 않은 상태와 많은 차이를 보이지만, 사람의 감성을 조사하고 재현을 목적으로 하는 팔운동감 제시기는 우선적으로 자연스러운 움직임이 보장되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 하중 및 기구학적 구조로 유발되는 부자연스러움을 상쇄시키는 형태의 팔운동감 제시기를 다음과 같이 개발하였다.

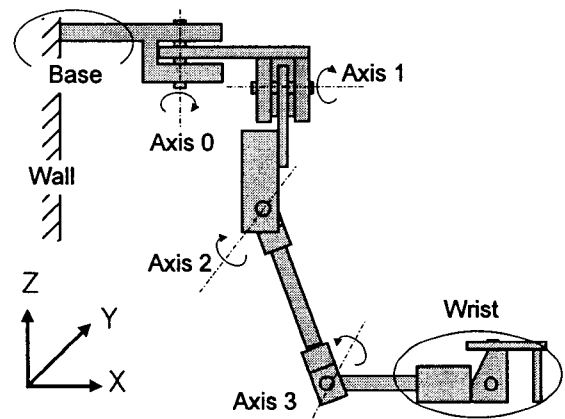


Fig. 1 Arm motion generator

Fig. 1 에서 보듯이, 팔 및 어깨에 가해지는 중량을 최소화하기 위해 외부 고정식 팔운동감 제시기의 구조를 택하였다. 즉, 팔운동감 제시기 하중의 대부분을 벽에 고정된 베이스가 담당하고, 4 축 링크의 회전운동을 통해 피험자의 임의의 운동을 팔운동감 제시기가 담당하는 구조로 팔운동감 제시기를 개발하였다. 0, 1, 2 축은 모터가 감속기를 통해 직접 연결되어

힘 피드백을 수행하고, 3 축의 경우 와이어 구동(tendon-driven) 방식을 채택하여 액추에이터의 하중에 의한 피험자의 부담을 줄이면서 힘 피드백을 수행한다.

2.2 기구학적 해석

팔운동감 제시기의 기구학적 해석은 매니플레이터의 해석과 동일하며, 본 연구에서는 어깨 3 축과 팔꿈치의 1 축에 대하여 기구학적 해석 및 모델링을 수행하였다. 먼저, 각 링크에 링크 좌표계를 결정하기 위하여 D-H 규약에 따라 좌표계를 부여한다. 두 좌표계간의 관계는 선정된 링크 파라미터에 의해 동차 변환 행렬로 표현되며, 손잡이의 위치와 방향은 관절변수의 향으로 나타내는 순기구학으로 나타낼 수 있다. Fig. 2는 팔운동감 제시기의 구조와 링크 좌표계를 나타내며, 팔운동감 제시기의 기구학 방정식은 다음과 같은 동차 변환 행렬로 표시된다.

$${}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = {}^0T_4 \quad (1)$$

직교 공간상에서의 말단부의 속도 벡터와 관절 공간상에서의 관절 속도 벡터 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\dot{x} = J \dot{q} \quad (2)$$

여기서, $\dot{x} = \{v_x \ v_y \ v_z\}^T$ 및 $\dot{q} = \{\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3 \ \dot{\theta}_4\}^T$ 는 말단부의 속도와 각 축의 관절 속도이며, J 는 3×4 의 자코비안(Jacobian) 행렬이다. 또한, 말단부가 임의의 힘 F 를 유지하기 위해서 요구되는 관절에서의 토크 τ 는 다음과 같다.

$$\tau = J^T F \quad (3)$$

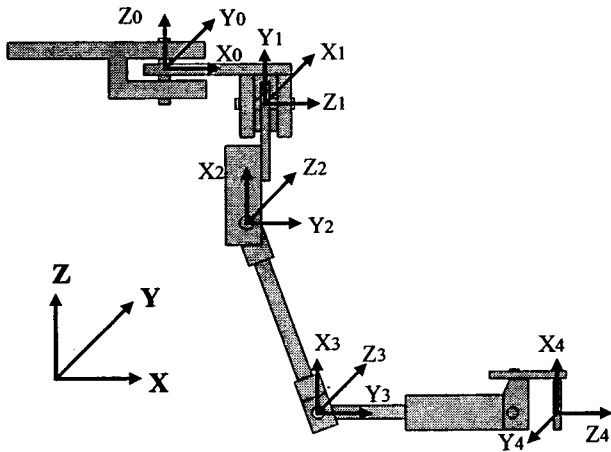


Fig. 2 Schematic diagram of arm motion generator based on Denavit-Hartenberg notation

2.3 동역학적 해석

팔운동감 제시기의 동역학적 모델링은 다음과 같은 식에 의해 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau + J^T F \quad (4)$$

여기서, $M(q)$, $C(q, \dot{q})$, $G(q)$ 는 각각 관성항, 감쇠항, 중력항이다. 팔운동감 제시기에 힘을 반영할 때보다 정확한 방향성을 확보하고, 피험자에게 하중에 대한 부담감을 해소하기 위해서는 정확한 모델링이 필요하다. 관성력이나 원심력, 코리올리력 등의 동역학적 요인들은 힘 반영시에 큰 영향을 미치지 못하므로 중력에 대한 보상만을 모델링에 포함하였으며, 그 결과식은 다음과 같다.

$$\tau_1 = 0 \quad (5)$$

$$\tau_2 = m_3 g l_{c3} \sin \theta_2 \cos \theta_3 + m_4 g \{l_3 \cos \theta_3 + l_{c4} \sin \theta_{34}\} \sin \theta_2 \quad (6)$$

$$\tau_3 = m_3 g l_{c3} \sin \theta_3 + m_4 g \{l_3 \sin \theta_2 - l_{c4} \cos \theta_{34}\} \quad (7)$$

$$\tau_4 = -m_4 g l_{c4} \cos \theta_{34} \quad (8)$$

여기서, m_i 는 링크 i 의 질량이고, l_{ci} 는 관절 i 에서 링크 i 의 질량 중심까지의 길이이며, θ_{ij} 는 관절 변수 θ_j 와 θ_i 의 합이다.

3. 능동 임피던스

피험자가 팔운동감 제시기의 말단부를 손으로 잡고 움직이면, 운동의 변위, 속도, 가속도 정보를 통해 모터의 구동 전류를 변환하여 줌으로써 원하는 능동 임피던스(active impedance)를 구현할 수 있다. 능동 임피던스를 통해서 관성, 강성 및 감쇠 등을 변화시키면서 피험자가 느끼는 운동감을 측정할 수 있으며, 이러한 데이터는 사용자가 보다 쾌적한 운동감을 느끼는 제품을 개발하는 데 사용할 수 있다.

3.1 모델링

임피던스 모델링을 수행할 때 팔운동감 제시기와 사람 팔의 임피던스가 동시에 고려되어야 한다. 그러나 모터 자체의 임피던스에 비해 사람 팔의 임피던스는 상대적으로 작으므로 본 연구에서는 고려하지 않는다.(4) Fig. 3은 팔운동감 제시기의 임피던스 모델링을 나타낸다.

Fig. 3에서 보듯이 피험자는 팔운동감 제시기의 말단부를 통해 힘의 변화를 경험하므로, 팔운동감 제시기를 손으로 잡는 부분에 한해서만 임피던스 모델링을 수행하였다.

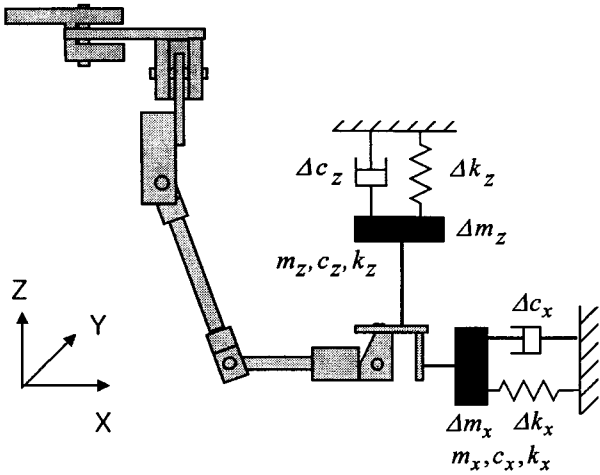


Fig. 3 Impedance modeling of arm motion generator

일반적으로 기계 시스템에서의 힘은, 움직인 거리, 속도, 가속도에 비례하여 발생하는 힘으로 분류한다. 동일한 방법으로 팔 운동감 제시기의 임피던스를 2 차 미분 방정식 형태로 다음과 같이 모델링을 한다.

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) = F_{total} \quad (9)$$

여기서, M , C , K 는 모터의 관성을 포함한 관성, 모터의 감쇠를 포함한 감쇠, 및 모터의 강성을 포함한 강성을 각각 나타낸다. 이 때, 팔의 운동에서 가속도의 변화에 의한 힘의 영향은 무시할 만큼 작으므로 관성에 의한 임피던스는 고려하지 않기로 한다.

3.2 능동 임피던스 제어

모델링된 임피던스를 구현하기 위해 능동 임피던스 제어 기법을 통해 다양한 힘을 피험자가 경험할 수 있도록 하였다. 능동 임피던스 제어 기법은 물리적으로 실제 시스템의 강성이나 감쇠를 변화시키지 않고 소프트웨어적으로 해결하여 비용과 시간을 단축시킬수 있다. 또한, 임의의 크기와 방향으로 힘을 실시간으로 변화시키면서 제시할 수 있다는 장점을 내포한다.

2 차원 팔운동감 제시기의 경우, 팔의 운동 방향과 운동감 제시기의 이동축이 x 축, y 축으로 대응되는 구조로 구성되어 있으나(5), 3 차원 공간상에서의 팔운동감 제시기의 경우 4 축 모두 회전 중심축과 사람 팔의 운동 방향이 정확히 대응되지 않는다. 따라서 기구학적 해석을 통해 팔의 위치 정보, 속도 정보를 얻고, 임의의 임피던스를 팔운동감 제시기에 부여하기 위해 동역학적 해석으로 각 축에 요구되는 토크를 계산한다. 계산된 4 축 모두의 토크가 임피던스 제어를 통해 실시간으로 구현되고, 궁극적으로 팔운동감 제시기의 끝단의 임피던스로 재현된다.

4. 통합 시스템의 구축

본 연구에서는 시각적 운동감을 제시할 수 있는 가상 현실 시스템을 구축하고, 팔운동감 제시기와와의 실시간 연동을 통한 보다 현실성 있는 운동감 제시 기술을 개발하였다. 이를 위하여 팔 운동감 제시기와 가상 환경이 통신을 통하여 실시간으로 운영되는 통합 시스템을 개발하였다. 따라서 피험자는 팔운동감 제시기를 조작하여 가상 현실을 통해 시각적으로 운동감을 경험하고, 가상 환경에서 발생하는 힘의 변화는 팔운동감 제시기를 통해 피험자로 전해지는 양방향 제어를 통해 운동감의 경험을 극대화시켰다. Fig. 4 는 이러한 양방향 제어의 개념을 나타낸 것이다.

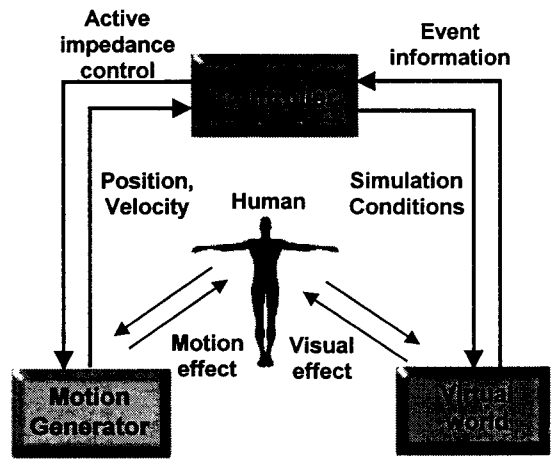


Fig. 4 Systematic diagram of complex system

4.1 가상 환경의 구성

팔운동감을 재현하기 위해 배에서 노를 젓는 팔운동감을 제시하는 상황을 구현하였다. 즉, 팔운동감 제시기의 조작으로 가상 환경에서 노를 젓고, 그와 실시간으로 연동하여 배가 전진하거나 후진하는 운동감을 시각적으로 제시하였다. 또한, 가상 환경에서 노를 저을 때, 사람 팔의 움직임을 시각적으로 제시하여 현실감 있는 팔운동감을 제시하였다. 이 때, 가상 현실을 도입하게 된 가장 큰 요인으로 팔운동감 제시기와 가상 환경의 실시간 연동을 통한 실시간 렌더링과 조작자의 의지가 반영되는 대화식 운영을 들 수 있다. Fig. 5 는 가상 환경에서 노를 젓는 상황을 나타낸 것이다.

4.2 힘의 모델링

가상 공간에서 노를 저을 때 발생하는 힘의 변화에 대한 모델링을 수행하였다. 노를 젓는 과정에서 유발되는 힘의 요인은 매우 다양하다. 노의 형상, 노의 이동속도, 물의 밀도, 물속에 잠긴 정도 등 다양한 요인에 의해 힘이 결정된다. 따라서 본 연구에서는 항력(drag force)에 의한 힘의 변화를 주요한 힘의

구현 목표로 설정하였다. Fig. 6 은 노가 수중에서 항력을 받는 힘의 모델링을 나타낸 것이다.



Fig. 5 Rowing in virtual environment

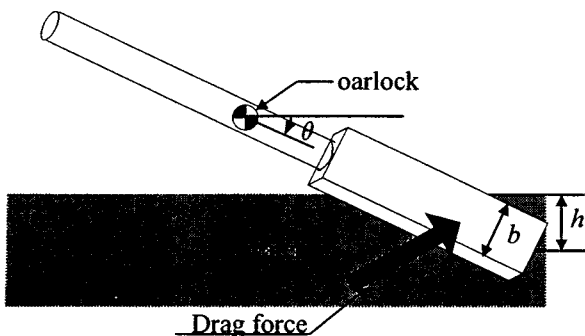


Fig. 6 Modeling of drag force

그림에서 보듯이 항력은 노의 이동 방향에 반대되는 방향으로 작용하고, 그 크기는 식 (10)과 같다.

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D V^2 S \quad (10)$$

여기서, C_D 는 항력 계수, ρ 는 물의 밀도, S 는 물에 잠긴 노의 단면적($S = bh / \sin \theta$), V 는 노의 이동 속도를 각각 나타낸다.

Fig. 5 에서 나타낸 노의 형태는 수직 평판으로 항력 계수는 2.0 으로 고정된 값이고, 노의 이동 속도와 물에 잠긴 노의 단면적은 실시간으로 변하는 값이다. 즉, V, h, θ 의 실시간 변화에 의한 항력이 팔운동감 제시기를 통해 구현된다.

또한, 본 연구에서는 C 형 단면과 반구형 단면의 노에 대한 힘에 대한 모델링을 수행하였다. C 형 단면과 반구형 단면의 경우 항력 계수는 각각 2.3, 1.4 로, 수직 평판의 노와 비교할 때 동일한 속도와 물에 잠긴 단면적일 때를 고려해보면, C 형 단면적의 노가 가장 큰 항력이 발생됨을 알 수 있다.

노를 저을 때 노가 수면 위에 있는 경우에는 수중과는 다른 힘을 경험하게 된다. 노의 하중에 의한 중력 방향의 힘이 가장 주요한 힘이 되고, 그 외의 요

인에 의한 힘은 상대적으로 비중이 작게 된다. 따라서 본 연구에서는 노가 수면 위에 존재할 경우의 힘은 노의 하중에 해당하는 힘을 중력 방향으로 일정하게 유지하는 방식을 채택하였다.

5. 결론

본 논문에서는 효과적으로 팔운동감을 제시하기 위하여 가상 현실을 구축하였고, 가상 현실과 연계된 팔운동감 제시를 위한 통합 시스템의 구축에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 시각에 반응하는 운동감의 재현과 실시간 제어를 위해 가상 현실을 도입하여 가상의 공간에서 노를 저는 상황을 제시하였다.
2. 노를 저을 때 발생하는 힘을 모델링하여 보다 사실적인 운동감의 경험이 가능하도록 하였다.
3. 가상 환경에서 발생하는 힘의 변화에 따른 사건 정보를 팔운동감 제시기의 능동 임피던스 제어를 통해 피험자가 경험할 수 있도록 하였다.
4. 실시간을 렌더링을 기반으로 한 양방향 제어를 통해, 팔운동감 제시기와 가상 현실간의 대화식 운영으로 피험자가 경험하는 운동감을 극대화시켰다

후 기

본 연구는 감성공학기술 개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Grigore, "Force and Touch feedback for Virtual Reality," A Wiley-Interscience Pub., pp. 20-21, 1996.
2. 이두용 외 16명, "한국과학기술원 자전거 주행 시뮬레이터," KSME 동역학 및 제어부문 - 생산 및 설계부문 공동학술대회 논문집, pp. 130-137, 1999.
3. 정웅철, 송재복, 김용일, "신경망을 이용한 운동감의 개인차 보상에 대한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집 Vol. 1, pp. 91-94, 1999.
4. Toshio, T., Kaneko, M., 1996, "Estimation and Modeling of Human Hand Impedance During Isometric Muscle Contraction" *Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division ASME* pp. 575-582.
5. 신동윤, 이세한, 송재복, 김용일, "운동감의 정량화를 위한 감성공학적 기법 개발에 관한 연구," 대한인간공학회 논문집, Vol. 17, No. 1, pp. 11-22, 1998.