힘 반향 조이스틱을 이용한 4 자유도 슬레이브 시스템의 힘 제어
Force Control of a 4-D.O.F Slave System using a Force-Feedback Joystick

*박형준 [1], #한창수 [1], 이지영 [1], 강민성 [2], 강성균 [3]
*Hyung-Jun Park[1], #Chang-Soo Han(cshan@hanyang.ac.kr)[1], Ji-Yeong Lee[2], Min-Sung Kang[2], Sung-Kyun Kang[3]
[1] 한양대학교 기계공학과, [2] 한양대학교 메카트로닉스공학과, [3] 한양대학교 지능형로봇학과

Key words : Force Control, Force-Feedback Joystick, Master-Slave Manipulator, Haptics

1. 서론

Haptics 는 가상환경 혹은 조종기와 로봇 등을 이용하여 원격의 환경에서 사용자에게 촉각 정보를 전달하는 연구의 총칭이다. 최근에는 가상물체에 대한 다양하고 정확한 정보를 사용자에게 전달하기 위하여 역감 및 촉감의 정밀한 구현의 필요성이 부각되고 있다[1]. Haptics 의 연구분야 중 햅틱 인터페이스는 모델링되어 있는 가상 환경 혹은 실제 환경의 물리적 특성을 사용자가 햅틱 디바이스를 통하여 똑같이 느끼게 하는 것이다[2]. 이러한 햅틱 장치는 손가락을 대상으로 개발하는 것이 유용한데, 이러한 의미에서 조이스틱은 인간의 촉감에 가장 예민한 부위인 엄지 손가락과 집게 손가락을 모두 사용하는 기구이므로 햅틱 장치 구현에 매우 적합하다[3].

조이스틱을 사용하는 굴착기는 토공 및 건설 환경에서 가장 많은 분야에 쓰이고 있으며, 건물해체, 재해복구 등의 매우 위험한 작업에도 활용되고 있다. 이러한 위험 지역에서의 작업은 굴착기의 원격제어 시스템 개발에 대한 필요성이 대두되었고, 많은 연구가 진행되었다. 그러나, 개발된 원격제어 시스템은 대부분 작업환경에 대한 정보가 2 차원 영상에 의존하여 작업자가 굴착 위치에 대한 깊이를 인지하기 어렵고, 작업 시간도 매우 오래 걸려 굴착기의 원격제어 적용 사례는 많지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안이 바로 굴착기의 버켓 반력을 인지하여 작업자에게 전달해 줄 수 있는 햅틱 기술이다. 따라서 본 논문에서는 굴착기에 적용할 수 있는 힘 반향 조이스틱을 4-D.O.F 의 머니퓰레이터에 적용하여 위와 같은 문제점을 해결할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 마스터-슬레이브 머니퓰레이터의 구성

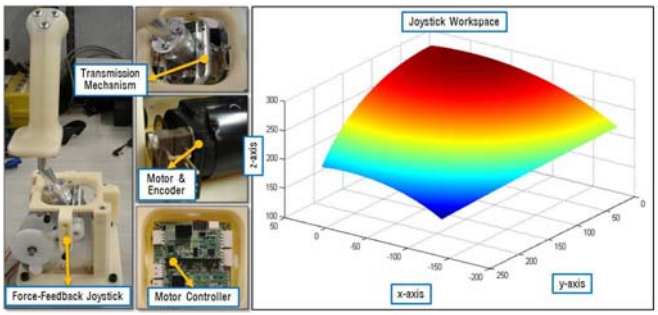
실제 굴착기는 6-D.O.F 이상의 제어 레버를 가지고 있으나, 하나의 단위 움직임에는 통상 2~3 개 이하의 액츄에이터가 동시에 움직이므로, 마스터와 슬레이브 머니퓰레이터는 4-D.O.F 를 확보하면 된다.

2.1 마스터 시스템의 구성

본 연구에서 개발한 힘 반향 조이스틱은 다중 이음쇠 형태의 전달 메커니즘을 적용하여 2-D.O.F 를 확보한다. 이러한 형태의 메커니즘은 두 연결부의 접촉을 제거함으로써 간섭을 완화시키고, 두 연결부 사이의 마찰을 감소할 수 있는 이점이 있다[4]. 또한, 실제 굴착기에서 사용되는 조이스틱의 설계 요소를 고려한 힘 반향 조이스틱을 설계함으로써 굴착기 레버의 작업 공간을 확보했다. 힘 반향을 위해 Fig. 1 (a)와 같이 두 개의 DC 모터를 사용하였으며, 토오크 증폭을 위해 기어 구조를 채택하였다. 그리고, 엔코더를 사용하여 모터를 서보화 시켰으며, 초기 원점 제어를 하기 위하여 축 당 한 개의 가변저항을 사용하였다. 마스터 시스템의 작업 공간은 속도제어를 하는 굴착기의 속도 범위와 매핑된다. 이에 구 좌표계(spherical coordinate)상의 조이스틱의 작업범위는 Fig. 1 (b)와 같다.

2.2 슬레이브 시스템의 구성

힘 반향 조이스틱을 사용하여 힘 제어할 슬레이브 시스템으로 Fig. 2 와 같이 6-D.O.F 머니퓰레이터인 FARA AS2 를 사용하였다. 굴착기의 모션을 구현하기 위해서 FARA AS2 의 4, 6 번 축을 구속시키고, 1 번 축을 선회장치(swing), 2 번 축을 붐(boom), 3 번 축을 아암(arm), 5 번 축을 버켓(bucket) 단으로 설정하여 굴착기와 똑같은 4-D.O.F 를 구현하였다. 또한, 버켓에 걸리는 반력을 인지하기 위하여 5 번 축에 F/T 센서를 부착하여 작업 시 주위 환경으로부터 전달되는 외력을 감지하여 사용자에게 전달하도록 설정하였다. 구성된 슬레이브 시스템의 기구학적인 인자를 통해 Denavit-Hartenberg 표기법에 따라 DH 테이블을 작성하면 Table. 1 과 같이 표현된다.



(a) Configuration of the joystick (b) Workspace of the joystick

Fig. 1 Force-feedback joystick

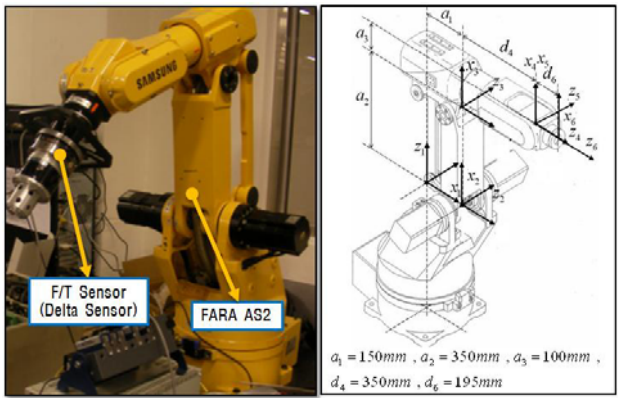


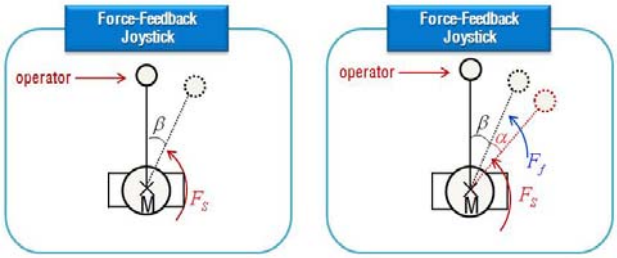
Fig. 2 Configuration of the slave system

Table 1 D-H (Denavit-Hartenberg) Table

Link No.	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	-π/2	a_1	0	θ_2-π/2
3	0	a_2	0	θ_3
4	-π/2	a_3	d_4	0
5	π/2	0	0	θ_4
6	-π/2	0	d_6	0

3. 힘 제어 알고리즘

사용자가 조이스틱을 조작하지 않을 경우 모터의 부하를 최소화 시키고, 조이스틱의 오작동을 방지하기 위해 조이스틱은 원점으로 복귀해야 한다. 또한, 사용자가 실제 조이스틱을 조종하는 것처럼 tension 을 느끼게 하기 위하여



(a) Force-feedback joystick (b) Force-feedback joystick considering reflection force

Fig. 3 The schematic diagram of the force-feedback joystick

다음과 같은 제어 알고리즘을 적용한다.

Fig. 3 (a)와 같이 본 연구에 적용된 힘 반향 조이스틱은 DC 모터를 통해 일반 조이스틱의 스프링의 역할을 대신한다. 앞서 언급했듯이, 조이스틱은 원점으로 복귀해야 하므로 조이스틱이 구동될 때의 각도를 β 라고 정의하면, 다음의 식이 성립된다.

$$\begin{aligned} \beta_{ref} &= 0° \\ e &= 0-\beta = -\beta \end{aligned} \tag{1}$$

그리고, 조이스틱의 스프링과 댐퍼 역할은 PD-Control 의 Gain 값을 통하여 구현하면 (2)식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_S &= K_P e + K_D \dot{e} \\ &= -K_P \beta - K_D \dot{\beta} \end{aligned} \tag{2}$$

(2)식에서 각 Gain 값의 조정을 통해 힘 반향 조이스틱의 tension 값을 사용자가 원하는 대로 조정할 수 있다. 또한, 슬레이브 시스템이 환경에 부딪쳤을 때 말단 효과 장치의 가상 위치 에러(virtual position error)값을 e_v 라고 정의하고, 사용자가 받는 총 힘을 F 라고 정의하면 Fig. 3 (b)를 통해 다음의 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} e_v &= 0-\alpha = -\alpha \\ F &= F_S + F_f \end{aligned} \tag{3}$$

(3)식에서 F_f 는 환경에 부딪쳤을 때의 반력을 의미한다. 따라서 $F_f = K_f e_v$ 로 표현될 수 있고, K_f를 P-Gain 값과 같은 값으로 두면, (3)식의 F 는 다음과 같이 다시 유도된다.

$$\begin{aligned} F &= -K_P \beta - K_D \dot{\beta} - K_f \alpha \\ &= -K_P(\beta+\alpha) - K_D \dot{\beta} \quad where,\ K_P = K_f \end{aligned} \tag{4}$$

(4)식을 통해 적절한 PD Gain 튜닝을 통해 사용자에게 환경에 대한 정보를 제공할 수 있다.

4. 실험 결과

실험을 하기 위해 구성한 힘 반향 조이스틱의 DC 모터 드라이버는 Freescale 사의 MC3387 을 사용하였으며, 모터 컨트롤러는 Microchip 사의 dsPIC33FJ128MC804 를 사용하였다. 본 연구에서는 환경센서로 사용되는 6 축 F/T 센서의 값 중 F_z 만을 제한적으로 사용하였다. 센서의 z 축에 대한 허용하중은 101[kg]이다.

실험결과 Fig. 5 와 같은 결과를 얻을 수 있었다. ‘A’구간에서 사용자는 오른쪽 조이스틱을 조작하여 슬레이브 시스템의 5 번 축(bucket)을 속도 제어하는 구간이다. ‘B’구간으로 넘어가면서 슬레이브 시스템의 말단 효과 장치는 환경에 접촉하게 되는데, 이 때의 반력이 힘 반향 조이스틱을 통해 사용자에게 전달이 되는 것을 조이스틱의 각도 감소를 통해 알 수 있다. ‘C’구간은 환경과의 접촉 이후 로봇이 환경으로 가하는 힘과 반력이 수렴함에 따라 조이스틱 또한 일정한 각도 값으로 수렴하는 구간이다.

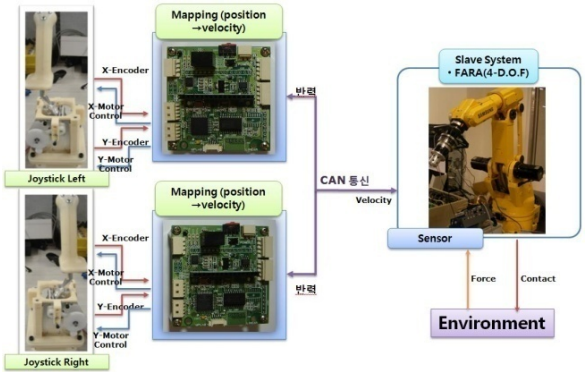


Fig. 4 The control block diagram of the total system

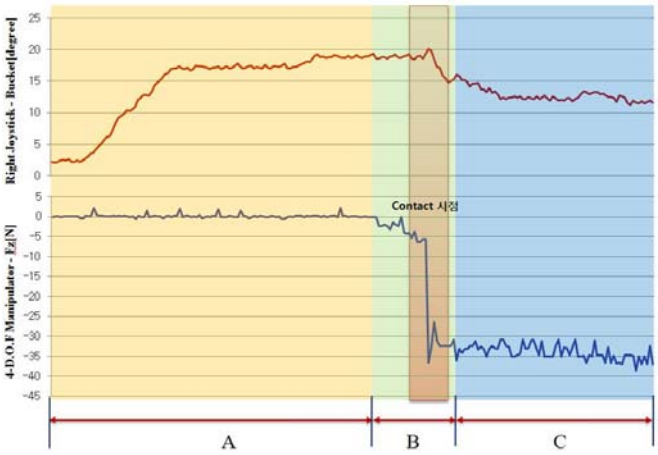


Fig. 5 The experimental result of the force control

5. 결론

본 연구에서는 개발한 힘 반향 조이스틱을 굴착기 모션을 수행할 수 있는 4-D.O.F 머니퓰레이터에 적용하여 그 성능을 평가하였다. 또한, 적절한 Gain 설정을 통해 작업자가 원하는 tension 을 설정할 수 있고, 작업 시 사용자에게 환경에 대한 정보를 제공해줌으로써 기존의 개발된 원격제어 시스템의 문제점을 해결할 수 있는 힘 제어 알고리즘을 제안하였으며, 실험을 통해 검증하였다.

향후 힘 반향 조이스틱과 힘 제어 알고리즘을 더 보완하여 실제 굴착기에 장착하여 성능평가를 진행할 예정이다. 또한, 굴착기 외에 다른 시스템에도 적용하여 범용적인 햅틱 인터페이스를 구현할 것이다.

후기

본 연구는 국토해양부(MLTM) 건설기술혁신사업(CTIP)과 지식경제부 산업원천기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 고애경, 최준영, 김홍철, 이장명, "힘 반향 조이스틱을 이용한 햅틱 인터페이스, " Journal of Control, Automation, and Systems Engineering Vol. 13, No. 12, 2007.
2. 경기욱, 박준석, "햅틱스 기술개발 동향 및 연구 전망," 전자통신동향분석 제 21 권 제 5 호, 93-108, 2006.
3. S. Weinstein, "Intensive and extensive aspect of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality, " The Skin Sense(Editor : D. R. Kenshalo), pp. 195-218, Springfield, 1968.
4. WEI-CHING LIN, KUU-YOUNG YOUNG, "Design of Force-Reflection Joystick System for VR-Based Simulation, " Jounal of Information Science and Engineering 23, pp. 1421-1436, 2007.