

병렬형 햅틱 기구를 이용한 굴삭기 조종 시스템 Application to Backhoe with a Parallel Haptic System

#소병록, *최등운, 원대희, 백승호, 백문홍

#B.R. So (newmal@kitech.re.kr), *D.W.Che, D.H.Won, S.H.Baeg, M.H.Baeg
한국생산기술연구원 융복합기술연구본부 로봇기술연구부

Key words : Parallel Haptic System, Backhoe, HRI

1. 서론

1950년대에 마스터/슬레이브 로봇 시스템이 제안된 이후로 원격 조종 시스템은 다양한 어플리케이션에 적용되어 왔으며, 최근에는 건설, 해저 및 우주 장비 등의 원격 및 무인화의 추세에 맞추어 보다 정확하고 안전한 적용을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

특히, 건설 중장비인 굴삭기(Backhoe)와 같은 다양한 Excavator의 조종을 위해서, 직렬형 구조[1,2]의 햅틱 장치와 Arm 착용형[3] 햅틱 장치가 적용되었고, 정밀한 굴삭기 제어를 위해 굴삭기의 기구학/동역학 모델링에 대한 연구가 수행되었다[4].

굴삭기와 같은 중장비는 실제 사용자는 두 개의 2 자유도 조이스틱에 의해 각 관절 레벨의 명령을 가할 수 있도록 되어있다. 이는 고속 및 정밀 조종을 위해서는 사용자의 숙련을 요구하기 때문에 조작방법을 간소화할 수 있다면 작업효율의 큰 향상을 가져올 수 있다. 이를 위해, 직관적으로 쉽게 조종에 접근하기 위한 햅틱 장치의 개발 및 적용이 필요하다.

본 논문에서는 굴삭기 조종을 위해 굴삭기의 내부/외부 위치 및 속도 기구학을 유도하고, Tsai[5]의 공간형 3자유도 매니플레이터와 1자유도 스크롤 타입의 장치로 이루어진 혼합형 햅틱 장치를 개발하여, PC 상의 시뮬레이터에 굴삭기와 햅틱 모델을 구현하여 가상 검증을 수행하였다.

2. 햅틱을 이용한 굴삭기 원격 조종 시스템

Fig. 1은 굴삭기의 원격 조종을 위한 시스템 블록도를 나타낸다. 작업자는 햅틱 장치, HMD, 및 3차원 가상환경 이미지 등으로 이루어진 가상 작업환경구현 시스템을 통해, 실제 환경에서의 작업 수행에 필요한 굴삭기의 말단 위치, 힘 및 3차원 환경 이미지를 전달 받으며, 굴삭기의 조종을 위해 햅틱 장치에 명령을 가할 수 있다. 사용자와의 유연한 인터페이스를 위해, 실제 환경의 굴삭기는 위치 및 힘 센서, 그리고 3차원 공간인지모듈로 구성된다.

Fig. 2는 햅틱 장치와 굴삭기의 제어를 위한 맵핑 관계를 나타낸다. 공간형 3자유도 햅틱 장치에 의해 작업 공간 상의 3개의 위치 입력값으로 굴삭기의 버킷의 말단(b_{u_bucket})을 조종하려고 하면, 1개의 여유자유도인해 버킷의 입사 각도를 제어하기 힘든 해를 얻을 수 있으므로, 유일한 하나의 해를 얻기 위해서는 굴삭기의 암(Arm)의 3개의 위치 명령을 햅틱부의 공간형 3자유도 말단의 명령과 맵핑하고, 굴삭기 최종단에서 나머지 하나의 버킷(Bucket) 조종은 햅틱 말단의 스크롤 조종부와 맵핑한다.

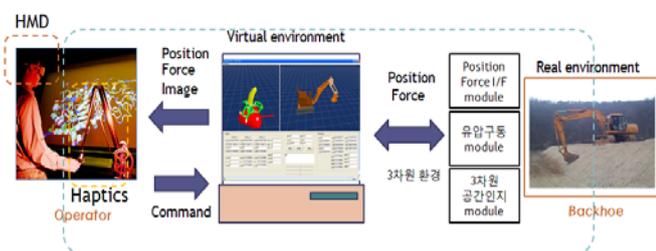


Fig. 1 Block diagram of remote control for backhoe

굴삭기 조종을 위한 병렬형 햅틱장치는 굴삭기의 암(arm)의 말단부의 위치를 제어하기 위한 공간형 3자유도 햅틱 기구와 굴삭기의 버킷(Bucket)의 각도를 제어하기 위한 1자유도 햅틱 장치를 포함하고 있다. 3자유도 병렬형 햅틱 장치는 Tsai[3]의 메커니즘을 이용하였으며, 굴삭기 버킷의 독립적인 조종을 위해 공간형 3자유도 햅틱 말단에 1자유도 명령을 부가할 수 있는 스크롤 타입의 조종부를 추가하였다.

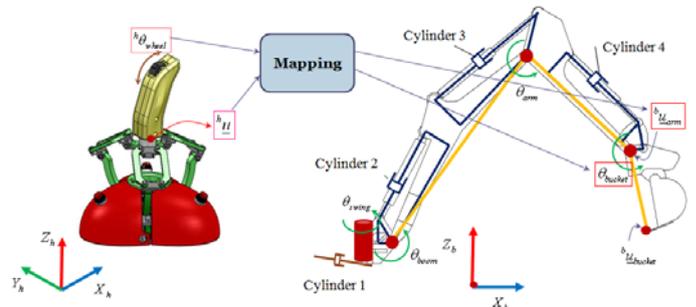


Fig. 2 Mapping of haptic and backhoe for control

3. 굴삭기 및 원격 조종기의 기구학 해석

Fig. 3은 굴삭기의 기구학 모델을 나타낸다. 굴삭기는 총 4자유도를 가지며, 각 관절들은 유압 실린더로 이루어진 페루프 구조의 구동 방식으로 구성되어 있다. 굴삭기 암(Arm)의 위치(b_{u_arm})에 대한 얻어진 각 회전 관절의 역기구학 해($\theta_{swing}, \theta_{boom}, \theta_{arm}$)와 독립적인 사용자 입력을 받은 버킷의 각도(θ_{bucket})은 각 체인별로 위치 레벨 내부기구학을 이용해 각 실린더의 길이($d_{swing}, d_{boom}, d_{arm}, d_{arm}$)를 얻을 수 있다. 또한, 암의 속도에 대한 회전 관절의 속도 해는 수식 (1)의 해로 얻을 수 있으며, 얻어진 해를 각 체인의 내부 기구학 수식 (2)에 대입하여, 각 실린더의 속도 명령을 얻을 수 있다.

Fig. 4는 제안된 햅틱 장치 모델과 실제 제작된 시제품으로, Tsai[5]가 제안한 공간형 3자유도 매니플레이터는 3개의 직렬형 체인으로 구성되어 있으며, 모터는 각 체인의 기저에 하나씩 삽입되어 있고, 각 체인은 5개의 관절들로 구성되어 있다. 각 체인의 기저 장착되어 있는 각도 센서 값을 정기구학 해를 이용해 사용자가 햅틱 장치에 부가되는 위치 명령(b_{u}) 및 속도 명령(\dot{b}_{u})을 얻을 수 있다.

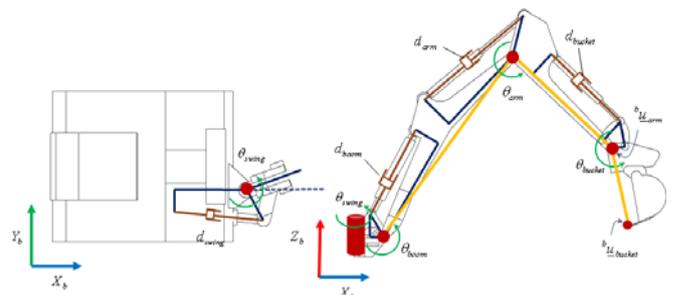


Fig. 3 Internal Kinematics of backhoe

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{swing} \\ \dot{\theta}_{boom} \\ \dot{\theta}_{arm} \end{bmatrix} = [G_{\phi}^{u_{arm}}]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_{arm} \\ \dot{y}_{arm} \\ \dot{z}_{arm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_{swing} \\ \dot{d}_{boom} \\ \dot{d}_{arm} \end{bmatrix} = [G_{\phi}^d] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{swing} \\ \dot{\theta}_{boom} \\ \dot{\theta}_{arm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

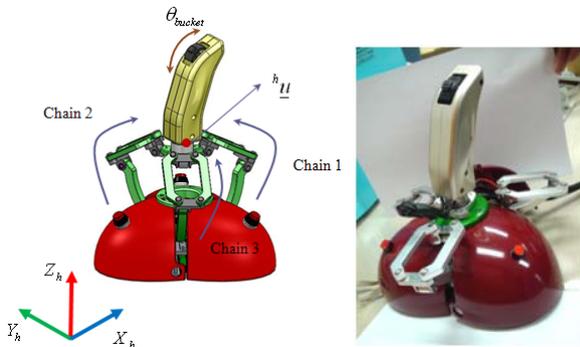


Fig. 4 Model of spatial 3-DOF haptic

4. 제어 알고리즘 및 시뮬레이션

Fig. 5는 햅틱장치와 굴삭기 제어를 위한 블록도를 나타내고 있다. 그림에서 상단의 햅틱 장치 알고리즘 모듈에서는 사용자에게 의해 부가되는 햅틱장치의 작업공간 위치/속도 명령과 힘 명령을 계산할 수 있다. 계산 되어진 각각의 명령으로 굴삭기는 위치/위치 제어, 위치/속도 제어 또는 위치/힘 제어를 수행할 수 있다. 여기서, 햅틱 장치와 굴삭기 간의 작업공간(Workspace) 맵핑에 의한 위치/위치 제어 방법은 두 장치 간 작업공간의 매칭이 어려우므로, 햅틱 장치와 굴삭기 간의 제어 방법은 위치/속도 제어를 사용한다. 하단의 위치/속도 제어에서는 기준 초기 위치에 대해 햅틱장치의 변화량을 굴삭기 암의 말단 속도(\dot{u}_{arm})와 맵핑시켜 준다. 다음으로 3장에서 설명된 속도레벨 관계식에 의해 굴삭기의 각 체인별 실린더의 선형 속도 명령을 계산해 굴삭기에 인가해 주면 굴삭기 내부의 로컬 제어기에서는 위치/속도 제어를 수행한다.

Fig. 6의 시뮬레이터에서는 OpenGL을 이용하여 햅틱장치와 굴삭기 모델링을 하였으며, 3장에서 구해진 기구학 해를 이용하여 실제 조종하고 있는 햅틱장치와 굴삭기를 시뮬레이션으로 검증한다.

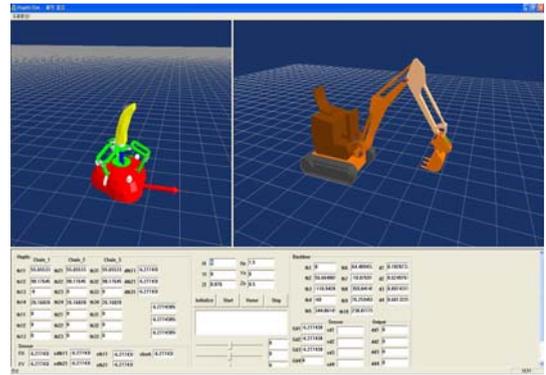


Fig. 6 Simulator of haptic and backhoe

5. 결론

이상으로 본 논문에서 제안된 햅틱 장치를 이용함으로써, 굴삭기의 조종이 1개의 스틱으로 굴삭기의 암(Arm)을 3자유도로 조종하고, 동시에 1자유도로 버킷을 작동함으로써, 통상적으로 2개의 스틱으로 굴삭기를 조종하는 것과 달리 매우 편리하게 암을 조작할 수 있고, 버킷의 작동 또한 보다 정교하게 수행할 수 있다. 추후 제안된 햅틱장치 시스템 및 제어 알고리즘을 실제 3차원 공간인지 모듈이 탑재된 굴삭기에 적용하고, 또한, 굴삭기의 각 체인별 실린더의 압력을 측정함으로써 햅틱 장치에 힘 반영 알고리즘을 보완 적용할 것이다.

참고문헌

1. 김동남, 오경원, 홍대회, 박종협, 홍석희, "굴삭기를 이용한 해체 장비용 햅틱 장치 설계," 한국 정밀공학회지, 25,95-102, 2008.
2. T. Hirabayashi, T. Yamamoto, H. Yano and H. Iwata, "Experiment On Teleoperation of Underwater Backhoe with Haptic Information," Proc. of ISARC, 36-41, 2006.
3. D. Kim, J. Kim, K. Lee, C. Park, J. Song and D. Kang, "Excavator Tele-Operation System using a Human Arm," Automation in Construction, Vol.18, 173-182, March, 2008.
4. J. G. Frankel, "Development of a Haptic Backhoe Testbed," M.S. Thesis, 2004.
5. L.W. Tsai, G.C. Walsh, and R.E. Stamper, "Kinematics of a Novel Three DOF Translational Platform," Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, 3446-3451, 1996.

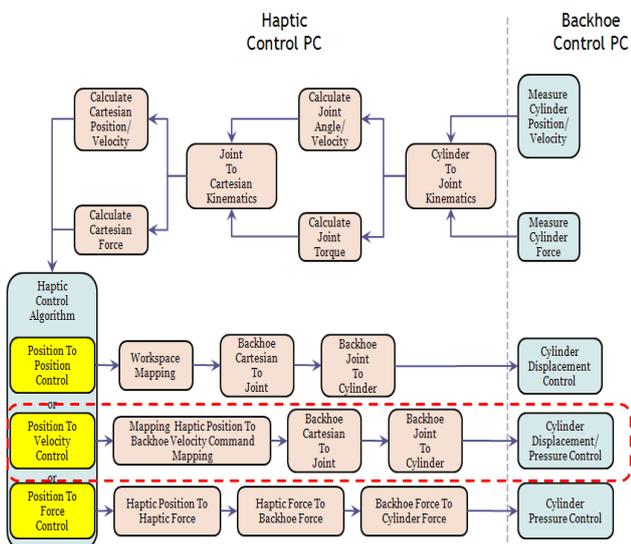


Fig. 5 Block diagram of control algorithm