

굴삭기를 이용한 해체 장비용 햅틱 장치 설계

김동남[†] · 오경원* · 홍대희** · 박종협***

Design of A Haptic Device for Dismantling Process Using Excavator

Dongnam Kim, Kyeongwon Oh, Daehie Hong and Jong-Hyup Park

Key Words : Haptic Device (햅틱 장치), Excavator (굴삭기), Inverse Kinematics (역기구학), Dismantling Process (해체 작업)

Abstract

Since the dismantling processes of building are very dangerous, there have been many studies to develop a remote operating devices using joystick. In this paper, in order to improve the operability of the dismantling actuator that is usually an excavator, a novel concept of tele-operated haptic device is proposed. Operators who use this haptic device with additional environmental sensing devices can work safely away from the dangerous sites. First, based on the concept design of the haptic device, the workspace mapping from the haptic device to the excavator is explored. Second, the kinematics which deals with the conversion from the 3 dimensional position information of the haptic device to the joint variable information of the backhoe is included. Lastly, 3D graphical simulation of both haptic device and the backhoe will be shown. This new design of the haptic device can be easily manufactured and gives the workers very convenient and transparent remote control capability.

기호설명

Z_{e1} : 굴삭기 swing 의 회전축
 Z_{e2} : 굴삭기 boom 의 회전축
 Z_{e3} : 굴삭기 arm 의 회전축
 Z_{e4} : 굴삭기 bucket 의 회전축
 a_2 : Z_{e2} 에서 Z_{e3} 까지의 거리(boom 의 길이)
 a_3 : Z_{e3} 에서 Z_{e4} 까지의 거리(arm 의 길이)
 r_{13} : Z_{e2} 에서 Z_{e4} 까지의 거리
 θ_{ei} : 굴삭기의 Z_{ei} 축에 해당하는 링크의 회전 각도 ($i=1,2,3,4$)
 $\theta_{h1}, \theta_{h2}, d_{h3}, \theta_{h4}$: 햅틱 장치에서 각 링크의 joint variable

1. 서론

현대 도시 개발의 모습을 살펴보면 초고층 빌딩과 주거용 대단지가 건축되고 있는 건설 현장을 쉽게 발견할 수 있다. 그러나 건설을 하기 위한 토지는 정해져 있기 때문에 이미 지어진 건축물을 리모델링하거나 해체 하는 현장 또한 주변에서 쉽게 볼 수 있다. 이러한 현장에서 건물 해체를 하는 공법에는 여러 가지가 있으나, 주변 환경과 건물의 규모 등에 따라 그 제약이 많이 따르고 있어 건설 중장비를 이용한 기계식 해체가 많이 이루어지고 있다. 특히, 건물 증축에 사용되는 중장비들이 해체 현장에서 그대로 쓰이는 경우를 많이 볼 수 있으며, 이러한 해체 현장에서 쓰이는 장비로는 크리셔와 같은 장비를 부착하여 다양한 용도로 사용이 가능한 굴삭기를 대표적인 예로 들 수 있다. 그러나 해체 현장에서 운전자가 이러한 굴삭기에 직접 탑승하여 건물을 해체하는 작업은 매우 위험한 작업이다. 따라서 운전자의 안전을 보장하기 위해서는 원격으로 해체 장비를 조종할 수 있는 원격 조종 장치가 필수적이다.

[†] 회원, 고려대학교 기계공학과 대학원
E-mail : smileast@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3765 FAX : (02)926-9290

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 기계공학과

*** ㈜ 내경엔지니어링

건설 현장에서 사용되는 장비의 기구학에 대한 해석과 함께 3D 모델링 시뮬레이션은 Frimpong⁽¹⁾에 의해 이루어진 결과가 있으며, 더 나아가 장비의 원격 조종에 관한 연구는 Joseph⁽²⁾에 의해 phantom 햅틱 장치를 이용하여 굴삭기를 제어한 연구 결과가 있다. Taketsugu⁽³⁾는 수중이라는 극한의 상황에서 작동되는 굴삭기를 햅틱 장치를 이용하여 제어한 결과를 보고하였으며, Takahiro⁽⁴⁾는 굴삭기에 공압 로봇을 탑재하여 조종바를 제어할 수 있는 시스템을 개발하였다.

본 논문에서는 해체 장비에서 많이 사용되는 굴삭기를 대상으로 하여 원격 조종을 하기 위한 장치에 대해 다룬다. 원격 조종 장치는 굴삭기의 각 링크가 가지고 있는 자유도를 그대로 반영하여, 3 차원 동작을 할 수 있어야 한다. 더 나아가 굴삭기가 해체 작업을 할 시에 받는 부하는 매우 크며, 심지어 작업이 불가능할 정도의 반력을 받을 수도 있다. 따라서 원격으로 조종하는 운전자가 이러한 반력을 파악하지 못하면, 무리한 조종을 할 수 밖에 없으므로 원격 조종 장치는 조종자에게 힘 반향 정보를 전달할 수 있는 햅틱 장치로서의 역할을 해야 한다. 본 논문에서는 굴삭기를 운전자가 효율적으로 운전할 수 있도록 새롭게 햅틱 장치를 설계하여 기구학 모델링을 하였으며, 동시에 조종 대상인 굴삭기의 기구학 모델링을 수행하였다. 이를 바탕으로 햅틱 조종 장치와 굴삭기의 연동에 관한 기본적인 변환 관계를 정립하였으며, 이를 시뮬레이션 하기 위하여 OpenGL 을 이용한 뼈대 형태의 3 차원 모델링을 하였다.

2. 굴삭기 기구학 모델링

2.1 햅틱 장치 설계를 위한 굴삭기 기구학 해석
굴삭기의 종류는 여러 가지가 있으나, 본 논문에서 다룬 굴삭기는 swing(스윙), boom(붐), arm(암), bucket(버킷)의 네 가지 동작을 하는 일반적으로 쉽게 볼 수 있는 굴삭기로 정한다. 이에 따라 굴삭기 각 링크의 좌표계와 네 가지 동작의 움직임을 Fig. 1 에서 나타내고 있다.

Fig. 1 에서 굴삭기의 스윙 조인트 축을 베이스 좌표계의 Z_{e1} 축으로 설정하며, 나머지 세개의 조인트 축을 붐, 암, 버킷의 순서대로 Z_{e2} , Z_{e3} , Z_{e4} 로 한다. 스윙을 제외한 나머지 조인트는 평행하게 그림과 수직한 방향을 가리키며, 그림에서는 Z 축 대신에 X 축을 차례대로 표기하였다.

굴삭기를 모델링하여 순기구학과 역기구학을 해

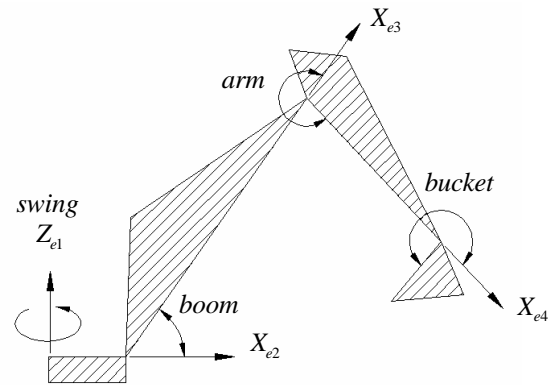


Fig. 1 Kinematic modeling of excavator

석한 연구는 이미 많이 진행되었으나, 햅틱 장치와 연동시키기 위해서는 특히, 역기구학 해석이 중요하다. 햅틱 장치에서 사용자가 최종적으로 원하는 것은 굴삭기의 버킷을 제어하는 것이므로, 결과적으로 햅틱 장치에 의해 굴삭기 버킷의 자세가 정해지게 된다. 버킷의 자세에 따라 굴삭기의 스윙, 붐, 암, 버킷의 회전각도가 결정되며, 이것은 역기구학 해석을 통해 얻을 수 있다.

굴삭기는 4 자유도를 가지면서, 동시에 버킷은 3 차원 공간에서 운동이 가능하다. 따라서 햅틱 장치의 조종바를 3 차원 공간상에서 움직일 수 있도록 하는 것이 정상적인 햅틱 장치의 설계 방안이다. 그러나 실제 굴삭기의 운전 패턴을 살펴보면 스윙 동작은 굴삭기의 주요 작업인 굴착 작업과 무관한 자유도를 나타낸다. 즉, 굴착 작업은 붐, 암 그리고 버킷의 3 자유도에 의한 버킷의 2 차원 동작으로 정해지며, 스윙 동작은 버킷에 담겨진 것을 측면의 다른 곳으로 운반하기 위해 필요하다. 따라서 햅틱 장치 설계시 스윙 동작은 따로 조작할 수 있도록 하는 것이 운전자 입장에서 매우 편리하며, 현재의 굴삭기 조종바가 이와 같이 설계되어 있다.

위와 같은 이유로 앞으로 소개할 햅틱 장치에서 사용될 굴삭기의 기구학 모델링은 붐, 암, 버킷에 의한 2 차원 평면 문제로 귀결되며, 다음 절에서 이 역기구학 해석을 다룬다.

2.2 굴삭기 기구학 해석

햅틱 장치를 사용할 때 굴삭기 버킷 위치와 각도는 절대 좌표계에 대한 햅틱 장치의 조종바 좌표로부터 얻을 수 있다. 실제로 굴삭기를 조종하기 위해서는 버킷팁의 위치와 동시에 버킷의 각도가 중요하다. 그러나 이를 운전자가 쉽게 인식하기 위해서는 버킷팁의 위치와 버킷 각도 대신에 버킷의 회전축 위치(암과 버킷이 연결된 조인트)와 버킷의 각도로 조종하는 것이 훨씬 편리하다. 따라서 햅틱 장치를 위한 굴삭기의 역기구학을 해석하기 위해서 필요한 정보는 암의 끝점이다. 즉, 암의 끝점(4 번 좌표계의 원점)으로부터 붐과 암의

각도를 계산하는 역기구학 해석을 필요로 한다.

다음 식 (1)과 (2)는 2 번 좌표계(붐의 회전축을 포함한 좌표계)에서 본 4 번 좌표계의 원점(암의 끝점)의 좌표로부터 붐과 암의 각도를 계산하는 역기구학 식이다.

$$\theta_{e3} = \pi + \cos^{-1} \left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - r_{13}^2}{2a_2a_3} \right) \quad (1)$$

$$\theta_{e2} = \tan^{-1} \left(\frac{r_{13}(y)}{r_{13}(x)} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{a_2^2 + r_{13}^2 - a_3^2}{2a_2r_{13}} \right) \quad (2)$$

앞서 설명한 바와 같이 버킷의 각도 또한 스윙과 마찬가지로 조종자가 직관적으로 파악할 수 있도록 햅틱 장치에서 다른 조종바를 만드는 것이 더 효율적이다. 이러한 관점에서 버킷팁의 자세 제어 보다는 버킷 회전축 위치와 회전각을 제어하는 것이 중요하기 때문에 버킷의 자세를 정하기 위한 역기구학 해석은 따로 필요하지 않다.

3. 햅틱 장치의 설계

3.1 햅틱 장치의 설계 고안

본 논문에서 고안한 햅틱 장치는 운전자가 굴삭기 작업을 하면서 버킷의 위치와 각도에 대한 정보를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 따라서 초보자가 기존의 복잡한 굴삭기 조종 방식에서 벗어나 손쉽게 굴삭기를 조작할 수 있는 장점을 가지고 있다. Fig. 2 는 본 논문에서 고안된 햅틱 장치의 개념도에 해당한다. Fig. 2 에서 좌표계는 Denavit-Hartenberg 좌표계를 사용하였으며 각 좌표 변환에 사용되는 파라미터 값은 Table 1 에 나타나 있다. 전체 자유도는 4 자유도이나 스윙과 버킷의 각도 제어는 운전자의 편의성을 위해 햅틱 장치 2 개의 자유도와 직접 연동된다. 즉, θ_{h1} 은 스윙을 제어하며, θ_{h4} 는 버킷의 각도를 직접 제어한다. 암의 끝점 제어는 햅틱 장치의 θ_{h2} 와 d_{h3} 에 의하여 제어되므로, 역기구학 해석에 의하여 굴삭기의 붐과 암의 각도(θ_{e2}, θ_{e3}) 계산이 이루어진다.

Fig. 3 은 햅틱 장치의 각 링크가 조작되는 모습을 나누어 표현한 그림이다. Fig. 3 (a)는 스윙 동작을 제어하는 모습으로써, 정해진 각도로 햅틱 장치의 조종바가 조작된 경우 그 방향으로 굴삭기가 스윙하도록 한다. 즉, 온/오프의 개념으로 굴삭기가 동작하며 방향만 정해줄 뿐이다. 이것은 스윙 동작을 할 때는 운전자가 스윙 동작에 대한 힘반향을 받을 필요가 없는 경우가 대부분이기 때문이다. Fig. 3 (b)와 (c)는 앞서 설명한 바와 같이 굴삭

기의 버킷 회전축 위치를 제어하기 위해 필요한 정보로 θ_{h2} 와 d_{h3} 의 움직임을 보여준다. 따라서 운전자는 평면상에서 햅틱 장치의 조종바 위치를 임의로 정할 수 있으며 이 정보가 굴삭기에 전달되어 버킷 회전축 위치를 결정하는 θ_{e2} 와 θ_{e3} 의 구동이 이루어진다

마지막으로 굴삭기 버킷의 각도인 θ_{e4} 는 작업을

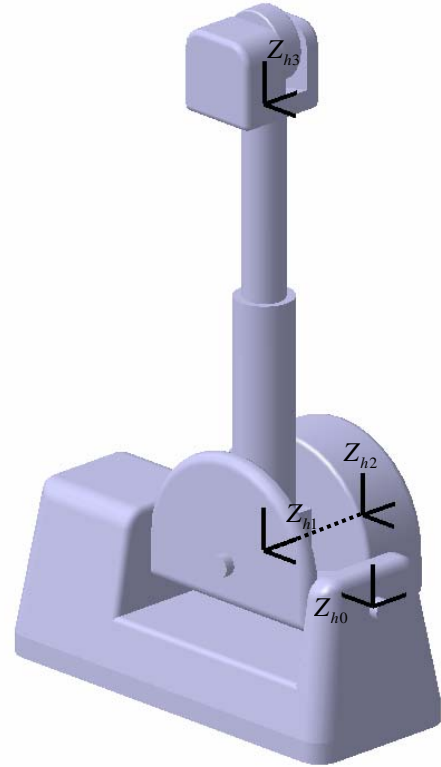


Fig. 2 D-H coordinate of haptic device

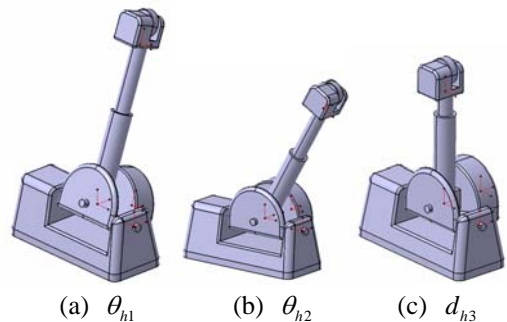


Fig. 3 Motion of haptic device

Table 1 DH-parameter of haptic device

	θ_{hi}	α_{hi}	a_{hi}	d_{hi}
2	$\pi/2 + \theta_{h2}$	$-\pi/2$	0	0
3	0	0	0	d_{h3}

할 때 직접적으로 힘을 받기 쉬우며, 굴착 작업의 효율성을 위해 버킷의 끝점 제어보다는 버킷 회전축에서 각도 제어를 직접 하는 것이 유리하다. 따라서 햅틱 장치에서는 썸휠(thumb wheel)과 같은 조작성이 편한 장치를 이용하여 조종바의 끝에 부착하고 이 썸휠의 각도 θ_{h4} 가 바로 θ_{e4} 를 제어하도록 한다.

3.2 햅틱 장치의 기구학 해석

앞서 햅틱 장치의 각 링크에 대한 좌표계를 설정하였으며 베이스 프레임에서 햅틱 장치 조종바의 위치 좌표를 나타내기 위하여 각 링크에서 좌표 변환하기 위한 변환 행렬 T 는 다음과 같이 정의된다.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

햅틱 장치와 굴삭기와의 연동 과정을 살펴보았을 때 θ_{h2} 와 d_{h3} 에 의해 굴삭기 암의 끝점이 제어되므로 변환을 위한 행렬 T 는 1T_2 와 2T_3 두 행렬의 곱으로 이루어지며 행렬의 각 요소는 DH 파라미터를 위 식에 대입하여 구할 수 있다. 순기 구학 해석은 θ_{h2} 와 d_{h3} 의 값이 주어졌을 때 조종바의 좌표 위치를 구하는 것이며 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$${}^1P = {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3P \quad (4)$$

1P 는 1 좌표계에서 바라본 조종바의 위치 벡터이며, 3P 는 3 좌표계에서 바라본 조종바의 위치 벡터이다. 그러나 조종바의 위치 좌표는 3 좌표계의 원점을 나타내기 때문에 ${}^3P = (0, 0, 0, 1)^T$ 와 같다. 따라서 햅틱 장치가 조작되어 θ_{h2} 와 d_{h3} 가 변경되면 그에 따른 조종바의 좌표가 계산되고 이 정보가 굴삭기가 움직여야 할 위치로 결정된다.

4. 굴삭기와 햅틱 장치 사이의 맵핑

4.1 효율적인 굴삭기 조작을 위한 맵핑

운전자가 조작하는 햅틱 장치는 그 조종바의 위치와 썸휠의 각도에 따라 그 좌표 값이 피드백되어 굴삭기의 각 링크 각도를 계산하게 된다.

앞서 설명한 바와 같이 굴삭기의 스윙은 θ_1 에 의해 결정되는 데 이 θ_1 을 결정하는 링크는 단지 온/오프만을 제어한다. 따라서 θ_1 이 음수를 가지게 되면 굴삭기는 왼쪽으로 스윙하게 되며 θ_1 이

양수가 되면 오른쪽으로 스윙하게 설정한다.

다음으로 굴삭기의 붐과 암의 각도인 θ_{e2} 와 θ_{e3} 는 햅틱 장치의 θ_{h2} 와 d_{h3} 에 의해 결정이 된다. 먼저 동작이 되는 햅틱 장치 조종바의 1 좌표계에 대한 위치를 읽는다. 이것은 앞 절에서 구한 햅틱 장치의 순기 구학 식에서 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 햅틱 장치의 위치 값을 굴삭기 좌표계에서의 위치로 스케일링한다. 실제 굴삭기와 햅틱 장치는 그 워크스페이스의 비율이 있으므로, 햅틱 장치의 크기와 제어하려는 굴삭기의 크기가 정해지면 그 비율을 정해야 한다. 그러나 본 논문에서 이루어진 시뮬레이션에서는 햅틱 장치와 굴삭기의 워크스페이스를 1:1로 정하였으므로, 햅틱 조종바의 좌표가 곧 굴삭기 베이스 좌표계에서의 암의 끝점과 동일하다고 설정하였다. 따라서 굴삭기 좌표계에서는 정해진 암의 끝점으로부터 θ_{e1} 과 θ_{e2} 를 구하며, 이것은 앞서 굴삭기 기구학 모델링에서 구하였다.

마지막으로 θ_{h4} 의 값을 정해주는 조종바에 부착된 썸휠은 버킷 각도와 연동이 되는데, 이것 또한 본 논문의 시뮬레이션에서는 1:1 비율로 움직이도록 정하였다. 이 비율을 바꿈에 따라 조작자가 버킷을 미세하게 제어할 수 있는 정도를 설정할 수 있다.

5. 시뮬레이션

5.1 햅틱 장치 시뮬레이션 프로그램

굴삭기의 각 링크 각도와 햅틱 장치와의 연동을 살펴보았다. Fig. 4와 Fig. 5에서는 햅틱 장치와 굴삭기의 연동 과정을 시뮬레이션하기 위해 간단한 뼈대 형태로 모델링 한 그림이다. 각 그림에서 왼쪽 그림은 굴삭기가 동작하는 모습을 나타내며, 오른쪽 그림은 햅틱 장치가 조종되는 모습을 나타낸다. Fig. 4는 햅틱 장치의 θ_{h2} 와 d_{h3} 에 의하여 굴삭기 붐과 암이 움직이는 모습을 나타내며 Fig. 5는 햅틱 장치의 θ_{h1} 제어로 굴삭기가 스윙하는 모습을 보여주고 있다. 또한 뼈대 모델링에서 햅틱 장치의 썸휠은 그림에서 보는 바와 같이 링크를 추가로 부착하여 그 회전 모습을 쉽게 확인할 수 있도록 표현하였다. 시뮬레이션 프로그램은 실시간으로 움직이도록 작성되었으며, 실제 햅틱 장치를 마우스와 키보드가 움직일 수 있도록 코딩하였다. 마우스의 2차원 평면 운동을 굴삭기의 붐과 암 제어, 마우스의 썸휠을 버킷, 마지막으로 키보드의 왼쪽, 오른쪽 화살표키를 스윙 제어로 설정하여 실제 햅틱 장치의 움직임과 그에 따른 굴삭기의 동작 모습을 시뮬레이션 하였다. 햅틱 장치가 존재하지 않아 햅틱 장치의 유저 인터페이스에 관한 고려는 아직 이루어지지 않은 상태이나, 굴

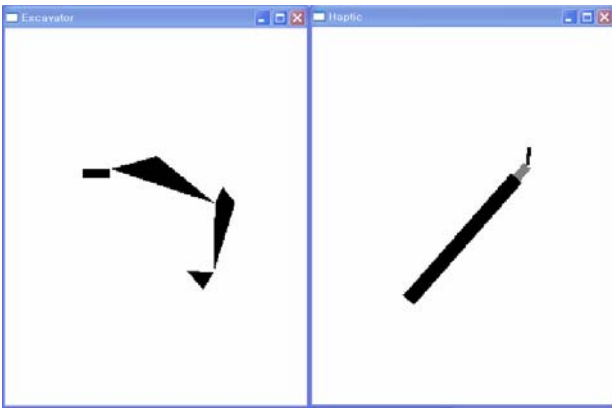


Fig. 4 Bucket control with haptic device

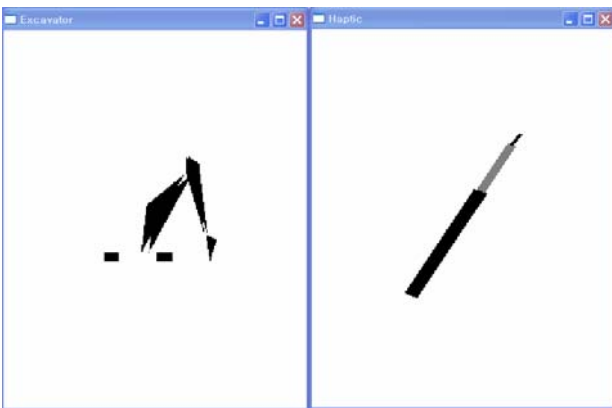


Fig. 5 Swing control with haptic device

삭기의 움직임을 운전자가 직관적으로 이해할 수 있는 장점을 본 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 본 프로그램은 Open GL 을 사용하여 Visual C++ API 에서 작성하였으며, Open GL graphic 을 이용하여 차후에 굴삭기나 햅틱 장치의 그래픽적인 요소를 더욱 강화할 수 있는 장점이 있다.

6. 결론

현재는 고층 건물들이 지어진 이후 일정한 시간이 흘러 다시 이러한 건물들을 해체할 시기가 되었다. 뿐만 아니라 시간이 지날수록 더욱 높은 건물들을 해체하는 기술을 확보해야 하는데, 고층 건물일수록 해체 작업은 점점 위험해 지고 있다. 이러한 문제가 있어 본 논문에서는 원격으로 해체 장비를 조종하기 위한 해체 장비용 햅틱 장치 설계가 필수적이라 판단하여 운전자가 쉽게 접근할 수 있는 햅틱 장치를 고안하였다. 고안된 햅틱 장치와 제어하고자 하는 굴삭기의 기구학 해석을 통해 운전자가 조종하는 햅틱 장치의 데이터가 어떻게 굴삭기를 움직일 수 있는지 살펴보았다. 또한 굴삭기와 햅틱 장치 사이의 맵핑을 프로그래밍하여 실시간으로 조작되는 시뮬레이션을 완성하였으

며, 기존 조종 장치와는 달리 직관적으로 초보자가 쉽게 굴삭기를 조종할 수 있다는 장점을 확인하였다.

이후에는 뼈대 모델링에서 벗어나 굴삭기의 모델링을 더욱 구체화하여 유압실린더까지 고려한 기구학 해석을 필요로 한다. 더 나아가서는 설계된 햅틱 장치를 실제로 제작하여 모델링 된 굴삭기를 제어하는 연구를 추가적으로 수행해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(과제번호 “06 건설핵심 B04”)과 BK21 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) S. Frimpong, Y. LI, 2005, “Virtual prototype simulation of hydraulic shovel kinematics for spatial characterization in surface mining operations” International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment Vol. 19, No. 4, pp. 238~250.
- (2) J. G. Frankel, 2004, “Development of a Haptic Backhoe Testbed”, A Thesis of Master of Science, School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology.
- (3) T. Hirabayashi, T. Yamamoto, 2006, “Experiment of Teleoperation Of Underwater Backhoe With Haptic Information”, Proceedings 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp. 36~41.
- (4) T. Sasaki, T. Nagai, K. Kawashima, 2006, “Remote Control of Backhoe for Rescue Activities Using Pneumatic Robot System”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3177~3182.