

굴삭기를 이용한 해체 장비용 원격 조종 장치 설계

김동남*, 오경원*, 홍대희#, 박종협**, 홍석희**

Design of a Remote Controller for Dismantling Processes Using Excavator

Dongnam Kim*, Kyeongwon Oh*, Daehie Hong#, Jong Hyup Park** and Suk Hie Hong**

ABSTRACT

Since the processes of dismantling are very dangerous, there have been many studies to develop remote operating devices using joystick. In this paper, in order to improve the operability of the dismantling equipment that is usually an excavator, a novel concept of tele-operated device is proposed. Operators who use this device with additional environmental sensing devices can work safely away from the dangerous sites. First, based on the concept design of the remote controller, its workspace is analyzed and the workspace mapping from the device to the excavator is explored. Second, after 7 steps of the excavating processes are defined, the kinematics which deals with the conversion from the 3 dimensional position information of the device to the joint variable information of the backhoe is included in this paper. Lastly, 3D graphical simulation of both remote controller and the backhoe will be shown. This new design of the remote control device can be easily manufactured and gives the workers very convenient and transparent remote control capability.

Key Words : Remote Controller (원격조종), Excavator (굴삭기), Inverse Kinematics (역기구학), Dismantling Process (해체 작업)

기호설명

Z_{e1} : Axis of swing joint
 Z_{e2} : Axis of boom joint
 Z_{e3} : Axis of arm joint
 Z_{e4} : Axis of bucket joint
 a_2 : Distance between Z_{e2} and Z_{e3}
 (Length of boom)
 a_3 : Distance between Z_{e3} and Z_{e4}

(Length of arm)

r_{13} : Distance between Z_{e2} and Z_{e4}
 θ_{ei} : Rotational angle of each link ($i = 1, 2, 3, 4$)
 $\theta_{h1}, \theta_{h2}, d_{h3}, \theta_{h4}$: Joint variable of each link at remote controller device

1. 서론

현대 도시 개발의 모습을 살펴보면 초고층 빌

접수일: 2007년 7월 30일; 게재승인일: 2007년 3월 21일

* 고려대학교 기계공학과

교신저자: 고려대학교 기계공학과

E-mail: dhhong@korea.ac.kr Tel. (02) 3290-3369

** ㈜ 내경엔지니어링

딩과 주거용 대단지가 건축되고 있는 건설 현장을 쉽게 발견할 수 있다. 그러나 건설을 하기 위한 토지는 정해져 있기 때문에 이미 지어진 건축물을 리모델링 하거나 해체하는 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 크러셔와 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.

건설 현장에서 사용되는 장비의 기구학에 대한 해석과 함께 3D 모델링 시뮬레이션은 Frimpong¹에 의해 이루어진 결과가 있으며, 더 나아가 장비의 원격 조종에 관한 연구는 Frankel²에 의해 phantom 햅틱 장치를 이용하여 굴삭기를 제어한 연구 결과가 있다. Hirabayashi³는 수중이라는 극한의 상황에서 작동되는 굴삭기를 햅틱 장치를 이용하여 제어한 결과를 보고하였으며 이외에 로봇 시스템에 관한 다양한 연구 결과가 있다.^{4,5}

그러나 기존 연구의 경우에는 이미 상용화된 햅틱 장치를 사용하여 굴삭기의 원격 조종에 적용한 결과를 다루고 있다. 이렇게 적용된 기존 햅틱 장치는 6 자유도 또는 3 자유도로서 4 자유도의 굴삭기 조작에는 적절하지 못한 특성이 있다. 즉, 기존 햅틱 장치는 굴삭기의 메인 링크에 해당하는 붐, 암, 버킷의 2 차원 동작을 필요 이상의 자유도를 사용하여, 오히려 조작자가 직관적으로 쉽게 조작할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 굴삭기 조종 시 굴삭기의 각 링크가 가지고 있는 작업 특성을 고려하지 않아 이러한 문제가 발생하였다. 그러나 이러한 점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 새롭게 원격 조종 장치를 설계하였으며, 더 나아가 해체 시 위험한 상황을 운전자가 파악하기 위하여 힘 반향 메커니즘을 적용할 수 있도록 원격 조종 장치의 기본 틀을 설계하였다. 설계된 조작 장치는 직관적으로 굴삭기의 움직임을 대신할 수 있어 다

른 조종 장치와는 달리 초보자도 쉽게 운전할 수 있는 장점을 가지고 있다.

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. 따라서 본 논문에서는 간단하게 힘 반향 메커니즘의 적용 가능성을 설명하며, 이후에는 조종 장치를 햅틱 장치라 하였다. 본 논문에서는 햅틱 장치의 기구학 모델링을 하였으며, 동시에 조종 대상인 굴삭기의 기구학 모델링도 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 하였고 이를 바탕으로 굴삭기 굴착 모션을 시뮬레이션 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. 1에서 나타내고 있다.

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

굴삭기를 모델링하여 순기구학과 역기구학을 해석한 연구는 이미 많이 진행되었으나, 햅틱 장치와 연동시키기 위해서는 특히, 역기구학 해석이

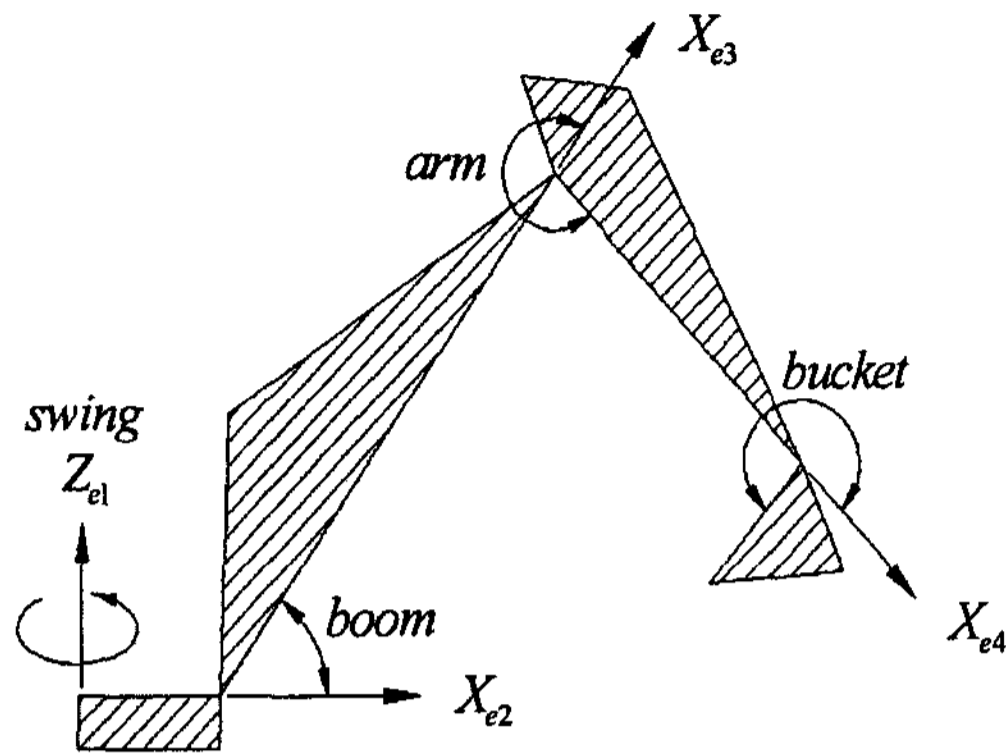


Fig. 1 Kinematic modeling of excavator

중요하다. 햅틱 장치에서 사용자가 최종적으로 원하는 것은 굴삭기의 버킷을 제어하는 것이므로, 결과적으로 햅틱 장치에 의해 굴삭기 버킷 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, 버킷의 3 자유도에 의한 버킷의 2 차원 동작으로 정해지며, 스윙 동작은 버킷에 담겨진 것을 측면의 다른 곳으로 운반하기 위해 필요하다. 따라서 햅틱 장치 설계 시 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 위

해서는 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.

$$\theta_{e2} = \tan^{-1} \left(\frac{r_{24}(y)}{r_{24}(x)} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{a_2^2 + r_{24}^2 - a_3^2}{2a_2r_{24}} \right) \quad (1)$$

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

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.

2.3 굴삭기의 작업 영역 분석

Fig. 2 는 측면에서 본 굴삭기의 작업 영역을 나타낸다. Fig. 2 를 살펴보면 우선 이중 실선으로 되어 있는 부분은 2m 길이의 굴삭기 붐을 나타낸다. 그리고 굵은 실선으로 되어 있는 부분은 굴삭기의 암을 나타내고 길이는 1.4m 이다. 가위 표시된 영역은 붐 조인트가 점 (1m, 1m) 에 위치하고 있고 -30° 에서 60° 의 범위로 움직일 때 붐의 끝부분이 도달할 수 있는 영역이다. 점으로 표시된 영역은 붐의 회전 범위 내에서 암이 240° 에서 360° 사이에서 회전할 때 도달 가능한 범위를 나타낸다.

앞서 설명한 대로 버킷팁의 자세 제어 보다는 버킷의 회전축의 위치가 더 중요하기 때문에 굴삭기의 작업 영역을 판단하기 위해서는 버킷 회전축이 도달할 수 있는 영역을 통해 알 수 있다. 즉 점으로 표시된 영역을 굴삭기의 작업 영역이라 할 수 있다.

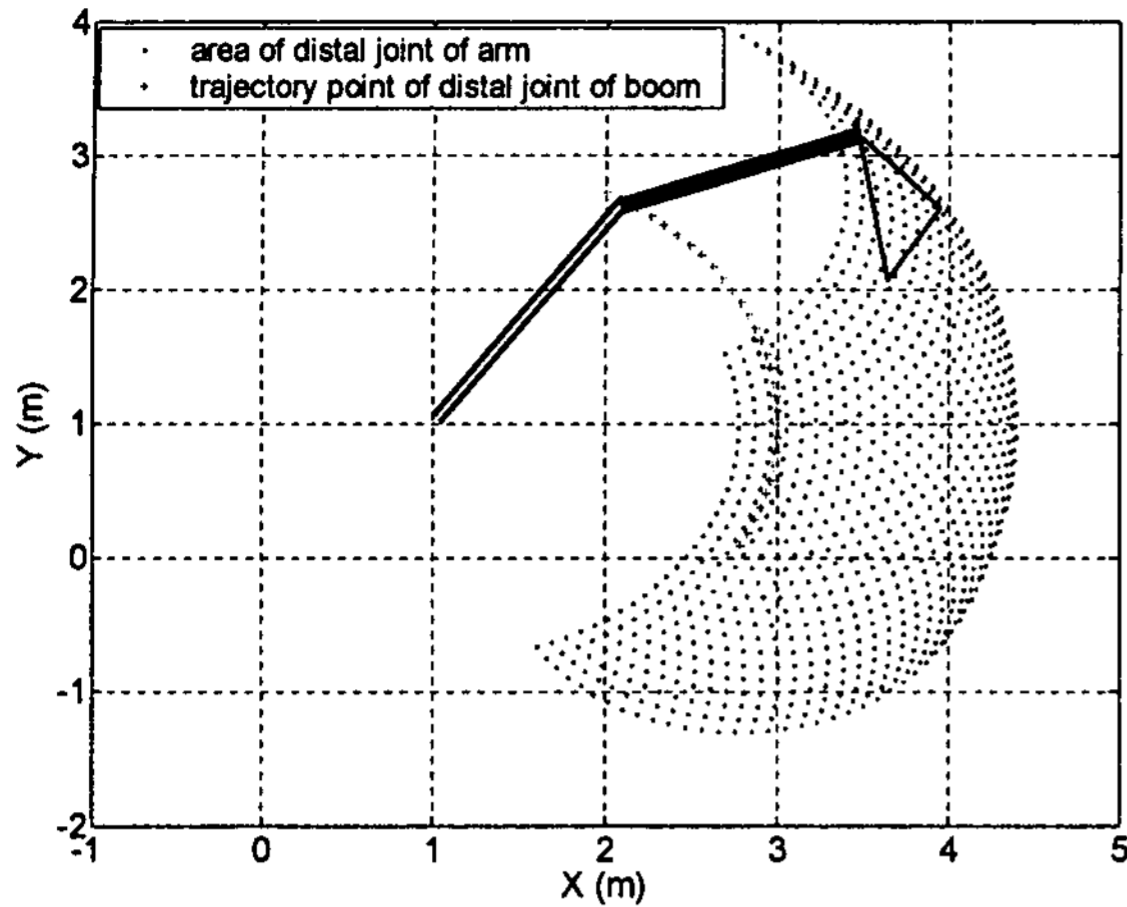


Fig. 2 Workspace of excavator (joint position of bucket link)

3. 햅틱 장치의 설계

3.1 햅틱 장치의 설계 고안

본 논문에서 고안한 햅틱 장치는 굴착 작업을 하면서 버킷의 위치와 각도에 대한 정보를 쉽게 파악할 수 있도록 하여 초보자가 기존의 복잡한 굴삭기 조종 방식에서 벗어나 손쉽게 굴삭기를 조작할 수 있다. Fig. 3 은 본 논문에서 고안된 햅틱 장치의 개념도에 해당한다. Fig. 3 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_{h2} 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. 4 는 햅틱 장치의 각 링크가 조작되는 모습을 나누어 표현한 그림이다. Fig. 4 (a)는 스윙 동작을 제어하는 모습이고 (b)와 (c)는 앞서 설명한 바와 같이 굴삭기의 버킷 회전축 위치를 제어하기 위해 필요한 정보로 θ_{h2} 와 d_{h3} 의 움직임을 보여준다. 운전자는 2 차원 평면상에서 햅틱 장치의 조종 바 위치를 임의로 정할 수 있으며 이 정보가 굴삭기에 전달 되어 버킷 회전축 위치를 결정하는 θ_{e2} 와 θ_{e3} 의 구동이 이루어 진다.

Table 1 DH-parameter of haptic device

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

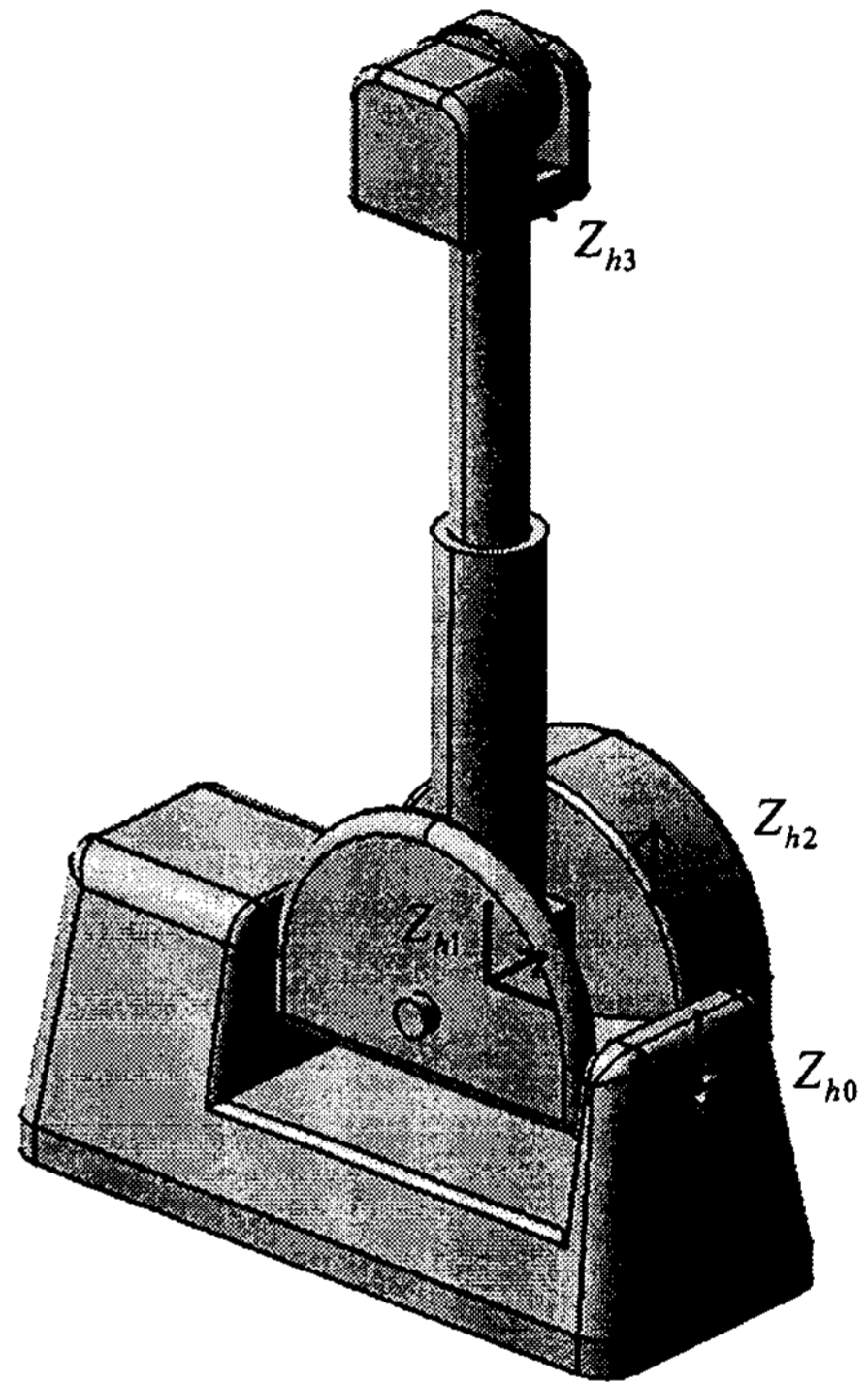


Fig. 3 Conceptual design of haptic device with D-H coordinates (only Z axes are shown)

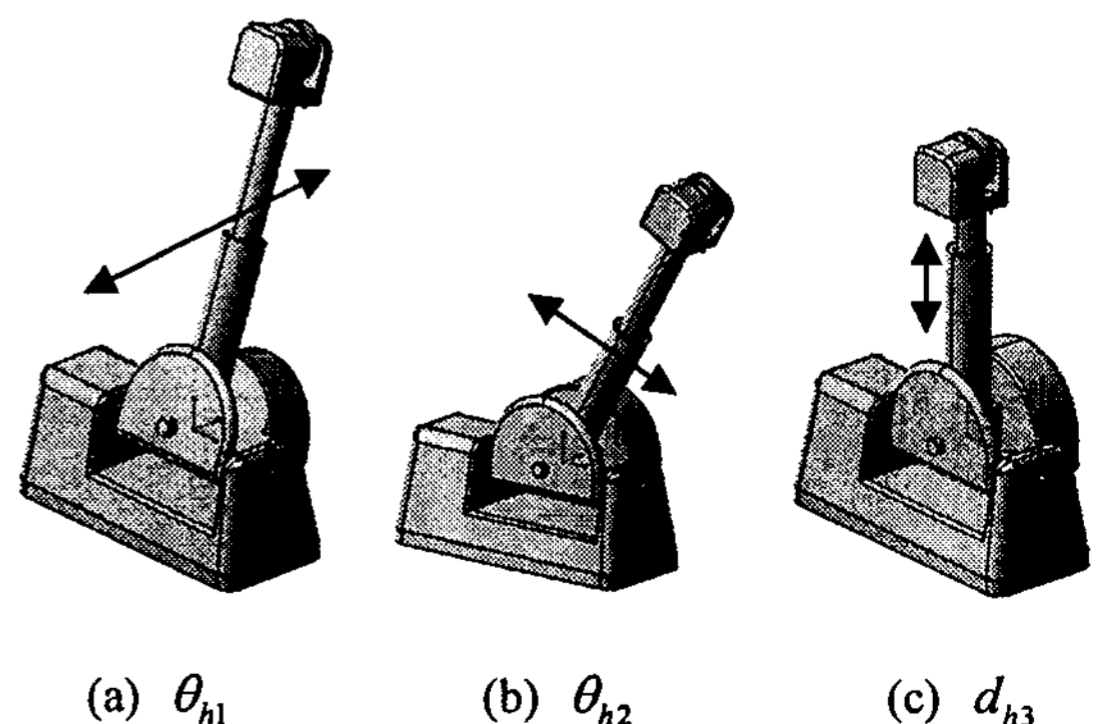


Fig. 4 3-dimensional motions of haptic device ((a) swing motion, (b,c) 2-D plane motion)

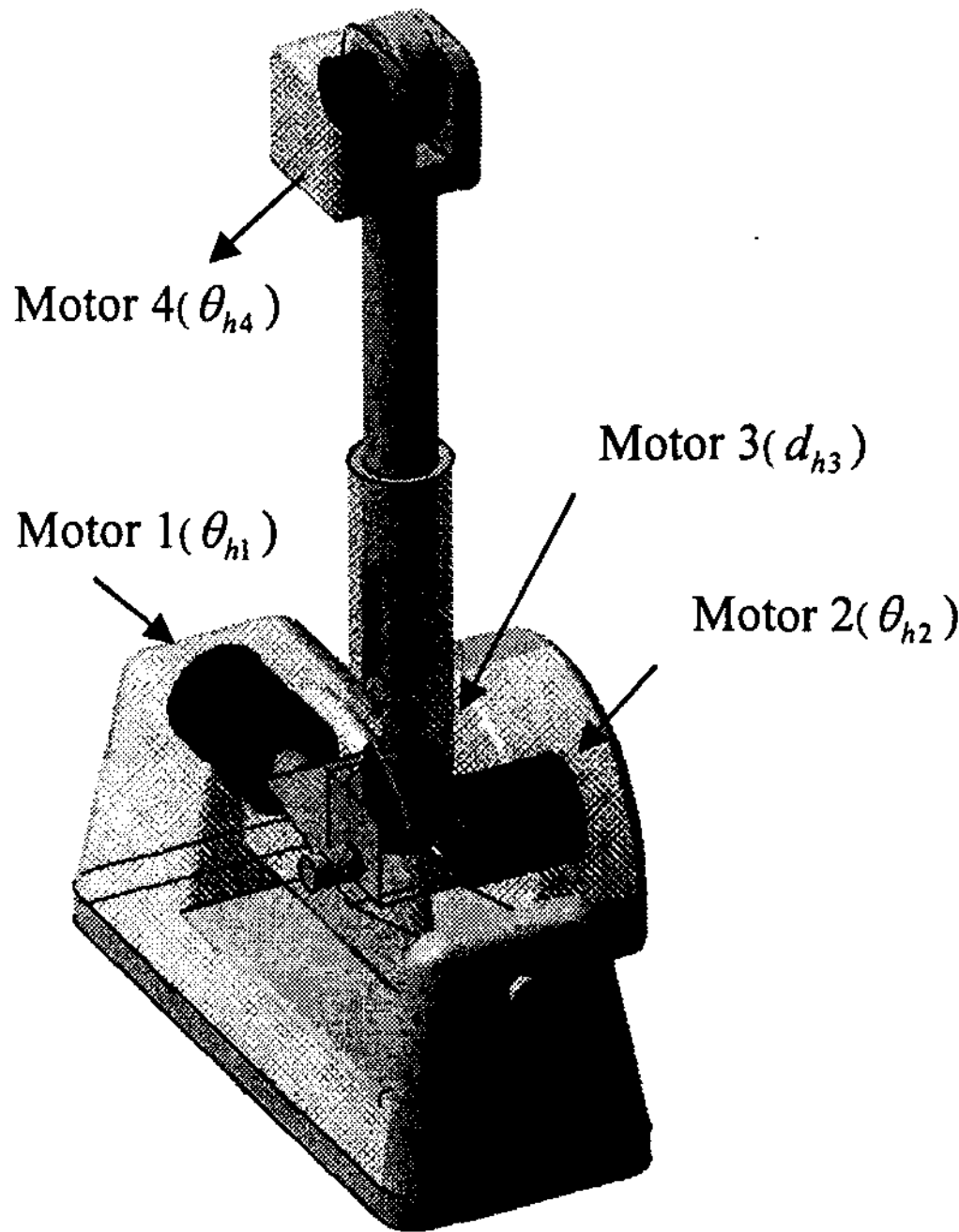


Fig. 5 Force feedback mechanism of 4 DOF haptic device using electrical motors

마지막으로 굴삭기 버킷의 각도인 θ_{h4} 는 작업을 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 직접적으로 θ_{e4} 를 제어하도록 한다.

본 논문에서는 실제로 햅틱 장치를 제작하기 이전에 햅틱 장치 시뮬레이션에 관한 내용을 다룬다. Fig. 5는 햅틱 장치의 내부 메커니즘을 보여주고 있다. 햅틱 장치 내부에는 각각 4개의 액추에이터와 엔코더가 있다. 엔코더는 각 링크의 각도를 측정하고 액추에이터는 굴삭기로부터 운전자가 힘반향을 감지하는데 필요하다.

3.2 햅틱 장치의 기구학 해석

베이스 프레임에서 햅틱 장치 조종바 끝점의 위치 좌표를 나타내기 위하여 각 링크에서 좌표 변환하기 위한 변환 행렬 T 는 다음과 같이 정의된다.^{6,7}

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

햅틱 장치와 굴삭기와의 연동 과정을 살펴 보았을 때 θ_{h2} 와 d_{h3} 에 의해 굴삭기 암의 끝점이 제어가 되므로 변환행렬은 1T_2 와 2T_3 두 행렬의 곱으로 이루어지며 행렬의 각 요소는 DH 파라미터를 위 식에 대입하여 구할 수 있다. 순기구학 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 $(0,0,0,1)^T$ 와 같다. 따라서 햅틱 장치 조작을 통해 조종자는 굴삭기 각각의 링크 회전축의 모션을 조종할 수 있다.

3.3 햅틱 장치의 작업 영역 해석

Fig. 6은 햅틱 장치를 측면에서 바라 보았을 때의 작업 영역을 나타낸다. 즉, 두 개의 파라미터 θ_{h2} 와 d_{h3} 로 부터 계산한 작업 영역이 된다. 이때 θ_{h2} 의 범위는 -50° 에서 50° 까지 움직이며, d_{h3} 는 0m 에서 0.3m 까지 움직이는 범위를 갖는다.

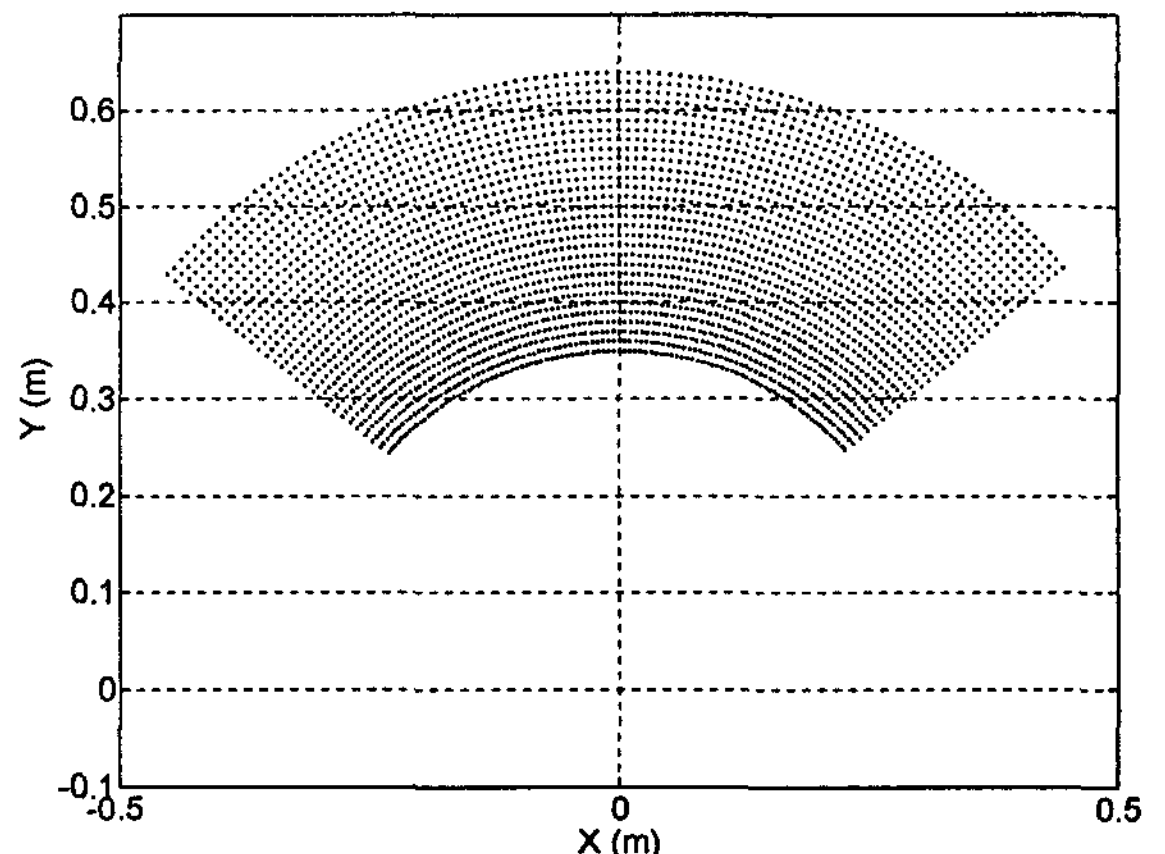
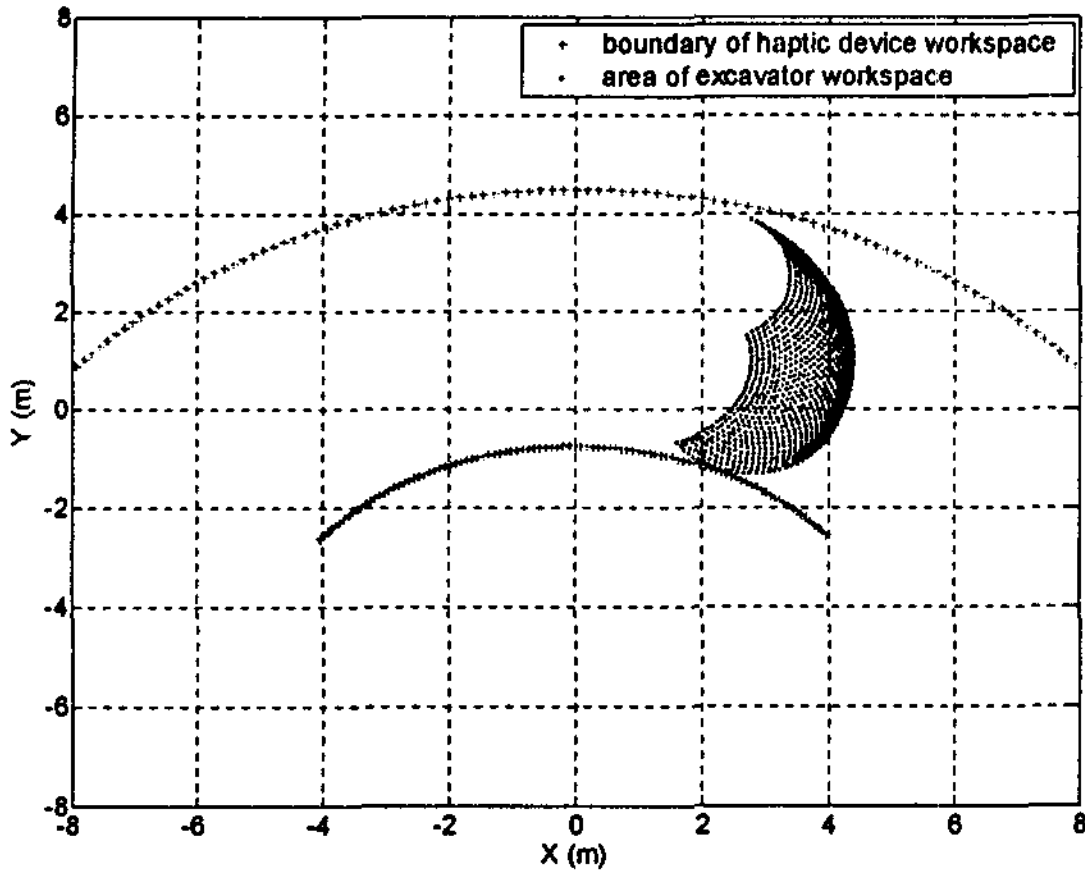
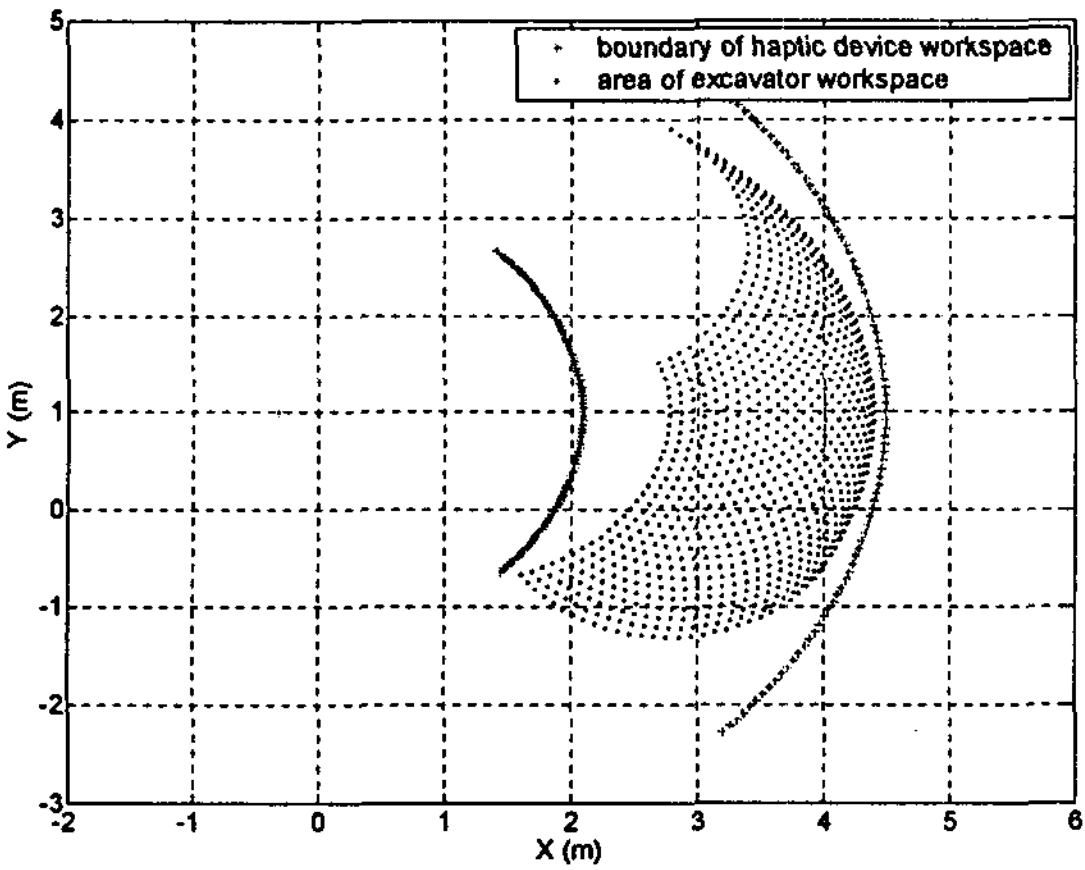


Fig. 6 Workspace of haptic device



(a) scale factor : 17.5, $\theta_{h2} : -50^\circ \sim 50^\circ$, origin : (0,-6).
9.4% of controller workspace covers excavator workspace



(b) scale factor : 8, $\theta_{h2} : -44^\circ \sim 44^\circ$, origin : (-0.31,1).
49.7% of controller workspace covers excavator workspace

Fig. 7 Workspace mapping from controller to excavator

다. 또한 그림에서 θ_{h2} 의 회전축 위치는 (0, 0)에 위치한다. 위 작업 영역 해석은 햅틱 장치로 굴삭기를 제어하기 위한 가장 기초 단계에 해당한다.

4. 햅틱 장치와 굴삭기 사이의 맵핑

조작자가 조작한 햅틱 스타일러스의 위치와 씬휠의 각도로부터 얻어지는 자세 정보는 굴삭기의

각 조인트 각도를 결정한다. 앞 절에서 굴삭기의 스윙 동작은 θ_{h1} 에 의해 정해진다고 하였다. θ_{h1} 이 음수일 경우에 굴삭기는 왼쪽으로 회전하며, 양수일 경우에는 오른쪽으로 회전한다. 다음 굴삭기의 두 번째와 세 번째 각도를 나타내는 θ_{e2} 와 θ_{e3} 는 θ_{h2} 와 d_{h3} 의 정보로부터 결정된다. 우선, 순기구학 해석에 의해 햅틱 장치의 위치가 얻어지며 이 위치는 버킷 회전축의 위치로 변환된다. 또한 이 값은 굴삭기와 햅틱 장치의 작업 영역 맵핑을 통해 이루어지며 Fig. 7에서 이를 보여주고 있다. 이미 2.3 절과 3.3 절에서 각각의 작업 영역 해석을 하였으므로 스케일링을 통해 햅틱 장치의 작은 영역을 커다란 굴삭기 작업 영역으로 맵핑한다. 이때 Fig. 7 (a)에서는 스케일링 값으로 17.5를 사용하였으며, Y 축 방향으로 -6만큼 이동하여 결과적으로 햅틱 장치를 통해 굴삭기 전체 영역을 조작할 수 있도록 맵핑하였다. 그러나 이때 조종장치가 불필요하게 움직이는 영역이 매우 넓게 존재한다. (a)의 경우에는 조종장치의 9.4%의 영역만이 굴삭기 조종이 가능해지는 매우 비효율적인 맵핑이 이루어진다. 그러나 (b)에서는 적절한 맵핑을 통해 최적으로 굴삭기를 조종할 수 있는 결과를 보여주고 있다. 스케일링 값은 8이지만 조종장치를 90도 넓혀 설치하고 θ_{h2} 의 범위를 -44도에서 44도까지 사용한 결과 햅틱 장치의 49.7% 영역이 굴삭기의 작업 영역과 맵핑되고 있다. 이러한 결과는 3차원적인 모션을 보여주는 상용화된 햅틱 장치를 사용하는 것에 비해 햅틱 장치와 굴삭기의 맵핑이 매우 효율적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 마지막으로 씬휠의 각도인 θ_{h4} 는 직접적으로 버킷 각도를 제어한다. 본 논문에서는 그 비율을 1대1로 하였으나 이 값을 변경하면 버킷을 미세하게 조작할 수 있는 씬휠 장치를 구성할 수 있다.

5. 시뮬레이션

이번 절에서는 굴삭기와 햅틱 장치의 기구학과 작업 영역 해석을 통해 햅틱에 의해 구동되는 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 8은 OpenGL로 구성된 굴삭기와 햅틱 장치의 모델링 그림이다. 햅틱 장치의 OpenGL 모델은 각 링크의 움직임을 보여주기 위해 간단한 형태로 모델링 하였다. 또한, 시뮬레이션은 다음 7개의 굴착 모션으로 구성된

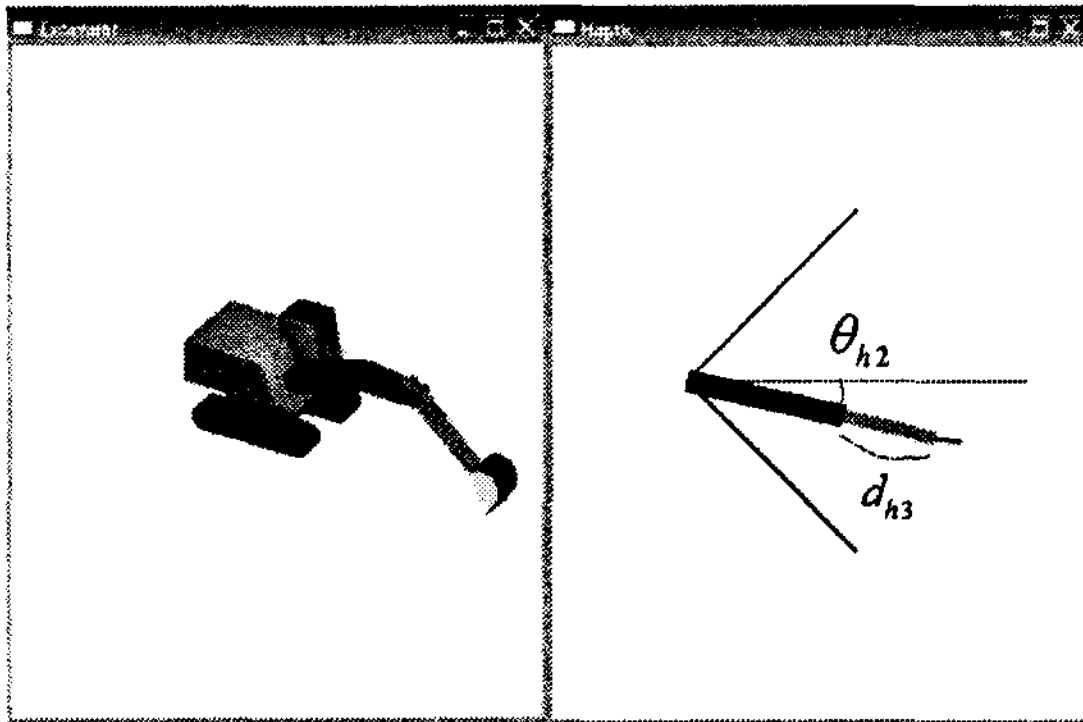


Fig. 8 OpenGL modeling of excavator and haptic θ_{h2}

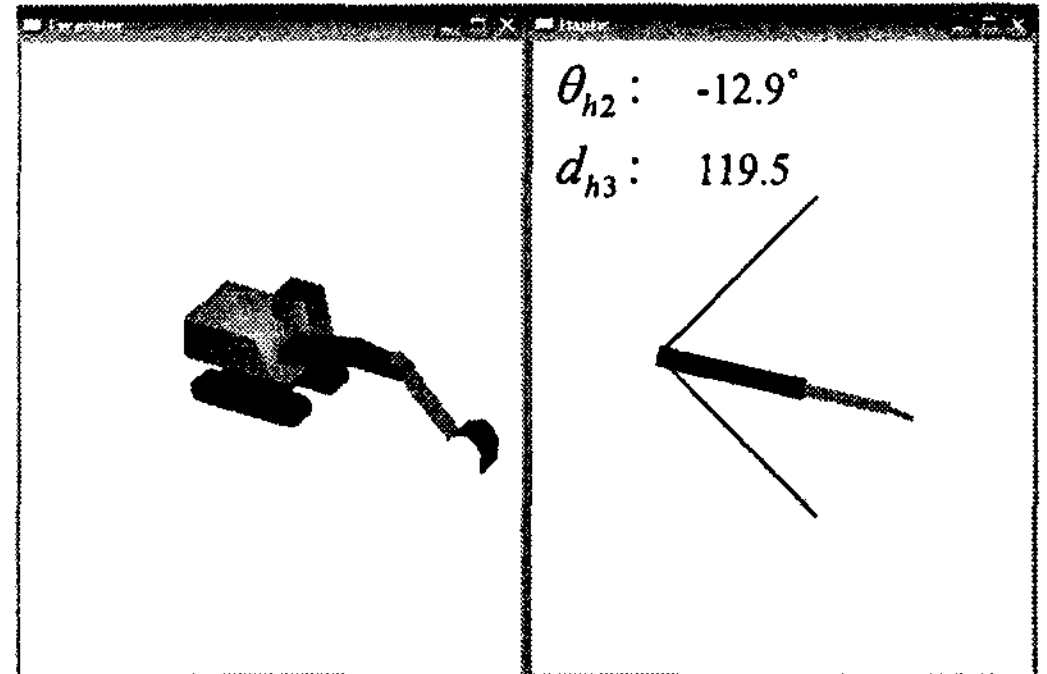
일련의 과정을 햅틱 장치로 조작한 결과이다.

1. 버킷을 흙으로 뺨음
2. 흙 안으로 파기
3. 버킷을 끌어당겨 흙 굴착
4. 버킷을 들어올림
5. 스윙하여 쌓인 흙더미 위로 버킷 이동
6. 흙더미에 흙을 버림
7. 제자리로 스윙하여 반복 수행

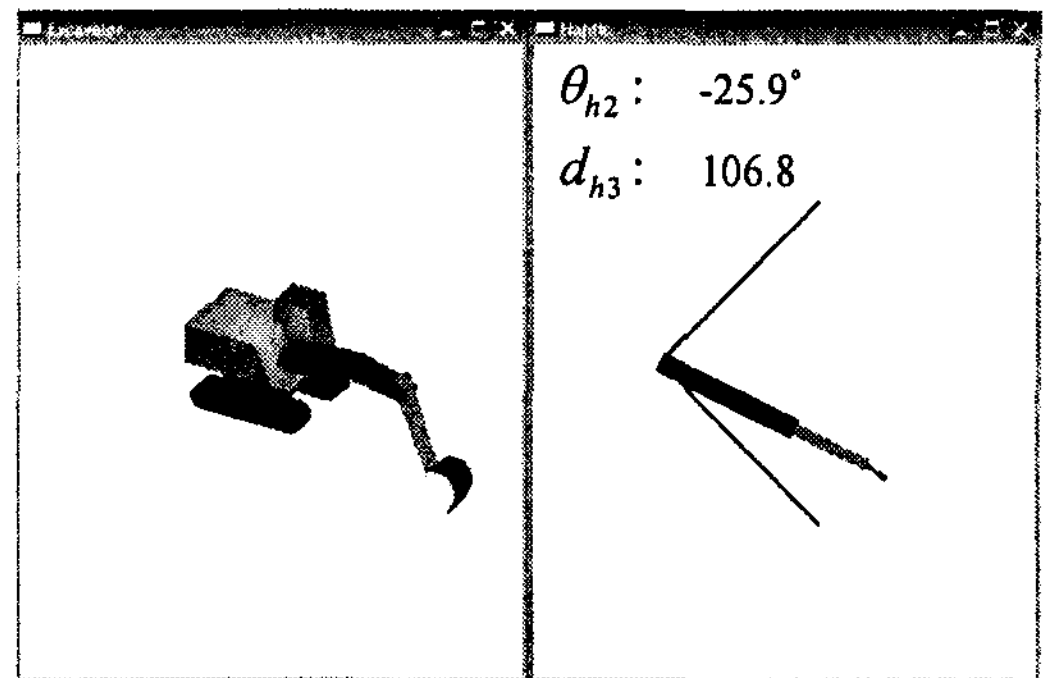
Fig. 9 는 굴착 모습을 순서대로 보여준 그림으로, 각 단계에서 햅틱 장치와 굴삭기 움직임의 모습을 보여주고 있다. 이때 앞서 조종 장치와 굴삭기 간의 맵핑에서 두 번째 경우인 햅틱 장치를 90도 높은 상태를 사용하였으며, 조종 장치에서 θ_{h2} 와 d_{h3} 의 값을 그림에 같이 표시하였다. 현재 시뮬레이션 프로그램은 실시간으로 제어가 된다. 마우스를 사용하여 2 차원 상의 평면 움직임으로 굴삭기 버킷 조인트 위치를 결정하며, 마우스 섀플이 직접적으로 굴삭기 버킷을 조종한다. 그리고 스윙 모션은 키보드의 화살표 키를 통해 이루어진다. Fig. 8 에 보면 섀플의 모습을 표현하기 어려워 3 번째 링크의 형태로 동작성을 확인하였다. 그리고 같은 평면상의 동작이 아니므로 스윙 모션은 햅틱 장치의 모델링에서는 나타내지 않았다.

6. 결론

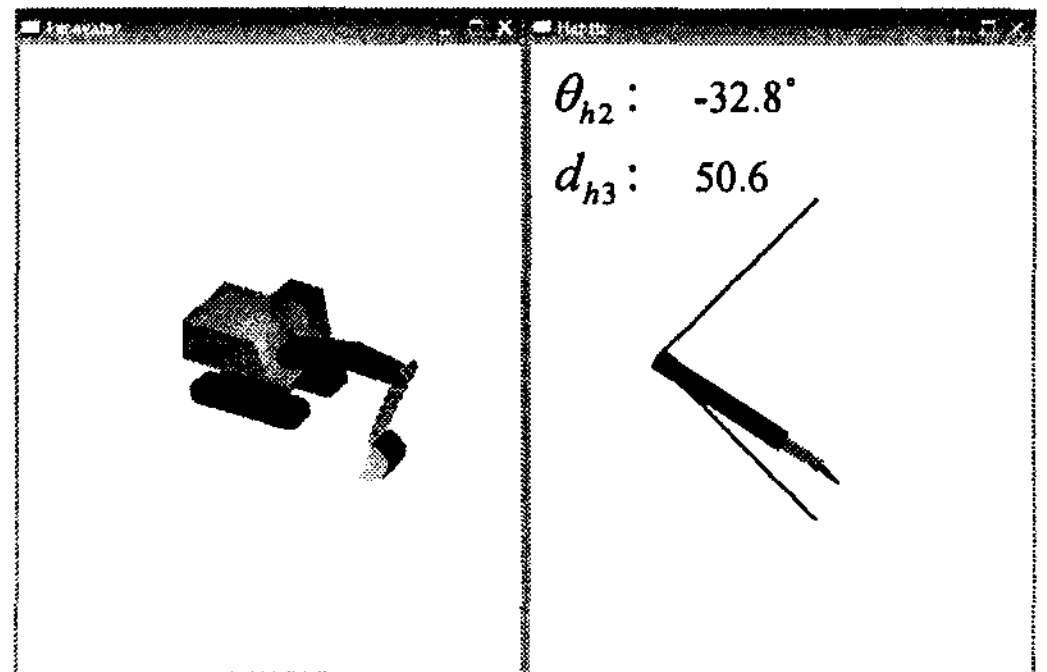
본 논문에서는, 새로운 햅틱 장치를 고안하여 굴삭기 제어를 하였다. 기구학 해석과 작업 영역을 분석하였으며, OpenGL 프로그램을 이용하여 비쥬



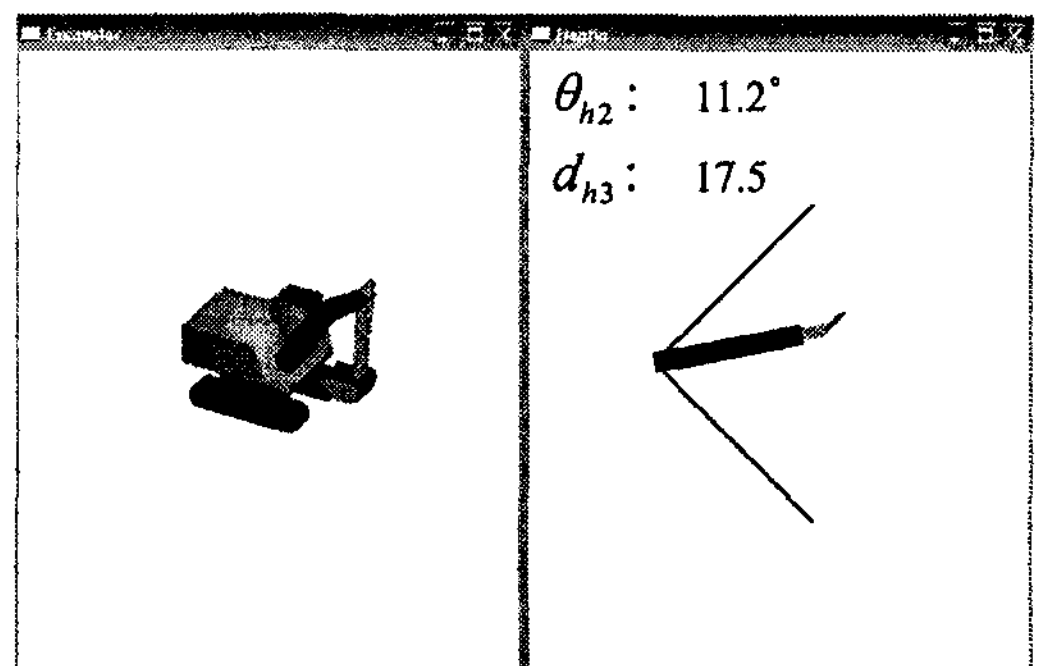
(a) Reach out with the bucket to soil



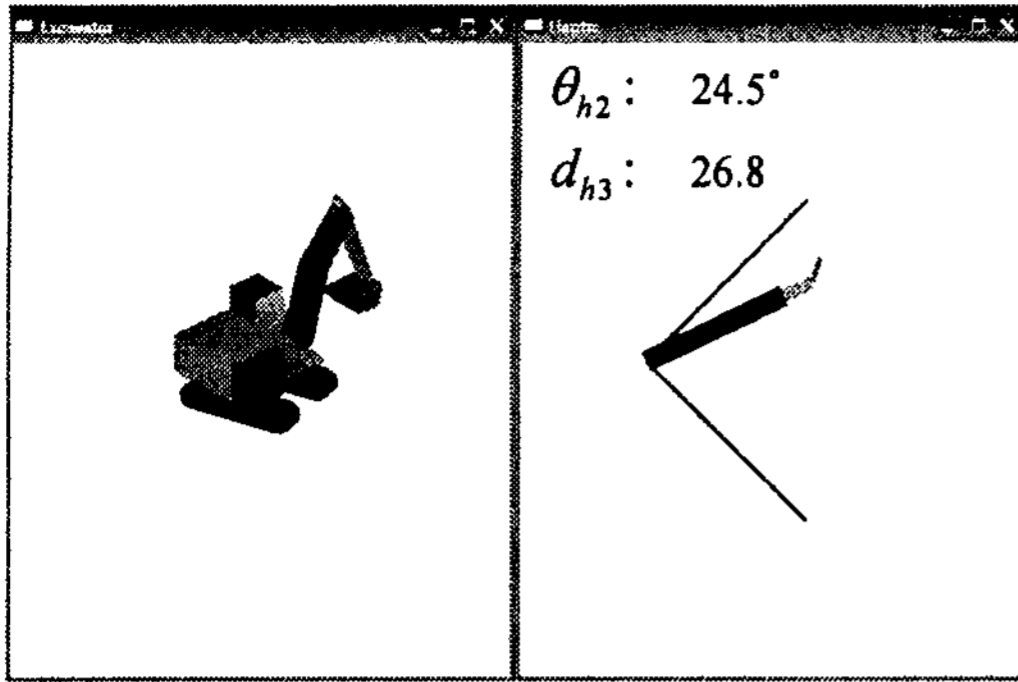
(b) Plunge down into the soil



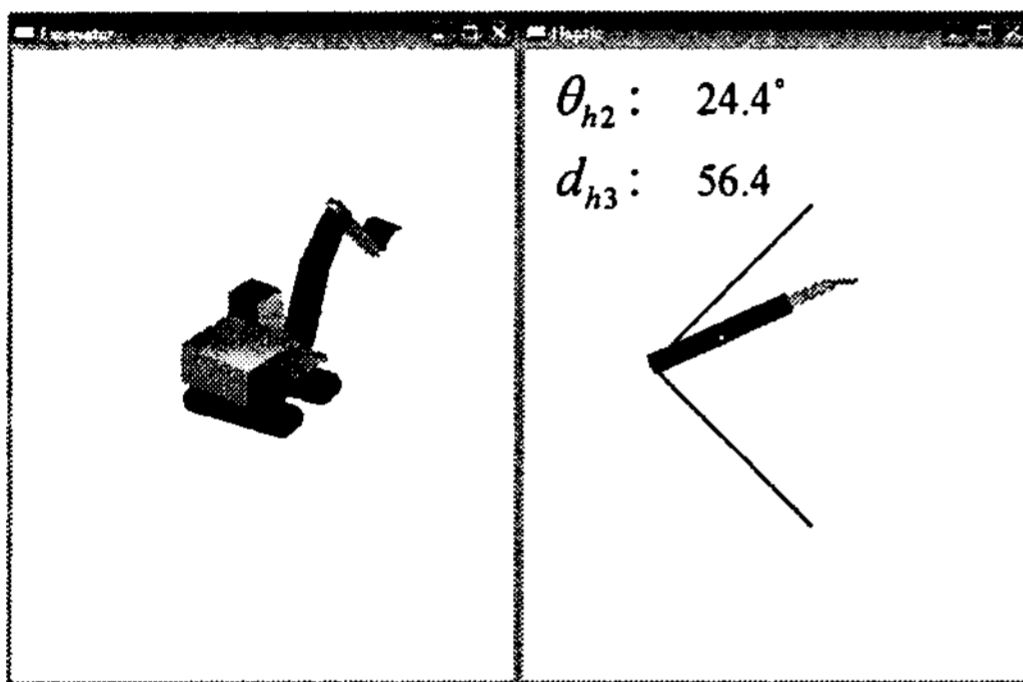
(c) Draw the bucket to fill it with dirt



(d) Lift the bucket



(e) Swing the bucket over to the spoil pile



(f) Unload the bucket onto the spoil pile

Fig. 9 Simulation (digging processes)

얼한 모습의 햅틱 장치 시뮬레이션을 수행하였다. 결과적으로, 햅틱 장치의 조작성이 매우 직관적이며 편리함을 확인할 수 있었다. 햅틱 장치를 제작하기 위해서는 햅틱 장치의 기본 설계를 통해 기구학적 해석을 필요로 하며 또한 조종하려는 대상과의 맵핑 과정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 햅틱 장치를 제작하기 이전에 필요한 기구학 해석과 작업 영역 해석을 다루었다. 이러한 분석을 기반으로 하여 힘반향 메커니즘을 적용할 수 있는 실제적인 햅틱 장치 설계가 이루어져야 할 것이다. 차후에는 완성된 햅틱 장치를 이용하여 실제 굴삭기를 조종하는 연구를 통해 본 논문에서 고안한 햅틱 장치의 편리성을 기존 햅틱 장치와 비교하여 확인할 수 있을 것이다.⁸

후 기

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(과제번호 “06 건설핵심 B04”)과

BK21 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Frimpong, S. and Li, Y., “Virtual prototype simulation of hydraulic shovel kinematics for spatial characterization in surface mining operations,” *Int. J. of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 19, No. 4, pp. 238-250, 2005.
2. Joseph, G. F., “Development of a Haptic Backhoe Testbed,” A Thesis of Master of Science, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, pp. 14-30, 2004.
3. Hirabayashi, T. and Yamamoto, T., “Experiment of Teleoperation of Underwater Backhoe With Haptic Information,” *Proceedings 23rd Int. Sym. on Automation and Robotics in Construction*, pp. 36-41, 2006.
4. Sasaki, T., Nagai, T. and Kawashima, K., “Remote Control of Backhoe for Rescue Activities Using Pneumatic Robot System,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3177-3182, 2006.
5. Stentz, A., Bares, J., Singh, S. and Rowe, P., “A Robotic Excavator for Autonomous Truck Loading,” *Autonomous Robots*, Vol. 7, No. 2, pp. 175-186, 1999.
6. Denavit, J. and Hartenberg, R. S., “A Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices,” *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 22, No. 1, pp. 215-221, 1955.
7. Rao, C. R. and Mitra, S. K., “Generalized Inverse of Matrices and Its Applications,” John Wiley & Sons Inc., pp. 45-56, 1971.
8. Cavusoglu, M. C. and Feygin, D., “Kinematics and Dynamics of Phantom(TM) model 1.5 Haptic Interface,” *Sensable*, pp. 1-13, 2001.