

# DirectX를 이용한 원자력발전소 증기발생기 슬러지 제거용 로봇작업의 3차원 Visualization 시스템 개발

김준홍, 김석곤, 김광홍, 조병학  
전력연구원

## Development of 3d visualization system of sludge lancing system for 460 steam generator using directX

Joon-Hong, Kim Suk-Gon, Kim Kwang-Hong, Kim Byung-Hak, Cho  
Korea electric power research institute

### ABSTRACT

한전 전력연구원은 로봇제어기술과 가상현실기술을 접목하는 과정의 일환으로 로봇작업을 3D 그래픽으로 가시화(Visualization)하는 연구를 수행하고 있다. 본 논문에서는 원자력발전소 증기발생기 내부에 발생하는 슬러지를 제거하기 위한 로봇시스템과 그 작업내용의 3차원 Visualization 시스템 개발에 관한 내용을 다룬다. 본 시스템은 Microsoft사의 제작품인 DirectX를 그래픽엔진으로 사용하였으며 C++로 작성되어있어 매우 개방적인 구조를 가지고 있어 타 분야로의 적용이 용이하다.

### 1. 서론

원자력발전소 증기발생기 내부에는 수천 개의 미세한 세관이 배열되어 있으며 운전 중 세관에 슬러지가 부착되어 열효율이 떨어지므로 일년에 한번씩 있는 정기 보수기간 중 세정장비를 이용하여 슬러지를 제거하는 작업이 수행된다. 일반적으로 외부의 작업자가 로봇에 부착되어 있는 카메라를 이용하여 작업위치를 파악하여 작업이 이루어지는데 이때 작업공간 내부의 잔류 증기와 슬러지 등으로 인해 영상의 화질이 떨어져서 작업에 지장을 초래할 수 있으며 제한된 작업공간으로 인해 오직 한 대의 카메라로 작업을 하게 되므로 작업자가 관찰할 수 있는 공간도 지극히 제한된다는 문제점이 있다. 이러한 점을 개선하기 위해 작업공간을 3차원 그래픽으로 모델링하고 카메라 오브젝트를 별도로 지원하는 특징을 갖는 DirectX를 이용하여 작업과정의 가시화를 구현함으로써 다수의 가상카메라로 모든 작업공간을 확인할 수 있고 정확한 작업위치 파악을 가능하게 하여 보다 정확하고 효율적인 작업이 가능하게 하였다.

### 2. 가시화의 구현

본 시스템 개발에서는 DirectX를 사용하여 3차원 가시화를 구현하였다. DirectX에서는 4x4행렬을 사용하여 이러한 작업을 수행한다. 본 논문에서는 카메라에 대한 Callback 함수를 작성하고 그 내부에 4x4행렬을 파라미터로 받아서 프레임의 좌표변환을 처리하는 AddTransform 함수를 사용하였다. 즉 카메라의 위치와 방위를 변환시키면 카메라의 방위각(azimuth)  $\theta$ , 극각(polar angle)  $\phi$ , 주거리  $f$  값을 변환시키게 되는데, 이러한 값들이 주어지면 좌표변환 함수의 입력 값으로 사용되는 horizontal 벡터  $\vec{H}$ , vertical 벡터  $\vec{V}$ , approach 벡터  $\vec{A}$ , position 벡터  $\vec{C}$ 를 계산 할 수 있다.

#### 2.1 카메라 설정

일단 C.O.P(center of projection)와 카메라의  $\vec{A}$ 가 주어지면 나머지  $\vec{H}$ 와  $\vec{V}$ 는 자동적으로 구해진다. 그림 1에 극좌표계에서 카메라의 위치와 방위를 나타내었다.

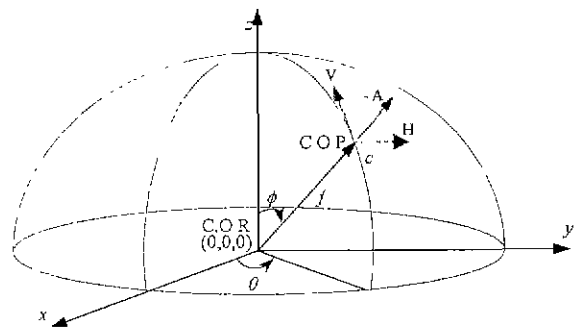


그림 1 극좌표계에서의 가상카메라  
Fig. 1 A virtual camera on polar coordinate

여기서 C.O.P는 다음과 같이 표현된다.

$$C = (C_x, C_y, C_z) = (f \cos \theta \sin \phi, f \sin \theta \sin \phi, f \cos \theta)$$

카메라 프레임 좌표인  $\bar{H}$ 와  $\bar{V}$ 는 방위각  $\theta$ 와 극각  $\phi$ 의 방향에서의 C.O.P의 접선을 의미한다. 그러므로  $\bar{H}$ 와  $\bar{V}$ 는 다음과 같이  $\phi$ 에 대해 C.O.P를 미분하면 구해진다.

$$\bar{H} = \frac{\partial C}{\partial \theta} = (-f \sin \theta \sin \phi, f \cos \theta \sin \phi, 0)$$

$$\bar{V} = \frac{\partial C}{\partial \phi} = (f \cos \theta \cos \phi, f \sin \theta \cos \phi, -f \sin \phi)$$

카메라 원점은 프로그램 내에서 조정되며,  $\theta$ 와  $\phi$ 는 요(yaw)와 피치(pitch)로 표시된다. 원점에서 카메라까지의 거리도 역시 조정된다. 그렇지만 카메라 거리의 변경은 2D 이미지 평면에 투영되는 이미지의 적정크기가 보장되도록 자동적인 크기 조절을 수반해야 한다.

## 2.2 카메라 회전 및 이동

### 2.2.1 회전

그림 2에서 보는 바와 같이 카메라의 회전 시에 설정된  $\phi$ 와  $\theta$ 값인  $\text{cam}[n].\text{RotP}$ ,  $\text{cam}[n].\text{RotT}$ 로부터 C.O.R을 focusing 했을 때의  $\bar{H}$ 와  $\bar{V}$  프레임을 계산한 후에 이동을 위해 현재 설정된  $\phi$ 와  $\theta$ 값인  $\text{cam}[n].\text{movP}$ ,  $\text{cam}[n].\text{movT}$ 에 의해 이를 회전시킨다.

$$C = (f \cos \theta \sin \phi, f \sin \theta \cos \phi, f \cos \phi) - R$$

$$\bar{A}_0 = |C|$$

$$\bar{H}_0 = (-f \sin \theta \sin \phi, f \cos \theta \sin \phi, 0)$$

$$\bar{V}_0 = (f \cos \theta \sin \phi, f \sin \theta \cos \phi, -f \cos \phi)$$

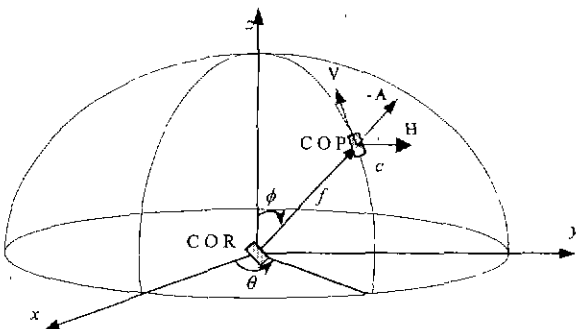


그림 2 카메라의 회전

Fig. 2 Rotating of camera

### 2.2.2 이동

그림 3에서 보는 바와 같이 초기  $\bar{H}$ - $\bar{V}$  프레임을 정하고 카메라 이동값인  $\text{cam}[n].\text{mov}_h$ ,  $\text{cam}[n].\text{mov}_v$ 에 의해  $\bar{H}$ ,  $\bar{V}$  방향으로 C.O.P를 이동시킨다.

$$C = (f \cos \theta \sin \phi, f \sin \theta \cos \phi, f \cos \phi) - R$$

$$\bar{A}_0 = |C|$$

$$\bar{H}_0 = (-f \sin \theta \sin \phi, f \cos \theta \sin \phi, 0)$$

$$\bar{V}_0 = (f \cos \theta \sin \phi, f \sin \theta \cos \phi, -f \cos \phi)$$

$$\bar{H} = \bar{H}_0 + \text{cam}[n].\text{mov}_h$$

$$\bar{V} = \bar{V}_0 + \text{cam}[n].\text{mov}_v$$

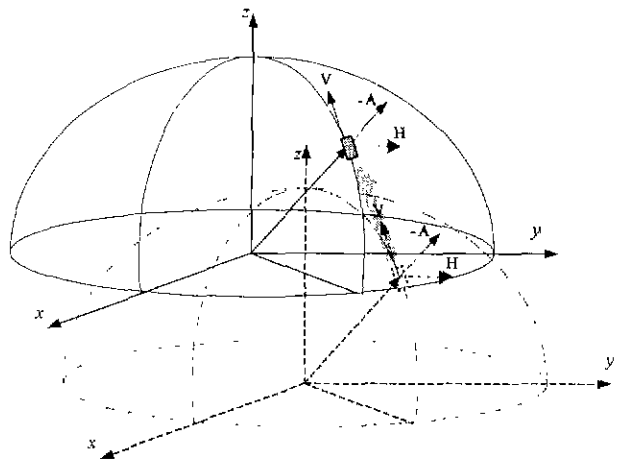


그림 3 카메라의 이동(수직방향)

Fig. 3 Moving of camera(in vertical direction)

## 3. 작업대상의 정의

### 3.1 460 SG 슬러지세정장비와 작업내용

증기발생기 내부의 세관표면에 발생하는 슬러지(성분 Iron,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , Cu, NiO, ZnO, etc.)를 제거하기 위해 소형 로봇을 투입하여 노즐을 통해 세관사이로 고압수를 분사하게 된다. 전력연구원에서는 그림 4(a)와 같은 세정장비를 제작하였다. 장비 앞쪽의 노즐은 대각선 방향으로 배열되어 있으며 노즐 모듈이 회전하면서 고압수를 세관사이로 분사하게 된다.

### 3.2 그래픽모델 생성

본 논문에서는 3차원 모델을 생성, 애니메이션 및 렌더링을 할 수 있는 패키지인 Autodesk사의 3ds max R3을 이용하여 가시화시스템에 사용할 3

차원 로봇과 증기발생기 내부의 모델을 여러개의 오브젝트로 분리하여 개발하였다. 그림 4(b)에 세정장비의 그래픽 모델을 나타내었다. 이렇게 생성된 모델을 DirectX 패키지에서 제공되는 파일타입 변환기로 DirectX에서 직접 읽어들이 수 있는 x파일로 변환하였다.



(a) 제작된 세정장비



(b) 세정장비 그래픽 모델

그림 4 슬러지세정장비

Fig. 4 Sludge lancing system

#### 4. 가시화 시스템 구축

##### 4.1 윈도우 구성

그림 5는 완성된 가시화 시스템이다. 각 메뉴에 대한 기능은 다음과 같다.

##### ■ File

단계적실행 / 계속실행을 선택하고, 비트맵 버튼과 조인트 정보를 on/off 시키고, DirectX에서 이용 가능한 드라이브를 출력하며, 시스템을 종료하는 등의 메뉴들로 구성되어 있다. 이러한 기능들은 DirectX에서 제공되는 모든 프로그램들에서 동일한 사용자 인터페이스로 제공되고 있으므로 본 시스템에서도 이를 이용하였다.

##### ■ Render

Shade 모드인 flat / gouraud / phong을 선택하고, 오브젝트의 시각적 사실감을 증대시키는 light 기능, fill 모드를 선택하는 point / wireframe / solid 기능, dithering / anti-alias 기능, texture 필터를 선택하는 point filtering / bi-linear filtering 기능 등을 제공한다. 이들 기능도 File 메뉴와 마찬가지로 DirectX에서 제공되는 인터페이스를 사용하였다.

##### ■ Camera

가상의 카메라를 선택하는 기능을 제공한다. 여기에는 로봇에 대해 가상 카메라의 상대적인 위치에 따라 top / right / front / left / bottom 의 5개의 카메라가 있으며, 이들 중에 하나를 선택할 수 있다.

##### ■ Focus

로봇을 회전시킬 때 적용되는 원점(O.C.R)을 설정한다. 여기에는 로봇에 대해 원점의 상대적인 위치에 따라 auto / origin / loco / tilt 의 3개의 원점이 있으며 이들 중에 하나를 선택할 수 있다.

##### ■ View

로봇의 특정부분을 선택적으로 화면에 보이게 하고, 나머지는 보이지 않게 하고 싶을 때 이용하는 기능이다. 여기서는 윈도우에 표시되는 물체들을 S/G / robot / nozzle / U-tube 의 4개 부분으로 나누었으며, 처음 실행 시에는 전부 선택 되도록 하였으며, 작업자가 필요에 따라 일부 혹은 전부를 선택할 수 있다 단 이 기능을 활용하기 위해서는 모델 작성시에 각 부분을 별도의 모델로 작성해야 한다.

##### ■ 가상카메라 제어버튼

팝업 메뉴들에 의해 설정된 정보를 토대로 물체를 이동시키고, 회전시키며, 축소 및 확대를 수행하는 기능을 제공한다. 이들 제어메뉴는 윈도우가 축소/확대되더라도 크기가 변하지 않으며 항상 메인 윈도우의 우측상단에 고정되어 있다.

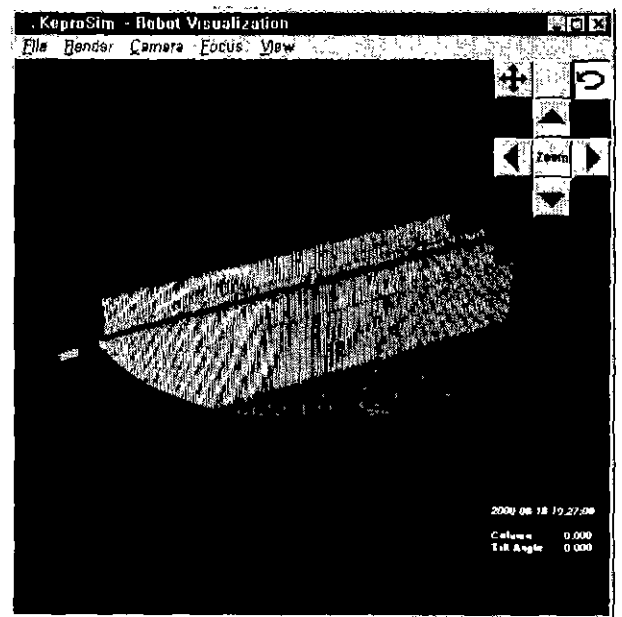


그림 5 메인 윈도우의 구성

Fig. 5 Structure of main window

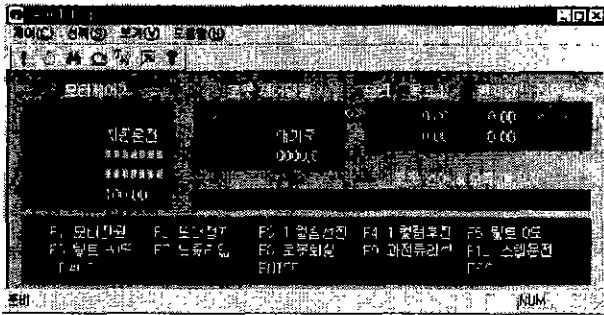


그림 7 로봇조작윈도우  
Fig. 7 Robot command window

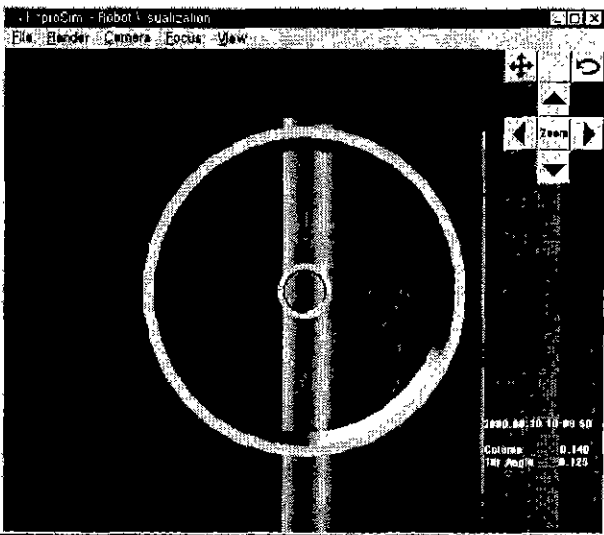


그림 6 작업과정(작업위치 정밀조작)  
Fig. 6 Job in progress(nozzle positioning)

#### 4.2 로봇언어

개발된 세정장비에 명령을 주는 언어는 크게 3가지 방법으로 입력이 가능하다. 먼저 모터제어기(LM628)가 장착된 Kalans Servo에서 키보드로 명령을 주는 방법이 있고, 파일에 저장된 명령을 순차적으로 수행하는 방법이 있으며, 마지막으로 주 제어 컴퓨터에서 TCP/IP 또는 UDP/IP 방식의 컴퓨터 통신에 의해 원격으로 명령을 주는 방법이 있다. 입력된 명령은 번역기로 입력되어 주어진 로봇언어에 해당하는 명령을 코드화하고 명령의 수행에 필요한 데이터를 입력한 후 이동경로생성 프로그램으로 보내져서 로봇 이동이 수행된다. 로봇언어에 오류가 발생한 경우 이를 CRT에 표시하거나 경고음으로 사용자에게 알리는 기능도 포함되어 있다. 로봇언어는 적용되는 작업에 따라 C-code를 변경함으로써 간단하게 추가/제거가 가능하다. 표 1에 본 시스템에서 사용된 로봇언어 명령을 나타내었다.

표 1 로봇언어 명령

Table 1 Robot language command

로봇언어	기능
home	move to zero position
pause	
resume	
speed	percent of full speed
loco	move(mm)
tilt	rotate(deg)
column	(mm)
reset	zero for all motors
delay	(sec)
stop	
file	setup motion file

#### 4. 결 론

본 논문에서는  $\Delta 60$ 형 증기발생기 슬러지세정작업의 3차원 가시화를 위해 DirectX를 이용한 로봇 visualization 시스템을 제안하였다. 본 시스템에서는 다수의 가상카메라를 설치하여 로봇 작업내용을 실시간으로 다양한 각도와 위치에서 관찰할 수 있으므로 작업능률과 완성도에 있어 획기적인 개선이 기대된다. 아울러 본 visualization 시스템은 개방된 구조로서 작업모델과 이에 따른 파라미터를 쉽게 추가, 변경할 수 있으므로 여러 가지 작업에 활용될 수 있는 특징을 가지고 있다. 향후 원자로 내부의 육안검사용 수중로봇의 Visualization 시스템 구축에 본 시스템을 활용할 계획이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 박신열, 허태영, "3D Studio와 DirectX를 이용한 Visualization 시스템 개발," 한국 정보처리학회 추계학술대회논문집, pp.CG-43~CG48, 1999. October
- [2] 조병학, "로봇의 기구학적 3차원 그래픽 시뮬레이션," 한국시뮬레이션학회 추계학술대회 논문집, pp.202~209, 1999. October
- [3] 조병학, "Simulation Studies on Robot System Applied to Nozzle Dam Installation," 전력연구원, TM 96EW03 P1998.482, 1998
- [4] 한진전력연구원, " $\Delta 60$ 형 증기발생기 슬러지 세정장비 개발," KEPRI Technical Memo, '00전력연-단157, 2000. April
- [5] Microsoft, "Microsoft Direct3D Retained Mode," Microsoft, 1988 annal
- [6] Autodesk. "3D Studio MAX R3 : Tutorials", Autodesk, Inc, 1997. October