

대부하 6자유도 운동 시뮬레이터의 실시간 제어기 설계에 관한연구  
Study on Real Time Controller Design of Heavy Load 6-DOF Motion Simulator

김 영대, 강 석중, 이 상범, 박 정호  
Young Dae Kim, Suk Jong Kang, Sang Bum Lee, Jung Ho Park

대 전 기 계 창 ( Agency for Defence Development )

The paper, introduce the real time controller Design method of heavy load 6-DOF motion simulator. And also, introduce the Geometric design of 6-DOF Motion generation, real time control A algorithm and the configuration method of real time controller H/W and S/W.

I. 서 론

6자유도 운동 시뮬레이터는 주로 항공기 조종 시뮬레이터의 운동 발생기로 많이 설계 발전되어 왔다. 1) 2) 3)

이 운동 시뮬레이터는 항공기의 운동과 유사한 가속 및 증력장을 조종수가 느끼게 함으로써 실제 비행 상황과 유사한 운동을 느끼도록 설계되어 있다.

이 6자유도 시뮬레이터는 기본적으로 유압실린더를 작동하기 위한 유압회로 및 제어장치 그밖에, 측정장비, 자료획득장비, 신호처리 장비등이 종합된 시스템이다.

6자유도 운동 발생 장치는 6개의 유압실린더를 사용하여 pitching (x축 회전운동), Rolling(Y축회전운동) 및 Yawing(z축회전운동)의 3축 각 운동과 Sway(x축 병진운동), Surge(Y축 병진운동) 및 Heave (z축 병진운동)의 3축 병진운동을 만들어 낼 있도록 각 유압실린더의 제어 입력을 6자유도 운동 제어컴퓨터에서 계산후 독립된 각 서어보제어기(PID Controller)를 통하여 시뮬레이터를 구동하도록 되어 있다.

본 논문에서는, 대용량 유압공급원을 사용하여 차량의 주행 환경을 재현시키는 6자유도 운동 발생장치의 실시간 제어기 설계 기법에 대해 설명하고 있으며, 6자유도 운동 발생장치의 기하학적 설계, 실시간 제어 알고리즘 및 실시간 제어기 H/W 및 S/W의 구성 방법을 제시 하고 있다.

II. 본 론

1. 시스템 제어기 설계시 고려사항

6자유도 운동 시스템 설계시 고려 사항은 시스템의 동적성능, 제한사항 및 안전성으로 나누어 볼 수있으며, 그것은 아래와 같다.

가. 동적성능 (Dynamic Performance)

시스템의 동적성능은 사용시스템의 적당한 응답기준과 허용 가능한 가속도 노이즈값으로 정의한다.

우선, 변위, 속도 및 가속도가 동시에 발생하는 시스템의 특성을

정의하기 위하여 3개의 변수가 Sine함수라고 가정한다. 6자유도 운동시스템은 이 Sine함수 변수에 대한 전달함수, 최대가속도노이즈 (Peak Acceleration Noise), 기생진동가속도 (Parasite Acceleration), Dynamic threshold 및 위치 여력에 대해 아래 조건을 만족해야 한다.<sup>4)</sup>

1) 전달함수

전달함수는 입력에 대한 시스템 가속도 출력의 크기와 위상관계를 나타낸다.

6자유도 각각에 대해 1Hz미만에서는 입력대출력비가  $1 \pm 0.1$ 이내이어야 하고, 위상 지연은 20도미만이어야 한다.

또한 1Hz에서 4Hz사이에서는 입력대 출력의 크기는 1 - 0.7 사이에 있어야하고 위상지연은 45도이하 이어야 한다.

2) 최대 가속도 노이즈 (Peak Acceleration Noise)

최대가속도 노이즈는 Sine함수 입력 신호에 대한 가속도 출력신호의 기본파에 대한 최대 편향치를 말한다 6자유도 각각이 0.5Hz에서 동작범위의 90%까지 측정 된 최대 가속도 잡음이 병진운동에서 0.2m/sec<sup>2</sup>, 회전운동에서 0.1rad/sec<sup>2</sup>을 초과해서는 안된다.

3) 기생 진동 가속도(Parasitic Accelerations)

6자유도 중에서 구동되지 않는 축의 최대 가속도는 병진 운동시 0.1m/sec<sup>2</sup>, 회전운동시 0.05rad/sec<sup>2</sup>을 초과해서는 안된다.

4) Dynamic Threshold

Dynamic threshold는 계단파 입력에 대해 출력 가속도가 63%에 도달시간을 말한다.

가속도 입력이 병진운동에서 0.1m/sec<sup>2</sup>, 회전운동에서 0.05rad/sec<sup>2</sup>이상일때 Dynamic threshold는 0.05초 이하이어야 한다.

5) 위치예러

계단입력 신호에 대한 정상상태예러는 최대 변위의 0.1% 이내여야 한다.

나. 제한사항

1) 이탈제한(Excursion Constraints)

6자유도 시스템의 위치는 동작되는 범위내에서 제한되어야한다. 따라서, 실린더의 stroke가 동작중심점에서 6자유도 운동을 동시에 수행 할 때 아래 한계치를 초과해서는 안된다.5)

[표1] 이탈 한계치(Excursion Constraints)

Sway	+6inches
Surge	+6inches
Heave	+6inches
Pitch	+4degrees
Roll	+4degrees
Yaw	+4degrees

따라서, 6자유도 운동시 [표1]의 이탈한계치를 초과할 경우, 이범위 내에서 시스템이 동작하도록 제어하는 "washout" 알고리즘이 필요하다.

2) 가속도제한(Acceleration Constraints)

6자유도 운동에서는 가속도  $\pm 2.5g$ 을 초과해서는 안된다. 이러한 가속도는 매우 높은 속도에서 Actuator가 줄어들거나늘어났을때 일어날 수 있다. 따라서, 제어입력에서 일정 수준으로 가속도는 제어되어야 한다.

다. 안전성

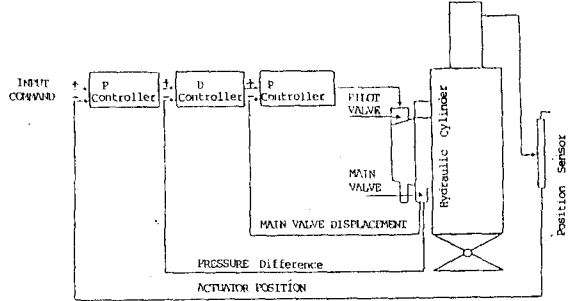
예상하지 않았던 시스템의 오동작으로부터 승무원 및 장비를 보호하기위하여 기계, 전기 및 유압보호장치가 요구된다.5)

- 1) 유압시스템에서 각 소자는 최대부하시보다 50% 이상 안전성을 높여야 한다.
- 2) 유압시스템에서 일정길이보다 길어지면 자동적으로 motion이 움직이지 않도록 하는 limit switch가 필요하다 또한 과도한 회전시에도 자동적으로 motion이 되지 않도록 하는 limit switch가 필요하다.
- 3) 시스템이 Shutdown이 되었을때, 처음의 고정된 장소로 이동시까지 갑작스런 움직임이 있어서는 안된다.
- 4) 긴급한 상황이 발생시 시스템이 자동적으로 Shutdown이 되어야한다.

2. 제어기설계

가 서어보 구동장치 제어기

운동발생장치인 각실린더를 제어하기 위한 서어보 구동장치 제어기 블록도는 [그림1]과 같다.



[그림1] 서어보 구동장치 제어기 블록도

[그림1]에서 서어보 밸브, 압력 및 위치 제어는 PD제어기를 사용했다.

여기서, 서어보밸브 제어기는 시스템의 선형화 대역폭을 향상시키고, 압력제어기는 부하 영향 및 시스템 안정화를 향상시키고, 위치제어는 시스템의 위치 정확성을 높인다.

나. 6자유도 운동제어

1) Euler Angle정의

6자유도 운동에서 x,y,z축에 대한 Yaw, Roll 및 Pitch의 Euler Angle을 아래와 같이 정의한다.

z축 회전각 :  $\psi$

y축 회전각 :  $\theta$

x축 회전각 :  $\phi$

이때,  $X_i, Y_i, Z_i$ 을 관성좌표라 할경우 각 좌표축에대해 Euler Angle만큼 이동시 관성좌표와 Body-fixed좌표( $x_b, y_b, z_b$ )는 식(1)과 같이 주어진다.

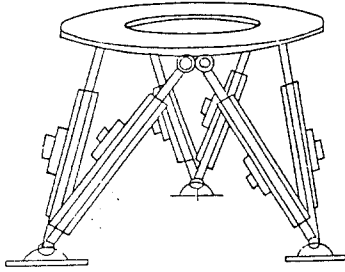
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = [T] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_b = [T]^T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i \quad (1)$$

여기서 [T]는 orthogonal이며 아래와 같다.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\phi & \sin\phi\sin\theta\cos\phi & \cos\phi\sin\theta\cos\phi \\ & -\cos\phi\sin\theta & +\sin\phi\sin\theta \\ \cos\theta\sin\phi & \sin\phi\sin\theta\sin\phi & \cos\phi\sin\theta\sin\phi \\ & +\cos\phi\cos\theta & -\sin\phi\cos\theta \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}$$

2) 6자유도 운동해석

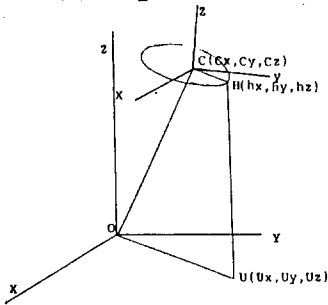
6자유도 운동을 수행하기 위하여 [그림3]과 같은 운동발생장치를 구성하였다.



[그림2] 6자유도 운동발생장치

[그림2]에서 각 실린더의 길이를 변화시킴으로써 6자유도 운동이 가능하다.

따라서, 각 실린더 길이로써 회전운동 및 병진운동을 수행시키기 위해서 [그림3]과 같이 modeling하였다.



[그림3] 6-DOF운동 시뮬레이터 modeling

병진운동 (Heave, Sway, Surge)는 직각좌표에 의해 이루어지며, 회전운동(Yaw, Roll 및 Pitch)은 각 좌표축에 대한 Euler Angle을 이용한 좌표 변환에 의해 이루어진다.

그러므로 실린더의 길이  $|\vec{UH}|$ 는 식(2)와 같이 표현된다

$$\vec{UH} = \begin{bmatrix} Cx \\ Cy \\ Cz \end{bmatrix} + [T] \begin{bmatrix} hx \\ hy \\ hz \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Ux \\ Uy \\ Uz \end{bmatrix} \quad (2)$$

따라서, 실린더길이의 초기치가  $|\vec{UH}_0|$ 인 경우 실린더 길이 변화  $\Delta \ell$ 은 식(3)으로 주어진다.

$$\Delta \ell = |\vec{UH}| - UH_0 \quad (3)$$

[그림3]에서 각 실린더 길이를  $l_1, l_2, \dots, l_6$ 라 할때 각각의 실린더 길이는 식(1)에서 식(3)과 같은 방법으로 구하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

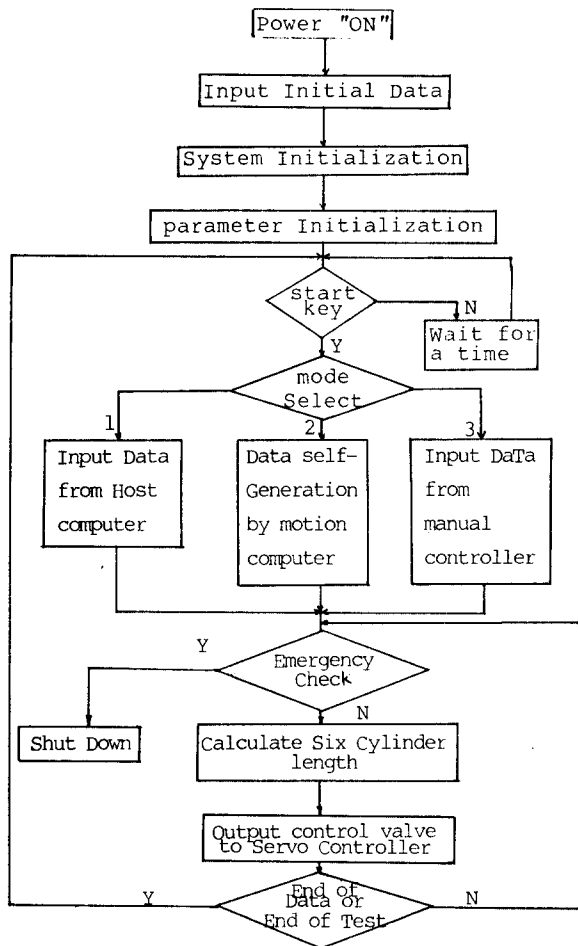
$$l_k = |\vec{U}_i H_j| \quad (i,j=1,2,3 \quad K=1,2, \dots, 6) \quad (4)$$

따라서 Euler Angle( $\psi, \theta, \phi$ ) 및 motion plate의 중심점(Cx, Cy, Cz)의 값이 주어질 경우 각 실린더의 길이를 실시간으로 구해서 제어하면 실시간 제어 6자유도 운동을 얻을 수 있다.

### 3. 실시간 제어 알고리즘

6자유도 운동 시뮬레이터의 실시간 제어를 구현하기 위한 알고리즘은 아래와 같다.

- 1) 시스템 Power를 "ON"시킨후 시스템의 초기치를 입력시킨다.
- 2) 프로그램 수행시간을 절약하기 위해 반복적으로 사용되는 값들은 미리 계산하여 memory상에 Table로 저장한다.
- 3) 시스템을 수행시 초기상태로 놓는다.
- 4) 시스템의 Inergency state를 체크한다.
- 5) Host Computer 또는 manual controller로부터 command input을 입력하여 6개의 실린더 길이를 계산한후 Servo Controller로 제어 입력을 출력시킨다.
- 6) 매 주기마다 시스템의 Inergency을 체크한다. 위 알고리즘을 수행하기 위한 S/W흐름도는 [그림4]와 같다.

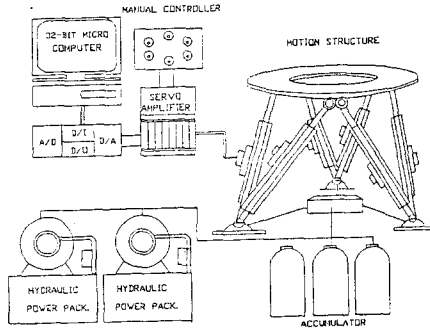


[그림4] 실시간 제어를 위한 S/W흐름도

위의 알고리즘은 "C"언어로 IBM 호환기종 AT에서 수행하였을때 한 Cycle당 8mS로써 Bandwidth가 6Hz인 6자유도 운동 시뮬레이터의 실시간 제어가 가능하다.

#### 4. 전체시스템 구성

6자유도 운동 시뮬레이터의 실시간 제어를 위한 시스템 구성도는 [그림 5]와 같다.



[그림 5] 6자유도 실시간 제어시스템 구성도

[그림5]에서 6자유도 운동의 명령은 Host 컴퓨터에서 주어지는 실 제차량 주행시험기록 명령이나 Pre-programed Schedule, 신호발생기 또는 Manual controller 에서 주어지는 입력 명령 Pitch, Roll, Yaw, Heave Sway 및 Surge값을 운동제어기(32bitmicro Computer)에서 각 실린더 길이를 구한후 D/A port를 통하여 Servo 제어기로 내보낸후 PID controller를 사용하여 시스템을 제어한다.

또한, 각 Imergency 상태는 Host 컴퓨터 및 Motion Controller(Micro Computer)에서 Check하도록 구성했다.

### III. 결 론

본 논문에서는 대부분 6자유도 운동 시뮬레이터의 제어기 설계서 고려사항 및 실시간 제어기법에 대해 설명하였다.

실시간 제어는 6자유도 운동해석을 8mS이내로 계산 해서 6Hz의 대역폭을 갖는 운동 시뮬레이터에 적용 가능성을 확인하였으며 또한, 각 주기마다 각 상태별로 Imergency를 Check함으로써 시스템의 안전성을 높였다.

### IV. 참 고 문 헌

1. C.J Jansen.  
Present and Future Developments of the NLR Moving Bas Research Flight Simulator, AIAA. Flight simulation Technologies conference, September 7-9 PP54-61, 1988
2. Michel Baret  
Six Degrees of freed on Labge Motion System for flight simulators
3. Robert W Levi and Larry Hayashiqwa  
Speificiation Considerations for a small motion base  
AIAA Flight Simulation Technologies conference, September 7-9 PP62-72,1988
4. AGARD, Dynamic Charactoristics of Flight Simulator Motion Systems.  
AGARD, Advisory Report No.AR-144,1979
5. MIL-STD-1558, Six Degree of Freedom Motion System for Aircrew Member training Simulators