

## 2자유도를 갖는 3차원 운동 시뮬레이터 연구

# Implementation of 3D Motion Simulator with Two Degrees of Freedom

최 명 환\*      김 영 진\*\*  
Choi, Myoung-Hwan      Kim, Young-Jin

### Abstract

In this work, we have developed a 2 degrees of freedom(DOF) motion simulator that can generate the sensation of motion in a 6 DOF space. The motion base has the DOF of roll and pitch, and the purpose of the motion base is to create the sensation of riding a vehicle in a 3D space by controlling the motion base. The dynamics of the mechanism was analysed and the optimal design of the motion base mechanism has been reached. The prototype motion base mechanism was developed and tested. The multi-axis motion controller(MMC) was used to control the two AC servo motors that drive the roll and pitch motion.

키워드 : 자유도, 롤 운동, 피치 운동, 시뮬레이터

Keywords : DOF(degrees of freedom), roll motion, pitch motion, simulator

### 1. 서론

본 연구에서는 2자유도(Degree of Freedom)를 갖는 3차원 운동 시뮬레이터의 연구에 대해 서술하고자 한다. 본 연구의 목적은 6자유도를 갖는 대형 운동 시뮬레이터의 운동을 효과적으로 구현하는 소형, 저가의 2자유도 운동 시뮬레이터 개발에 중점을 두었다.

2자유도는 Roll과 Pitch[1][3]로 구성되며, Roll 운동은 z축을 중심으로하는 회전운동이며 Pitch 운동은 y축을 중심으로하는 회전운동이다. 2자유도 시뮬레이터의 운동구성은 그림 1과 같다. 시뮬레이터는 운동체 진행방향을 정면으로 향하여 Roll, Pitch 운동을 하게된다. 본 연구에서는 기존의 시뮬레이터에서 사용하던 유압구동방식을 사용하지 않고 AC Servo 모터[2]만을 구동원으로 하였다. 따라서 모터의 토크를 최소화하기 위한 구동 메카니즘과 시뮬레이터의 Frame 구조에 대한 고찰이 필요한데 이에 대해서는 2장에서 다루었다.

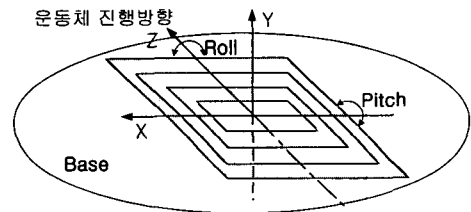


그림 1. 2자유도 운동 구성

2장에서 결정된 구동 메카니즘을 적용한 각 Frame의 동역학적 해석[4]과 이에따른 모터 토크 및 Ball Screw 사양 결정은 3장에서 서술 하였고, 4장에서는 제어기 구조와 3차원 운동을 2자유도 기구의 운동으로 변환하는 알고리즘 구현에 대해 설명하였다. 끝으로 5장에 결론을 맺었다.

## 2. 구동 메카니즘

### 2.1 모터 토크를 최소화하기 위한 메카니즘 고안

모터의 토크를 최소화 할 수 있는 기구적 메카니즘을 고안하는 것을 Frame 설계의 우선 과제로 하여 문제에 접근하였다. 물체의 중심 축에 모터를 직접 연결하여 물체를 회전시키려면 큰 힘이 필요하며, 물체의 무게중심이 회전축으로부터 멀어지면 더욱 큰 힘이 필요하게 된다. 이 힘을 줄이기 위한 방안으로 기계적 요소, 즉 기어 등을 연결하게 된다. 그러나 기어를 사용했을 때는 기계적 오차가 발생하게 되므로 본 연구에서는 기어를 사용하지 않고 비교적 기계적 오차가 적은 Ball Screw를 사용한 구동방식을 고안하였다. 그림 2와 같은 구조로 Ball Screw를 이용하면 모터를 물체의 회전축에서 분리 할 수 있고 지레의 원리를 적용할 수 있어서 Frame을 작은 힘으로도 회전시킬 수 있게 된다.

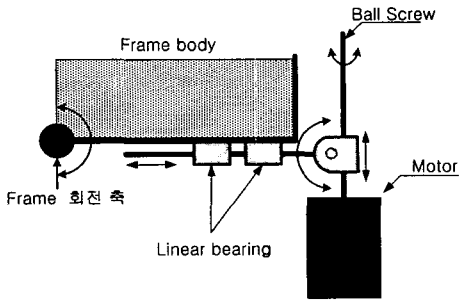


그림 2. 구동 메카니즘

### 2.2 Roll, Pitch Frame 설계

2자유도 운동 시뮬레이터는 Base, Pitch 그리고 Roll Frame으로 구성된다. 구동되는 Frame은 Roll과 Pitch Frame이고 이들 Frame을 구동시키는 구동 Unit는 그림 2와 같이 AC Servo 모터, Ball Screw unit, Linear bearing unit 그리고 몇 개의 연결부품으로 구성된다. Pitch Frame은 Base Frame에 고정된 Pitch 구동 Unit에 의해 X축을 중심으로 회전하게 되고, Roll Frame은 Pitch Frame에 고정된 Roll 구동 Unit에 의해 Z축을 중심으로 회전하게 된다.

각 Frame은 안전을 고려하여 프레임이 구동될 때 한계위치 이상 구동 시 Frame간 충돌이 없도록 Limit sensor를 도입하였다.

## 3. 기구부 동력학적 해석

### 3.1 구동 메카니즘 분석

Frame을 점질량으로 모델하여 구동메카니즘을 간략화 하면 그림 3과 같고, 각 기호의 명칭은 아래와 같다.

$w$  : Frame 회전 각속도

$w_{max}$  : Frame 회전 최대 각속도

(30 deg/sec)

$\alpha_{max}$  : Frame 회전 최대 각 가속도

$g$  : 중력 가속도

$m$  : Frame의 질량

$C$  : Frame의 회전축

$h$  : C에서 Frame의 무게 중심까지의 거리

$J$  : Frame과 Ball Screw Lead nut의

연결 점

$E$  : Frame 수평 기준선과 모터축의 교점

$R$  : C에서 J까지의 거리(회전반경)

$I$  : 회전축 C를 중심으로하는  $m$ 의

moment of Inertia( $m h^2$ )

$\theta$  : Roll, Pitch Frame의 구동각

$d$  : 구동각  $\theta$ 에 따른 R의 가변거리(Linear Bearing & shaft 구조에 의함)

$P$  : 구동각  $\theta$ 일 때 Frame과  $m$ 의 회전 반경의 교차점

$P'$  : 구동각  $\theta$ 일 때 점 J가 수직 이동한 위치

$F$  : 최대 각속도  $\alpha_{max}$ 로 구동하기 위해 Ball Screw 축상에 필요한 힘

$F_{dg}$  : 구동각  $\theta$ 일 때 중력가속도  $g$ 에 의해 점 P에 작용하는 힘

$T_{dg}$  : 구동각  $\theta$ 일 때  $F_{dg}$ 에 의해 Frame 회전축 C에 작용하는 토크

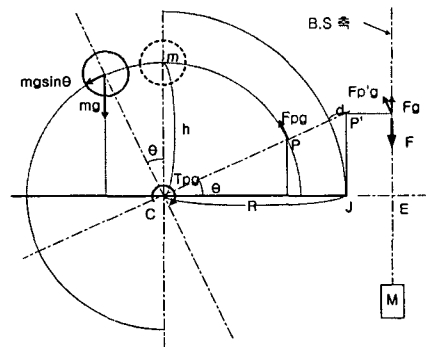


그림 3. 구동 메카니즘 분석

**3.1.1 구동각  $\theta$  일 때 중력 가속도에 의해 Ball Screw 축상에 작용하는 힘 ( $F_g$ )**

그림 3에서 구동각  $\theta$  일 때 중력가속도에 의해  $m$ 에 작용하는 힘을 분석해 보면,  $h$ 를 반경으로 하는 원의 접선 방향으로  $m g \sin \theta$ 의 힘이 작용한다. 이때 점 J는 사각  $\theta$ 만큼 반시계 방향으로 회전한 위치가 되고 점 P에는 크기  $m g \sin \theta$ 인 힘이 반경  $h$ 인 원의 반시계 접선 방향으로 작용한다. 이 힘을  $F_{pg}$ 라고 하면,  $F_{pg}$ 에 의한 회전축 C에서의 시계 방향으로의 토크  $T_{pg}$ 는 식 (1)과 같다.

$$T_{pg} = F_{pg} \times h = m g h \sin \theta \quad (1)$$

이때 점 P'에서의 힘  $F_{p'g}$ 는  $F_{pg}$ 와 같은 방향으로 작용하며  $T_{pg}$ 와의 관계는 식 (2)와 같다.

$$T_{pg} = F_{p'g} \times (R+d) \quad (2)$$

식 (1),(2)에서  $F_{p'g}$ 에 대해 정리하면 식 (3)이 된다.

$$F_{p'g} = \frac{m g h \sin \theta}{R+d} \quad (3)$$

$F_{p'g}$ 에 의해 Ball Screw에 작용하는 Ball Screw 축 방향으로의 힘은  $F_{p'g}$ 에  $\cos \theta$ 를 곱한 것과 같다. 이 힘을  $F_g$ 라하면  $F_g$ 는 식 (4)가 된다.

$$F_g = F_{p'g} \cos \theta = \frac{m g h \sin \theta \cos \theta}{R+d} \quad (4)$$

**3.1.2 최대 각속도  $\alpha_{max}$ 로 구동시 필요한 힘(F)**

최대 각속도  $\alpha_{max}$ 로 Frame을 구동한다고 할 때 Ball Screw 축상에 필요한 힘을  $F$ 라고 하자. 구동각  $\theta$ 만큼 기운 상태에서 Frame을  $\alpha_{max}$ 로 구동하기 위해 필요한 힘  $F$ 는 식 (5)와 같이 구해진다.

$$F = F_{p'g} \cos \theta + \frac{I \alpha_{max}}{R+d} = \frac{m g h \sin \theta \cos \theta + m h^2 \alpha_{max}}{R+d} \quad (5)$$

**3.1.3 최대 각속도  $w_{max}$ 로 구동하기 위한 제한 조건**

모터의 정격회전수를  $W_m$ , Ball screw Lead[9]를  $L$ , Gear 감속비를  $r$ , Frame의 회전반경을  $R$ 이라고 하자. Frame을 최대 각속도  $w_{max}$ 로 구동할 때 Ball Screw의 축상에서의 속도를  $v$ 라고 하면,  $v$ 는 식 (6)으로 구할 수 있다.

$$v = w_{max} \times R \quad (6)$$

또,  $v$ 는  $W_m, r, L$ 의 관계로 나타낼 수 있다.

$$v = W_m \times r \times L \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)로에서 Frame을  $w_{max}$ 로 구동하기 위해 필요한  $R, L, r, W_m$ 의 관계를 알 수 있다.

**3.1.4 Frame의 무게중심**

그림 3에서 Roll Frame과 Pitch Frame은 점질량으로 모델링되었다. 각 Frame의 무게 중심은 모터의 토크에 큰 영향을 미친다. 그러므로 기구 설계시 각 Frame의 무게 중심이 최대한 구동 축에 가깝도록 설계해야 한다. 기구 설계시 구동축의 위치 선정 방법은 임의의 좌표계상에서 기구의 각 구성 요소를 점질량으로 모델하여 무게 중심을 구한 후에 무게 중심까지의 거리가 최소화되도록 좌표계(회전축)를 수평이동시키는 방법을 사용하였다. 무게 중심은 평행력의 합성법[7]을 이용하였다. 그림 4는 Pitch Frame의 무게중심 구하는 방법을 보였다. Pitch Frame을 구성하는 각 개체의 점질량과 Z-Y 좌표계 상의 좌표 ( $z, y$ )는 다음과 같다.

- A : 모니터 20 [Kg], 좌표( 0.3, 0.5) [m]
- B : Roll Body 40 [Kg], 좌표( 0, 0.15) [m]
- C : 조종자 100 [Kg], 좌표( -0.3, 0.25) [m]
- D : Pitch Body 40 [Kg], 좌표(-0.15,-0.25) [m]
- E : Pitch Frame의 점질량

식 (8)과 식 (9)로부터 E의 무게중심 좌표 ( $z_E, y_E$ )를 구한다.

$$z_E = \frac{z_A m_A + z_B m_B + \dots + z_D m_D}{\sum m_E} = -0.15 [m] \quad (8)$$

$$y_E = \frac{y_A m_A + y_B m_B + \dots + y_D m_D}{\sum m_E} = 0.155 [m] \quad (9)$$

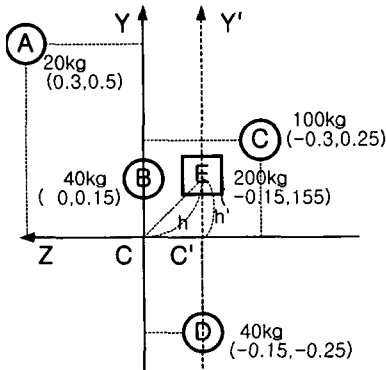


그림 4. Pitch Frame 무게중심

식 (8)과 식 (9)의 결과로 Pitch Frame의 무게중심이 Z-Y 좌표계의 회전축 C로부터 Z축으로  $-0.15 [m]$ , Y축으로  $0.155 [m]$  만큼 치우쳐 있음을 알 수 있다. Frame 설계시 좌표계의 기준점을 이동시킴으로써 이 값을 0으로 보정할 수 있다. 본 연구에서는 Y축을 Y'로 이동함으로써  $z_E$  값을 0으로 보정하여 Pitch Frame을 설계하였다. 이렇게 함으로써 Z-Y 좌표계의 회전축 C와 점질량 E까지의 거리  $h$ 를  $h'$ 로 줄일 수 있고, 따라서 식 (5)에 의해 구해지는 힘  $F$ 를 보다 작도록 Frame을 설계할 수 있다. Roll Frame도 같은 방법으로 설계하였다.

### 3.2 모터의 토크와 Ball Screw 사양 결정

Frame을  $\alpha_{max}$ 로 구동하기 위해 Ball Screw 축상에 필요한 힘  $F$ 와 이 힘을 내기 위한 모터의 토크  $T$ 와의 관계는 식 (10)과 같다. 여기서  $e$ 는 Ball Screw의 효율이다.

$$F = \frac{2\pi e}{L} \times T \quad (10)$$

식 (5)와 식 (10)으로부터 Frame을  $\alpha_{max}$ 로 구동하기 위한 모터의 토크를 구한다.

Ball Screw의 Lead ( $L$ )는 규격화 되어 생산되기 때문에 사용자의 시스템에 맞는 사양을 선택해야 된다. 식 (6)과 식 (7)로부터 Lead ( $L$ )를 구할 수 있다.

$$L = \frac{w_{max} R}{W_m r} \left[ \frac{mm}{revolution} \right] \quad (11)$$

그림 5와 그림 6은 본 실험실에서 제작한 2자유도 운동 시뮬레이터의 Frame구조와 조종자가 탑승한 사진이다.



그림 5. 시뮬레이터 Frame구조 (측면도)



그림 6. 조종자가 탑승한 모습

표 1은 2자유도 운동 시뮬레이터의 설계 사양이다. 2자유도 운동 시뮬레이터의 구동각도는  $\pm 17 [^\circ]$ 이며 최대 각속도  $w_{max}$ 는  $30 [deg/sec]$ 이다.

표 1. 2자유도 운동 시뮬레이터 설계 사양

구동부	계산 조건		
	항 목	값	단위
Roll	m : Frame부 총 점질량	160	[Kg]
	g : 중력 가속도	9.8	[m/ sec <sup>2</sup> ]
	h : 회전축과 무게 중심까지의 거리	0.26	[m]
	$\theta$ : 최대 구동각	30	[°]
	I : C를 중심으로 하는 moment of Inertia	12.15	[Kg m <sup>2</sup> ]
	R : Frame 회전 반경	0.525	[m]
	$\alpha_{max}$ : 최대 각 가속도	5.25	[rad/ sec <sup>2</sup> ]
	e : 볼스크류 효율	0.5	
	L : 볼스크류 Lead	10	[mm/rev]
	F : Force	495	[Kgm/ sec <sup>2</sup> ]
	T : Torque	1.58	[Nm]
	$W_m$ : 모터 정격 회전수	2000	[rpm]
Pitch	m : Frame부 총 점질량	200	[Kg]
	g : 중력 가속도	9.8	[m/ sec <sup>2</sup> ]
	h : 회전축과 무게 중심까지의 거리	0.155	[m]
	$\theta$ : 최대 구동각	30	[°]
	I : C를 중심으로 하는 moment of Inertia	20.58	[Kg m <sup>2</sup> ]
	R : Frame 회전 반경	0.5	[m]
	$\alpha_{max}$ : 최대 각 가속도	5.25	[rad/ sec <sup>2</sup> ]
	e : 볼스크류 효율	0.5	
	L : 볼스크류 Lead	10	[mm/rev]
	F : Force	519.9	[Kgm/ sec <sup>2</sup> ]
	T : Torque	1.65	[Nm]
	$W_m$ : 모터 정격 회전수	2000	[rpm]

#### 4. 제어기와 제어 알고리즘

##### 4.1 제어기 구성

상위제어기로는 삼성의 MMC(Multi Motion Controller) 보드[11]를 사용하였다. 제어기의 Hardware 구성은 크게 MMC 보드와 모터 Driver

를 잇는 Interface 회로, Power 회로[10], Sensor 회로[8]로 구성된다. MMC 보드는 PC-Based slot 형태의 Open - Architecture 구조로 설계되어 모터의 종류에 관계없이 Motion 제어가 가능하도록 설계된 보드이다. Power 회로의 설계는 안전을 위해 모터 Driver의 Alarm신호를 직렬로 연결하여 Driver 중 하나라도 Alarm 신호가 발생하면 모든 Driver의 모터 구동전원이 OFF 되어 운동 시뮬레이터가 정지 되도록 설계하였다. Sensor 회로는 Roll과 Pitch의 Limit와 Home 위치를 검출하기 위해 설계하였다.

그림 7은 제어기의 구조를 Block Diagram으로 나타내었다. 제어 알고리즘의 입출력 관계를 알 수 있다.

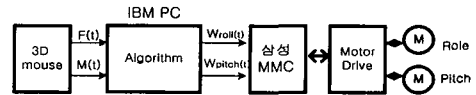


그림 7. 제어기 구조

##### 4.2. 제어 알고리즘

6자유도 시뮬레이터의 운동 구성 요소는 그림 8과 같이 3개의 Translational 운동( 좌우진, Heave, 전후진)과 3개의 Rotational 운동( Pitch, Yaw, Roll)으로 구성된다. 이 운동은 3D mouse의 출력과 일대일 대응된다.

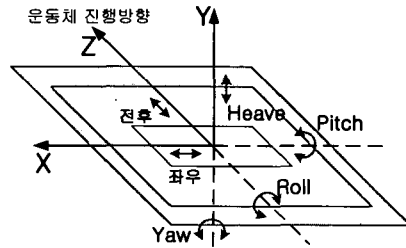


그림 8. 6자유도 운동구성

3D mouse의 출력[6]은 Translational 운동 명령과 Rotational 운동 명령으로써 각각 3개씩 Force, Moment의 정보이다.

그림 9는 3D mouse의 좌표계[5]와 각 운동의 방향을 나타낸다. Translational 운동 명령은 X, Y, Z 축 방향의 운동 명령이며  $F_x(t)$ ,  $F_y(t)$ ,  $F_z(t)$ 로 표시하였고, Rotational 운동 명령은 X, Y, Z 각 축을 중심으로 회전하는 운동 명령이며  $M_x(t)$ ,  $M_y(t)$ ,  $M_z(t)$ 로 표시하였다.

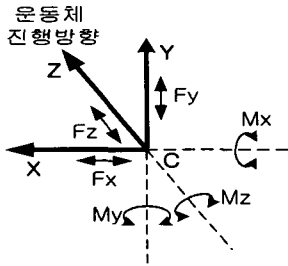


그림 9. 3D mouse의 좌표계와 운동명령 구성

3D mouse의 Translational 운동 명령  $F(t)$ , Rotational 운동 명령  $M(t)$ 는 식(12), (13)와 같이 성분별로 나타낼 수 있다.

$$F(t) = \begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \\ F_z(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$M(t) = \begin{bmatrix} M_x(t) \\ M_y(t) \\ M_z(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

가상 공간을 이동하는 6자유도 운동체(이후 '가상 운동체'라고 한다)의 좌표계를 3D mouse의 좌표계와 같은 방향으로 정하자. 이 가상 운동체 좌표계에 대한 가상 운동체의 Translational 속도를  $V(t)$ , Rotational 속도를  $W(t)$ 라고 하면,  $V(t)$ 와  $W(t)$ 는 식 (14), (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V(t) = \begin{bmatrix} V_x(t) \\ V_y(t) \\ V_z(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$W(t) = \begin{bmatrix} W_x(t) \\ W_y(t) \\ W_z(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

3D Mouse의 Translational, Rotational 운동 명령은 가상 운동체의 Translational 속도와 Rotational 속도의 명령으로 사용된다. 시간  $t$ 에 따른  $F(t)$ ,  $M(t)$ ,  $V(t)$ ,  $W(t)$ 의 변화는 아래의 그림 10과 같다.

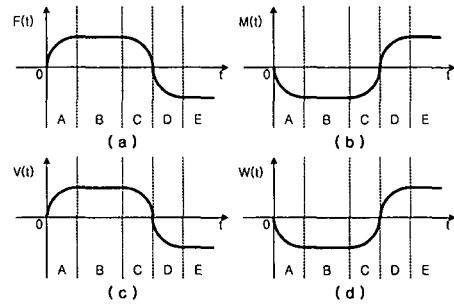


그림 10. 3D mouse의 운동명령  $F(t)$ ,  $M(t)$ 와 가상운동체의 속도  $V(t)$ ,  $W(t)$ 의 관계

그림 10에서 A, B, C, D, E는 시간 축에서 각각 같은 구간이다. A는 정방향 가감속 구간, B와 E는 등속구간, C와 D는 역방향 가감속 구간이다. 여기서 방향은 그래프 상의 부호로써 표시된다.

그림 10의 (a)와 (c)에서 3D mouse의 Translational 운동 명령  $F(t)$ 와 가상 운동체의 Translational 속도  $V(t)$ 의 관계는  $F(t)$ 의 변화곡선과 같은 방향과 크기로  $V(t)$ 의 변화 곡선을 나타낼 수 있다. 또 그림 10의 (b)와 (d)에서 3D mouse의 Rotational 운동 명령  $M(t)$ 와 가상 운동체의 Rotational 속도  $W(t)$ 의 관계는  $M(t)$ 의 변화곡선과 같은 방향과 크기로  $W(t)$ 의 변화를 표시할 수 있다. 이것은 3D mouse와 가상 운동체가 모두 6자유도를 갖기 때문에 3D mouse의 운동 명령의 방향과 변화의 크기에 비례하여 가상 운동체가 이동, 정지 또는 회전하기 때문이다.

그러면 2자유도 운동 시뮬레이터로 가상 운동체의 6자유도 운동의 구현 방법을 생각해 보자. 2자유도 운동 시뮬레이터는 그림 1에 나타난 바와 같이 Roll과 Pitch로만 구성된다. 2자유도 운동 시뮬레이터의 Translational 명령 속도를  $S(t)$ , Rotational 명령 속도를  $A(t)$ 라고 하자.  $S(t)$ 와  $A(t)$ 는 식 (16), (17)과 같이 성분별로 나타낼 수 있다.

$$S(t) = \begin{bmatrix} S_x(t) \\ S_y(t) \\ S_z(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} A_x(t) \\ A_y(t) \\ A_z(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

2자유도 운동 시뮬레이터에는 없는 Translational 명령 속도  $S(t)$ 를 설정한 것은 가상 운동체의 6자

유도 운동을 2자유도 운동 시뮬레이터의 실제 운동인  $W_{roll}(t)$ 과  $W_{pitch}(t)$ 로 변환하기 위해서이다. 2자유도 운동 시뮬레이터의 Rotational 명령 속도  $A(t)$ 는 가상 운동체의 Rotational 속도  $W(t)$ 에 비례상수를 곱하여 적용하면 된다. 가상 운동체가 회전(Rotational 운동)하면 2자유도 운동 시뮬레이터에 앉은 조정자가 가상 운동체가 지향하는 방향과 같은 방향으로 회전해야 되기 때문이다. 문제는 가상 운동체의 Translational 속도  $V(t)$ 의 처리 방법이다. 가상 운동체의 Translational 운동을 2자유도 운동 시뮬레이터로 구현하기 위해서는 가감속도에 따른 조종자의 속도감을 구현하는 것이 핵심 사항이다.

가상 운동체의 Translational 속도  $V(t)$ , Rotational 속도  $W(t)$ 가 그림 11의 (a), (b)와 같을 때 2자유도 운동 시뮬레이터의 Translational 명령 속도  $S(t)$ 와 Rotational 명령 속도  $A(t)$ 의 변화 곡선을 그림 11의 (c), (d)에 각각 나타냈다.

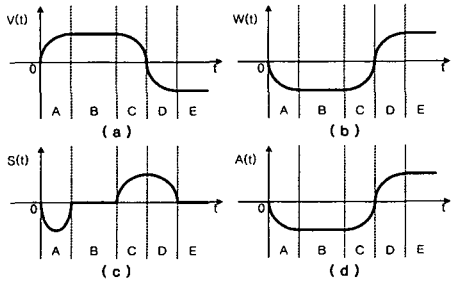


그림 11. 가상운동체의 속도  $V(t)$ ,  $W(t)$ 와 2자유도 운동 시뮬레이터의 명령속도  $S(t)$ ,  $A(t)$ 의 관계

그림 11과 같이  $A(t)$ 는  $W(t)$ 와 같은 형태로 변화한다. 그런데  $S(t)$ 는  $V(t)$ 와 반대 방향이며 크기는  $V(t)$ 를 미분한 형태가 된다. 이것은 가상 운동체의 Translational 속도  $V(t)$ 에 대한 2자유도 운동 시뮬레이터 위의 조종자가 느끼는 속도감을 구현하기 위해 변환된 것이다. 예를 들면 가상 운동체가 출발할 때 2자유도 운동 시뮬레이터의 조종사는 가상 운동체의 Translational 운동에 의해 운동 방향의 반대로 힘을 느끼게 되는 것이다.

$S(t)$ 의 크기가  $V(t)$ 를 미분한 값이 되는 것은, 속도  $V(t)$ 의 변화량이 있을 때만 2자유도 운동 시뮬레이터가 구동되어야 하기 때문이다.  $S(t)$ 와  $V(t)$ 의 관계는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(t) = -K_1 \dot{V}(t) = -K_2 (V(t) - V(t-\Delta t)) \quad (18)$$

$K_1$ ,  $K_2$ 은 비례상수이며,  $\Delta t$ 는 단위시간이다. 그림 11의 (b), (d)로부터  $A(t)$ 는  $W(t)$ 의 값에 비례 상수  $K_3$ 를 곱하여 나타낼 수 있다.

$$A(t) = K_3 W(t) \quad (19)$$

2자유도 운동 시뮬레이터의 실제 운동인  $W_{roll}(t)$ 과  $W_{pitch}(t)$ 는 2자유도 운동 시뮬레이터의 Translational 명령 속도  $S(t)$ 와 Rotational 명령 속도  $A(t)$ 의 각 성분에 비례상수배하여 식 (20)과 식 (21)로 나타낼 수 있다.

$$W_{roll}(t) = A_x(t) + A_\alpha \dot{S}_x(t) + K_4 \dot{A}_y(t) \quad (20)$$

$$W_{pitch}(t) = A_x(t) + A_\alpha \dot{S}_x(t) + K_5 \dot{A}_y(t) \quad (21)$$

두 식에서 첫번째 항은 2자유도 운동 시뮬레이터의 실제 운동에 직접 영향을 주지만, 나머지 항은 미분관계로 영향을 준다. 이것은 2자유도 운동 시뮬레이터의 운동 구성요소가 아닌 운동의 효과를 속도감의 차원에서 구현했기 때문이다. 각 항의 설명은 다음과 같다.

식 (20)에서  $A_x(t)$ 는 2자유도 운동 시뮬레이터의 Roll 명령속도로  $W_{roll}(t)$ 에 가장 큰 영향을 준다.  $A_\alpha$ 는  $\dot{S}_x(t)$ 의 비례상수이다.  $\dot{S}_x(t)$ 는 2자유도 운동 시뮬레이터의 좌우진 명령속도의 변화량으로  $W_{roll}(t)$ 에 적용된다.  $\dot{A}_y(t)$ 는 2자유도 운동 시뮬레이터의 Yaw 명령속도의 변화량으로  $W_{roll}(t)$ 에 적용되며  $K_4$ 는 비례상수이다.

식(21)에서  $A_x(t)$ 는 2자유도 운동 시뮬레이터의 Pitch 명령속도로  $W_{pitch}(t)$ 에 가장 큰 영향을 준다.  $A_\alpha$ 는  $\dot{S}_x(t)$ 의 비례상수이다.  $\dot{S}_x(t)$ 는 2자유도 운동 시뮬레이터의 전후진 명령속도의 변화량으로  $W_{pitch}(t)$ 에 적용된다.  $\dot{A}_y(t)$ 는 2자유도 운동 시뮬레이터의 Yaw 명령속도의 변화량으로  $W_{pitch}(t)$ 에 적용되며  $K_5$ 는 비례상수이다. 식 (20)과 식 (21)에는 2자유도 운동 시뮬레이터의

Translational 명령속도 중 Heave 명령속도  $S_y(t)$ 가 고려되지 않았는데 Heave운동은 2자유도 운동 시뮬레이터로는 구현할 수 없기 때문이다. 다만, 가상 운동체가 헬리콥터와 같은 수직 이착륙 운동체일 때, 운동체의 진동을 구현하는 부분을 별도로 만들고 HMD와 같은 시각 매개체와 연동을 하면 수직 운동의 효과를 낼 수 있다.

## 5. 결론

지금까지 2자유도 3차원 운동 시뮬레이터의 설계부터 6자유도 운동을 2자유도 운동으로 구현하는 알고리즘까지 살펴보았다. 사람은 감각 기관에 의해서 위치 이동과 회전을 느끼게 되는데 시각이 차지하는 비중이 상당히 크다. 본 연구의 향후 연구 진행방향도 이 시각적 효과를 주기 위한 부분이 포함된다. 기본적으로 6자유도 운동을 2자유도 운동으로 완전히 구현할 수 없음은 너무도 자명한 일이지만, 시각적 효과를 제공하는 장치와 2자유도 운동 시뮬레이터를 연동한다면 그 효과는 더욱 클 것으로 본다. 그리고 기구의 소형화와 저비용화가 이루어지면서 게임산업으로의 응용도 수월하리라고 본다.

향후 진행되어야 할 사항중 가장 중요한 것은 시뮬레이션할 대상 운동체의 개개 특성을 잘 살리려면 각 계인값을 잘 설정해야 되기 때문에 2자유도 운동 시뮬레이터로 6자유도 운동을 구현하는 알고리즘의 계인값을 찾는 것이라 하겠다.

## 참 고 문 헌

- [1] JOHN J. CRAIG, *Introduction to ROBOTICS Mechanics and Control Second Edition*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [2] CLARENCE w. DE SILVA, *Control Sensors and Actuators*, Prentice Hall, 1989.
- [3] K.S.Fu외 2명, *ROBOTICS Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1987.
- [4] KUO, *AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS, SEVENTH EDITION*, PRENTICE HALL International Inc., 1995.
- [5] LogiCad, *Cyberpuck User's Manual v.2.1*, A Logitech Company.
- [6] LogiCad, *Magellan/ SPACE MOUSE Programming Guide, Version 2.1*, A Logitech Company.
- [7] David Halliday Robert Resnick, *Fundamentals of Physics*, John Wiley & Sons Inc, 1974.
- [8] *최신 센서데이터북*, 도서출판 世和, 1998.
- [9] 하이원코리아, *HIWIN 직선운동 기술정보*, HIWIN.
- [10] 삼성전자 생산기술센터, *CSDJ Servo Drive 사용자 Manual*, 삼성전자, 1, 2000.
- [11] 삼성전자 생산기술센터, *MULTI- MOTION 제어기 사용자 설명서(Ver 3.0)*, 삼성전자 생산기술센터, 1998.