

가상현실 공간에서의 운동 감성인자를 고려한 운동제현에 관한 연구

전 용 민* ((주)A-Worker)

Study of The Human Factors in Motion Environments and Development of Washout Algorithm for Virtual Reality Motion Systems

Jeon Yong Min (A-Worker Co.)

요 약

가상현실에 대한 인간의 감성인자를 고려한 제현용 시스템들은 컴퓨터 및 주변장치의 발달과 더불어 다각적인 방향으로 개발되었다. 가상현실의 환경을 조정하기 위해서는 인간의 감성인자들에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 이러한 가상현실 환경에서의 인간의 감성인자들 중 인체의 운동 감성인자를 연구하여, 가상현실의 운동 환경을 가장 효과적으로 제현할 수 있도록 하는 데 그 목적을 두고 있다. 즉 가상현실 환경에서의 운동감을 야기시키는 운동시스템 운동판의 최적의 운동을 발생시킬 운동명령을 생성하는 워시아웃 알고리즘(Washout Algorithm)의 물리적 특성을 연구하고, 워시아웃 알고리즘 내부의 고역필터들의 계수 의미를 파악하여 워시아웃 알고리즘에 의해 생성된 운동명령을 최선의 운동명령으로 보정키 위한 방법을 연구하고자 하였다.

Keyword : Washout Algorithm(워시아웃 알고리즘), Stewart Platform(스튜어트플랫폼) Simulator(시뮬레이터), Human Factor(감성인자)

1. 서 론

가상현실 운동감 제현용 운동시스템(이하 '가상현실용 운동시스템'라 칭한다.)은 제현하려고 하는 운동 자유도(Motion Degree of Freedom)의 수에 따라 기하학적 모양이 다양하다. 현재 가상현실용 운동시스템은 운동체의 운동 자유도수(6자유도: 병진성 운동 3개, 회전성운동 3개)를 모두 충족하는 스텔워드 플랫폼(Stewart Platform)의 형식을 많이 사용하고 있다.

실제 운동체는 공간상에서 운동체를 구동시키는 동력원이 허용하는 한 운동체 자체의 운동 자유도수 만큼 자유로운 운동이 가능하다. 반면, 지상에 고정된 가상현실용 운동시스템의 운동판 운동은 운동판을 구성하고 있는 액츄에이터(Actuator)의 연결형태와 한정된 운동거리에 의해 운동할 수 있는 자유도수와 운동공간이 제약을 받는다. 따라서 운동판의 한정된 자유도 운동과 그 운동범위 안에서 인간의 동적 느낌을 충족키 위한 최선의 운동을 제현해야 한다.

최선의 제현운동의 기준은 운동에 대한 인간의

인지정도를 파악하여 인간의 동적 느낌을 최대화할 수 있는 제현운동으로 가상현실용 운동시스템을 구성하고, 구동해야 한다. 따라서 인간의 운동 감성인자들에 대한 운동반응 정도를 파악하여 운동체의 자유도 운동을 제한하고, 가상현실용 운동시스템에서 의미있는 운동판의 운동을 구동시키기 위한 구동명령으로 전환할 수 있는 운동 제현 알고리즘의 개발이 필요하다. 이러한 알고리즘의 기능은 운동체의 운동을 이용하여 가상현실용 운동시스템의 한정된 운동범위에서 가능한 최선의 동적 느낌을 제현해 줄 수 있는 과정을 거쳐 최종적으로 운동판의 운동을 발생시키고자 하는 것이다.

최근 기반 이론의 발달과 컴퓨터의 고성능으로 최적필터(Optimal Filter) 및 적응필터(Adaptive Filter)를 개발하여 운동감 제현에 연구 목적으로 적용하고 있지만 아직까지는 상업적으로 제작 및 운용되고 있는 워시아웃 알고리즘은 고전적인 2차계 혹은 3차계 고역필터(High Pass Filter)에 가변적인 기능을 첨가한 것이 일반적으로 사용되고 있다. 이러한

이유는 개발된 워시아웃 알고리즘이 동일 알고리즘을 적용하고 있더라도 그 알고리즘에 사용된 각 계수(Parameter)는 지정한 운동체 및 운동판을 기준으로 조정된 계수를 적용하고 있기 때문에 유사한 운동체 및 운동판이라든가 다시 계수의 조정을 필요로 하고 있기 때문이다.

2. 워시아웃 알고리즘 형태 및 이해

워시아웃 알고리즘의 기본 형태는 고역필터와 지역필터들 간의 적절한 물리적 제한에 의한 선택에 의해 구성된다.

워시아웃 알고리즘의 기본 목적은 실제 대상 운동체에서 조종자의 조종입력에 대한 반응 운동을 운동시스템의 제한 공간내에서 조종자가 동일한 운동 느낌을 인지하도록 하는 것이다. 이러한 운동을 조종자에게 인지시키기 위하여 가상현실의 운동시스템은 운동체에서 발생하는 각 자유도 운동을 재생시켜야 한다.

운동체는 무한 공간에서 자유도 운동을 발생시키는 반면, 운동시스템의 운동은 상당한 공간적인 제한을 지니고 있다. 이러한 이유로 인하여 구조적인 제한 공간에서 효과적인 운동 재현을 위해 자유도 운동의 신호를 새롭게 정리하게 되는데, 이를 워시아웃(Washout)이라하며, 필터의 조합에 의해 운동시스템의 구동 명령신호(Cueing Signal)을 발생시키는 알고리즘을 워시아웃 알고리즘이라 한다.

3. 인체감각모델 (Human perception Model)

조종자가 운동을 인지하는 중요한 인자로서는 병진가속도(Translational Acceleration)와 회전 각속도(Angular Velocity)이며, 병진가속도는 인체 감각기관중 평형식(Otolith System)에서, 회전각속도는 전정관(Vestibular)에서 인지하게 된다. 그림 1은 인체의 귀의 중간부근에 위치하는 평형기관과 전정기관의 구성을 보이고 있다.

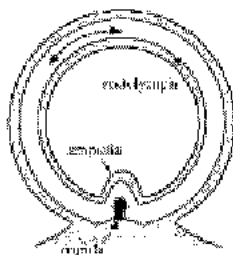


Fig 1 평형기관과 전정기관의 구성도

대상 운동체에서 발생되어진 가속도와 각속도는 워시아웃 알고리즘의 최초 입력 값으로 사용된다. 하지만 워시아웃 알고리즘의 선택적인 입력값으로 사

용하기 위해서는 가속도와 각속도가 운동체 내부의 조종자에게 어떻게 인지 될 것인지의 기본적인 조건을 만족해야 한다. 인체는 일반 운동에 대해서 감지할 수 운동영역과 감지할 수 없는 영역이 있다. 따라서 운동 대상체에서 발생되어진 가속도와 각속도를 워시아웃 알고리즘의 최초의 입력 값으로 사용하기 전에 먼저 인체가 과연 발생하는 가속도와 각속도를 인지할 수 있는냐는 판단이 선행되어야 한다. 따라서 인체의 운동 반응에 대한 분석이 필요하다.

3.1 Translational Sensation

조종자가 평형기관에서 병진운동을 인지하는 것은 식(1)과 같이 병진 가속도보다는 병진가속도와 중력 가속도간의 벡터차인 비력(Specific Force)으로 느끼게 된다.

$$\vec{a} = \vec{A} + \vec{g} \quad (1)$$

여기서 \vec{a} 는 병진 가속도 벡터, \vec{g} 는 중력 가속도 벡터이다.

가속도와 비력은 동일한 차원이며, 인체의 운동감지 기관에서는 순수한 병진 가속도보다 비력의 물리적인 운동상태를 감지하고, 그 감지정도를 정량화하여 뇌에 전달하게 된다. 가상현실용 운동시스템을 설치하는 목적중의 하나는 조종자의 위치에서 실제 운동 대상체가 운동시 발생하는 각각의 가속도에 대한 비력을 제한된 운동시스템에서 최대한 발생시키는 것이다. 따라서 운동체의 병진가속도를 제한하는 운동시스템은 순수한 병진가속도 보다 비력에 대한 특성을 나타내어야 한다는 것이다.

비력을 감지하는 평형식 기관의 수학적 모델링은 다음과 같다.

$$\frac{F(s)}{A(s)} = \frac{k(\tau_{as} + 1)}{(\tau_{ls} + 1)(\tau_{ss} + 1)} \quad (2)$$

3.2 Rotational Sensation

회전각속도에 대한 인체 감각기관의 형태는 일반 제어시스템에서 사용되어지는 각속도 센서의 형태와 동일하다. 인체가 인지하는 주파수 영역은 대체적으로 중저주파수 각속도에 대해 민감하게 반응을 하며, 저/고 주파수 각속도에 대해서는 그 민감도가 떨어진 다.

회전각속도를 감지하는 전정기관의 수학적 모델링은 다음과 같다.

$$\frac{\Omega}{\omega} = e^{-0.3s} \frac{T_s^2}{(T_{LS} + 1)(T_{SS} + 1)(T_{AS} + 1)} \quad (3)$$

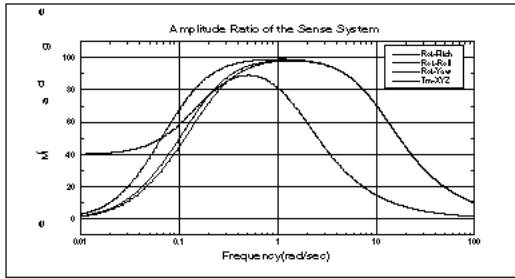


Fig 1. 병진 및 회전운동에 대한 인체 인식범위

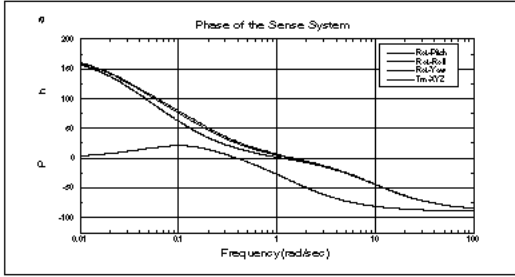


Fig 2. 병진 및 회전운동에 대한 인식위상차

4. 워시아웃 알고리즘의 구성

워시아웃 알고리즘의 기본 형태는 고역필터(High Pass Filter)와 저역필터(Low Pass Filter)들간의 적절한 물리적 제한과 결합에 의해 구성된다. 워시아웃 알고리즘의 최초 입력값으로는 대상 운동체에서 발생되어진 병진가속도와 회전각속도를 사용하게 된다.

4.1 High Pass Specific Force Part

병진성 운동시 인체의 인지 분석에 의거하여 대체적으로 0 - 10rad/sec 주파수대역의 병진성 운동들을 인체는 양호하게 인지할 수 있지만 운동체의 지구주파성 병진운동은 가상현실 운동시스템 내에서 재현하기 위해서는 운동관의 운동공간(Workspace for Motion) 영역을 크게 확보하여야 한다. 따라서 이러한 지구주파성 운동을 적절하게 상쇄하여야 하며, 재현 운동을 지속시키기 위해 고역필터를 이용하여 지구주파성 가속도 입력신호를 적절히 제거하게 된다.

고역필터의 차단주파수(Cutoff Frequency)는 운동시스템의 형태와 크기가 결정하는 운동시스템의 설계에 상당히 중요한 인자로 사용된다.

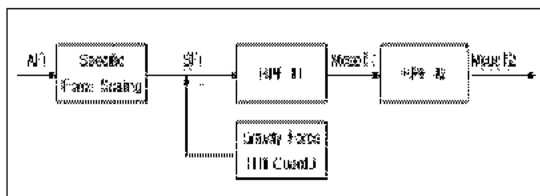


Fig 3. Translational Motion Channel

$$SF_i = K_i \{AF_i + G_i^T\} - G_i^T \quad (4)$$

여기서 K_i 와 G_i 는 다음과 같다.

$$K_{i-3} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{bmatrix}, G_{i-3} = \begin{bmatrix} g_1 = 0 \\ g_2 = 0 \\ g_3 = g \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $i = 1 : X, i = 2 : Y, i = 3 : Z$

초기 재현 정도를 정한 후 운동체에서 발생된 가속도의 주파수영역에 대한 유효영역을 선정하게 된다. 즉 고역필터의 차단주파수를 설정하게 된다. 고역필터는 다음과 같다.

$$M_{cut} = SF_i \left(\frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2} - \frac{s}{s + \omega_b} \right) \quad (6)$$

4.2 Low Pass Specific Force Part

인체가 인지하는 병진성 운동중에서 지구주파성 운동은 인지 비중이 높다. 따라서 운동시스템의 경로공간 제약으로 인하여 소거된 지구주파성 운동을 다른 방법을 사용하여 재현하여야 한다. 그 방법이 비리값을 이용한 경사조종(Filt Coordination)방법이 있다. 이 경사조종방법은 운동시스템의 운동관을 경사 시킴으로써 중력에 의한 파생 가속도를 이용하는 것이다. 운동관의 피치(Pitch)운동방향은 X방향의 병진 가속도를, 롤(Roll)운동방향은 Y방향의 병진 가속도를 파생시킨다. 하지만 지구주파성 병진운동을 보상하기 위해 중력에 의한 파생 가속도를 얻는 것은 운동공간이 상대적으로 제한된 운동시스템에 있어서는 상당히 효과적인 방법이나, 지구주파성 운동을 보상하기 위한 양만큼 경사량 또한 증가하게 된다. 이러한 경사량의 크기는 회전성 운동으로 전환되며, 파생 가속도를 얻는 대신 운동관의 회전성 운동을 야기시키게 된다. 따라서 경사조종에 의한 저역필터의 차단주파수의 선정 역시 중요한 사항이 된다.

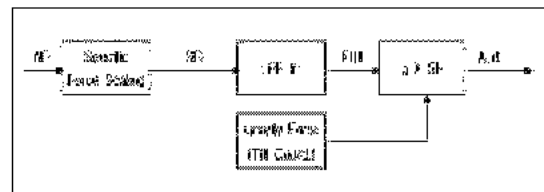


Fig 4. Tilt Motion Channel

$$F_{TMA} = AF_i \left(\frac{\omega_s^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s + \omega_s^2} \right) \quad (7)$$

지주파성 병진운동에 대한 경사조종 방법의 적용은 다음과 같은 식에 의해 회전운동으로 전환된다.

$$\begin{aligned} \phi_{TMA} &= -F_{TMA}/g \\ \theta_{TMA} &= F_{TMA}/g \\ \psi_{TMA} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

4.3 High Pass Angular Rate Channel

회전운동에는 X축에 의한 회전운동(Roll Motion), Y축에 의한 회전운동(Pitch Motion)과 Z축에 의한 회전운동(Yaw Motion) 3가지의 형태가 있다. 병진운동의 경우와 같이 운동체에서 회전각속도를 운동시스템에서 전부 재현한다는 것은 어려운 문제이다. 이것은 역시 운동시스템의 경로공간이 병진과 회전운동 모두의 구속을 부가되어야 하기 때문에 경로공간이 실제 운동체가 운동하고 있는 공간과 동일한 공간을 요구한다는 것은 불가능하다. 회전운동 또한 재현량을 설정하여야 한다.

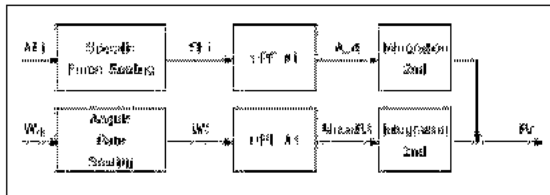


Fig 5. Rotational Motion Channel

$$\omega_i = K_{\omega i} \omega_A \quad (9)$$

여기서 $K_{\omega i}$ 는 다음과 같다.

$$K_{\omega i-3} = \begin{bmatrix} K_p & 0 & 0 \\ 0 & K_p & 0 \\ 0 & 0 & K_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

$i = 1$: Pitch, $i = 2$: Roll, $i = 3$: Yaw

회전성 운동은 운동체의 각속도가 인체에 인지시킬수 있는 영역에서 전단주파수를 설정하게 된다. 고역필터는 다음과 같다.

$$M_{\omega i} = \omega_i \left(\frac{s}{s^2 + 2\zeta_r \omega_r + \omega_r^2} \right) \quad (11)$$

5. 워시아웃 알고리즘 계수 결정

5.1 2차계 Washout Algorithm (병진/회전용: High Pass Filter Design)

병진/회전운동에 대한 워시아웃 알고리즘은 고역필터로 이루어졌다. 여기서 변환 변수는 전단주파수와 댐핑 계수(Damping Coefficient) 이다.

$$M_{\omega i} = SF_i \left(\frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_{\omega i} \omega_{\omega i} + \omega_{\omega i}^2} \right) \quad (12)$$

Fig 6에서 전단주파수의 결정에 따라서 운동판의 경로공간이 결정된다.

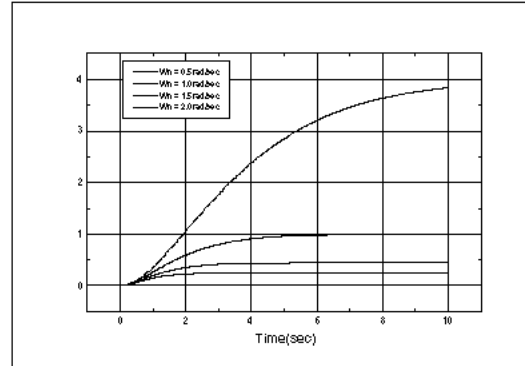


Fig 6. 고역필터 응답특성 주파수별 운동거리

한 예로 단위 가속도성분 입력 $1 m/sec^2$ 을 기준으로 고역필터를 지난 신호에 대한 공간거리(Space Displacement)는 다음 Table 1과 같다.

Cutoff Frequency (rad/sec)	0.5	1.0	1.5	2.0
Space displacement (m)	3.838	0.999	0.444	0.250

Table 1. 단위 가속도당 공간거리

Fig 7는 임의 단위 입력을 취하였을 때의 2차계 고역필터의 응답특성을 나타내고 있다.

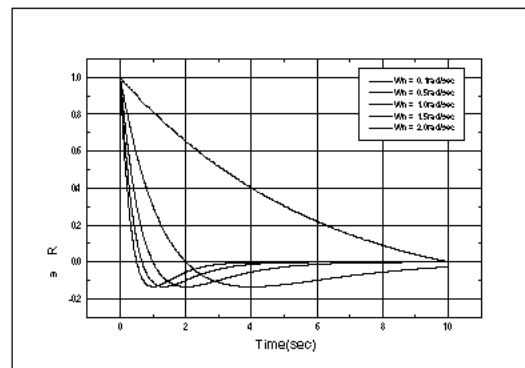


Fig 7. 고역필터 응답특성 주파수별 수렴속도

2차계 고역필터의 물리적인 특성은 첫째 운동시스템의 운동판이 일정 공간거리로 점차 수렴한다는

것과 함께 전달주파수에 따라 수렴속도가 달라져 예상치 못한 과생 가속도/각속도(이하 ‘가/각속도’라 칭한다.)가 유발할 수 있다는 것이다.

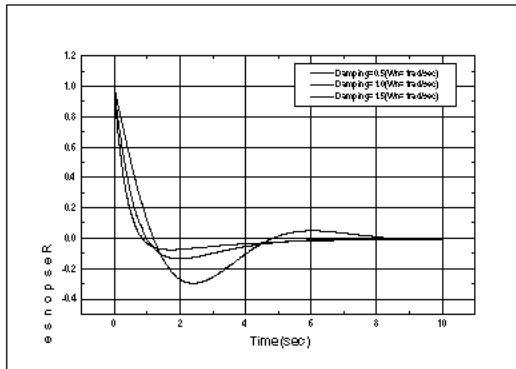


Fig 8. 고역필터 응답특성 댐핑계수 수렴속도

2차계 고역필터에서 댐핑계수의 선정은 대체적으로 과생 가/각속도의 영향에서 대체적으로 탈피할수 있는 정도와 대상 운동체의 운동형태에 좌우될 수 있다. Fig 8은 댐핑계수에 대한 가/각속도 수렴도를 보여주고 있으며 Fig 9는 운동관의 공간거리 상태를 보여주고 있다.

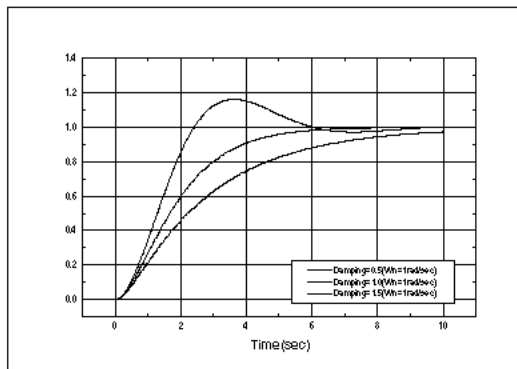


Fig 9. 고역필터 응답특성 댐핑계수별 운동거리

위시아웃 알고리즘에 사용하는 댐핑계수는 대체적으로로 과댐핑(Over Damping)으로 설정하게 된다. 댐핑계수를 설정하는 기본 형태는 최소의 수렴 시간과 인체가 인지할 수 없는 감속도로 유지하는데 있다.

5.2 3차계 Washout Algorithm (병진용:High Pass Filter Design)

운동시스템의 병진운동에 대한 제한은 전달주파수와 댐핑계수의 적절한 값으로 설계한다. 하지만 운동체의 운동은 탄방향 또는 일정 방향운동으로 형성되지 않고 조종사의 조종입력에 따라 변화하게 된다. 따라서 제한을 위한 운동시스템은 조종에 대한 운동

상태 1에서 2의 운동상태로 진이될 수 있도록 공간거리를 지속적으로 확보하여야만 한다. 이러한 의미에서 2차계 고역필터는 위의 사항을 만족하지 못한다. 따라서 운동관의 초기 중립위치로 복귀하도록 하는 방법이 추가로 필요하게 된다.

$$M_{\omega_{in}} = SF_i \left(\frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{s}{s + \omega_{b_i}} \right) \quad (13)$$

1차계의 필터를 추가하여 ω_{b_i} 의 설정에 따라서 운동관의 중립위치로의 복귀속도를 설정할 수 있다. Fig 10은 1차계 고역필터를 추가하여 2차계 고역필터에서의 운동관이 일정 수렴치에서 초기 중립위치로 복귀하는 운동형태를 보여주고 있다.

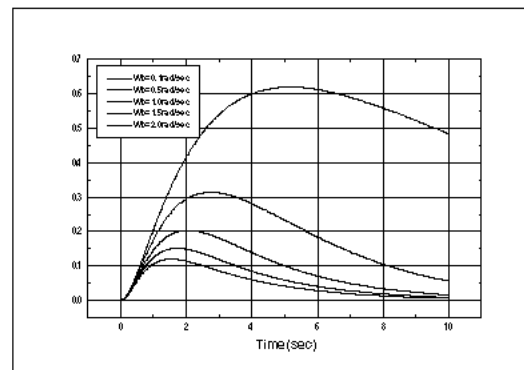


Fig 10. 운동관 중립 복귀속도

그림10 으로부터 추가의 1차계 고역필터의 영향으로 ω_{b_i} 의 주파수값에 따라 복귀 속도정도가 달라지고 있는 것을 알수 있다.

5.3 2차계 Washout Algorithm (Tilt coordinator: Low Pass Filter Design)

운동시스템의 운동공간 제한으로 인하여 저주파성 병진운동의 제한은 운동관의 적절한 기울인의 경사조종 방법을 사용하여 중력으로 인한 과생 가속도로 사용하게 된다. 병진 고역필터로부터 전달된 지역의 병진운동 신호는 경사로서 재현되는데, 이는 고역필터의 전달주파수가 어떠한 값을 지니고 있는냐에 따라 운동관의 경사량이 선정되게 된다. 이때 주의할 사항으로 인체의 감각기관에서 회전성운동에 대한 인지정도는 저주파성 회전운동 영역에서는 대체로 둔감하게 작용하기는 하지만 경사 각속량이 커질수록 회전운동에 대한 인지정도가 높아져 병진운동에 대한 오류의 회전운동을 발생시킬 수가 있다.

$$F_{Tilt} = AF_i \left(\frac{\omega_b^2}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \right) \quad (14)$$

$$\begin{aligned}\phi_{T_{20}} &= -F_{T_{20}}/g \\ \theta_{T_{20}} &= F_{T_{20}}/g \\ \psi_{T_{20}} &= 0\end{aligned}\quad (15)$$

고역필터로부터 제거된 지주파성 병진운동의 기준은 고역필터의 전달주파수 ω_{c_i} 에 근거하고 있다. 지역필터를 설계하기 위해 지역필터의 전달주파수는 ω_{c_i} 와 동일하게 정하도록 한다. Fig 11은 2차계 지역필터의 단위 가속도(1g = 9.81m/sec²)위력을 취하였을 때의 지역 필터의 전달주파수의 변화에 따른 파생 가속도 응답특성 나타내고 있다. 전달주파수의 증가에 따라 응답의 수렴시간이 작아지는 것을 볼 수 있다. 인체의 감각기관으로부터 회전운동에 대한 인지범위는 대략 0.1rad/sec (5.73deg/sec) 이상이기 때문에 파생 가속도를 생성키 위한 경사 각속도는 이를 넘지 않도록 주의해야 한다.

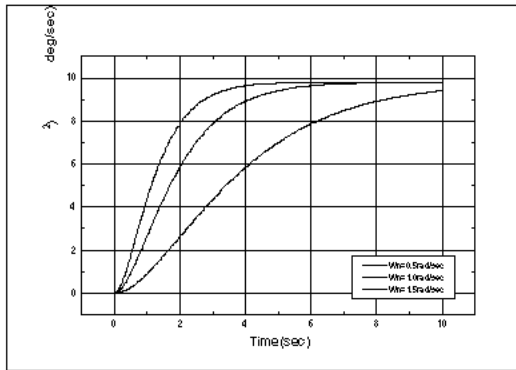


Fig 11 지역필터 응답특성 주파수 경사 수렴도

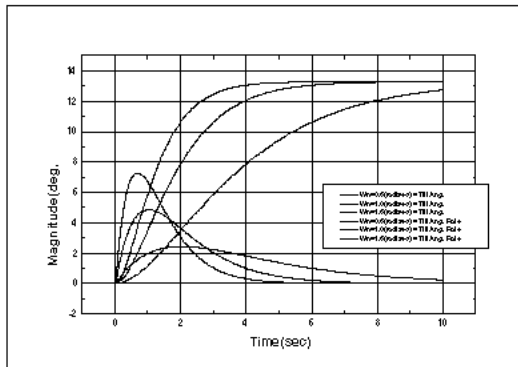


Fig 12 파생 가속도 발생을 위한 각속도

지역필터의 댐핑계수는 대체적으로 과댐핑의 형식으로 값을 선택하게 된다. 이는 수렴중 진동에 의해 파생 가속도의 회전운동 오류를 차단하는 목적으로 사용한다.

대체적으로 파생 가속도는 대상 운동체의 병진 가속도의 15 - 25%사이에서 재현하게 된다.

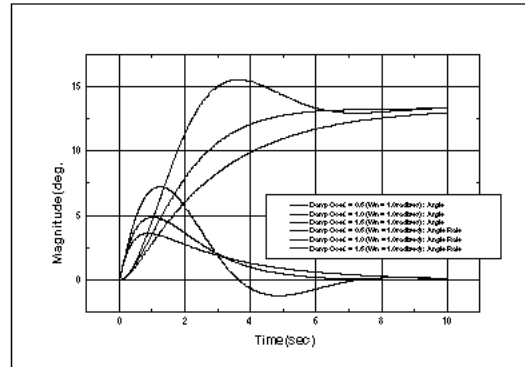


Fig 13 고역필터 응답특성 댐핑계수별 경사수렴도/각속도

4. 결론

가상현실내 운동감을 재현하기 위한 구현 알고리즘으로 워시아웃 알고리즘에 대한 이분들은 그 동안 많이 연구되었지만, 이를 설계하기 내부적인 계수들의 물리적 특성과 의미에 대해 설계자의 입장에서 제시하지 못하였다. 본 연구는 기존의 워시아웃 알고리즘의 이해와 회로설계를 위한 각 계수들의 항목이 운동시스템에 물리적으로 어떠한 의미를 지니고 있었는가에 대해 기술하였다.

운동 재현용 운동시스템의 설계는 대상 운동체의 운동분식, 인체의 인지영역 해석, 워시아웃 알고리즘 설계, 운동판의 경로공간 해석, 운동시스템의 구조적 설계의 순으로 설계가 이루어져야 한다. 워시아웃 알고리즘은 각 부분의 설계인자에 대해 매우 큰 영향을 주며, 각 부분별 설계인자간의 적절한 최적의 인자값을 선정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 운동시스템을 설계하고 이를 운동재현에 적용하는데 있어서 워시아웃 알고리즘의 정확한 이해가 중요하다 결론을 얻었다.

참고문헌

- [1] Military Standard, "Six-Degree-of-Freedom Motion Requirements for Air-crewmember Training Simulators", MILSTD-1558, Feb.1974.
- [2] Conrad,B and Schmidt,S.F, "A Study of Techniques for Calculating Motion Drive Signal for Flight Simulator.", NASA CR-114345, July, 1971.
- [3] Robert.W.Levi and Larry Hayashigawa, "Specification Considerations for a Small Motion Base", AIAA,88-4587-C1,1988.
- [4] Robert J.Telban, Frank M. Cardillo and Jacob A.Houck, "Developments in Human Centered Cueing Algorithms for Control of Flight Simulator Motion Systems", AIAA-99-4328.1999
- [5] J.B.Sinacori, "A Practical Approach to Motion Simulation" AIAA PAPER NO.73-931, OCT.1973
- [6] Soren LaForce, "Algorithmic Improvements for Simulator Motion Drive", AIAA-92-4158-C1.1992