

운전 시뮬레이터의 주행감각 재현을 위한 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘 개발

A New Washout Algorithm for Reappearance of Driving Perception of Simulator

유기성, 이민철*

(Ki-Sung You and Min-Cheol Lee)

Abstract : For reappearance of driving perception in a driving simulator, a washout algorithm is required. This algorithm can reappear the vehicle driving motions within workspace of the driving simulator. However classical washout algorithm contains several problems such as selection of order, cut-off frequency of filters, generation of wrong motion cues by characteristics of filters, etc. In order to overcome these problems, this paper proposes a new washout algorithm which gives more accurate sensations to drivers. The algorithm consists of an artificial inclination of the motion plate and human perception model with band pass filter and dead zone. As a result of this study, the motion of a real car could be reappeared satisfactorily in the driving simulator and the workspace of motion plate is restrained without scaling factor.

Keywords : reappearance of motion perception, driving simulator, washout, human perception model, scaling factor

I. 서론

운전 시뮬레이터(driving simulator)는 실내의 제한된 공간에서 운전하는 차량의 주행 감각과 운전 감각을 위화감 없이 체험할 수 있도록 해 주는 “운전감각 모의장치”로서 새로운 차량 시스템 및 알고리즘 타당성 평가나 운전자에게 주행 중 발생할 수 있는 여러 가지 위급 상황을 안전하게 재현시켜 운전자의 반응 상태를 파악하거나, 위급 상황의 대처를 위한 운전 연습에 이용될 수 있다. 즉 운전 시뮬레이터의 중요한 기본 구성요소인 운전자에게 가속도 감각을 부여하는 운동시스템(motion system)과 그에 따른 가속도 모의 수법(washout) 알고리즘, 그리고 가상환경(virtual environment)을 통해 운전자에게 실제 차를 주행하고 있는 듯한 현실감을 부여할 수 있다[1,2,3]. 이렇게 구성된 운전 시뮬레이터의 유효성은 차량의 동역학적 특성과 운전조건 변화를 시뮬레이터가 어떻게 현실감 있는 운동으로 재현하느냐에 달려 있다. 일반적으로 차량은 운동영역의 제한이 없지만 그 운동을 모사하는 운동 시스템은 기구학적인 운동범위와 시스템의 동특성에 있어서 한계가 있으므로 완전한 운동재현이 어렵게 된다. 그러므로 운동영역을 운동시스템의 물리적인 한계 내로 제한하고 운전자로부터 전달되는 명령 지령(command cue)에 의한 결과를 인체의 감지영역 내로 유지시키는 가속도 모의 수법이 필요하다[4,5,6]. 그 중 고전적인 가속도 모의 수법(classical washout) 알고리즘은 다른 알고리즘에 비해 비교적 적은 설계 인자를 필요로 하여 선행 연구에서 개발, 적용하였다[7,8,9]. 그러나 파라미터 선정

이 경험에 의존하고 운동 지령(motion cue)의 크기조정으로 감각이 축소되며, 부가적인 운동 지령의 생성으로 운전자에게 잘못된 가속도 감각을 부여하는 등 문제점이 나타나고 있다.

본 연구에서는 이러한 기존의 가속도 모의 수법을 개선하여 인체 모델에 가장 근접한 알고리즘을 구현하고 운동 기반 시뮬레이터의 장점을 최대한 살리는데 주안점을 둔다. 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘의 평가를 위해 운전석에 앉은 인체 모델을 수학적으로 모델링하여 차량해석결과와 비교 분석하고, 주행감각에 대한 승차실험을 통한 시뮬레이터의 운동 지령과 시각 지령의 만족도를 비교 분석한다.

II. 고전적인 가속도 모의 수법의 원리 및 문제점

1. 고전적인 가속도 모의 수법의 원리

고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘은 운동시스템의 기구학적 한계를 극복하기 위하여 토론토(Toronto) 대학에서 항공기 시뮬레이터의 개발 시 제안되어 널리 사용되어진 방법이다[5,6]. 이 알고리즘의 경우 짧은 해석 시간 및 검증된 안정성과 같은 장점이 있지만, 사용되는 필터들의 차단 주파수 선정이 어렵고, 경사변환을 수행하면 원신호가 왜곡되는 현상이 발생하며, 필터에 의한 복원력만으로는 연속적인 운동을 재현하는 데 한계가 있다는 등 여러 가지 문제점을 안고 있다. 이러한 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘의 문제점 및 한계를 극복하기 위해서, 미 항공 우주국(NASA)에서 최적 제어 기법을 이용한 가속도 모의 수법 알고리즘, 국민대학교의 동적 파라미터를 이용한 준적응형(semi-adaptive) 가속도 모의 수법 알고리즘 등 다양한 연구가 진행되고 있다[5,6,7,10]. 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘은 운전자가 주행 시나리오를 민감하게 체험할 수 있도록 차량 동역학 해석 결과로부터 얻어지는 운전석의 각 방향 병진 가속도와 회전 각속도를 입력으로 주게 된다. 명령 지

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 10. 20., 채택확정 : 2004. 3. 10.

유기성: 부산대학교 지능기계공학과(nedayks@chol.com)

이민철: 부산대학교 기계공학부(mclee@pusan.ac.kr)

※본 연구는 NRL(국가 지정 연구실) 과제(M1-0203-00-0017-02J0 000-00910) 및 부산대학교 연구비(4년과제)의 지원으로 연구하였음.

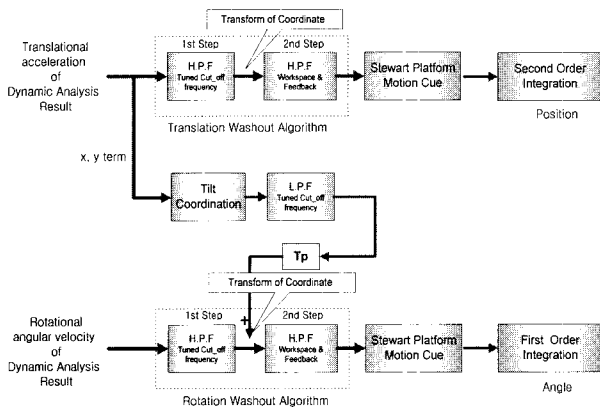


그림 1. 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘의 개략도.
Fig. 1. Block diagram of classical washout algorithm.

령의 성분 중 저주파 신호는 운동 시스템의 기구학적인 한계 때문에 운동재현이 불가능하게 되므로 운전자가 감지할 수 있는 영역의 응답을 1단계 고주파 통과필터(high pass filter)를 통해 재현한다. 또한 좌표변환의 영향을 고려하고 임의의 운동을 수행한 뒤 다음 순서의 명령 지령을 재현하기 위해 운동 플랫폼을 운동원점으로 되돌리는 역할을 위한 2단계 고주파 통과 필터를 거쳐 시뮬레이터의 운동 지령을 생성한다. 가속도 모의 수법 알고리즘에서 고주파 필터링과 함께 중요한 설계요소는 경사변환으로, J-turn이나 차선변경과 같은 주행상황에서 발생하는 지속적인 차량의 횡 가속도는 저주파 신호이므로 고주파 통과 필터를 거치면 재현할 수가 없다. 따라서 필터링한 저주파 가속도를 재현하기 위해 운동플랫폼을 더 기울여 주변 모사된 각도로 운전자는 지속적인 가속도를 체험할 수 있게 된다. 이렇게 구성된 고전적인 가속도 모의 수법의 개략적인 원리는 그림 1과 같다.

2. 고전적인 가속도 모의 수법의 문제점

고전적인 가속도 모의 수법으로 차량 시뮬레이터의 운동 지령을 생성하여 가상 환경에 운전자를 탑승시켰을 때 발생하는 문제점은 다음과 같다. 가속도 모의 수법 알고리즘의 개발단계에서 시뮬레이터로 구현할 인간의 감각대역을 결정하는 1단계 고주파 통과 필터의 차단주파수 선정이 용이하지 않으며, 필터의 특성에 의해 잘못된 운동 지령을 발생시킬 수 있으며, 저주파 성분의 가속도 구현이 어렵다. 또한 다수의 필터 사용으로 인해 위상 보상기가 필요하며, 차량 시뮬레이터의 운동한계내의 운동 지령을 생성시키기 위한 크기조정계수(scaling factor)를 도입해야하고, 경사변환에 의한 가속도 성분과 각속도 성분의 연성(coupling)으로 인한 잘못된 모의 감각 재현이 발생할 수 있다[6,10]. 따라서 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서 운전 시뮬레이터를 위한 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘의 개발이 필요하다.

III. 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘

1. 인체 감각 모델(human perception model)

운전자가 인지하는 중요한 운동상태는 비력(specific force)과 회전 각속도이며, 비력은 귀의 쇄반고리관에 위치한 평

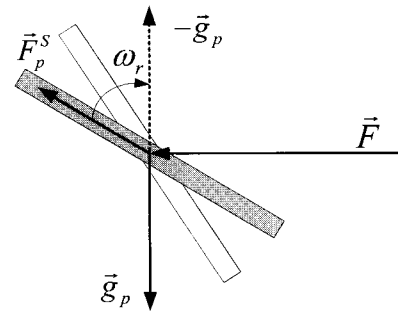


그림 2. 비력의 생성.
Fig. 2. Generation of specific force.

형석(otolith)에서, 회전 각속도는 전정관(vestibular)에서 인지하게 된다. 운전자가 평형석에 의해 저주파의 병진 운동을 감지하는 것은 병진 가속도를 감지하는 것보다는 병진 가속도와 중력장 가속도간의 벡터차인 비력을 주로 감지한다. 비력은 (1)과 같이 정의된다.

$$\vec{F}_p^s = \vec{a}_p - \vec{g}_p \tag{1}$$

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

그림 2는 비력의 크기를 벡터의 방향과 크기로 나누어 나타낸 것으로, 저주파의 병진 가속도와 중력벡터의 반대방향과의 합으로 표현된다.

인체 감각 모델에 관한 연구 중 인체감각기관과 가장 유사하게 연구된 결과로는 Young과 Oman의 인체 감각 모델이다. Young과 Oman의 보고서에서 제시한 인체감각기관 모델은 가속도 및 각속도를 느끼는 평형석계(otolith system)와 전정관계(vestibular system)에 대한 수학적 모델링이다 [11,12]. 평형석은 스프링 · 질량 · 댐퍼 시스템으로 모델링하며 (2)와 같이 표현된다.

$$\beta \alpha = kx + r \frac{dx}{dt} + m \frac{d^2x}{dt^2} \tag{2}$$

여기서, m 은 내이의 부피에 상응하는 질량(mass of the same volume of endolymph), β 는 m 의 평형석 막조직의 초과 질량(excess mass of the statoconial membrane), α 는 반점막의 선형가속도(linear acceleration in the plane of the macula), k 는 위치에 따라 변하는 저항 계수, r 은 점성 및 속도에 따라 변하는 저항 계수이다. 병진 가속도 입력에

표 1. 평형석계의 인체 감각 모델 파라미터.

Table 1. Human perception model parameter of otolith system.

	Surge	Sway	Heave
τ_L	5.33 sec	5.33 sec	5.33 sec
τ_S	0.66 sec	0.66 sec	0.66 sec
τ_A	13.2 sec	13.2 sec	13.2 sec
k	0.17 kg/s ²	0.17 kg/s ²	0.17 kg/s ²

표 2. 전정관계의 인체 감각 모델 파라미터.

Table 2. Human perception model parameter of vestibular system.

	Roll	Pitch	Yaw
T_L	6.1 sec	5.3 sec	10.2 sec
T_S	0.1 sec	0.1 sec	0.1 sec
T_A	30 sec	30 sec	30 sec

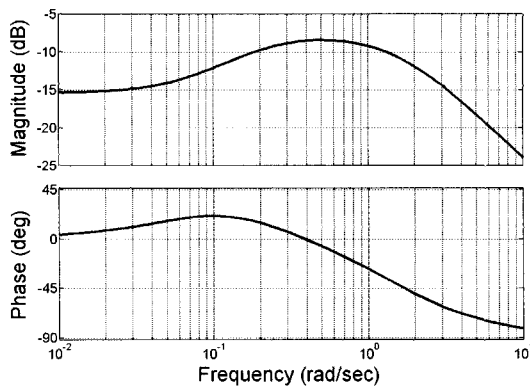


그림 3. 평형석계의 주파수 특성.

Fig. 3. Frequency characteristic of otolith system.

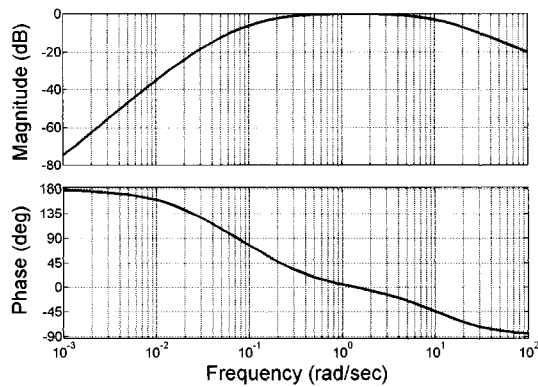


그림 4. 전정관계의 주파수 특성.

Fig. 4. Frequency characteristic of vestibular system.

대한 평형석의 출력의 비로 표현한 평형석계의 전달함수는 (3)과 같이 표현된다.

$$G(s)_{otolith} = \frac{k(\tau_{AS} + 1)}{(\tau_L s + 1)(\tau_S s + 1)} \quad (3)$$

여기서, τ_L, τ_S, τ_A 는 각각 평형석계의 저주파 신호를 위한 시정수(short-time constant), 고주파 신호를 위한 시정수(long-time constant), 신경계의 전달과정에서 유발되는 위상과 관계되는 시정수이다. 평형석계의 모델링 및 시정수는 실험을 통해 선정된 것이다[11]. 평형석에 주어지는 병진 가속도 입력에 대한 평형석의 출력의 비에 대한 주파수 응답은 그림 3과 같다. 또한, 평형석계의 인체 모델에 사용되는

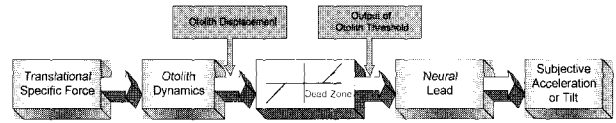


그림 5. 평형석계의 인체 감각 모델의 블록선도.

Fig. 5. Block diagram of model of translational sensation system.

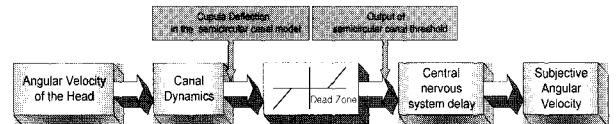


그림 6. 전정관계의 인체 감각 모델의 블록선도.

Fig. 6. Block diagram of model of rotational sensation system.

파라미터는 표 1과 같다. 그림 3에서 보는 것과 같이 평형석계에 입력되는 병진 가속도에 대해 0.2~2 rad/sec까지 양호한 감지를 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 인체가 감지할 수 있는 비력은 2 rad/sec 이하의 영역이라고 볼 수 있다.

전정관계는 회전 속도를 감지하는 6개의 각속도 센서로 구성되어 있으므로 가속도 모의 수법의 회전 운동 명령으로 각속도를 이용해도 무방하다. 즉, 가속도 모의 수법 알고리즘 내부에서의 수학적 이론 전개에 따른 해석 용이성과 회전 운동감각의 재현 타당성에 의해, 입력된 회전 각속도를 충실히 재현하면 운전자가 그에 부합된 가속도를 감지할 수 있다고 가정하고 이를 입력한다. 전정관계의 수학적 모델링은 비틀림 진자(torsion pendulum)로 모델링되어 (4)와 같이 표현된다.

$$aH = k\theta + r \frac{d\theta}{dt} + H \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (4)$$

여기서, H 는 반원형관의 관성모멘트(moment of inertia of the cupula)이고, aH 는 반원형관에 작용하는 토크(torque acting on the cupula)이다. 회전 각속도 입력에 대한 전정관의 출력의 비로 표현한 전달함수는 (5)와 같이 표현된다.

$$G(s)_{vestibular} = \frac{T_L T_A s^2}{(T_L s + 1)(T_S s + 1)(T_A s + 1)} \quad (5)$$

여기서, T_L, T_S, T_A 는 각각 전정관계의 저주파 신호를 위한 시정수(short-time constant), 고주파 신호를 위한 시정수(long-time constant), 신경계의 전달과정에서 유발되는 위상과 관계되는 시정수이다. 전정관계의 모델링 및 시정수는 실험을 통해 선정된 것이다[11]. 전정관계의 인체 모델에 사용되는 파라미터는 표 2와 같고, 회전 각속도 입력에 대한 전정관의 출력의 비에 대한 주파수 영역 응답은 그림 4와 같다. 전정관의 주파수 응답 특성은 그림 4에서와 같이 주파수 대역이 0.2~10 rad/sec까지 양호한 감지를 나타낸다. 따라서 인체가 감지할 수 있는 회전 각속도의 주파수 영역은 0.2~10 rad/sec임을 알 수 있다.

평형석계와 전정관계의 인체 모델인 (3)과 (5)에서 위상 지연 요소 및 인체 감각의 불감대역(dead zone)을 고려하면 그림 5 및 그림 6과 같은 형태의 인체 감각 모델이 나온다. 여기서, 인체 감각 모델은 위상지연을 가지는 대역 통과 필터 형태를 가지고 있다.

그림 5와 6에서 제시한 인체 감각 모델을 이용하여 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘에서 1단계 고주파 통과 필터 대신에 평형석과 전정관의 인체 감각 모델에서 나타나는 위상보상 요소(여기서 위상보상 요소는 (3)과 (5)에서의 τ_A 와, T_A 가 포함된 항이다.)를 제거한 새로운 형태의 인체모델 필터로 재구성하여 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘에서 발생하는 문제점을 개선하였다.

2. 병진 성분 가속도 모의 수법 전략

차량 해석 결과 중에서 가속도 모의 수법의 입력신호인 선형 가속도에 저주파 성분 명령이 지속적으로 주어지면 시뮬레이터가 위치한계를 벗어나게 되는 문제가 발생하므로 이러한 저주파 신호를 고역 통과 필터(high pass filter)를 이용해 제거해야 한다. 고역 통과 필터를 통과하면 위치한계를 초과하려고 하는 낮은 주파수 성분이 제거되어 차량의 운동을 시뮬레이터의 기구학적인 한계 내에서 재현할 수 있게 된다. 이러한 고주파 통과 필터는 차량 운동 재현의 향상과 회전 운동과의 커플링 감소를 위해 1단계 필터와 2단계 필터로 구분되어진다. 1단계 필터는 시뮬레이터 운전석의 좌표계로 입력되는 신호를 직접 처리하는 부분으로 대역 통과 필터(band pass filter) 형태인 인체모델 필터로 구성하였다. 그러나 운동재현기의 하판(base plate)의 좌표축에서 상판(upper plate)에 고정된 좌표축을 중심으로 회전한 각도인 브라이언트 각(bryant angle)에 따라 발생하는 부수적인 비력이 존재하게 되므로 1단계 필터만으로는 운동재현기의 기구학적 한계 내에서 운동을 재현할 수 없게 된다. (6)은 운동재현기의 하판에서의 관성 좌표계에서 상판의 고정석의 좌표계로 변환하는 좌표변환식이다.

$$\vec{a}_B = {}^P_B R \vec{a}_P \tag{6}$$

여기서, \vec{a}_P 는 시뮬레이터 고정석에서의 선형 가속도 성분을 나타내고, \vec{a}_B 는 시뮬레이터 베이스 상의 관성 좌표계에서의 선형 가속도 성분을 나타내며, ${}^P_B R$ 는 (7)과 같이 브라이언트 각을 이용한 관성 좌표계로의 변환 행렬이다.

$${}^P_B R = \begin{bmatrix} C_\beta C_\gamma & -S_\gamma C_\beta & S_\beta \\ C_\gamma S_\alpha S_\beta + C_\alpha S_\gamma & -S_\alpha S_\gamma S_\beta + C_\alpha C_\gamma & -S_\alpha C_\beta \\ -C_\gamma C_\alpha S_\beta + S_\alpha S_\gamma & C_\alpha S_\beta S_\gamma + S_\alpha C_\gamma & C_\alpha C_\beta \end{bmatrix} \tag{7}$$

병진 가속도 운동을 운동재현기의 기구학적 한계내의 운동으로 재현하기 위해서 1단계 필터를 거쳐 가공되어진 고주파 성분의 병진 가속도를 변환행렬을 통해 관성 좌표계인 운동재현기의 상판에서 처리할 수 있는 신호로 만든다. 다시 제한된 범위 내에서 병진 가속도 운동을 재현하기 위해 1단계 필터처럼 지속적인 정현파가 저주파 성분의 가속도

입력에 대해서도 발산하지 않도록 하면서 운동재현기의 운동원점 복귀를 가능케 하는 2단계 필터를 구성하여 사용하였다.

3. 회전 성분 가속도 모의 수법 전략

차량 해석 결과 중 회전 각속도는 1단계 필터를 통과하여 (8)과 같은 변환행렬에 의해 변환된 각속도를 처리하는 2단계 필터를 거쳐 운동재현기의 운동지령으로 생성된다.

$$\omega_B = {}^P_B R M \omega_P \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sec \phi_2 \cos \phi_3 & -\sec \phi_2 \sin \phi_3 & 0 \\ \sin \phi_3 & \cos \phi_3 & 0 \\ -\tan \phi_2 \cos \phi_3 & \tan \phi_2 \sin \phi_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

여기서, ω_P 는 시뮬레이터의 운전석에서의 회전 각속도 성분을 나타내고, ω_B 는 브라이언트 각에 의해서 표현되는 회전 각속도 성분을 나타내며, ${}^P_B R M$ 은 입력되는 시뮬레이터의 운전석의 회전 각속도를 브라이언트 각에 의해서 표현되는 각속도로 변환하는 행렬이다.

1단계 필터는 차량의 운전석 좌표계로 입력되는 지속적인 저주파 입력에도 변위가 발산하지 않도록 하면서 회전 각속도에 대해 인체의 민감한 영역을 고려해서 인체모델 필터로 구성했다. 그리고 2단계 필터는 운동재현기의 짐벌각(gimbal angle)을 제한하면서 운동재현기의 운동원점 복귀를 위해 고역 통과 필터를 사용하였다.

4. 경사 좌표 변환

병진 운동을 재현하기 위해 고역 통과 필터에 의해 제거되어진 비력의 저주파 성분은 지속적인 가속도를 모사하는데 있어서 필수적인 요소이다. 이러한 지속적인 가속도를 운동재현기에서 재현하기 위한 방법으로 흔히 저역 통과 필터를 이용해 그림 2와 같이 기울임 각을 만들어 줌으로써 가능해진다. 차량의 병진 가속도 성분이 저주파로 들어올 경우 운전자는 중력의 크기만큼 반대방향으로 비력을 감지하게 되므로 중력벡터의 반대방향($-\vec{g}_P$)으로 플랫폼에서 재현해야 할 비력을 기울여 주면 원하는 저주파성 비력을 구현할 수 있게 된다. 경사 좌표 변환은 중력벡터의 반대방향으로 비력벡터를 기울여 주는 좌표변환식이고 (9)와 같다.

$$\omega_r = \frac{\vec{F}_P^s \times (-\vec{g}_P)}{|\vec{F}_P^s| |\vec{g}_P|} = \frac{1}{|\vec{F}_P^s|} \begin{bmatrix} |\vec{F}_{P_y}^s| C_\alpha C_\beta + |\vec{F}_{P_z}^s| S_\alpha C_\beta \\ |\vec{F}_{P_x}^s| S_\beta - |\vec{F}_{P_x}^s| C_\alpha C_\beta \\ -|\vec{F}_{P_x}^s| S_\alpha C_\beta - |\vec{F}_{P_y}^s| S_\beta \end{bmatrix} \tag{9}$$

경사 좌표 변환(tilt coordination)을 개발할 때 과도한 기울임 각이 발생할 경우 의도하지 않은 기울임 각이나 가속도를 유발하고, 운전자의 운전 조작에 대한 응답의 불일치함을 감지하게 되어 시뮬레이터 병(simulator sickness)을 발생시키기 때문에 주의해야 한다.

5. 새로운 가속도 모의 수법의 인체모델 필터 구성

운동재현기의 운동한계로 인해 차량 해석 결과 중에서

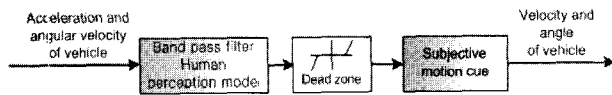


그림 7. 새로운 인체모델필터의 블록선도.

Fig. 7. Block diagram of new human perception model filter.

표 3. 인체모델 필터를 위한 파라미터.

Table3. Parameter for human perception model filter.

Specific force sensation model parameter			
	surge	sway	heave
τ_L	5.33 sec	5.33 sec	5.33 sec
τ_S	0.66 sec	0.66 sec	0.66 sec
τ_a	13.2 sec	13.2 sec	13.2 sec
k	0.4 kg/s ²	0.4 kg/s ²	0.4 kg/s ²
dTH	0.17 m/s	0.17 m/s	0.28 m/s
Rotational motion sensation model parameter			
	roll	pitch	yaw
T_L	6.1 sec	5.3 sec	10.2 sec
T_S	0.1 sec	0.1 sec	0.1 sec
T_A	30 sec	30 sec	30 sec
δTH	3.0 rad	3.6 rad	2.6 rad

적절한 주파수 영역만을 선택하여 가속도 모의 수법 알고리즘에 의해 운동을 재현하게 된다. 이 알고리즘의 성능은 운동재현기가 차량해석결과인 가속도와 각속도에 얼마나 잘 추종하는가를 나타내는 운동 모사율(rate of motion in facsimile)의 정도(degree)로 평가될 수 있는데, 가속도 모의 수법 알고리즘의 종류나 파라미터에 따른 운동 모사율이 서로 유사하더라도 시뮬레이터 내의 운전자가 느끼는 운동에 있어서 차이가 클 수도 있다. 따라서 인체 감각 모델을 수정하여 가속도 모의 수법 알고리즘에 적용함으로써 시뮬레이터 내의 운전자의 반응이 실제 차량에서 느끼는 주파수 영역으로 제한되도록 하여 운동감을 모사해줄 수 있도록 한다.

1단계 필터를 설계할 때 인간이 주로 느끼는 감각대역을 기초로 하여 차단주파수를 설계할 수 있지만 인체감각대역 자체가 매우 낮은 주파수 대역이므로 어디까지 구현해 주어야 될지 결정하기가 매우 어렵다. 또한 알고리즘을 통과한 신호가 시뮬레이터의 운동항계를 벗어나면 크기조정계수를 도입하여 운동자체를 축소시켜야만 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 그림 7과 같이 인체 감각 모델에서 인체모델 대역 통과 필터를 도입하고 불감대역을 적용하여 감각기관에서 인지할 수 없는 신호는 제거한 후 시뮬레이터의 운동지령을 생성한다. 이를 통해 차단주파수의 선정을 용이하게 하고 크기조정계수를 도입하는 문제를 해결한다. 그림 7은 제한한 인체모델 필터의 블록선도이고, (10)은 (3)에서 시간 지연성분 요소를 제거한 병진 가속도 성분을 위한 인체 모델 필터의 전달함수, (11)은 (5)에서 시간지연성분 요소를 제거한 회전 각속도 성분을 위한 인체 모델 필터의 전달함수이다.

$$\frac{d(s)}{a(s)} = \frac{k \tau_A \tau_L^{-1} \tau_S^{-1}}{(s + \tau_L^{-1})(s + \tau_S^{-1})} \quad (10)$$

$$\frac{\theta(s)}{\omega(s)} = \frac{T_L s}{(T_L s + 1)(T_S s + 1)} \quad (11)$$

여기서, a는 차량해석결과 중에서 병진 가속도이고, d는 운동재현기의 하판 좌표계에서 움직여야 할 변위, ω 는 차량해석결과 중에서 회전 각속도, θ 는 운동재현기의 하판 좌표계에서 움직여야 할 각이다. 표 3은 각 방향에 따른 인자와 불감대역의 경계 값을 정리한 것이다.

지속적인 시나리오를 수행하기 위한 2단계 필터의 차수 선정은 필터에 의해 생기는 원점복귀성분의 영향을 사람이 어떻게 느끼는지를 평가하여 1차로 선정하였고, 개발된 시뮬레이터의 최대속도 및 최대변위 가능 주파수 영역인 0.388Hz 이하인 점을 고려하여 1 rad/sec의 차단 주파수를 가지는 재귀 IIR 필터(recursive IIR filter)로 설계하였다. 이

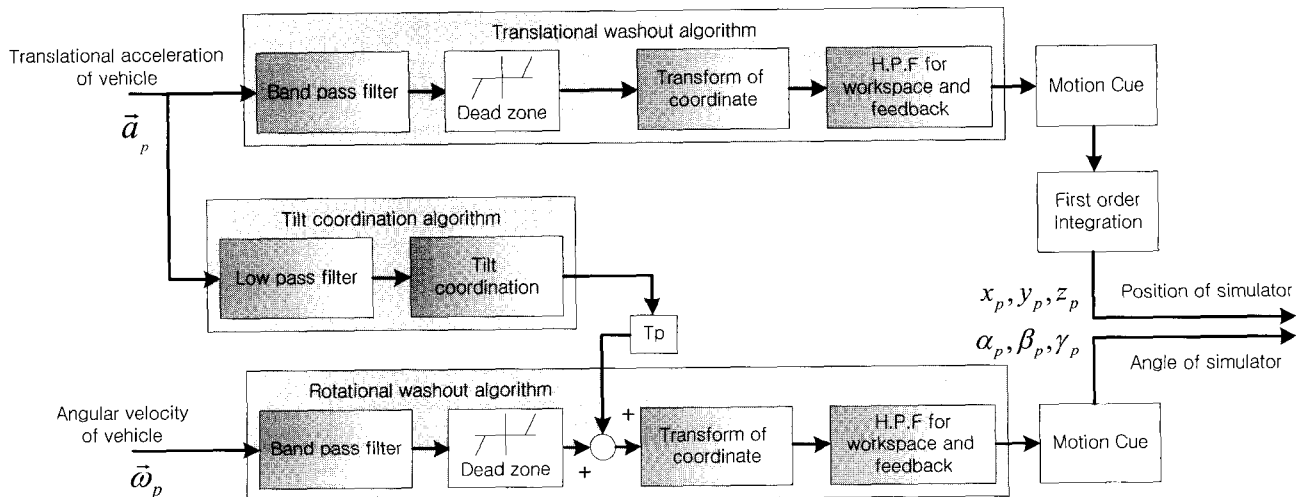


그림 8. 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘의 개략도.

Fig. 8. Block diagram of new washout algorithm.

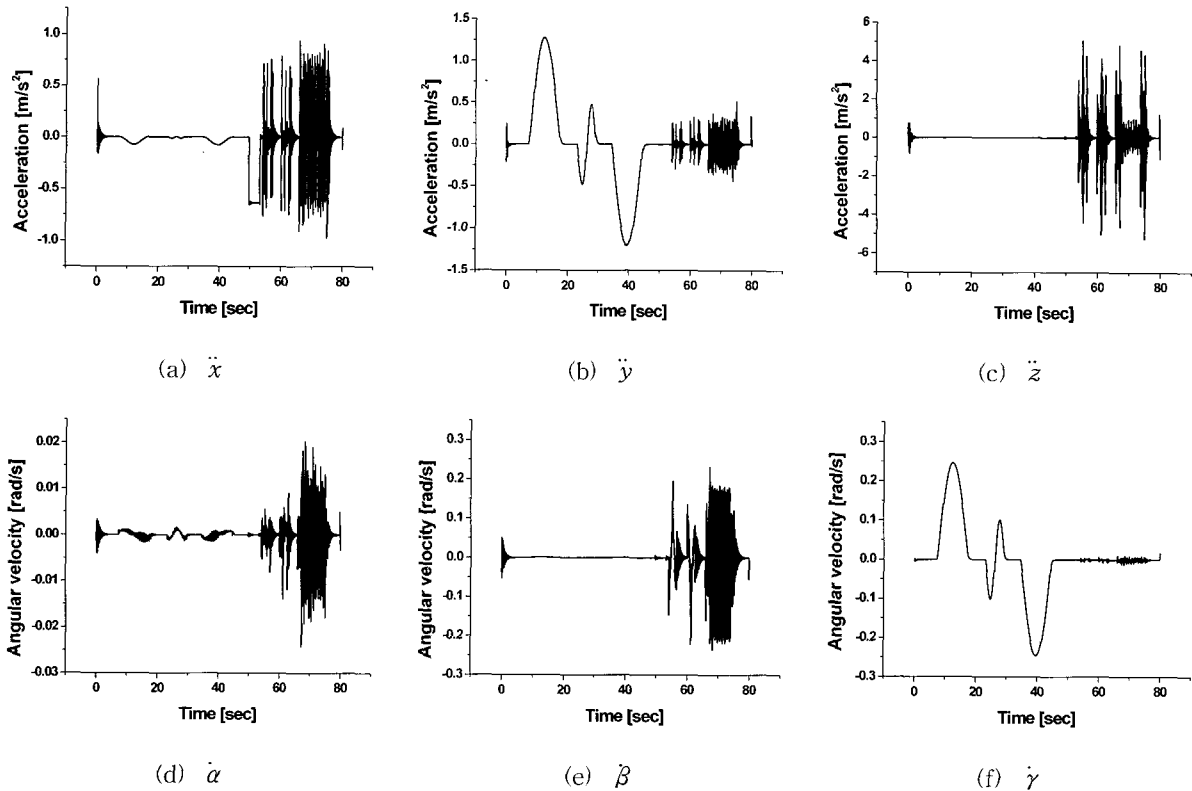


그림 9. 시나리오에 따른 차량 해석 결과.
 Fig. 9. Vehicle dynamic results in scenario.

렇게 구성된 전체 가속도 모의 수법 알고리즘은 미분항과 적분항이 없어 기존의 알고리즘에 비해 계산량이 매우 적다. 그림 8은 제안한 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘의 전체적인 흐름도이다. 그림 1과 그림 8을 비교해 보면, 고전적인 가속도 모의 수법의 경우 이차적분이 포함되어 있고, 제안한 가속도 모의 수법은 이차적분요소가 없으므로 계산 시간에 의한 시간지연이 작음을 알 수 있다.

시뮬레이션 및 감성평가를 위해 사용된 차량 동역학 모델은 실시간 구현을 위해 무질량 링크기법을 이용한 14개의 물체와 5개의 무질량 링크를 가진 차량 모델을 사용하였다 [13]. 그림 9는 시나리오로 구성된 차량 동역학 해석 결과이고, 그림 10은 선행 연구에서 개발된 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘을 통과한 결과이며, 그림 11은 본 연구에서 개발한 가속도 모의 수법 알고리즘을 통과한 결과이다. 스웨이(sway)운동 신호를 비교하면 그림 10(b)와 11(b)에서 보듯이 제안한 가속도 모의 수법 알고리즘이 운동 재현기의 운동 한계 내에서 운동의 크기가 크고, 히브(heave)운동 신호인 그림 10(c)와 11(c)를 비교하면 저주파 영역에서 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘의 운동 보다 제안한 가속도 모의 수법 알고리즘의 운동이 분명하게 나타난다. 또한, 복귀성분도 저주파(0.0159 Hz)로 인체 감각 대역에서 느끼지 못하는 영역으로 운전자의 운동감 재현에 보다 효율적임을 알 수 있다. 마찬가지로 요(yaw)운동 신호인 그림 10(f)와 11(f)를 비교하면 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘은 지나치게 복귀성분이 많이 발생하여 잘못된 운동감을 재현해

줄 수 있지만, 제안한 가속도 모의 수법 알고리즘은 복귀성분으로 인한 과도한 입력은 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

IV. 평가

1. 정량적 평가

운동 플랫폼의 운동 모사율의 정도(degree)를 평가하는 방법으로 차량 동역학 해석 신호와 제안한 가속도 모의 수법 알고리즘에 의해 만들어진 운동 지령과의 상관성을 살펴보는 상호상관함수를 이용하여 정량적으로 평가하였다. 그림 12는 제안한 가속도 모의 수법 알고리즘의 정량적 평가를 위한 블록선도이다.

평가를 위한 인간모델은 운전석에 앉은 사람을 강제로 가정하였고, 인체 감각 모델을 감각기관으로 대체한 더미(dummy)를 이용하였다. 그림 13과 그림 14는 고전적인 가속도 모의 수법과 제안한 가속도 모의 수법의 상호상관함수를 이용하여 상관성을 비교한 것이다. 그림 13과 그림 14에서 보듯이 차량 동역학 해석에 의해 나온 명령 지령과 제안한 가속도 모의 수법 알고리즘을 통해 나온 운동 지령의 상관성이 매우 높다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 14에서 보듯이 시간축의 값이 0 근방인 지점에서 상관성의 크기가 매우 크게 나타나고, 이는 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘이 시간지연으로 인한 신호의 왜곡이 거의 없이 시뮬레이터의 운동 지령을 생성할 수 있음을 보여준다.

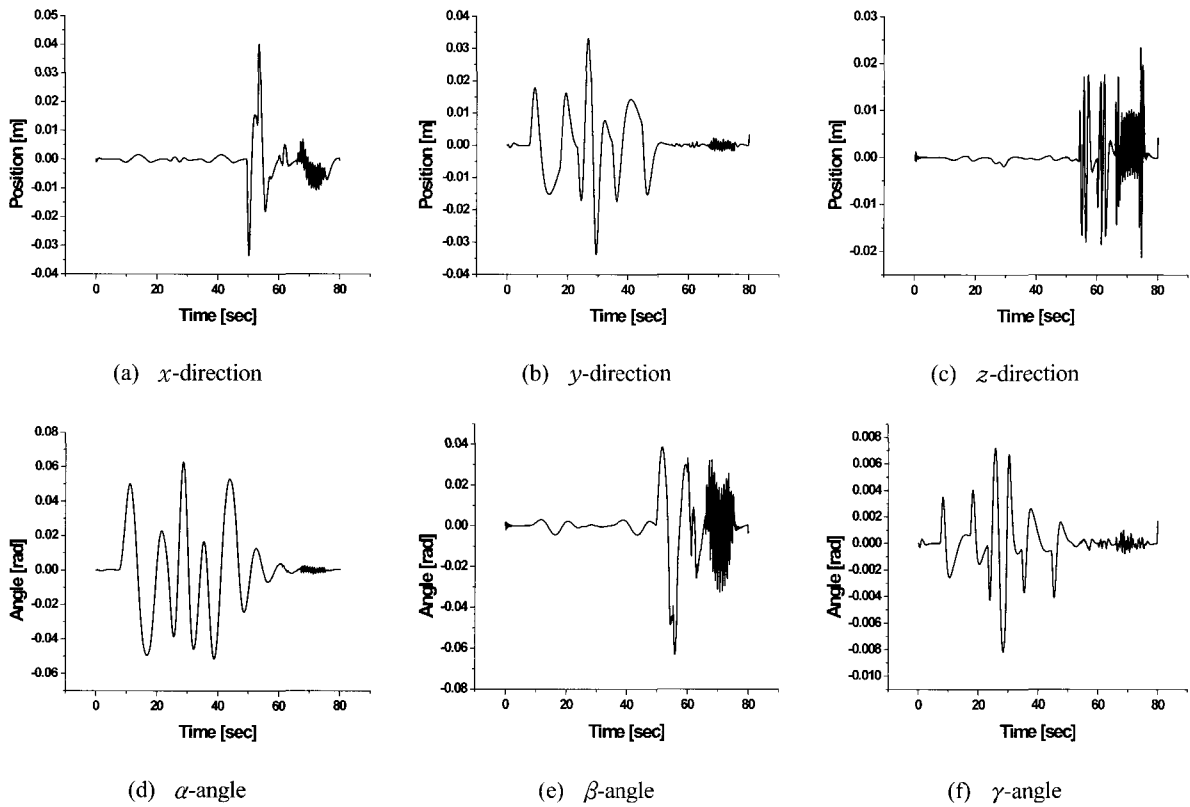


그림 10. 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘 결과.

Fig. 10. Results of classical washout algorithm.

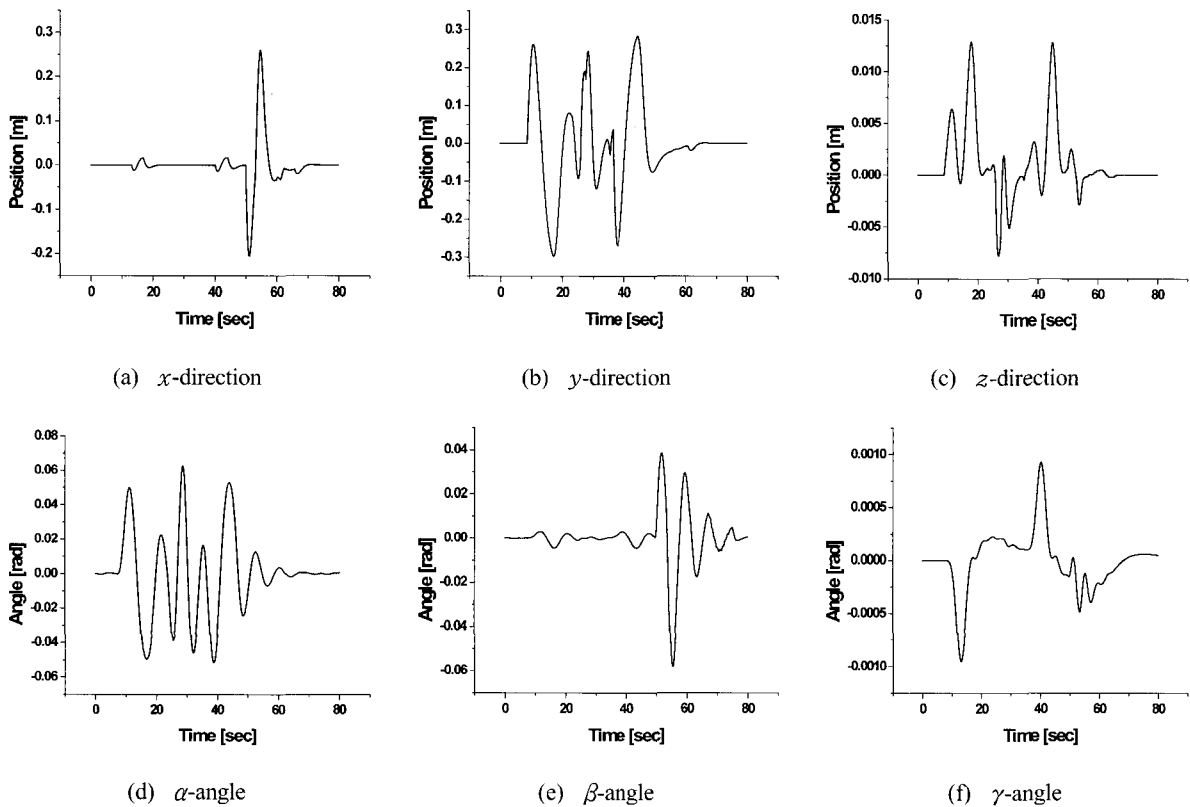


그림 11. 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘 결과.

Fig. 11. Results of new washout algorithm.

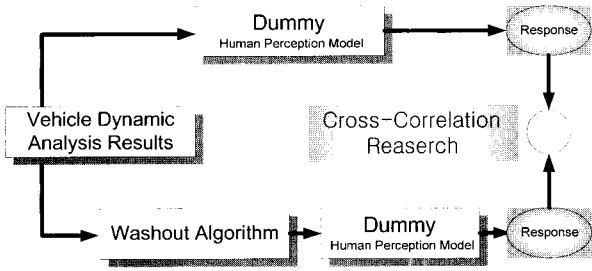


그림 12. 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘의 정량적 평가 방법.
Fig. 12. Quantitative evaluation for new washout algorithm.

2. 정성적 평가

가상 주행 환경(virtual driving environment)은 도시공간의 아스팔트 도로를 주행하는 시나리오로 구성하였다. 차량 운전 시뮬레이터는 선행연구에서 개발한 6자유도 유압서보 시스템인 스투어트 플랫폼과 제이기, 그리고 본 연구를 위해 개발한 모니터링(program) 프로그램을 이용하여 평가를 수행하였다. 운전자 탑승을 통한 주행감각 제한의 다양한 평가를 위해 도로지도(road map)는 직선도로와 커브, 차선변경, 범퍼통과, 가감속 구간, 도로의 요철 등 일반적인 도로의 조건을 다양하게 포함하고 있다. 평가를 위해 남녀 14

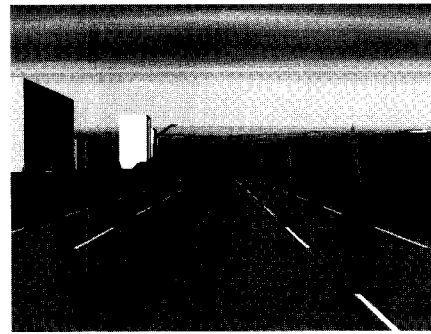


그림 15. 가상 주행 환경.
Fig. 15. Virtual driving environment.

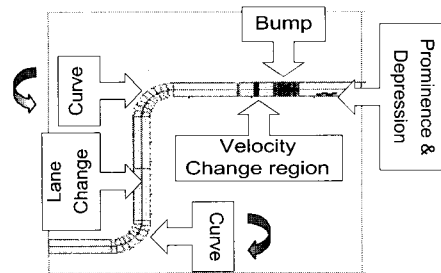


그림 16. 도로지도.
Fig. 16. Road map.

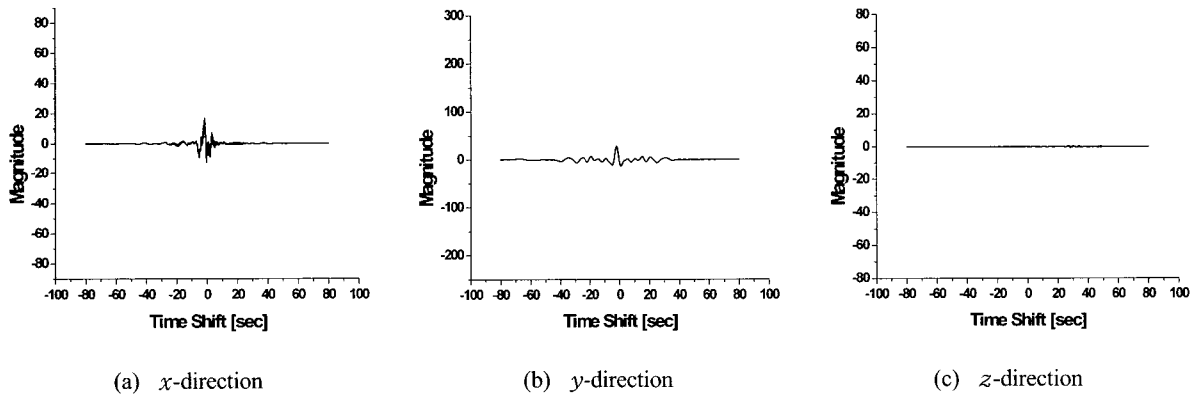


그림 13. 고전적인 가속도 모의 수법의 상호상관도 조사.
Fig. 13. Cross-correlation research for classical washout algorithm.

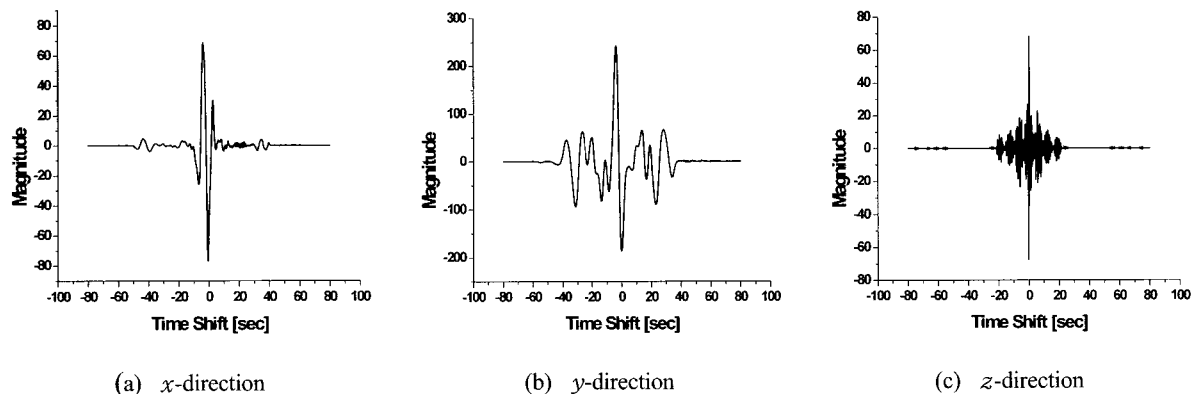


그림 14. 새로운 가속도 모의 수법의 상호상관도 조사.
Fig. 14. Cross-correlation research for new washout algorithm.

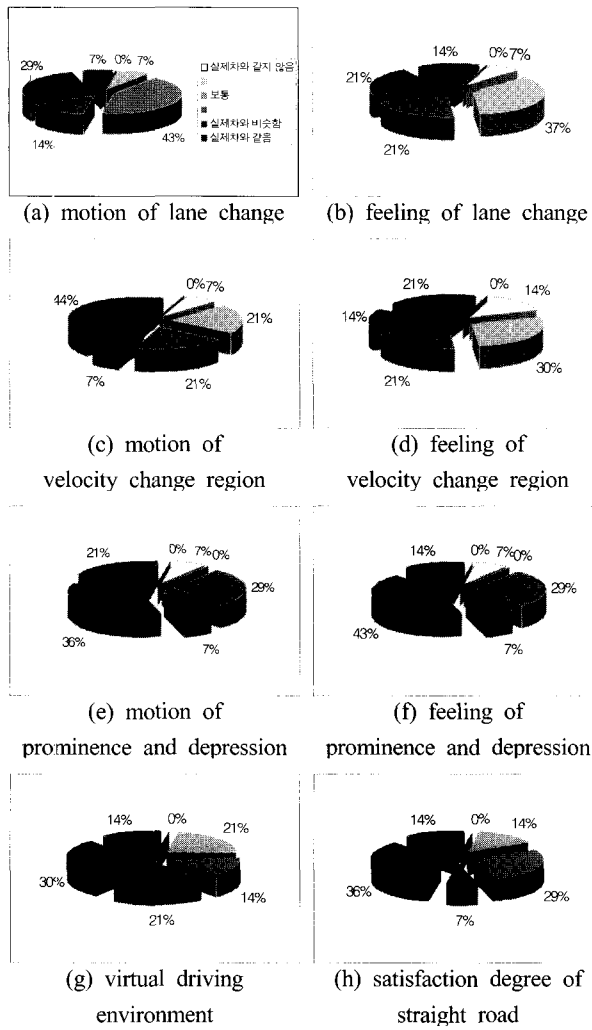


그림 17. 세부별 운전자의 만족도 조사.
Fig. 17. Cross-correlation research for classical washout algorithm.

명을 선정하여 개발된 시뮬레이터에 탑승시켰다. 운전 경력 정도에 따른 운전자의 탑승 만족도를 비교하기 위해 운전자의 경력사항을 평가 항목에 추가하였다. 그림 15는 개발된 가상의 주행 환경이고, 그림 16은 탑승자가 주행할 도로의 요소를 대략적으로 도시한 그림이다.

운전자에 대한 정성적인 평가를 위해 설문지의 질문을 세분화하여 운동재현기의 운동에 의한 감성유발과 운동과 시각 지령의 조합에 의한 감성유발 정도(degree)를 6단계로 구분하였고, 시뮬레이터 병(simulator sickness)에 대한 17가지 조사항목을 통해 차량 운전 시뮬레이터의 개선방향을 조사하였다. 그림 17은 운동재현기의 운동에 의한 감성유발 정도를 색깔의 농도로 표현한 것으로, 비교적 모든 도로 요소에 대해 만족할 만한 결과를 얻었다. 운동재현에 의한 감성유발과 운동 및 시각 지령의 조합에 의한 감성유발의 정도를 비교해 본 결과, 커브나 속도의 가감속 구간, 요철 구간에서는 비교적 운동에 의한 감성유발이 양호하였고, 직선도로에서는 운동에 의한 감성유발이 부족하였다. 이는 시나리

표 4. 시뮬레이터 병에 대한 평가.

Table 4. Evaluation for simulator sickness.

평가 항목	없음	약간	보통	심함
구토	12	0	0	0
식욕(성욕)의 증가	13	0	0	0
식욕(성욕)의 감퇴	13	0	0	0
뱃멀미	12	1	0	0
숨쉬기 곤란함	13	0	0	0
식은땀	12	1	0	0
현기증	11	1	0	0
눈의 부심	12	0	1	0
눈의 피로	8	3	1	0
눈의 초점을 맞추기 어려움	5	6	2	1
시야의 흐림	4	8	1	0
머리의 혼란함	10	1	1	0
두통	12	1	1	0
정신적인 압박	7	5	1	0
지루함	5	4	3	0
피로감	8	4	1	0
일반적인 불편함	5	6	2	0

오의 도로 환경이 이상적인 아스팔트이므로 실제 운전 환경과 다르게 느끼기 때문으로 판단된다. 표 4는 시뮬레이터 병을 조사한 것으로 지루함이나 일반적인 불편함, 시야의 흐림 등을 일부 호소하였으나 전체적으로는 시뮬레이터 병을 감지하지 못할 정도의 양호한 수준이었다. 개발된 가속도 모의 수법 알고리즘을 정량적, 정성적 방법으로 평가해 본 결과, 인체 모델에 보다 가까운 차량 데이터에 근접한 신호를 생성할 수 있었고, 기존의 가속도 모의 수법 알고리즘에서 발생한 문제점을 해결할 수 있었다. 즉, 운동 지령의 크기조정 없이도 운동한계 내에서 구동하고, 운동 지령이 시각 지령인 화면에서 벗어나지 않고, 원점복귀성분으로 인한 잘못된 감성유발이 없음을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 차량의 운동을 제한된 운동 영역 내에서 거동할 수 있도록 하는 새로운 가속도 모의 수법 알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘에서 발생하는 문제점을 지적하고, 이를 개선하기 위해 인체 감각 모델을 수정한 필터를 제안하였다. 또한, 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해, 시뮬레이션을 통한 정량적인 평가와 실험 및 설문 조사를 통한 정성적인 평가를 수행하였다.

정량적인 평가를 통해 제안한 가속도 모의 수법 알고리즘이 원신호의 복귀성분으로 인한 신호의 왜곡 현상이 적게 발생하고, 고전적인 가속도 모의 수법 알고리즘에 비해 필터의 차단주파수의 선정의 어려움을 줄일 수 있음을 보였다. 이를 통해 인체 모델에 가까운 차량 데이터에 근접한 신호를 생성할 수 있었고, 기존의 가속도 모의 수법 알고리즘에서 발생한 문제점을 해결할 수 있었다. 정성적인 평가에서 운전자가 시뮬레이터에서 인지하는 운전 감각이 실제 차량에서 느끼는 운전 감각과 비교하여 전체적으로 '보통' 이상의 결과로 나타났으며, 상대적으로 시각적인 효과의 부

족으로 직선도로에서는 운동의 감성유발이 부족한 결과로 나타났다. 시뮬레이터 병에 대한 평가에서는 가상환경의 시각적인 효과로 인하여 눈의 초점을 맞추기 어렵다는 호소를 제외하고는 비교적 양호하였다.

본 연구에서 제안한 가속도 모의 수법 알고리즘을 이용하면 정량적인 평가와 정성적인 평가 방법을 통해 운동 지령의 크기조정 없이도 운동한계 내에서 구동하고, 운동 지령이 시각 지령인 화면에서 벗어나지 않고, 원점복귀성분으로 인한 잘못된 감성유발이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

인간의 감각 기관은 매우 복잡한 형태로 가속도와 각속도를 감지하므로 향후 연구로 보다 인간과 근접한 모델을 고려함으로써 다양한 평가와 개선이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

[1] J. Drosdol and F. Panik, "The daimler-benz driving simulator, a tool for vehicle development," *SAE paper* 850334, 1985.

[2] J. S. Freeman, G. Watson, T. E. Papelis, T. C. Lin, A. Tayyab, and R. A. Romano, "The iowa driving simulator: an implementation and application overview," *SAE paper* 950174, 1995.

[3] J. A. Greenberg and T. J. Park, "The ford driving simulator," *SAE paper* 940179, 1994.

[4] T. Suetomi, A. Horiguchi, T. Okamoto and S. Hata, "The driving simulator with large amplitude motion system," *SAE Paper* 910113. 1991.

[5] C. C. Peter and T. M. Burnell, "Analysis Procedures and subjective flight results of a simulator validation and cue

fidelity experiment," *NASA Technical Memorandum* 88270, 1981.

[6] L. D. Reid and M. A. Nahon, "Response of airline pilots to variations on flight simulator motion algorithm," *AIAA*, vol. 1, pp. 639-646, 1988.

[7] A. Samji and L. D. Reid, "The detection of low-amplitude yawing motion transients in a flight simulator," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 22, pp. 300-306, 1992.

[8] 김영수, 백창흠, 최성학, 심민식, 최진성, 강득수, 정대현, "비행 훈련 시뮬레이터 운동판," *대우중공업 기술 개발 소식*, 1995.

[9] 손권, 유원석, 이민철, 이장명, 김성수, 휠 굴삭기의 운전 시뮬레이터의 개발, *삼성 중공업 산학협동연구 보고서*, 1997.

[10] 최성태, "Semi-adaptive washout algorithm의 개발", *국민대학교 대학원 자동차공학과 석사 학위 논문*, 2001.

[11] M. K. Park, M. C. Lee, K. S. Yoo, K. Son, W. S. Yoo, and M. C. Han, "Development of the PNU driving simulator and its erformance evaluation," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, vol. 3, pp. 2325-2330, 2001.

[12] KENNETH NEMIRE, "Simulation fidelity of a virtual environment display," *HUMAN FACTORS*, 36(1), pp. 79-93, 1994.

[13] K. S. Kim, W. S. Yoo, S. S. Kim, and S. S. Kim, "Development of vehicle dynamics program autoDyn7(I) - structure and algorithm," *Trans. of KSAE*, vol. 7, no. 3, 1999.



유 기 성

1998년 부산대학교 기계공학과 졸업. 부산대학교 기계공학과 대학원 석사(2000). 1998년~현재 부산대학교 대학원 지능기계공학과 박사과정 재학 중. 주 관심분야는 영상처리기법, 자율이동로봇, 전실 제어, 차량 시뮬레이터.



이 민 철

1983년 부산대학교 기계공학과 졸업. 1988년 일본 쓰쿠바 대학교 이공학연구과 공학 석사, 1991년 동대학 물리공학 연구과 공학 박사. 1991년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 주 관심분야는 시스템 규명, 로봇제어, 지능형서비스로봇, 이족보행로봇, 메카트로닉스, 시뮬레이터.