새로운 경사 변환과 복귀 성분을 고려한 차량 운전 시뮬레이터 워시아웃 알고리즘 개발

Development of a Washout Algorithm for a Vehicle Driving Simulator Using New Tilt Coordination and Return Mode

강 유 진, 유 기 성, 이 민 철*
(Eugene Kang, Ki-Sung You, and Min-Cheol Lee)

Abstract : Unlike actual vehicles, a vehicle driving simulator is limited in kinematic workspace and bounded on dynamic characteristics. So it is difficult to simulate dynamic motions of a multi-body vehicle model. In order to overcome these problems, a washout algorithm which controls the workspace of the simulator within the kinematic limitation is needed. However, a classical washout algorithm contains several problems such as generation of wrong sensation of motions by filters in tilt coordination, requirement of trial and error method in selecting the proper cut-off frequencies, difficulty in returning the simulator to its origin using only high pass filters and etc. This paper proposes a new tilt coordination method as an algorithm which gives more accurate sensations to drivers. In order to reduce time for returning the simulator to its origin, a new washout algorithm that the proposed algorithm selectively onset mode from high pass filters and return mode from error functions is proposed. As a result of this study, the results of the proposed algorithm are compared with the results of classical washout algorithm through the human perception models. Also, the performance of the suggested algorithm is evaluated by using human perception and sensibility of some drivers through experiments.

Keywords : vehicle driving simulator, washout algorithm, new tilt coordination, return mode

I. 서론

차량 운전 시뮬레이터(vehicle driving simulator)는 탑승한 운전자에게 실제 차량을 운전하고 있는 듯한 느낌을 가지게 하는 가상현실 장비이다. 차량 운전 상황에서의 현실감을 재현하기 위하여, 조향 휠 및 가감속 페달 조작 등을 통해 발생하는 차량 운동을 해석하고, 그에 따른 운동 감각, 시각, 청각과 같은 운동 상황을 운전자에게 제공하여 준다. 차량 운전 시뮬레이터의 유효성은 차량의 동역학의 특성과 운전 조건 변화에 따른 운동 감각, 시각 및 청각과 같은 운동 상황을 어떻게 현실감 있게 재현하느냐에 달려있다. 그러나 실제 차량은 운동 영역의 제한이 없지만, 그 운동을 모사하는 운동 시스템은 기구학적인 운동 범위와 시스템의 동특성에 있어서 한계가 있기 때문에 운동 감각 재현에 제약을 받게 된다. 그러므로 차량의 운동 영역을 시뮬레이터의 물리적인 한계내로 제한하는 워시아웃 알고리즘(washout algorithm)이 필요하다[1~4].

대표적인 워시아웃 알고리즘으로 고전적인 워시아웃 알고리즘(classical washout algorithm)이 있다[5~10]. 이 알고리즘은 짧은 해석 시간 및 검증된 안정성과 같은 장점이 있지만, 사용되는 필터들의 차단 주파수 선정이 어렵고, 경사 변환시 원신호가 왜곡되는 현상이 발생하며, 필터에 의한 복원력만으로는 연속적인 운동을 재현하는 데 한계가 있다는 등 여러 가지 문제점을 안고 있다. 이러한 고전적인 워시아웃 알고리즘의 문제점 및 한계를 극복하기 위해서, 본 논문에서는 새로운 경사 변환 알고리즘과 복귀 성분을 고려한 워시아웃 알고리즘을 개발하고자 한다. 또한 인체 감각 모델(human perception model)을 이용하여 제안한 알고리즘과 고전적인 워시아웃 알고리즘과의 정량적인 비교를 수행하고자 한다.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2003. 8. 26., 채택확정 : 2004. 3. 22.
강유진 : 삼성 SDI(eugene.kang@samsung.com)
유기성 : 부산대학교 지능기계공학과(nedayks@chol.com)
이민철 : 부산대학교 기계공학부(mclee@pusan.ac.kr)
※ 본 연구는 NRL(국가 지정 연구실) 과제(M1-0203-00-0017-02J0000-00910)의 지원과 부산대학교 연구보조비(4년과제)의 지원으로 연구하였음.

II. 고전적인 워시아웃 알고리즘

1. 인체 감각 모델

인체는 평형석(otolith)에서 비력(specific force)을 감지하여 병진 운동을 느끼며, 전정관(vestibular)에서 회전 각속도를 인지하여 회전 운동을 느낀다. 평형석에서 감지하는 비력은 병진 가속도 벡터와 중력 가속도 벡터의 차이다.

$$\overrightarrow{F^S} = \vec{a} - \vec{g} \tag{1}$$

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

인체 감각 기관은 Young과 Oman에 의해서 스프링 · 질량 · 댐퍼 시스템으로 모델링 되었으며, 평형석계의 전달함수는 다음 식과 같이 표현된다[5~6]. 또한 평형석계의 주파수 응답 특성을 구해보면, 0.01~0.5 Hz의 대역에서 가장

양호한 감지를 나타낸다.

$$G(s)_{otolith} = \frac{k(\tau_A s+1)}{(\tau_L s+1)(\tau_S s+1)} \quad (2)$$

여기서, τ_L, τ_S, τ_A는 각각 평형석계의 저주파 신호를 위한 시정수(short- time constant), 고주파 신호를 위한 시정수(long-time constant), 신경계의 전달과정에서 유발되는 위상과 관계되는 시정수이다.

모델링된 전정관계의 전달 함수는 다음 식과 같이 표현되고, 주파수 응답 특성은 0.01~5 Hz의 주파수 대역에서 가장 양호하게 감지되어 진다.

$$G(s)_{vestibular} = \frac{T_L T_A s^2}{(T_L s+1)(T_S s+1)(T_A s+1)} \quad (3)$$

여기서, T_L, T_S, T_A는 각각 전정관계의 저주파 신호를 위한 시정수(short- time constant), 고주파 신호를 위한 시정수(long-time constant), 신경계의 전달과정에서 유발되는 위상과 관계되는 시정수이다.

2. 고전적인 워시아웃 알고리즘

고전적인 워시아웃 알고리즘은 크게 병진 운동 워시아웃(translational washout)과 회전 운동 워시아웃(rotational washout), 그리고 경사 변환 알고리즘의 세 부분으로 나뉘며, 알고리즘의 개략도는 그림 1과 같다. 차량 동역학 해석 결과로부터 얻어지는 운전석에서의 차량의 병진 가속도와 회전 각속도는 워시아웃 알고리즘에 입력되고, 입력된 신호는 워시아웃 알고리즘을 통하여 시뮬레이터에서 구현 가능한 병진 가속도와 회전 각속도로 출력된다.

병진 운동 워시아웃 알고리즘은 두 단계로 구분된 고주파 통과 필터와 좌표 변환으로 구성된다. 1단계 고주파 통과 필터를 이용하여 저주파 성분을 제거하고, 운동 재현기의 상판 중심에서의 고주파 가속도를 생성시킨다. 운동 재현기의 상판 중심의 가속도는 좌표변환을 통해 하판의 중심 좌표계에서의 가속도로 변환된다. 그러나 좌표 변환과정에서 운동 재현기의 브라이언트 각에 따라 부수적인 비력이 발생하여, 1단계 고주파 통과 필터만으로는 운동 재현기의 기구학적 한계 내에서 운동을 재현할 수 없다. 이를 해결하기 위해, 2단계 고주파 통과 필터를 사용하여 운동 재현기의 하판 중심에서의 고주파 병진 가속도를 생성한다.

회전 운동 워시아웃 알고리즘은 1단계 및 2단계 고주파 통과 필터와 좌표 변환으로 구성된다. 1단계 고주파 통과 필터를 이용하여 차량의 운전석 좌표계로 입력되는 지속적인 저주파 회전 각속도를 제거하고, 이 필터를 통과한 회전 각속도를 브라이언트 각으로 표현되는 회전 각속도로 변환된다. 그리고 2단계 고주파 통과 필터를 사용하여 운동 재현기의 짐벌각(gim-bal angle)을 제한하면서 원점 복귀가 가능한 고주파 회전 각속도를 생성한다.

병진 운동 워시아웃의 경우 고주파 통과 필터를 사용하여 고주파의 비력 성분만을 생성하기 때문에, 병진 운동 워시아웃만으로는 저주파 성분의 비력을 생성시킬 수 없다. 그러나 경사 변환 알고리즘을 이용하면 병진 운동 워시아웃에서 제거되는 비력을 회전 운동에 따른 기울임 각으로

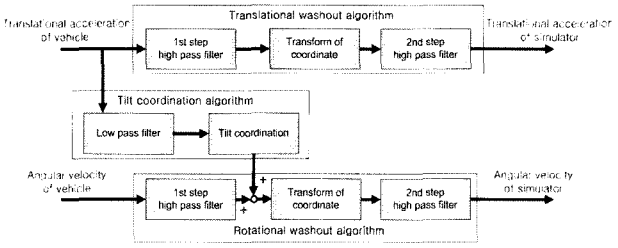


그림 1. 고전적인 워시아웃 알고리즘의 개략도.

Fig. 1. Schematic diagram of classical washout algorithm.

재현할 수가 있다. 운전자는 중력의 크기만큼 반대 방향으로 비력을 감지하게 되므로, 중력 벡터의 반대방향으로 운동 재현기를 기울이면 원하는 만큼의 비력을 구현할 수 있게 된다.

고전적인 워시아웃 알고리즘은 빠른 계산 및 안정적인 성능 등과 같은 장점을 가지고 있지만, 다음과 같은 문제점이 존재한다.

첫째, 경사 변환시에 사용되는 고주파 통과 필터와 저주파 통과 필터는 이상적인 필터가 아니므로, 고주파 성분의 비력과 저주파 성분의 비력의 합은 재현해야 할 비력 성분과 비교하였을 때, 위상 및 크기 특성에서 왜곡되어지는 현상이 발생한다.

둘째, 고전적인 워시아웃 알고리즘에서는 고주파 통과 필터를 사용하여, 기구학적 운동 한계 내에서 구현이 가능한 고주파 성분의 운동을 생성한다. 그러나 이러한 고주파 통과 필터를 지난 신호는 차단 주파수가 증가함에 따라서 원 신호의 진행 방향과 반대 방향으로의 운동이 발생할 뿐만 아니라, 고주파 통과 필터에 입력되는 운동이 원점으로 복귀한 이후에도, 고주파 통과 필터를 지난 운동은 일정 시간이 지나고 나서야 운동 원점으로의 복귀가 이루어진다. 따라서 고주파 통과 필터에 의한 복원력만으로는 운동 원점으로의 완전한 복귀까지 걸리는 시간을 줄이는 데에 한계가 있게 되어, 연속적으로 발생하는 운동을 충실히 재현할 수 없다.

III. 새로운 경사 변환 알고리즘 및 복귀 성분을 고려한 워시아웃 알고리즘

1. 새로운 경사 변환 알고리즘

차량 동역학 해석을 통해 얻어진 병진 가속도와 회전 각속도에 대하여, 워시아웃 알고리즘과 같은 신호처리 과정 없이 인체 감각 모델에서 인지되는 운동 감각은 차량에서의 운동 감각이라 할 수 있다. 그림 2는 차량에서의 운동 감각을 평가하기 위한 구성도를 나타낸다. (1)에서 나타낸 운전자의 평형석을 통해 인지되는 비력을 운전석 중심에서의 좌표계로 변환하면 다음 식과 같이 유도되어진다.

$$\overrightarrow{F_P^S} = \overrightarrow{a_P} - {}^P_G R(\alpha,\beta,\gamma)\vec{g} = \begin{bmatrix} a_{Px} + g\sin\beta \\ a_{Py} - g\sin\alpha\sin\beta \\ a_{Pz} + g\cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $\overrightarrow{a_P}$는 운전석 좌표계에서의 병진 가속도이고,

$-{}^{P}_{G}R(\alpha,\beta,\gamma)\vec{g}$는 운전석 좌표계에서의 중력 가속도이다. $\vec{a}_P$를 병진 운동에 의한 비력인 $\vec{F}^{S}_{Pt}$로 대입하고, $-{}^{P}_{G}R(\alpha,\beta,\gamma)\vec{g}$를 회전 운동에 따른 비력인 $\vec{F}^{S}_{\Pr}$로 대체하면, 운전석 좌표계에서의 비력은 다음 식과 같이 표현되어진다.

$$\vec{F}^{S}_{P}=\vec{F}_{Pt}+\vec{F}^{S}_{\Pr} \tag{10}$$

그림 3은 고전적인 경사 변환에 의한 운동 감각을 평가하기 위한 구성도를 나타낸다. 고전적인 워시아웃 알고리즘에서는 지속적인 병진 가속도를 고주파 통과 필터를 사용하여 제거하고, 비력 성분은 같은 병진 가속도를 저주파 통과 필터를 통과시켜서 저주파 병진 가속도를 생성한 다음, 경사 변환을 통해 생성한다. 고전적인 경사 변환을 이용해 재생하게 되는 비력은 다음식과 같다.

$$\vec{F}^{S}_{P,\,Classical}=\vec{F}^{S}_{Pt,\,High}+\vec{F}^{S}_{\Pr,\,Low}+\vec{F}^{S}_{\Pr} \tag{11}$$

여기서 $\vec{F}^{S}_{Pt,\,High}$는 고주파 통과 필터를 지난 고주파 병진 가속도에 의해 생성된 비력이고, $\vec{F}^{S}_{\Pr,\,Low}$는 저주파 통과 필터를 거친 저주파 병진 가속도의 경사 변환에 의해 생성된 비력이다. 그러나 실제 사용되는 고주파 통과 필터와 저주파 통과 필터는 해당 차단 주파수 이상 또는 이하의 신호를 완벽하게 필터링하는 이상적인 필터가 아니기 때문에, 저주파 및 고주파 통과 필터를 적용한 비력의 합은 원래의 비력과 다르게 왜곡되어진다. 그림 4는 새로운 경사 변환 알고리즘에 의한 운동 감각을 평가하기 위한 구성도를 나타내고 있다. 본 논문에서는 경사 변환 시 저주파 통과 필터 사용으로 인한 문제점을 해결하기 위해, 병진 가속도와 고주파 통과 필터를 지난 병진 가속도와의 차이를 이용한 새로운 경사 변환 알고리즘을 제안하고자 한다.

부가적인 비력 생성을 위해, 경사 변환에 입력되어지는 가속도 성분($\vec{a}_{P,\,Diff}$)는 다음 식을 통하여 구해진다.

$$\vec{a}_{P,\,Diff}=\vec{a}_P-\vec{a}_{P,\,High} \tag{12}$$

여기서 $\vec{a}_P$는 차량 해석 결과로부터 얻어진 운전석에서의 병진 가속도이고, $\vec{a}_{P,\,High}$는 고주파 통과 필터를 지난 병진 가속도이다.

병진 가속도에 의해 생성된 비력으로 전개하면, 다음 식과 같이 유도되어진다.

$$\vec{F}^{S}_{Pt}=\vec{F}^{S}_{Pt,\,High}+\vec{F}^{S}_{Pr,\,Diff} \tag{13}$$

여기서 $\vec{F}^{S}_{Pt}$는 병진 가속도에 의해 생성된 비력이고, $\vec{F}^{S}_{Pt,\,High}$는 고주파 통과 필터를 지난 병진 가속도에 의해 생성된 비력이며, $\vec{F}^{S}_{Pr,\,Diff}$는 제안한 경사 변환 알고리즘에 의해 생성된 비력이다.

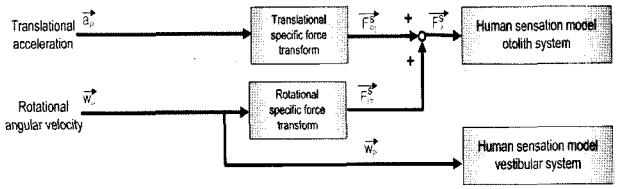


그림 2. 차량에서의 운동 감각을 평가하기 위한 구성도.

Fig. 2. Schematic diagram for sensations of motions in actual vehicle.

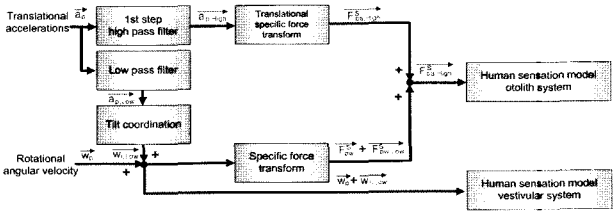


그림 3. 고전적인 경사 변환에 의한 운동 감각을 평가하기 위한 구성도.

Fig. 3. Schematic diagram for sensations of motions by classical tilt coordination.

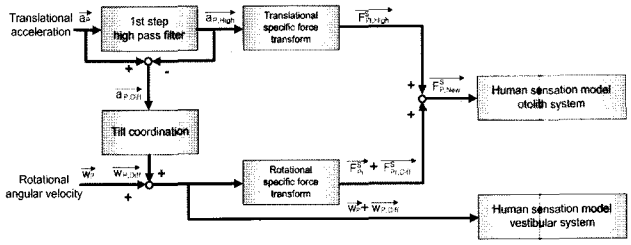


그림 4. 새로운 경사 변환에 의한 운동 감각을 평가하기 위한 구성도.

Fig. 4. Schematic diagram for sensations of motions by new tilt coordination.

부가적인 비력 생성을 위해, 경사 변환에 입력되어지는 가속도 성분($\vec{a}_{P,\,Diff}$)는 다음 식을 통하여 구해진다.

$$\vec{a}_{P,\,Diff}=\vec{a}_P-\vec{a}_{P,\,High} \tag{12}$$

여기서 $\vec{a}_P$는 차량 해석 결과로부터 얻어진 운전석에서의 병진 가속도이고, $\vec{a}_{P,\,High}$는 고주파 통과 필터를 지난 병진 가속도이다.

병진 가속도에 의해 생성된 비력으로 전개하면, 다음 식과 같이 유도되어진다.

$$\vec{F}^{S}_{Pt}=\vec{F}^{S}_{Pt,\,High}+\vec{F}^{S}_{Pr,\,Diff} \tag{13}$$

여기서 $\vec{F}^{S}_{Pt}$는 병진 가속도에 의해 생성된 비력이고, $\vec{F}^{S}_{Pt,\,High}$는 고주파 통과 필터를 지난 병진 가속도에 의해 생성된 비력이며, $\vec{F}^{S}_{Pr,\,Diff}$는 제안한 경사 변환 알고리즘에 의해 생성된 비력이다.

운전자가 운전석에서 인지하는 비력은 고주파 통과 필터에 의한 비력과 경사 변환에 의한 비력 및 회전 각속도에 의한 비력의 합으로 표현되어지며, 제안한 알고리즘에서 생성된 비력은 다음 식과 같이 차량에서 인지하는 비력과 동일하게 유도되어진다.

$$\begin{aligned}\vec{F}^{S}_{P,\,New}&=\vec{F}^{S}_{Pt,\,High}+\vec{F}^{S}_{\Pr,\,Diff}+\vec{F}^{S}_{Pr}\\&=\vec{F}^{S}_{Pt}+\vec{F}^{S}_{Pr}=\vec{F}^{S}_{P}\end{aligned} \tag{14}$$

2. 복귀 성분을 고려한 워시아웃 알고리즘

2.1 고전적인 워시아웃 알고리즘에서의 운동원점 복귀

고전적인 워시아웃에서는 고주파 통과 필터를 사용하여 기구학적 운동 한계 내에서 구현 가능한 고주파 성분의 운동을 생성한다. 그러나 고주파 통과 필터에 입력되는 운동이 원점으로 복귀한 이후에도, 고주파 통과 필터를 거친 운

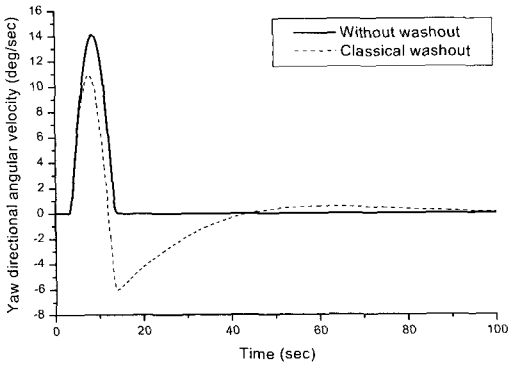


그림 5. 고주파통과필터에 의한 요 방향 회전 각 속도.
Fig. 5. Yaw directional angular velocity through high pass filter.

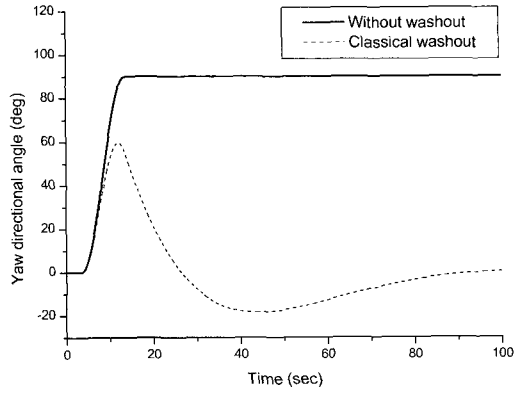


그림 6. 고주파통과필터에 의한 요 방향 회전 각.
Fig. 6. Yaw directional angle through high pass filter.

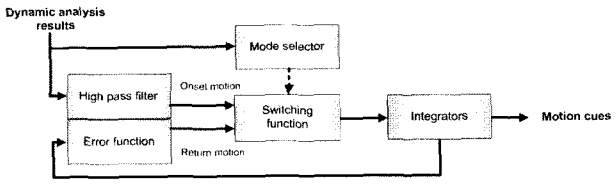


그림 7. 복귀 성분을 고려한 알고리즘 개략도.
Fig. 7. Schematic diagram of washout algorithm using return mode.

동은 일정 시간이 지나고 나서야 운동 원점으로의 복귀가 이루어진다. 그림 5와 6은 고주파 통과 필터를 사용하였을 때의 요 방향 회전 각속도와 그에 따른 회전각을 보이고 있다. 여기서 사용된 고주파 통과 필터의 차단 주파수는 워시아웃 알고리즘에 의한 주행 감각 재현 성능을 높일 수 있도록 시행착오적으로 0.01Hz 로 선정하였다. 실선은 좌회전시의 차량에서의 회전 각속도와 회전각이고, 점선은 고주파 통과 필터에 의해 변환된 회전 각속도와 회전각을 나타낸다. 그림 5와 같이 고주파 통과 필터에 의해 저주파 성분이 제거됨에 따라 운동 방향과 반대 방향의 각속도가 발생하며, 그림 6에서처럼 워시아웃을 거치지 않은 차량에서의 회전각은 좌회전 이후 90 deg로 유지되는 반면에, 고전적인 워시아웃에 의한 회전각은 약 60 deg까지 증가하였다가 운동 원점인 0 deg로 복귀가 이루어진다. 즉, 피크 각(peak angle)까지는 시작모드(onset mode)에 의해 고전적인 워시아웃 알고리즘을 거쳐 회전 운동을 시작하고, 그 이후에는 복귀모드(return mode)에 의해 복귀 운동을 시작한다. 그러나 원점에 처음 도달한 시점 이후에도, 운동 방향과는 반대 방향으로 회전하였다가 원점으로 서서히 복귀함을 볼 수 있다. 이와 같은 원점으로의 완전한 복귀가 이루어지기 전의 상황이나, 반대 방향에서 운동이 진행되고 있는 상황에서, 연속적인 운동이 발생한다면 운동 재현기가 위치 한계를 벗어나게 된다. 따라서 실제 차량 주행 환경에서는 다양한 운동이 연속적으로 발생하기 때문에, 운동 원점 복귀는 가능한 빠른 시간 내에 이루어져야 하며, 반대 방향의 운동 역시 제거되어져야 한다.

2.2 복귀 성분을 고려한 워시아웃 알고리즘

고전적인 워시아웃에서의 고주파통과필터에 의한 복원력만으로는 운동 원점으로의 완전한 복귀까지 걸리는 시간을 줄이는 데에 한계가 있으므로, 본 연구에서는 운동 원점과의 오차를 이용하여 복귀 성분을 보상하는 알고리즘을 구현하고자 한다. 그림 7에서 복귀 성분을 고려한 알고리즘의 개략도를 보이고 있다. 복귀 성분을 고려한 워시아웃 알고리즘은 고주파통과필터, 오차 함수(error function), 스위칭 함수(switching function), 적분기 및 모드 선택기(mode selector)로 구성된다. 또한 병진 가속도 및 회전 각속도와 같은 차량 동역학 해석 결과가 제안한 알고리즘에 입력되고, 운동 재현기의 운동 한계 내에서 구현이 가능하고 항상 운동 원점으로 복귀하게 하는 운동 명령(motion cues)이 출력된다.

고주파 통과 필터를 이용하여 운동 한계를 벗어나게 하는 저주파 성분을 제거하고, 필터를 통과한 고주파 성분을 운동 원점에서 피크 변위 및 회전각까지의 개시 운동으로 선정한다. 적분기와 오차 함수를 이용하여 복귀 운동을 생성하며, 모드 선택기에 의해 해석된 정보를 바탕으로 스위칭 함수에서 개시 운동과 복귀 운동을 선택적으로 연결하여, 시뮬레이터에서 구현이 가능하고 항상 원점으로 복귀하는 운동 명령을 생성한다. 그림 8은 운동 모드를 해석하고 스위칭 함수를 제어하는 모드 선택기의 구조도를 보여주고 있다. 모드 선택기는 노이즈 성분을 제거하기 위한 저주파 통과필터, 양방향 운동에서의 복귀 성분을 고려하기 위한 양수화 함수(absolute function), 시간 변화율을 구하는 차분 함수(difference function), 전처리된 신호를 해석하고 운동 모드를 결정하는 모드 해석기(mode analyzer)로 구성되어 있다. 그림 6에서 나타난 것처럼 운동 원점에서 피크 각까지의 운동을 개시 운동 모드로 선정하고, 피크 각에서 운동 원점으로의 운동을 복귀 운동 모드로 선정한다. 그러나 고주파 통과 필터를 지난 신호를 모드 해석에서 사용할 때에는 위상 앞섬과 같은 문제가 발생하기 때문에, 차량 동역학 해석 결과를 운동 모드 해석에서 사용한다.

Ⅳ. 시뮬레이션을 통한 정량적 평가

1. 가상 주행 환경

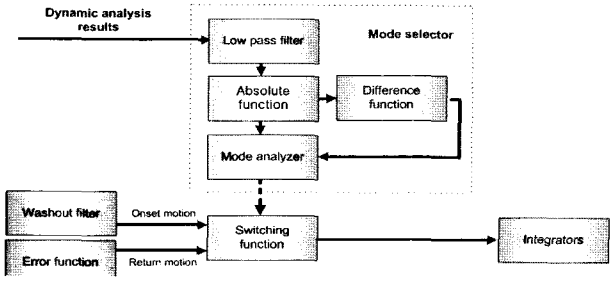


그림 8. 모드 선택기 개략도.
Fig. 8. Schematic diagram of mode selector.

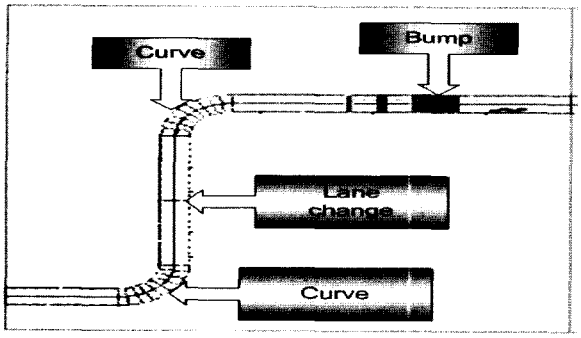


그림 9. 시뮬레이션을 위한 도로 지도.
Fig. 9. Road map for simulation.

가상 주행 환경은 도시 공간의 아스팔트 도로를 주행하는 시나리오로 구성하였다. 주행 감각 재현의 다양한 평가를 위해 도로 지도(road map)는 그림 9와 같이 직선 도로와 커브, 차선 변경, 범퍼 통과, 가감속 구간, 도로의 요철 등 일반 도로의 조건을 포함하고 있다.

2. 새로운 경사 변환에 의한 운동 감각에 대한 정량적평가

그림 10에서 15는 가상 주행 환경에서의 운동 감각을 나타낸다. 히브(heave) 및 요(yaw) 방향 성분은 경사 변환 알고리즘에 영향을 미치지 않으므로, 서지(surge) 및 스웨이(sway) 방향의 병진 운동 감각과 롤(roll) 및 피치(pitch) 방향의 회전 운동 감각만을 선택하였다. 이 때의 고주파 통과 필터 및 저주파 통과 필터의 차단 주파수는 모두 0.01 Hz이다. 각 방향 운동감각을 나타내는 그림에서, 실선은 워시 아웃 알고리즘을 거치지 않은 차량 해석 결과에 대한 인체 감각 모델의 응답인 차량에서의 운동 감각이고, 긴 점선은 고전적인 경사 변환에 의한 시뮬레이터에서의 운동 감각이며, 짧은 점선은 새로운 경사 변환에 의한 운동 감각이다. 운동 감각 오차는 차량에서의 운동 감각과 시뮬레이터에서의 운동 감각과의 차이로 정의하였다. 그림 10과 11은 서지 방향 운동 감각 및 운동 감각 오차를 각각 보이고 있다. 그림 10처럼 고전적인 경사 변환에 의한 운동 감각은 새로운 경사 변환에 의한 운동 감각에 비해 크기 및 위상 특성에서 왜곡이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 그림 11에서 고전적인 경사 변환에 의한 운동 감각 오차는 전체 서지 방향 운동 감각의 30%정도인 약 ±0.1 m/sec 이내의 수치로 나타나지만, 새로운 경사 변환에 의한 운동 감각 오차는 약 ±0.02 m/sec

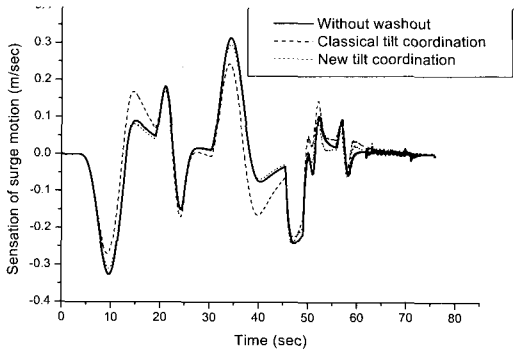


그림 10. 서지 방향 운동 감각.
Fig. 10. Surge motion sensation.

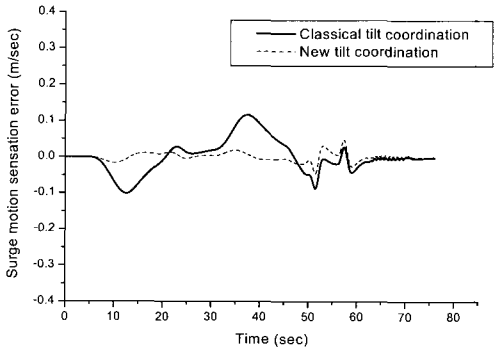


그림 11. 서지 방향 운동 감각 오차.
Fig. 11. Surge directional sensation error.

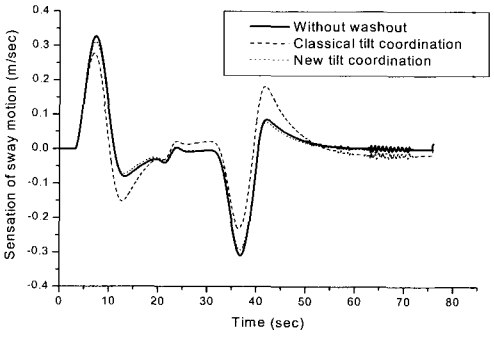


그림 12. 스웨이 방향 운동 감각.
Fig. 12. Sway directional sensation.

이내로 나타난다. 그림 12와 13은 스웨이 방향 병진 운동 감각과 운동 감각 오차를 각각 나타낸다. 서지 방향에서의 결과와 마찬가지로 새로운 경사변환에 의한 운동 감각의 크기 및 위상 특성은 비교적 왜곡이 덜 발생함을 볼 수 있으며, 운동 감각 오차 역시 ±0.02 m/sec이내의 범위로 줄어들었음을 확인할 수 있다. 그림 14와 15는 롤 및 피치 방향 회전 운동 감각을 나타낸다. 워시아웃 알고리즘을 사용하지 않았을 때에 비해 부가적인 병진 운동 감각은 최대 ±0.4 deg 정도로 발생하고 있다. 그러나 피치 방향 운동 감각의 최대 크기가 약 ±10 deg임을 감안하면, 부가적인 회전 운동 감각이 전체 회전 운동 감각에 지배적인 영향을 주지 않는다고 할 수 있다.

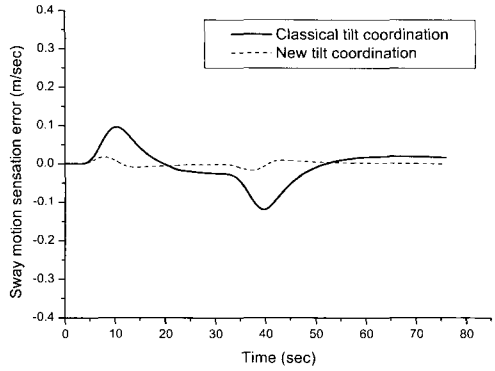


그림 13. 스웨이 방향 운동 감각 오차.

Fig. 13. Sway directional sensation error.

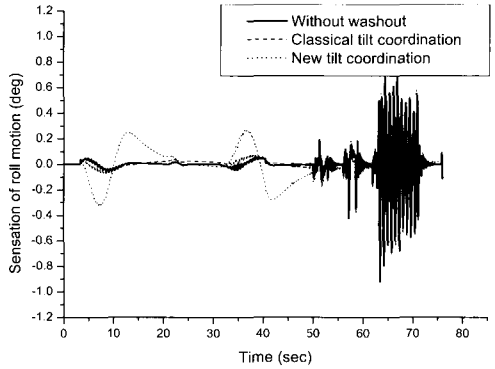


그림 14. 롤 방향 운동 감각.

Fig. 14. Roll directional sensation.

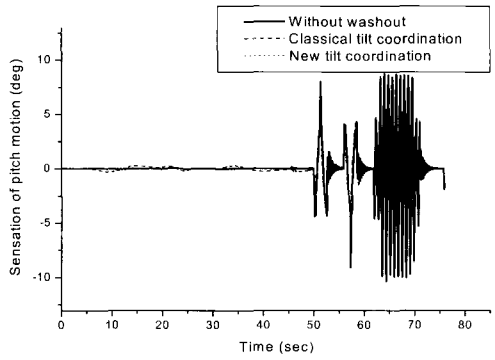


그림 15. 피치 방향 운동 감각.

Fig. 15. Pitch directional sensation.

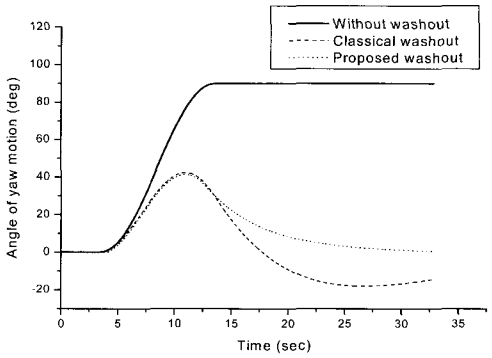


그림 16. 요 방향 회전각.

Fig. 16. Yaw motion angle.

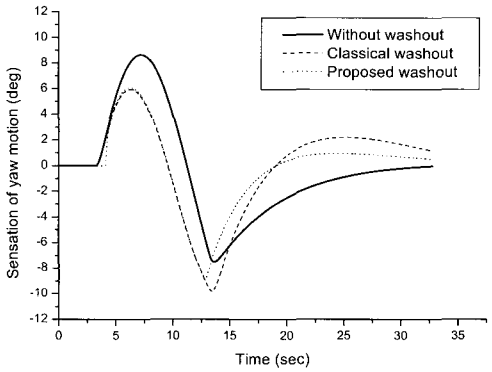


그림 17. 요 방향 회전 운동 감각.

Fig. 17. Yaw motion sensation.

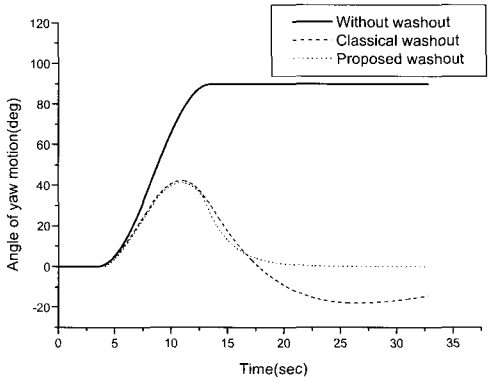


그림 18. 요 방향 회전각.

Fig. 18. Yaw directional angle.

3. 복귀 성분을 고려한 알고리즘에 대한 정량적 평가

그림 16에서 19는 좌회전 시의 요 방향 회전 각속도에 대한 인체 감각 모델을 통한 운동 감각과 회전 각속도의 일차 적분 값인 운전석 중심에서의 회전각을 나타낸다. 여기서 실선은 워시아웃을 사용하지 않았을때의 결과이고, 긴 점선은 고전적인 워시아웃에 의한 결과이며, 짧은 점선은 제안한 알고리즘에 의한 해석 결과이다. 또한 이 때에 사용된 고주파 통과 필터의 차단 주파수는 0.02 Hz이다. 그림 16과 17는 고주파 통과 필터에 의해 발생하는 반대 방향의 운동을 제안한 알고리즘을 이용하여 제거하고 운동 원점으로 최종 복귀 시간을 단축시켰을 때의 결과이다. 그림 16에서처럼 고전적인 워시아웃에 의한 회전각은 운동 개시 이후 약 40 deg까지 증가하고 18초 부근에서 1차 복귀가 이루어진 이후 반대 방향으로의 회전이 발생하고 있다. 그에 비해서 제안한 알고리즘에 의한 회전각은 반대 방향으로의 회전 없이 운동 원점으로 복귀하고 있다. 또한 그림 17에서처럼 운전자가 인지하는 회전 운동 감각은 복귀 운동에서 어느 정도의 위상 앞섬이 발생하지만 전체적으로 유사하게 나타남을 볼 수 있다. 그림 18과 19는 제안한 알고리즘을 이용하여 운동 원점으로의 복귀 시간을 보다 더 단축시켰

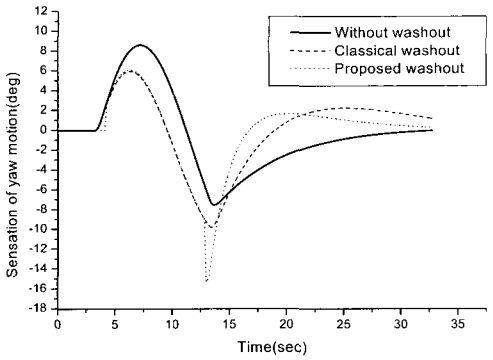


그림 19. 요 방향 회전 운동 감각.
Fig. 19. Yaw directional sensation.

을 때의 결과이다. 그림 18에서처럼 제안한 알고리즘에 의한 회전각은 반대 방향으로의 회전이 제거되었을 뿐만이 아니라 18초 부근에서 운동 원점으로 완전하게 복귀하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 그림 19처럼 18초 부근에서 크게 튀는 부분이 발생하고, 이러한 잘못된 운동 감각을 운전자가 느끼게 될 것이라 예상된다. 따라서 운동 원점으로의 빠른 복귀를 위한 알고리즘을 개발할 때 운전자가 인지하는 운동 감각을 고려해야 하는 것은 해결해야 할 과제이다.

V. 실시간 차량 주행 및 정성적 평가

1. 설문지 계획

워시아웃 알고리즘의 유효성과 부산대학교에서 개발한 차량 운전 시뮬레이터의 성능을 판단하기 위해서는, 인체 감각 모델을 이용한 정량적인 평가뿐만 아니라, 운전자의 운전 감각 재현에 대한 정성적인 평가 또한 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 제안한 워시아웃 알고리즘의 유효성을 평가하고, 워시아웃에 의한 운동 감각과 각 모듈간의 영향을 검토할 수 있도록, 설문 문항을 세부적으로 나누어 정성적인 평가의 기준을 마련하고자 한다.

설문지는 크게 주행 코스에 따른 평가와 운동 요소에 따른 평가로 구성되어 있다. 주행 코스에 따른 평가는 부산대학교 주행 환경에서 구현된 직선 구간, 좌회전 구간, 굽어진 도로, 경사 구간, 요철 통과시의 운동 재현기로 구현해주는 가속도에 대한 운전자의 감지 정도를 나타내는 운동 감각(sensation of motion)과 가속도, 시각 및 청각적인 요소 등 복합적으로 이루어지는 운전자의 감지 정도를 나타내는 느낌(feeling) 을 실제 차량에서의 운전 상황과 비교하는 문항으로 구성하였고, 운동 방향에 따른 평가를 위하여 6자유도 각각의 운동에 대한 운동 감각과 느낌을 묻는 문항으로 구성하였다.

2. 주행 실험

차량 시뮬레이터의 정성적 평가를 위하여 가상으로 만들어진 부산대학교의 환경을 주행하도록 하였다. 그림 20은 설정된 시나리오에 따른 차량의 주행 경로를 나타낸다. 운전 시나리오는 1번 범퍼에서 8번 범퍼까지 좌회전 및 직선 구간과 굽어진 도로, 등반 구간 등을 경험 할 수 있도록 구

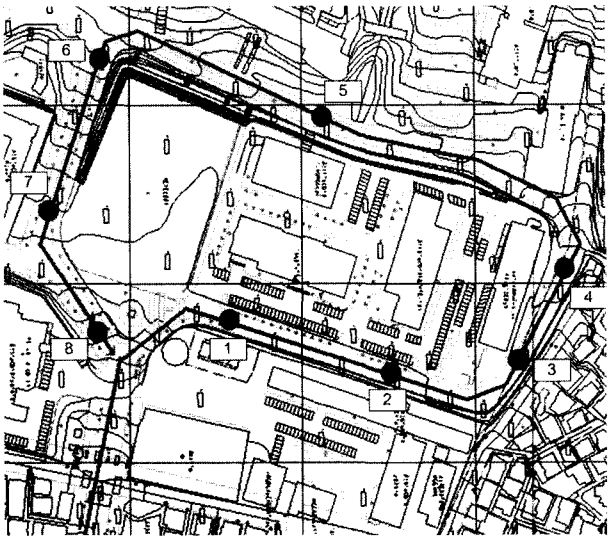


그림 20. 설정된 주행 경로.
Fig. 20. Road map for experiments.

성하였다. 1번 범퍼의 2 m 후방에서 출발하여 0~35 km/h의 속도 범위 내에서 운전자가 주관적으로 운전하여 8번 범퍼의 앞에서 정지하도록 하였다. 운동 재현기의 구동 없이 한 번의 완주를 통해 운전자가 주어진 주행 환경을 익히고 난 뒤에 운동 재현기를 이용한 실험을 실시하였고, 설문지를 이용하여 각 문항에 대한 정성적인 평가를 기술하도록 하였다. 본 실험 및 설문에 참가한 운전자는 모두 25명이었다.

3. 설문 평가 결과

3.1 주행 코스별 운동 감각 및 느낌

시뮬레이터에서의 주행과 실제 차량에서의 주행에 대한 코스별 운동 감각 및 느낌을 비교한 설문 응답을분석하기 위하여, 답변 문항을 '매우 다르다 0', '조금 다르다 1', '보통이다 2', '비슷하다 3', '같다 4', '매우 같다 5'로 각각 수치화 하였다. 각 평가 항목에 대한 25명의 운전자의 응답을 산술적인 평균값을 구하여 표 1과 같이 나타내었다. 전체적으로 '보통이다 2' 이상의양호한 수치를 보이며, 평가 항목 중에서 범퍼 통과시의 운동 감각과 느낌이 가장 높은 수치로 '비슷하다'와같다'의 범위 내에 들고 있다. 또한, 대부분의 항목에 대한 운동 감각과 느낌은 거의 일치하는 경향을 보인다. 각각의 주행 코스에서 답변 문항에 따른 운전자 분포를 전체 평가 참여 인원에 대한 백분율로 나타내었을 때 범퍼 통과에서는 '조금 다르다'와 같은 부정적인 응답이 없으며, 전체적으로 긍정적인 응답이 차지하는 비율이 높음을 볼 수 있다. 범퍼 통과시의 운동은 주로 고주파 운동으로 이루어져 있기 때문에 가장 양호한 응답을 보이며, 회전 및 경사 구간에서의 운동 감각과 느낌은 다른 주행 코스들에 비해, 실제 차량과의 유사함은 더 낮게 평가 되었다. 이는 스크린이 벽면에 부착됨에 따라 발생하는 시각적 불일치에 기인한다고 판단된다.

3.2 운동 방향에 따른 운동 감각 및 느낌

차량 시뮬레이터의 운동 요소인 6자유도 운동에 대한 운동 감각 및 느낌을 실제 차량과 비교한 설문 결과는 '매우 다르다 0', '조금 다르다 1', '보통이다 2','비슷하다 3', '같

표 1. 주행 코스별 운동 감각 및 느낌에 대한 평균값.
Table 1. Average values of motions and feelings as driving courses.

평가 항목	운동 감각	느낌
직선 구간	2.72	2.72
좌회전 구간	2.44	2.56
굽어진 도로	2.56	2.56
경사 구간	2.40	2.56
범퍼 통과	3.36	3.28

표 2. 운동 방향에 따른 운동 감각 및 느낌에 대한 평균값.
Table 2. Average values of motions and feelings as each direction.

평가 항목	운동 감각	느낌
서지 방향	2.92	2.96
스웨이 방향	2.74	2.82
히브 방향	3.37	3.46
롤 방향	2.71	2.78
피치 방향	2.88	2.76
요 방향	2.88	2.6

다 4', '매우 같다 5'로 각각 계량화하고 산술적인 평균을 구하여 표 2에 정리하였다. 각 항목에 대한 평가는 모두 '비슷하다 3'에 근접한 수치를 보이며, 서지 및 히브 방향의 운동 감각과 느낌이 실제 차량에서와 가장 비슷하다고 평가되었다.

표 1에서 나타난 주행 코스 및 운전 조작에 대한 운동 감각에 대한 평가의 평균값들 보다, 운동 방향에 따른 운동 감각에 대한 평가의 평균값들이 전체적으로 더 크게 나타난다. 운동 방향에 따른 평가에 가장 큰 영향을 주는 요소가 워시아웃 알고리즘임을 고려하면, 제안한 워시아웃 알고리즘이 잘못된 운동 감각을 운전자에게 제공하지 않을 뿐만이 아니라, 실제 차와 유사한 병진 및 회전 운동 감각을 제공한다고 할 수 있다.각 설문 응답에 대한 운전자 분포를 참여 인원에 대한 백분율로 나타내었을 때 스웨이 방향 운동 감각에서 '매우 다르다'라는 평가(4%)가 있었으나, 모든 항목에서 50%가 넘는 응답자들이 '비슷하다 3' 이상의 긍정적인 평가를 내렸다.

VI. 결론

본 논문에서는 차량의 운동을 제한된 운동 영역 내에서 거동할 수 있도록 하는 워시아웃 알고리즘을 개발하였다. 고전적인 워시아웃의 경사 변환에서 비력이 왜곡되는 문제점을 제시하고, 보다 완전한 비력 재현이 가능한 새로운 경사 변환 알고리즘을 제안하였다. 또한 고전적인 워시아웃에서 고주파 통과 필터만을 사용하여 복귀 성분을 생성할 때 발생하는 문제점을 지적하고, 이를 개선하기 위해 복귀 성분을 고려한 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해, 시뮬레이션을 통한 정량적인 평가와 실험 및 설문 조사를 통한 정성적인 평가를 수행하였다.

정량적인 평가를 통해 제안한 경사 변환 알고리즘이 고전적인 경사 변환 알고리즘에 비해 롤 및 피치 방향에서 부가적인 회전 운동 감각이 어느 정도 발생하지만, 전체적으로 실제 차량에서 느끼는 운동 감각을 더 잘 재현해 줄 수 있음을 확인하였다. 또한 제안한 복귀 성분을 고려한 알고리즘은 기존의 워시아웃 알고리즘에 비해 보다 빠른 복귀를 가져올 뿐만 아니라 고주파 통과 필터에 의해 발생하는 원 신호의 진행 방향과 반대 방향의 운동을 제거하였다. 따라서 항상 원점으로 복귀하고 연속적인 운동 구현이 가능함을 확인하였다.

정성적인 평가에서 운전자가 시뮬레이터에서 인지하는 운전 감각이 실제 차량에서의 운전 감각과 전체적으로 '보통이다' 이상의 결과로 나타났으며, 워시아웃 알고리즘의 영향이 가장 크게 나타나는 운동 방향에 따른 운동 감각과 느낌이 '비슷하다'에 근접한 수치로 나타났다. 따라서 제안한 알고리즘에 의해서 시뮬레이터에 탑승한 운전자에게 잘못된 운동 감각을 재현하지 않을 뿐만이 아니라, 실제 차량과 유사한 주행 환경을 제공해 줄 수 있음을 확인하였다.

향후 연구에서는 복귀 성분을 고려한 알고리즘을 개발할 때, 인체 감각 모델을 제안한 알고리즘에 포함시킴으로써 복귀 성분뿐만 아니라 운전자가 인지하는 운동 감각을 고려하는 알고리즘으로 개선하여야 할 것이다.

참고문헌

[1] J. Drosdol and F. Panik, "The Daimler-Benz Driving Simulator, A Tool for Vehicle Develoment," *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.

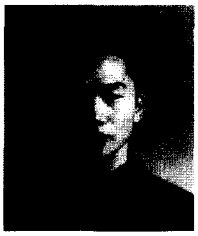
[7] A. Samji and L. D. Reid, "The Detection of Low-Amplitude Yawing Motion Transients in a Flight Simulator," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 22, pp. 300-306, 1992.

[8] 김영수, 백창흠, 최성학, 심민식, 최진성, 강득수, 정대

현, "비행 훈련 시뮬레이타 운동판," 대우중공업 기술 개발 소식, 1995.

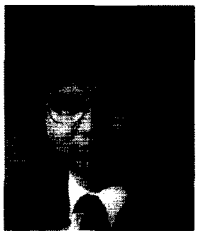
[9] 손권, 유완석, 이민철, 이장명, 김성수, 휠 굴삭기의 운전 시뮬레이터의 개발, 삼성 중공업 산학협동연구 보고서, 1997.

[10] 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.



강 유 진

1975년 8월 4일생. 1998년 부산대학교 제어기계공학과 졸업. 동대학원 지능기계공학과 석사(2003). 2003년~현재 삼성 SDI 생산기술연구소 연구원. 관심분야는 시스템규명, 메카트로닉스, 차량 시뮬레이터, 비선형제어.



이 민 철

1960년 8월 6일생. 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업. 일본 쯔쿠바 대학교 이공학연구과 공학 석사(1988). 동대학 물리공학 연구과 공학박사(1991). 1991년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 시스템규명, 로봇제어, 지능형 서비스 로봇, 이족 보행 로봇, 메카트로닉스, 시뮬레이터.

유 기 성

1973년 1월 15일생. 1998년 부산대학교 기계공학과 졸업. 동대학원 기계공학과 대학원 석사(2000). 2000년~현재 동대학원 지능기계공학과 박사 과정 재학중. 관심분야는 영상처리기법, 자율 이동로봇, 견실제어, 차량 시뮬레이터. 메카트로닉스, 시뮬레이터.