

퍼지에 기초한 워시아웃 알고리즘을 적용한 주행 시뮬레이터의 개발

정의정* · 송재복** · 고희동***

Development of Driving Simulator Based on Washout Algorithm with Fuzzy Logic

Uijung Jung, Jae-Bok Song and Hee-Dong Ko

Key Words : Driving simulator(주행 시뮬레이터), washout algorithm(워시아웃 알고리즘), Stewart platform(스튜어트 플랫폼), fuzzy logic(퍼지 로직), system integration(시스템 통합)

Abstract

In the virtual environment, reality can be enhanced by offering the motion based on a motion simulator in harmony with visual and auditory modalities. In this research, the Stewart platform based motion simulator has been developed. This motion simulator is driven by the electric motors, and offers the slightly wider workspace compared to the commercial available simulators. In order to compensate for the limited range of the motion platform, the washout filters with fixed coefficients have been usually adopted. In this paper the new approach is proposed to tune the filter coefficients based on the fuzzy logic on the real-time basis. It is shown that performance with the variable filter coefficients is better than that with the fixed ones. The driving simulator based on the bicycle dynamics was developed by integrating the motion simulator and graphic system.

기호설명

- x : 서지 방향의 좌표
- ω : 각속도
- ω_p : 피치 각속도
- a : 선가속도
- f : 비력(specific force)
- f_x : x 방향의 비력
- g : 중력 가속도
- θ_{tilt} : 틸트각(tilt angle)
- ω_{HPFx} : 2차 고주파 통과 필터의 차단 주파수
- $\omega_{HPF\theta}$: 1차 고주파 통과 필터의 차단 주파수
- ω_{LPFx} : 2차 저주파 통과 필터의 차단 주파수
- ζ_{HPF} : 2차 고주파 통과 필터의 감쇠비

ζ_{LPF} : 2차 저주파 통과 필터의 감쇠비

1. 서론

시뮬레이터는 시제품의 평가, 안전성 검사, 인체 반응 연구, 오락 등 많은 분야에 사용되고 있으며, 그 활용 범위가 점차 광범위해지고 있다. 주행 상황과 관련된 가상환경에서의 효과적인 현실감 제시를 위해서는, 그래픽 화면의 구성, 입체 음향 효과, 그리고 주행 상황에서의 운동감 제시 등이 필요한데, 각각의 기능이 잘 수행되어야 가상환경에서의 몰입감이 최대화될 수 있다.

가상환경에서 다양한 운동을 제시하기 위해 다자유도 운동 플랫폼이 요구되는데, 주로 6자유도 스튜어트 플랫폼이 많이 사용되고 있다. 스튜어트 플랫폼은 70년대 NASA에서 항공기 시뮬레이터⁽¹⁾, ⁽²⁾로 사용되기 시작한 후부터, 자동차, 선박, 모터 사이클⁽⁴⁾, 그리고 자전거 등 각종 시뮬레이터에 사용되어 왔다. 스튜어트 플랫폼은 액추에이터의 형태에 따라 유압식과 전기 모터식으로 분류된다.

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 기계공학과

*** KIST 영상미디어센터

유압식은 큰 힘을 요구하는 대형 장치에 적합하지만, 여러 유압 발생 장치로 인해서 시스템이 복잡해지고 소음이 발생하며 반응 속도가 다소 느리다는 단점을 갖는다. 이에 비하여, 전기 모터식은 소규모이고 유압식에 비해 작용력이 작은 반면에, 소음이 작고 반응 속도가 빠르다. 본 연구에서는 시뮬레이터의 효율성 및 설치의 용이성, 그리고 소음 등을 고려하여 전기 모터식으로 액추에이터를 채택하였다.

현실에서의 여러 주행 상황들은 모두 물리적인 법칙에 의해서 지배를 받으므로, 가상환경에서 발생하는 주행 상황들도 동일한 물리적인 법칙에 의해서 제시되어야 한다. 그러므로 주행 장치의 동역학이 실시간으로 계산되어, 그래픽 화면 및 모션 플랫폼에 제공되어야 한다. 한편, 모션 플랫폼의 운동 범위는 실제 주행 장치에 비하여 현저히 작을 수밖에 없다. 이러한 제한된 플랫폼을 사용하여 현실감을 내기 위해서는, 소위 위시아웃 알고리즘⁽⁵⁾을 사용하여야 한다.

본 연구에서는 운동감 제시를 위한 모션 플랫폼의 구성 및 위시아웃 알고리즘의 적용, 그리고 가상환경 요소와의 통합에 대한 연구를 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발한 주행 시뮬레이터의 전체적인 블록 선도이다. 사용자가 주행에 필요한 입력 신호를 생성하면, 동역학은 위치 및 자세를 계산하여 사용자의 정보를 그래픽 워크스테이션과 모션 플랫폼에 보낸다. 그래픽 워크스테이션은 사용자 입력에 적합한 가상환경에서의 화면을 사용자에게 제시하고, 모션 플랫폼은 위시아웃 알고리즘에 의해서 필터링된 운동을 사용자에게 제시한다.

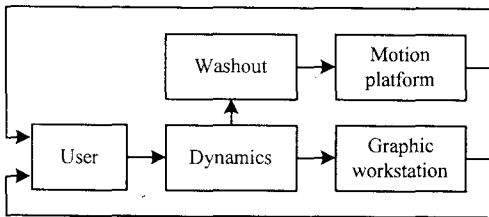


Fig. 1 Block diagram of vehicle simulator.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 자체 제작한 모션 시뮬레이터의 구성에 대하여 설명하고, 3절에서는 가상 환경에서 운동을 제시하기 위한 자전거 동역학과 시뮬레이터에 적용한 위시아웃 알고리즘 그리고 퍼지를 이용하여 위시아웃 알고리즘의 성능을 개선한 결과를 보이고, 4절에서는 그래픽 시스템과 시뮬레이터의 통합 환경 구축에 대해 설명하겠다.

2. 모션 시뮬레이터의 개발

본 연구에서 개발한 주행 시뮬레이터에서는 스튜어트 플랫폼에 기초한 모션 시뮬레이터를 이용하여 다양한 주행 상황에 필요한 6자유도 운동을 구현하였다. Fig. 2는 고려대학교에서 개발한 모션 시뮬레이터 KU-MS(Korea University - Motion Simulator)의 사진이다. KU-MS는 Fig.3와 같이, 스튜어트 플랫폼, PC, DSP 제어기, 모터 제어기 등의 4부분으로 구성되어 있다.

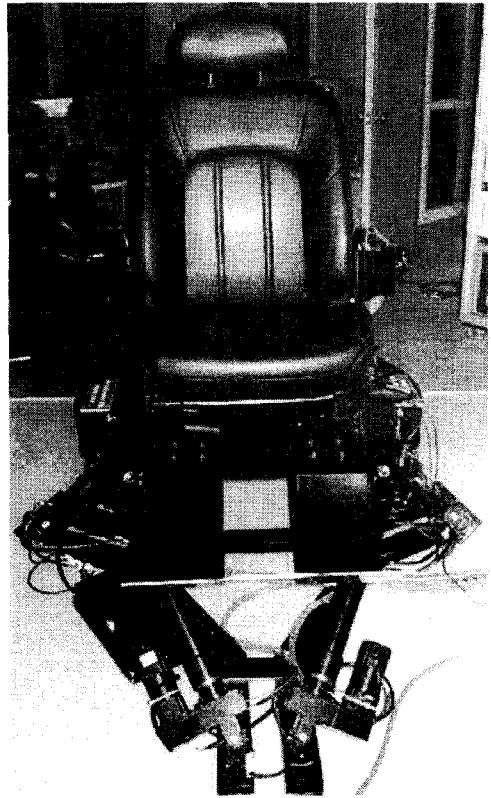


Fig. 2 Photo of motion simulator KU-MS.

모션 시뮬레이터에 탑승한 운전자가 조이스틱 등의 입력 장치를 사용하여 지시하는 주행 상황은 PC로 입력되며, 이 입력은 동역학 및 위시아웃 알고리즘을 통하여 스튜어트 플랫폼의 적절한 자세(위치/방위) 정보를 생성한다. 이러한 자세 정보는 DSP 제어기로 입력되며, 역기구학 해석을 통하여 플랫폼의 원하는 자세를 구현하는 데 필요한 6개의 다리 길이를 계산하게 된다. 이렇게 계산된 다리 길이에 대한 정보는 AC 서보 모터의 위치를 제어하는 6개의 모터 제어기에 전달된다. 최종적으로 스튜어트 플랫폼은 볼 스크류를 이용하여 모터로부터의 회전 운동을 직선 운동으로 변환하여 다리의 길이를 실시간으로 제어함으로써, 원하는 플랫폼의 자세를 실시간으로 구현하게 된다.

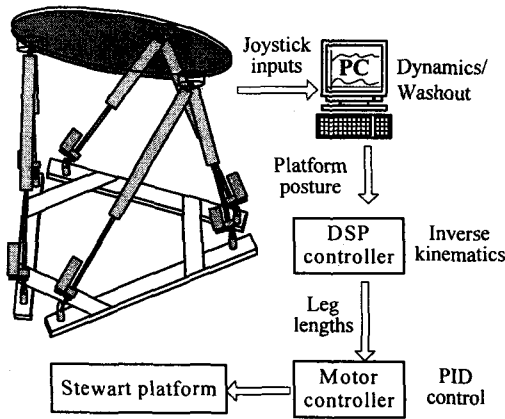


Fig. 3 Configuration of KU-MS.

본 연구를 위하여 개발한 KU-MS의 사양을 상업용 유압식 스튜어트 플랫폼인 Mannesman HSE-6-MS-8-L-2D와 비교하여 Table 1에 나타내었다. 모션 시뮬레이터의 기본이 되는 스튜어트 플랫폼은 보다 현실감 있는 운동감 제시를 위해 넓은 동작 범위뿐만 아니라, 충분한 가속 능력을 갖추도록 하였다. 기존에 개발된 유사한 종류의 시뮬레이터와 비교하여, 유사하거나 더 우수한 사양을 갖도록 설계하였다. 한편, 스튜어트 플랫폼의 상단에는 자동차용 시트를 장착하였으며, 초기 높이는 그래픽 화면 중앙에 사용자의 시선이 위치할 수 있도록 하여 넓은 범위 동작을 수행하더라도 시선이 스크린 밖으로 벗어나지 않도록 설계하였다.

Table 1 Specifications of KU-MS.

| Model | KU-MS | Mannesman |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Actuator type | Electric motors | Hydraulic actuators |
| Payload | 400kg | 325kg |
| Frequency Response | 3Hz | 2Hz |
| Pitch angle | ± 25 deg | ± 17 deg |
| Roll angle | ± 25 deg | ± 17 deg |
| Yaw angle | ± 30 deg | ± 26 deg |
| Surge displacement | ± 0.20 m | +0.175/-0.137 m |
| Sway displacement | ± 0.20 m | ± 0.141 m |
| Heave displacement | ± 0.15 m | +0.095/-0.090 m |
| Pitch angular velocity | ± 140 deg/s | ± 30 deg/s |
| Roll angular velocity | ± 130 deg/s | ± 30 deg/s |
| Yaw angular velocity | ± 120 deg/s | ± 30 deg/s |
| Surge velocity | ± 0.62 m/s | ± 0.25 m/s |
| Sway velocity | ± 0.64 m/s | ± 0.25 m/s |
| Heave velocity | ± 0.65 m/s | ± 0.25 m/s |
| Pitch angular accel. | ± 2600deg/s ² | ± 200 deg/s ² |
| Roll angular accel. | ± 2400deg/s ² | ± 200 deg/s ² |
| Yaw angular accel. | ± 2200deg/s ² | ± 200 deg/s ² |
| Surge acceleration | ± 1.19g | ± 0.82g |
| Sway acceleration | ± 1.23g | ± 0.82g |
| Heave acceleration | ± 1.24g | ± 1.02g |

3. 주행 동역학 및 워시아웃 알고리즘

3.1 자전거 동역학

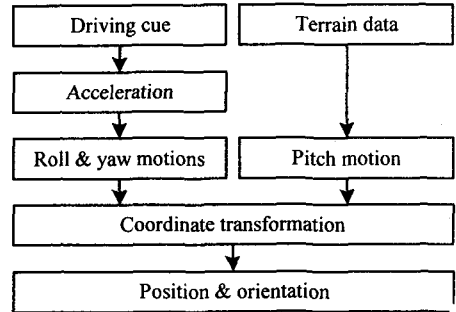


Fig. 4 Flow chart for bicycle dynamics.

주행 시뮬레이터를 사용하여 여러 다양한 차량의 주행 상황을 묘사할 수 있으나, 본 연구에서는 Fig. 4의 흐름도에 나타난 자전거 동역학을 채택하였다. 자전거 동역학을 적용하기 위해서는 입력으로 조향각과 페달 토크가 필요한데, 이러한 정보는 사용자가 조이스틱을 사용하여 제공한다. 이때 차량이 주행하는 지형의 정보도 활용되는데, 예를 들어 경사에 대한 정보는 피치각의 계산에 사용된다. 이들 데이터를 이용하여 자전거의 가속도(따라서 변위), 요각 및 롤각 등을 계산한다. 그 후에 좌표 변환을 통해 공간상에서 자전거의 위치와 방향을 계산해낸다. 이러한 자전거 동역학은 Runge-Kutta 4차 방식에 기초한 미분방정식 해법을 사용하여 해를 구하였다.

3.2 고전적 워시아웃 알고리즘

스튜어트 플랫폼은 그 구조적인 한계로 인하여 동작 범위를 최대한도로 크게 설계하더라도, 실제 자동차나 자전거와 같은 차량의 동작 범위에 비하여 상대적으로 매우 작을 수밖에 없다. 따라서 이러한 제한된 운동 범위 한계 내에서 운전자가 실제 차량에 탑승하고 있는 것 같은 운동감을 제시하기 위해서는 모션 시뮬레이터의 운동을 적절히 조절하여야 하는데, 이러한 목적으로 워시아웃 알고리즘이 사용된다. 즉, 워시아웃 알고리즘은 인간의 운동감 인지 영역을 고려하여 제한된 시뮬레이터의 운동 영역에서 최대한의 운동감을 제시할 수 있도록 하여 주는 방식을 제공한다.

운동감을 인지하는 전정기관(vestibular organ)은 평형사(otolith)와 반고리관(semicircular canal)으로 구성되어 있다. 평형사에서는 비력(specific force), 반고리관에서는 회전 각속도를 인지한다. 비력은 다음과 같이 정의된다.

$$f \equiv a - g \quad (4.1)$$

평형사와 반고리관은 주로 고주파 영역에서 민감하게 반응하며, 운동 신호 중 저주파 신호는 모션 시뮬레이터의 작업 영역의 한계를 유발하게 되므로, 고주파 신호만을 운전자에게 제시하는 것이 바람직하다. 따라서 위시아웃 알고리즘에서는 비력과 회전 각속도의 고주파 성분만을 선택하기 위하여 다음과 같은 2차(비력의 경우) 및 1차(각속도의 경우) 고주파 통과 필터(HPF)를 사용한다.

$$\frac{\ddot{x}}{f_x + g\theta_{yilt}} = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_{HPF} \omega_{HPFx} s + \omega_{HPFx}^2} \quad (4.2)$$

$$\frac{\omega}{\omega_p} = \frac{s}{s + \omega_{HPF\theta}} \quad (4.3)$$

그리고 비력 성분 중 저주파 성분은 다음과 같이 저주파 통과 필터(LPF)를 사용하여 추출한 다음에, tilt coordination으로 제시한다.

$$\frac{-g\theta_{yilt}}{f_x} = \frac{\omega_{LPFx}^2}{s^2 + 2\zeta_{LPF} \omega_{LPFx} s + \omega_{LPFx}^2} \quad (4.4)$$

여기서, surge(x축 병진)와 pitch(y축 회전), sway(y축 병진)와 roll(x축 회전)이 tilt coordination을 통해 결합되어 있으므로 서로 종속적이며, heave(z축 병진)와 yaw(z축 회전)는 tilt coordination을 수행하지 않으므로 서로 독립적이다. 따라서 식 (4.2)-(4.4)는 surge와 pitch의 관계 또는 sway와 roll의 관계를 나타낸다. tilt coordination은 플랫폼의 기울임에 의해 저주파 성분의 비력을 느끼도록 한다. 사람이 경사면에 정지 상태로 있을 경우에 비력은 중력 가속도와 크기는 같고, 방향이 반대인 가속도이다. 즉, 사람의 기울어진 방향에 대한 비력 성분이 경사각에 의해 생성되며, 이 성분이 평형사에 의해 인지된다. 따라서, 기울어진 운동판의 경사각에 의해 생성되는 비력의 성분은 저주파 신호의 직선 가속도를 표현할 수 있다. 이는 J-turn과 같이 지속적인 저주파 가속이 있을 경우 효과적으로 운동감을 반영한다. Fig. 5는 앞서 설명한 위시아웃 알고리즘의 블록 선도를 나타낸다.

고전적 위시아웃 알고리즘은 고정된 계수에 의해 운동 신호를 처리하므로 다양한 주파수와 진폭을 가진 신호에 능동적으로 대처하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 위시아웃 알고리즘에 퍼지 로직을 적용함으로써, 보다 향상된 운동감을 제시할 수 있도록 하는 방식을 제안하고자 한다. 즉, Fig. 6의 블록 선도와 같이, 식 (4.2)-(4.4)의 차단 주파수 및 감쇠비 등의 계수의 결정에 퍼지 규칙을 적용시킨다.

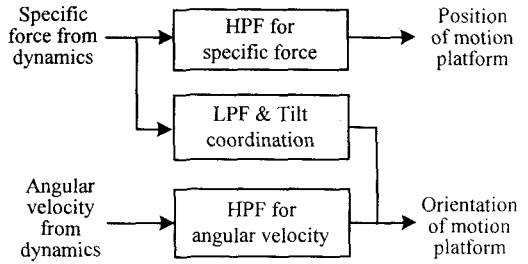


Fig. 5 Block diagram of classical washout algorithm.

3.3 퍼지를 이용한 위시아웃 필터의 계수 조정

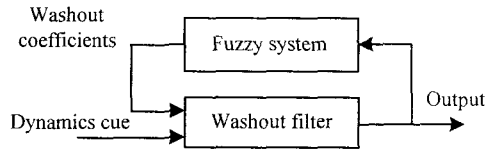


Fig. 6 Block diagram of washout algorithm and fuzzy system

퍼지 규칙은 Table 2와 같으며, Fig. 7은 HPF의 차단 주파수에 대한 멤버쉽 함수를 나타낸다. 퍼지 규칙의 적용 예로 HPF의 경우를 살펴보면, 모션 플랫폼의 운동판이 작업 영역의 한계에서 멀리 있으면 HPF의 차단 주파수를 낮추어 큰 운동 영역을 확보한다. 반면에, 한계에 가까이 있으면 차단 주파수를 높여 한계에 이르지 않도록 한다. 이를 통하여 시뮬레이터의 운동에 보다 많은 유연성을 줄 수 있다. 퍼지 규칙의 추론 관계는 Max-min operation, implication rule은 min operation을 이용하였으며, defuzzification은 center of area 방법을 적용하였다.

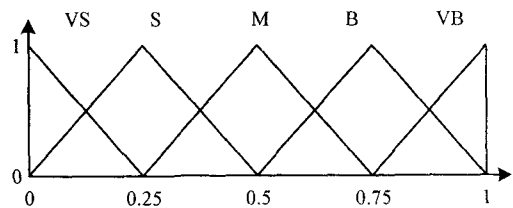


Fig. 7 Membership functions of ω_{HPFx} .

입력 신호의 주파수가 고주파 차단 주파수보다 3배 정도 커야 HPF를 거친 신호의 진폭 및 위상의 왜곡이 없어진다. 따라서 위시아웃에 적용된 퍼지 로직은 모션 플랫폼의 작업영역이 허용하는 내에서 최대한 적절한 차단 주파수를 갖도록 한다.

Table 2 Basic rules for fuzzy system.

| | | Coefficient membership functions | | | |
|-------|----|----------------------------------|-----------------|----------------------|----------------|
| | | ω_{HPFx} | ω_{LPFx} | $\omega_{HPF\theta}$ | ζ_{HPFx} |
| XL | VF | VS | | | |
| | F | S | | | |
| | M | M | | | |
| | N | B | | | |
| | VN | VB | | | |
| θL | VF | | | VS | |
| | F | | | S | |
| | M | | | M | |
| | N | | | B | |
| | VN | | | VB | |
| TRL | F | S | B | | |
| | M | M | M | | |
| | N | B | S | | |
| Error | VS | M | M | M | |
| | S | S | B | S | |
| | B | VS | VB | VS | |

XL: Displacement limit
 θL: Angle Limit
 TRL: Tilt rate limit
 Error: Error of output
 VF: Very Far from limit
 F: Far from limit
 N: Near to limit
 VN: Very Near to limit
 Z: Zero
 VB: Very Big
 B: Big
 M: Middle
 S: Small
 VS: Very Small

퍼지 로직의 적용을 통한 워시아웃 필터의 계수 조정의 결과를 고정 계수를 갖는 워시아웃 필터의 결과와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 0.5 Hz의 신호가 입력되었을 때, 퍼지 로직을 적용한 경우 고정된 계수를 사용한 경우보다 입력된 신호와의 진폭과 위상의 차가 작으므로 입력 신호를 더 잘 반영함을 알 수 있다. Fig. 9는 이 때의 HPF의 계수의 변화를 나타낸다. 입력 주파수에 따라 진폭과 위상차의 비교를 Fig. 10에 나타내었다. 특히, 주파수가 낮을수록 퍼지 로직을 적용한 결과가 고정된 계수의 결과 보다 진폭이 크고 위상차가 작은 경향을 보이고 있다.

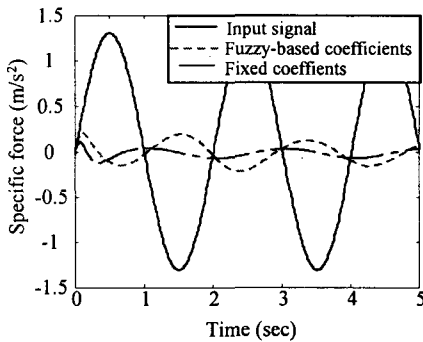


Fig. 8 Results of washout filters with fuzzy-based and fixed coefficients.

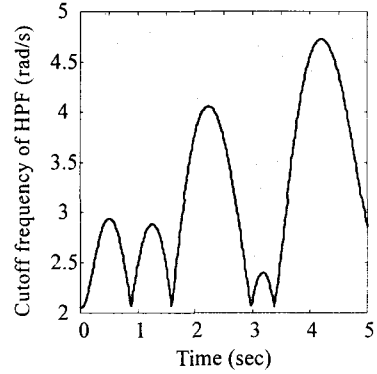


Fig. 9 Cutoff frequencies of HPF when fuzzy-based coefficients are used.

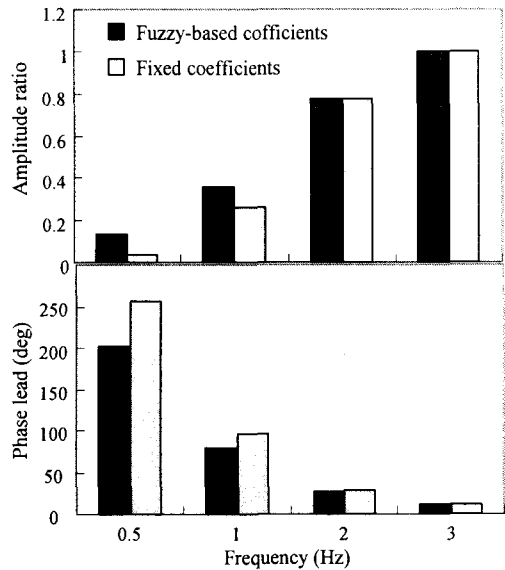


Fig. 10 Amplitude ratios and phase leads of fuzzy-based and fixed coefficients.

4. 시스템 통합

주행 시뮬레이터를 구성하기 위해서는 모션 시뮬레이터에 더하여 가상환경 기법을 이용하여 주행 환경을 시청각적으로 구현하여야 한다. 이러한 가상환경은 물론 모션 시뮬레이터의 PC와 서로 정보를 교환하면서 운전자의 입력에 해당하는 영상을 구현하여 주어야 한다. 이를 위하여 그래픽 워크스테이션을 사용하였으며, 워크스테이션과 PC 간에는 LAN을 이용한 TCP/IP 방식으로 통신을 수행하였다.

Fig. 11은 시뮬레이터에 프로그램을 다운로드하고, 동역학 연산과 워시아웃 알고리즘을 수행하며,

그래픽 워크스테이션과 통신을 하도록 하는 컨트롤 패널이다. 이를 통하여 모션 시뮬레이터에 전달되는 자세 정보를 모니터하고 위시아웃 필터의 계수를 조정한다. 전체 프로그램의 샘플링 주기는 20msec로 설정하였으며, 이 주기마다 조이스틱 정보의 입력, 동역학 및 위시아웃 알고리즘의 계산, PC와 DSP 간의 통신, DSP와 모터 제어기 간의 통신 등이 수행된다. 한편, 모터 제어기에서는 1ms의 샘플링 주기로 모터를 제어한다.

한편, 디바이스 서버는 조이스틱, 모션 시뮬레이터, 사운드 장치 등을 통합 관리하고, 이벤트 컨트롤러를 이용하여 가상환경에서의 이벤트를 처리하며 그래픽 서버에서 이들 정보를 이용하여 화면 처리를 수행한다. 워크스테이션에서 생성한 그래픽 정보는 3개 채널의 프로젝터를 통해 스크린에 초당 30프레임 정도로 영사된다. 스크린의 크기는 9.555m × 3.145m로 대형이며, 시야각은 150° × 40°이다. Fig. 12은 위와 같이 구성된 주행 시뮬레이터의 주행 장면을 보여준다.

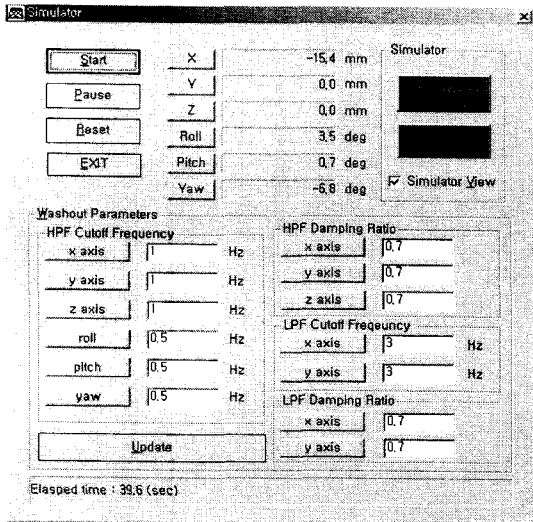


Fig. 11 Control panel of motion simulator.

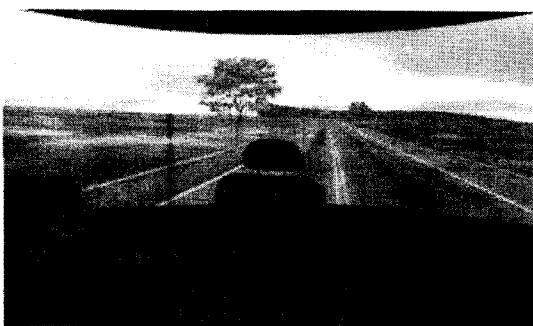


Fig. 12 Integrated vehicle simulator system.

5. 결론

본 연구에서는 전기 모터로 구동되는 스텔트 플랫폼에 기초한 모션 시뮬레이터를 자체 설계 및 제작에 의해서 구성하였으며, 이를 사용하여 주행 시뮬레이터를 구성하였다. 그리고 위시아웃 필터의 계수 선정에 퍼지 로직을 적용하여 모션 시뮬레이터의 운동 결과에 따라 계수를 조정하였다. 이는 신호의 왜곡을 유발하는 진폭의 감소와 위상차를 줄여 고정된 계수의 위시아웃 필터보다 다양한 신호에 효율적으로 적용할 수 있다. 앞으로 퍼지 규칙을 다양하게 보강하고 조정하여 보다 향상된 성능을 내며, 인간의 감성을 바탕으로 위시아웃 알고리즘을 개선하는 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 감성공학 기반기술개발 사업의 일환으로 한국과학기술연구원의 지원하에 수행되었음.

References

- (1) William R. S., "Controllers for Aircraft Motion Simulators," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 4, No. 2, pp. 184~191.
- (2) Raphael S., Jehuda I. S., and Jen-Kuang H., 1982, "An Optimal Control Approach to the Design of Moving Flight Simulators," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-12, No. 6, pp. 818~827.
- (3) Moshe I., and Meyer A. N., 1999, "Off-Line Comparison of Classical and Robust Flight Simulator Motion Control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 22, No. 5, pp. 702~709.
- (4) Barbagli, F., Ferrazzin, D., Avizzano, C. A., and Bergamasco, M., 2001, "Washout Filter Design for a Motorcycle Simulator," *Proc. of IEEE Conference on Virtual Reality*, pp. 225~232.
- (5) Parrish, R. V., Dieudonne, J. E., Bowles, R. L., and Martin, D. J., 1975 "Coordinated Adaptive Washout for Motion Simulators," *Journal of Aircraft*, Vol. 12, No. 1, pp. 44~50.