

Development of a System for Cognitive Workload Distinction for Intelligent Vehicle

Wongi Hong¹, Wonsup Lee¹, Kihyo Jung², Suwan Park³,
Yunsuk Park³, Joonwoo Son³, Seikwon Park⁴, and Heecheon You¹

¹Department of Industrial Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Gyeongbuk, 790-784

²2nd R&D Institute, Agency for Defense Development, Daejeon, South Korea, 305-152

³HumanLAB, DGIST, Daegu, South Korea, 711-873

⁴Department of Industrial Engineering, Air Force Academy, Cheongwon, Chungbuk, 363-849

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to compare and evaluate the accuracy of workload distinction of quantification measures (HR, SDNN, RMSSD, RMSE) by ROC analysis method to apply ECG biosignal to safe driving support technology of intelligent vehicle. And a system applied ROC analysis method to analyze the accuracy of workload distinction in real-time is developed. **Background:** Biosignals such as electrocardiography (ECG) can be used to analyze driver's cognitive workload which is one of safe driving support technologies of the intelligent vehicle. Driver's workload can be distinguished by analyzing heart rate (HR) and heart rate variability (HRV), which are calculated by ECG measured. To distinguish workload level based on ECG, individually suitable quantification measures of ECG should be selected; however, existing researches have used equal ECG quantification measures and ECG baseline. **Method:** System which can analyze workload in real-time and discriminate the most suitable measure for ECG quantification is developed. **Results:** A case study was conducted to test the system; consequently, HR was the most suitable measure for ECG quantification in the case. **Conclusion:** The system will be complemented at the point of effectiveness and usability continuously and it will be able to be applied and used to intelligent vehicle in the foreseeable future. **Application:** The system and the algorithm will be useful in the research for workload based on ECG.

Keywords: ECG, Heart rate variability, Cognitive workload, ROC analysis, Intelligent vehicle

1. Introduction

지능형 자동차의 안전 운전을 지원하는 기술 중의 하나인 운전자 인지 부하(cognitive workload) 분석에는 심전도(electrocardiography; ECG)와 같은 생체신호가 사용될 수 있다. 지능형 자동차란 운전자의 조작에 의해 작동하는 기존의 자동차에 능동안전(active safety) system 및 운전자 지원(advanced driver assistance) system 기능을 추가하여 자동차의 안전 및 운전자 편의를 향상시키고, 운전자의 운전 부하를 경감해주는 안전하고 편리한 차세대 자동차를 일컫는다(이경수, 2006). 지능형 자동차가 운전자의 정신적 부하 수준을 파악해 맞춤형 주행 정보를 제공하기 위해서는 운전 부하 수준을 과학적으로 측정하고 분석하는 기술 개발이 선행되

어야 한다.

운전자의 workload는 ECG 측정치를 이용해 계산되는 heart rate (HR) 및 heart rate variability (HRV)를 분석하여 파악될 수 있다. HR은 workload 수준이 높아질수록 유의하게 증가되는 경향을 보이며(Mehler et al., 2009), HRV는 workload가 증가하면 유의하게 감소하게 된다(Berntson et al., 1997). HR은 측정된 ECG raw data로부터 IBI (inter-beat interval)를 추출하여 산술적 연관관계($HR = 60 / IBI \times 1000$)를 고려하여 계산된다. HRV는 시간 영역의 세 가지 척도(SDNN, RMSSD, RMSE)를 사용하여 정량화된다. SDNN (standard deviation of normal to normal intervals)은 IBI의 표준편차, RMSSD (root mean square of successive differences)는 인접 IBI간의 평균 제곱 합, 그리고 RMSE (root mean squared error)는 IBI가 점진적인 증감 경향을 고려하여 생체신호 특성을 정량화할 수 있

도록 회귀분석의 평균 제곱 오차로 계산된다(이원섭 외, 2010).

ECG 기반의 workload 수준 판별을 위해서는 개인별로 적합한 ECG 정량화 척도를 파악하는 것이 필요하나, 기존 연구들은 동일한 ECG 정량화 척도 및 기준 workload를 사용하였다. ECG 신호를 통해 workload를 정량화하는 척도는 개인별 ECG 특성에 최적 정량화 척도가 상이하게 나타나므로(이원섭 외, 2010), 개인별로 최적의 정량화 척도를 사용하여 workload 분석을 수행해야 한다. 그러나 기존 연구들은 전체 실험 참여자에 대해 동일한 분석 방법을 적용하여 실험하여, 개인별 ECG 특성을 반영하지 못하였다. 예를 들면, Wood et al. (2002)은 단순 반응 작업이 SDNN을 유의하게 감소시키는 것으로 발표하였으나, Schubert et al. (2009)은 구두 발표 작업이 반대로 SDNN을 증가시키는 것으로 보고하였다. 또한, RMSSD는 일반적으로 workload 수준이 높아질수록 유의하게 감소되는 경향을 보이나, Gould et al. (2009)은 복잡도가 상이한 선박 navigation 방법들에 따라 RMSSD가 유의하게 감소하지 않은 것으로 보고하였다. 이와 같이 동일 ECG 정량화 척도에 대해 기존 연구들의 분석 결과가 서로 상이한 이유는 workload 분석 시 개인별 ECG 특성 차이를 반영하지 못하고 전체 실험 참여자들에게 동일한 분석 방법을 적용하였기 때문이다.

본 연구는 ECG 신호를 지능형 자동차의 안전 운전 지원 기술에 적용하기 위해 정량화 척도들(HR, SDNN, RMSSD, RMSE)의 workload 판별 정확성을 ROC 분석을 통해 비교 평가하였다. ECG 생체신호에 따른 workload 판별을 실시간으로 분석하기 위해 본 연구는 ROC 분석 방법을 적용한 system을 개발하였다.

2. Development of System

2.1 Development of System for Driving Workload Distinction

2.1.1 System Structure

부하 평가 system은 그림 1에 나타난 것과 같이 4개의 module (data 취득 및 이상치 제거, 판별 척도 및 기준 설정, 실시간 분석, GUI)로 구성된다. 첫째, data 취득 및 이상치 제거 module은 실시간으로 ECG 측정 hardware로부터 data를 입력 받은 후 이상치(판별 기준: 직전 data 대비 15% 초과)를 filtering하는 기능을 수행한다. 둘째, 판별 척도 및 기준 설정 module은 N-back task 실행을 통해 특정 운전자에게 추세 부합성이 있는 ECG 정량화 척도(예: RMSE,

RMSSD)와 기준을 설정하는 기능을 수행한다. 셋째, 실시간 분석 module은 운전자의 정신적 부하 수준을 실시간 측정하여 제공해주는 기능을 수행한다. 마지막으로, GUI module은 사용자에게 정보를 효과적으로 전달할 수 있는 화면을 의미한다. 본 system은 Microsoft Visual Basic 6.0으로 개발되었다.

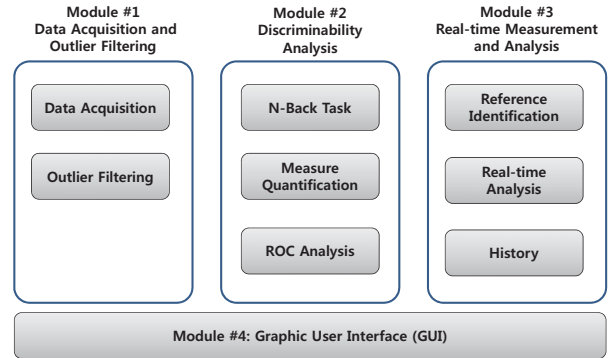


Figure 1. System structure: four system modules

2.1.2 Workload Discriminability Analysis

본 연구는 개인별 ECG 특성을 고려한 최적의 ECG 정량화 척도 및 workload 판별 기준을 파악하기 위해서 ROC (receiver operating characteristic) 분석을 통해 판별 척도의 변별성(discriminability) 분석 방법을 제안하였다. ROC 분석이란 평가자가 주어지는 자극에 대해 응답하는 정확도에 따라 정답(hit) 확률 대비 오답(false alarm) 확률을 곡선으로 그려 민감도(sensitivity), 특이도(specificity) 등을 파악하는 분석 방법을 일컫는다(김민섭, 2008). 본 연구는 ROC 분석 방법을 system에 적용하여 ECG 신호의 기준 workload 대비 변화에 따라 system이 주어진 자극(N-back task)의 workload 수준을 정확히 판별하는 정도를 분석하였다.

2.1.3 System Use Process

개발된 system의 사용 절차는 그림 2에 나타난 3 단계(사용자 선택, 기준치 설정, 그리고 실시간 분석)로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 그림 3에 나타난 것과 같이 운전자를 선택하게 된다. 이때 등록되지 않은 사용자는 자신의 ECG 생체신호 민감도 측정을 통해 최적 판별 척도 및 기준을 설정하는 N-back task (낮은 부하: 0-back, 중간 부하: 1-back, 높은 부하: 2-back)를 그림 4와 같이 수행하게 된다. N-back task는 무작위 숫자들이 연속적으로 제시될 때 임의의 시점에 N번째 이전 숫자를 기억해내는 암기 작업이다(Son et al., 2010). 파악된 특정 운전자에 대한 생체신호 민감도 결과는 system DB에 저장되며, 다음 번 system 사용 시 해당 사용

자를 선택하면 관련 사항이 system에 자동으로 반영된다.

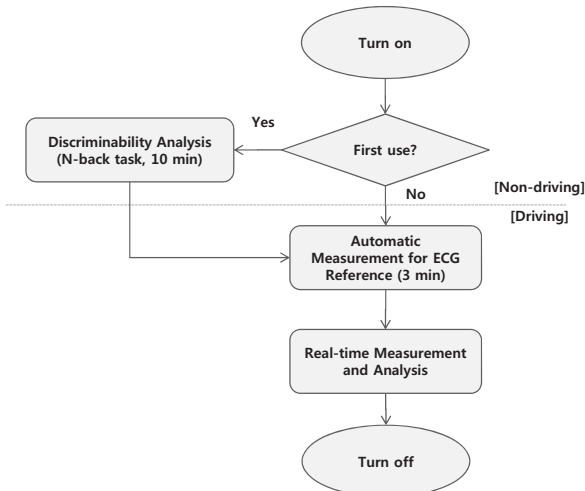


Figure 2. System use process



Figure 5. Automated measurement for heart rate reference (illustrated)

마지막 단계에서는 실시간으로 입력되는 ECG data가 설정된 기준치를 초과하는 경우 그림 6과 같이 운전자 작업 부하 수준을 3 단계(안정: 초록색, 불안: 노란색, 위험: 빨간색)로 표시해준다. 부하 수준의 판별은 첫 번째 단계에서 파악된 운전자별 생체신호 민감도를 고려해 이루어진다. 예를 들면, 운전자의 ECG 신호가 기준치 대비 30%를 초과하는 경우 운전자의 부하 수준을 불안으로 판별하고, 기준치 대비 50%를 초과하는 경우에는 위험으로 판별한다. 사용자 화면에는 부하 수준을 시각적으로 파악할 수 있도록 심장 박동 빈도에 맞춰 움직이는 심장 animation과 HR 정보가 표시된다. 또한, 사용자의 작업 부하가 위험일 경우 “운전 부하가 높습니다. 적절한 휴식은 안전 운전에도 도움이 됩니다.”라는 음성 경고가 제공되며 관련 문구가 화면에 표시된다. 마지막으로, 운전자가 자신의 심박 변화 추세를 확인할 수 있도록 심박 변화 보기 기능을 그림 7과 같이 제공한다.

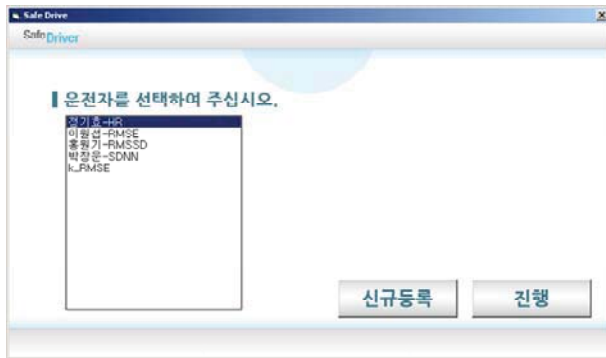


Figure 3. Driver selection (illustrated)

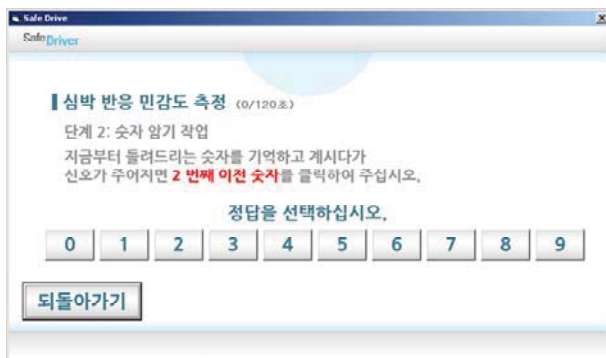


Figure 4. N-back task (illustrated)

두 번째 단계에서는 그림 5에 나타난 것과 같이 3분 동안 기준치를 설정하게 된다. 기준치는 3분 동안의 주행 중에 파악되며, 3분이 지나면 자동으로 실시간 분석 화면으로 전환되게 된다.

2.2 Development of ECG Measure Equipment

본 연구는 광센서를 사용하여 신체 움직임이 있는 운전 중에도 운전자의 ECG를 보다 안정적으로 측정할 수 있는 system을 개발하였다. 기존 ECG 검출 방법은 측정 센서의 특성에 따라 세 가지(광학적 방법, 기계적 방법, 전기적 방법)로 구분된다. 기계적 방법과 전기적 방법은 운전상황에서 사용자가 센서 부착 부위를 움직일 경우 측정 오류를 수반하는 한계점이 있어 본 연구는 광학적 방법을 이용하였다. 개발된 장비는 그림 8에 나타난 것과 같이 자동차 핸들커버 형태로, 운전대의 양쪽에 각각 12개의 광센서를 부착하여 운전자의 ECG를 실시간으로 측정할 수 있도록 고안되었다.



(a) Low workload (stable)



(b) Middle workload (unstable)



(c) High workload (dangerous)

Figure 6. Workload indicator (illustrated)



Figure 7. Heart rate history indicator (illustrated)



Figure 8. Optical sensors attached on a wheel for ECG signal measurement

3. Case Study: ECG Analysis

본 연구는 개발된 system의 활용하여 20대 남성 1명의 ECG 신호를 측정하고 ROC 분석을 통해 workload 판별 척도(HR, SDNN, RMSSD, RMSE)를 평가하였다. 분석 시, 1-back (1B)과 2-back (2B) task는 유사한 수준의 workload를 유발하는 것으로 나타나 두 가지 task를 하나로 두어 분석하였다. SDNN은 0-back (0B)과 1B & 2B에 대한 hit rate가 50% 이하로 낮게 나타났으나, 1B & 2B 조건의 given probability는 100%로 높게 나타났다(표 1.a 참조). Given probability는 1B & 2B이라고 응답했을 때 자극이 실제 1B & 2B일 확률을 의미한다. RMSSD는 1B & 2B에 대한 hit rate가 70%로 다른 조건보다 작게 나타났으나, 1B & 2B 조건의 given probability는 95.5%로 높게 나타났다(표 1.b 참조). RMSE는 1B & 2B 조건에 대한 hit rate가 65%로 낮게 나타났으나, 1B & 2B 조건의 given probability는 95.1%로 높게 나타났다(표 1.c 참조). 마지막으로, Mean IBI는 모든 조건에 대한 hit rate와 correct rejection rate가 100%로 높게 나타났다(표 1.d 참조).

4. Discussion

본 연구는 개인별 ECG 특성 및 workload 판별에 적합한 최적 정량화 척도가 상이한 점을 고려하여 ROC 분석 기반의 개인별 최적 workload 판별 방법을 제안하였다. 본 연구는 기존 연구와 달리, 기존 workload 대비 변화량을 분석하여 운전자들의 다양한 ECG 특성이 고려된 workload을 제공할 수 있는 방안을 마련하였다.

본 연구는 개인별 실시간 ECG 측정 및 workload를 분석하기 위한 system과 GUI를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 system은 운전자가 개발된 system을 사용하여 자신에 가장 적합한 ECG 정량화 척도로써 workload를 실시간으로 파악할 수 있다는 장점을 갖는다.

Table 1. Result of ROC analysis
(Note: Percentage in parenthesis is given probability)

		Response		
		Baseline	0B	1B & 2B
(a) SDNN				
Stimulus	Baseline	97.3% (53.7%)	2.7%	0%
	0B	50.0%	50.0% (60.1%)	0%
	1B & 2B	33.9%	29.6%	36.5% (100%)
(b) RMSSD				
		Response		
		Baseline	0B	1B & 2B
Stimulus	Baseline	97.3% (98.4%)	2.7%	0%
	0B	0%	96.7% (75.7%)	3.3%
	1B & 2B	1.6%	28.4%	70.0% (95.5%)
(c) RMSE				
		Response		
		Baseline	0B	1B & 2B
Stimulus	Baseline	80.5% (81.1%)	19.5%	0%
	0B	0%	96.7% (72.8%)	3.3%
	1B & 2B	18.7%	16.7%	64.6% (95.1%)
(d) Mean IBI				
		Response		
		Baseline	0B	1B & 2B
Stimulus	Baseline	100% (100%)	0%	0%
	0B	0%	100% (100%)	0%
	1B & 2B	0%	0%	100% (100%)

본 연구에서 개발된 운전자 workload 측정 system을 지능형 자동차의 안전 운전 지원 기술에 적용하기 위해서는 지속적인 연구 및 보완이 필요하다. 예를 들면, 연령 또는 성별 등에 따라 다양한 ECG 특성을 가진 운전자를 대상으로 실험하여 system의 유용성이 검증될 필요가 있다. 그리고

실차 환경에 system을 적용하여 실제 운전 상황에서의 ECG 신호에 따른 workload 분석을 수행하여 실제 주행 환경에 보다 적합한 system으로 보완할 수 있다. 본 연구에서 개발된 system은 보완을 통해 차세대 지능형 자동차의 안전 운전 지원 기술에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgements

This work was funded by grants from Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology.

References

- Brookhuis, K. A., and De Waard, D., Assessment of drivers' workload: performance, subjective and physiological indices. In P. Hancock and Desmond P. (Eds.), *Stress, workload and fatigue: theory, research and practice* (pp. 321-333). New Jersey: Lawrence Erlbaum, 2001.
- Gould, K. S., Røed, B. K., Saus, E., Koefoed, V. F., Bridger, R. S., and Moen, B. E., Effects of navigation method on workload and performance in simulated high-speed ship navigation, *Applied Ergonomics*, 40(1), 103-114, 2009.
- Kim, M., Analysis of receiver operating characteristic curves for motor-related physical fitness in elite speed skaters, *Press of Korea National Sport University*, 2008.
- Lee, W., Jung, K., Hong, W., Park, S., Park, Y., Son, J., Park, S., and You, H., "Analysis of drivers' ECG biological signal under different levels of cognitive workload for intelligent vehicle", *Proceedings of the 2010 Fall Conference of Ergonomics Society of Korea*, 2010.
- Mehler, B., Reimer, B., Coughlin, J. F., and Dusek, J. A., "The impact of incremental increases in cognitive workload on physiological arousal and performance in young adult drivers", *Proceedings of Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, Washington DC, 2009.
- Schubert, C., Lambert, M., Nelesen, R. A., Bardwell, W., Choi, J. B., and Dimsdale, J. E., Effects of stress on heart rate complexity: A comparison between shortterm and chronic stress, *Biological Psychology*, 80(3), 325-332, 2009.
- Son, J., Reimer, B., Mehler, B., Pohlmeier, A. E., Godfrey, K. M., Orszulak, J., Long, J., Kim, M., Lee, Y., and Coughlin, J., Age and cross-cultural comparison of drivers' cognitive workload and performance in simulated urban driving, *International Journal of Automotive Technology*, 11(4), 533-539, 2010.
- Wood, R., Maraj, B., Lee, C. M., and Reyes, R., Short-term heart rate variability during a cognitive challenge in young and older adults, *Age and Aging*, 31, 131-135, 2002.

Yi, K., Intelligent vehicles: next generation active safety and advanced driver assistance systems, *Auto Journal*, 28(4), 14-122, 2006.

Author listings

Wongi Hong: wonkiman@postech.ac.kr

Highest degree: BS, Department of Electrical Engineering, University of Ulsan

Position title: Master candidate, Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Human computer interaction, Bio-signal analysis, Ergonomic product design & development, User interface design & evaluation

Wonsup Lee: mcury@postech.ac.kr

Highest degree: BS, Industrial and Media Design, Handong University

Position title: PhD student, Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic product design, Product shape design based on 3D scanning, 3D human modeling, Engineering design

Kihyo Jung: khjung@postech.ac.kr

Highest degree: PhD, Industrial Engineering, POSTECH

Position title: Senior Researcher, Agency for Defense Development

Areas of interest: Digital human model simulation, Anthropometric product design, Human performance evaluation

Suwan Park: psuwan@dgist.ac.kr

Highest degree: PhD, Computer Engineering, Kyungpook National University

Position title: Research Engineer, HumanLAB, DGIST

Areas of interest: Driver aware vehicle, Driver's workload assessment (On-Road & Simulator), Advanced Human-Vehicle Interface

Yunsuk Park: pys@dgist.ac.kr

Highest degree: BS, International Commerce, Keimyung University

Position title: Research Engineer, HumanLAB, DGIST

Areas of interest: Survey participants, Driver's workload assessment (On-Road & Simulator)

Joonwoo Son: json@dgist.ac.kr

Highest degree: PhD, Mechanical Engineering, Pusan National University

Position title: Project Leader, HumanLAB, DGIST

Areas of interest: Designing for older drivers, Driver's workload assessment (On-Road & Simulator), Advanced Human-Vehicle Interface

Seikwon Park: ergoparks@gmail.com

Highest degree: PhD, Industrial Engineering, Pennsylvania State University

Position title: Professor, Department of Systems Engineering, Korea Air Force Academy

Areas of interest: Human factors in aviation and aerospace, Fatigue/Stress modeling & assessment, Human performance & workload assessment, Bio-signal measurement and analysis techniques, Biofeedback training

Heecheon You: hcyou@postech.ac.kr

Highest degree: PhD, Industrial Engineering, Pennsylvania State University

Position title: Associate Professor, Department of Industrial & Management Engineering, POSTECH

Areas of interest: Ergonomic product design & development, User interface design & evaluation, Digital human modeling & simulation, Human performance & workload assessment, Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) prevention, Usability testing