

운전자 주행 특성 파라미터를 고려한 지능화 차량의 적응 제어

민 석 기[†] · 이 경 수^{*}

(2002년 11월 4일 접수, 2003년 5월 19일 심사완료)

Driver Adaptive Control Algorithm for Intelligent Vehicle

Sukki Min and Kyongsu Yi

Key Words : Intelligent Vehicle(지능화 차량), Intelligent Cruise Control(지능형 순항 제어), Adaptive Cruise Control(적응식 순항 제어), Stop-and-Go Control System(정지/서행 제어 시스템), Time-gap(타임 갭), Time-to-Collision(충돌 시간)

Abstract

In this paper, results of an analysis of driving behavior characteristics and a driver-adaptive control algorithm for adaptive cruise control systems have been described. The analysis has been performed based on real-world driving data. The vehicle longitudinal control algorithm developed in our previous research has been extended based on the analysis to incorporate the driving characteristics of the human drivers into the control algorithm and to achieve natural vehicle behavior of the adaptive cruise controlled vehicle that would feel comfortable to the human driver. A driving characteristic parameters estimation algorithm has been developed. The driving characteristics parameters of a human driver have been estimated during manual driving using the recursive least-square algorithm and then the estimated ones have been used in the controller adaptation. The vehicle following characteristics of the adaptive cruise control vehicles with and without the driving behavior parameter estimation algorithm have been compared to those of the manual driving. It has been shown that the vehicle following behavior of the controlled vehicle with the adaptive control algorithm is quite close to that of the human controlled vehicles. Therefore, it can be expected that the more natural and more comfortable vehicle behavior would be achieved by the use of the driver adaptive cruise control algorithm.

기호설명

- c : 차간거리[m]
- v_f : 선행차량속도 [m/s]
- v_s : 자차량속도 [m/s]
- τ : 타임갭 [s]
- TTC : 충돌예상시간 [s]
- c_0 : 최소허용차간거리 [m]
- λ : Forgetting factor (대체용어가없음.원어대로사용바람)

1. 서론

각종 센서와 액추에이터의 개발로 인해 운전자의 편의를 고려한 지능화 차량(Intelligent Vehicle)과 그 제어 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지능화 차량은 레이더와 센서등의 장비를 갖추고 운전자의 별도 조작없이 차량 스스로 운전자의 기능을 대신 수행하여 주행하는 차량 시스템을 말하며 이미 해외 유수의 자동차 메이커는 물론 국내 기업에서도 적응식 순항 제어(ACC, Adaptive Cruise Control)시스템과 정지/서행 제어 시스템(Stop-and-Go Control System)같은 지능형 차량의 개발이 한창이다[1-5].

지금까지의 지능화 차량의 제어를 위한 알고리

[†] 회원, 한양대학교 대학원 자동차공학과

^{*} 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : kyongsu@hanyang.ac.kr

TEL : (02) 2281-7194 FAX : (02) 2296-0561

들은 개발자에 의해 미리 정해진 상대 거리나 상대 속도를 제어하는 정적이며 고정된 방법이었다. 이는 차량과 인간이라는 두가지 요소중에 단지 차량만을 고려한 제어라고 할 수 있다. 그러나 운전자의 주행패턴은 나이와 성별에 따라 매우 다양하며 운전 목적, 도로 정체의 정도, 도로의 상태, 날씨와 같은 외부 환경 요소에 따라서 또다른 양상을 보이기도 한다. 그러므로 획일화된 제어 방법은 승차감에 큰 영향을 미치게 되며, 이는 주행 특성상 운전자에게 강한 심리적 부담을 주게 되는 원인이 된다. 따라서 운전자의 현재 주행 상태를 파악하고 이를 제어로직에 적용하는 보다 능동적이며 인간공학적인 제어기의 설계가 필요하다[1].

이를 위해 본 연구에서는 운전자의 주행 특성을 나타내는 파라미터를 선정하고 이를 추정하여 실제 제어기에 적용하였다. 아울러 운전자의 주행 특성이 적용된 제어가 기존의 제어 방법에 비해 실제 운전자의 주행 결과와 흡사함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 실험을 통한 주행 특성 분석

2.1 주행 형태의 다양성

지능화 차량에 관한 연구는 다양한 주행 조건에서 선행차량과의 일정한 거리와 속도를 유지하며 자율 주행 할 수 있는 차량의 개발과 성능을 개선하기 위한 연구가 그 대상이었다[1-12]. 그러나 운전자 개개인의 특성이 실제 제어에 반영되지 않았기 때문에 주행 특성상 운전자에게 강한 심리적인 부담을 주게 된다. Fig. 1 에 보여지는 것과 같이 운전자의 연령이나 성별과 같은 고유 인자와 운전 목적, 정체의 정도, 도로의 상황, 주행 경험, 날씨와 같은 외부 인자에 의해 매우 다양한 형태의 주행 패턴이 존재한다. 때문에 이러한 환경 변화에 적용할 수 있는 능동적인 제어 로직이 필요하다.

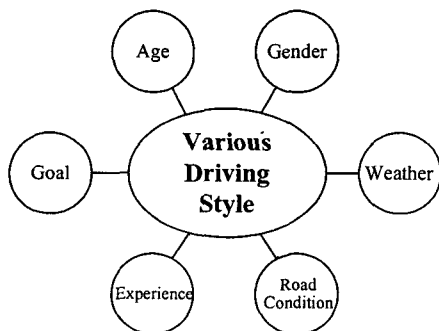


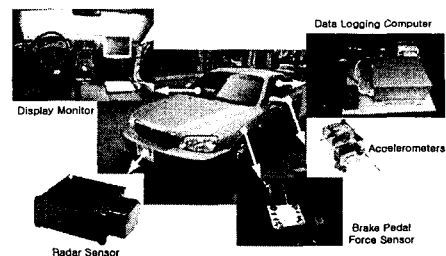
Fig. 1 Component of various driving style

2.2 실험 차량의 구성

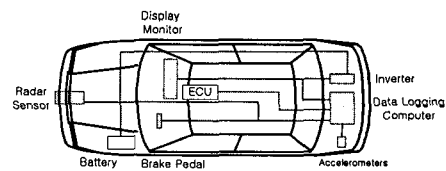
Fig. 2 는 운전자 주행 특성 분석을 위한 데이터 취득용 실험 차량의 구성을 보여준다. 실험용 차량은 전방 차량과의 상대 거리, 상대 속도의 정보를 얻기 위한 레이더 센서, 차량의 종/횡 방향 가속도를 측정하기 위한 가속도 센서, 브레이크 페달에 가해지는 압력을 측정하기 위한 답력계, 데이터 취득을 위한 컴퓨터 시스템으로 구성되어 있다. 차량의 ECU(Engine Control Unit)로 부터 CAN(Controller Area Network)을 이용하여 차량의 속도, 엔진 RPM, 토크 컨버터의 터빈 각속도, 크로틀의 개도각, 자동변속기의 기어 단수의 정보를 얻는다.

선행 차량과의 거리 정보는 레이더를 통해 취득되는데, 실험에 사용한 레이더는 Delphi 사의 77GHz MMW 모델로, 0~150m 의 광범위한 영역의 신호를 얻을 수 있고 거리 분해능은 1m 이며 시리얼 통신을 통해 상대 거리와 상대 속도의 정보를 제공한다.

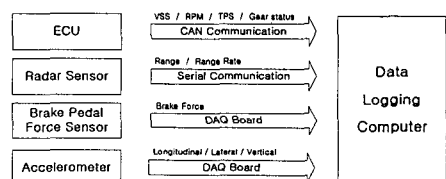
주행 패턴 분석을 위한 차량 실험은 서울 시내 주요 간선 도로(강변북로, 외곽순환도로)에서 실시했으며, 운전자 정보는 개별적으로 부여된 ID 로 구분했다.



(a) Experimental vehicle

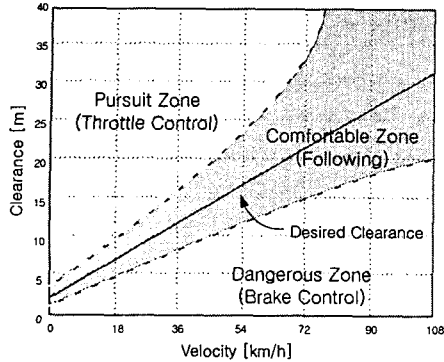


(b) Electric wiring

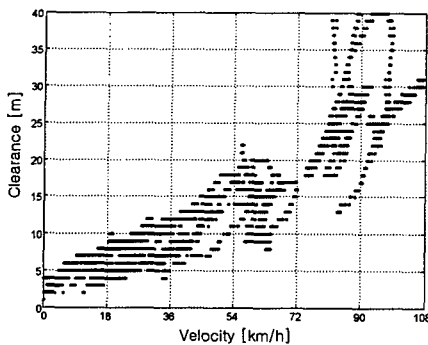


(c) Data logging

Fig. 2 Configuration of experimental vehicle



(a) Driving scheme



(b) Field operation data

Fig. 3 Driving scheme of human driver

2.3 운전자 주행 특성 분석

2.3.1 선행 차량 추종

도로 실험을 통해 나타난 운전자의 주행 특성을 살펴보면 일반적으로 Fig. 3(a)와 같은 양상을 나타낸다. 운전자는 각자의 운전 특성에 따른 임의의 상대거리(Clearance)를 설정하고 어느 정도의 오차 허용 범위 안에서 선행 차량을 추종한다. 만약 그 영역을 벗어난 상황일 경우 가감속 조작을 통해 오차를 줄여나가면서 설정 영역으로 이동해 간다. 그런데 저속과 고속 영역일 경우 그 정도에 차이가 생기는데, 고속 영역으로 갈수록 그 오차의 허용 정도가 커지게 된다. Fig. 3(b)는 각각 다른 속도 구간과 도로 상황에서 선행 차량을 추종하는 운전자의 주행 기록이다.

2.3.2 주행 형태의 다양성

운전자는 선행 차량과 어떤 일정한 거리를 두고 주행을 하게 된다. 이때 상대거리(Clearance)와 선행차량(forward vehicle)의 속도는 비례하는 특성이 있는데 이는 식 (1)과 같고, Fig. 3을 통해 나타난 운전자의 주행 패턴을 잘 표현한다.

$$c = v_f \cdot \tau + c_o \quad (1)$$

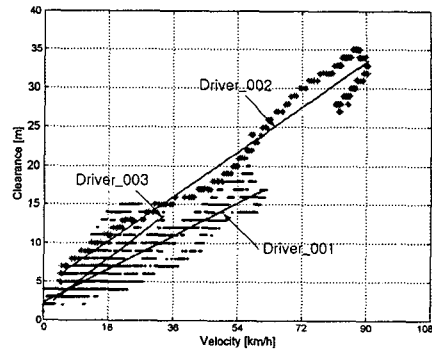


Fig. 4 A comparison of relationship between the clearance and vehicle velocities

Table 1 Estimated time-gap and minimum clearance

Driver ID	Time-gap	Min. Clearance
Driver_001	0.8626	2.2806
Driver_002	1.1572	4.4317
Driver_003	1.4159	1.6422

여기에서, τ 은 타임 갭(Time-gap)을 c_o 는 최소 유지 거리로 선행 차량의 속도가 0km/h 일때 유지하는 거리를 의미한다.

Fig. 4는 운전자 3명에 대한 상대 거리-속도 그래프이다. 실선은 실험 데이터를 최소 자승법을 이용하여 표현한 것으로 기울기는 타임 갭을, 상대 거리축 절편은 최소 유지 거리를 의미한다. Table 1을 통해 알수 있듯이 추정된 타임 갭과 최소 유지 거리는 운전자에 따라 각기 다른 양상을 보인다.

2.3.3 타임 갭과 충돌 시간(TTC)

Fig. 5(a)는 선행차량(forward vehicle)의 속도와 이를 추종하는 실험차량(subject vehicle)의 속도를 비교한 그래프이다. Fig. 5(b)와 (c)는 40초 이전과 이후의 타임 갭(τ)과 충돌 시간(TTC, Time-to-Collision)의 역(TTC^{-1})의 궤적을 나타낸다. 여기서 충돌 시간은 다음과 같이 표현된다.

$$TTC = \frac{c}{v_s - v_f} \quad (2)$$

40 초 이후에는 선행 차량의 속도 변화가 매우 작는데, 이때에는 타임 갭과 충돌 시간의 역의 궤적이 작아지며 일정 영역으로 수렴하게 되는 것을 볼수 있다. 이는 선행 차량의 속도가 일정하다면, 주행 궤적은 목표 타임 갭과 상대 속도가 0 km/h가 되는 지점으로 수렴함을 의미한다.

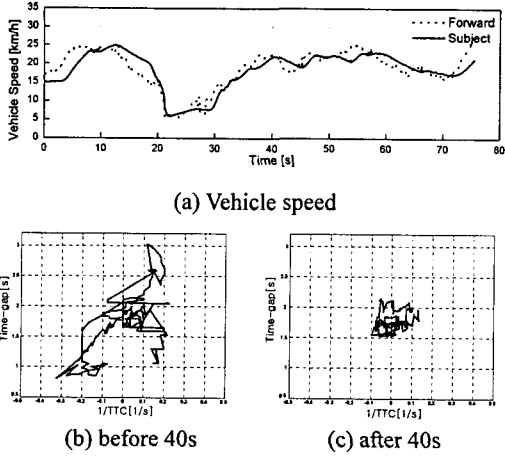


Fig. 5 Time-gap and the inverse TTC trajectories during following

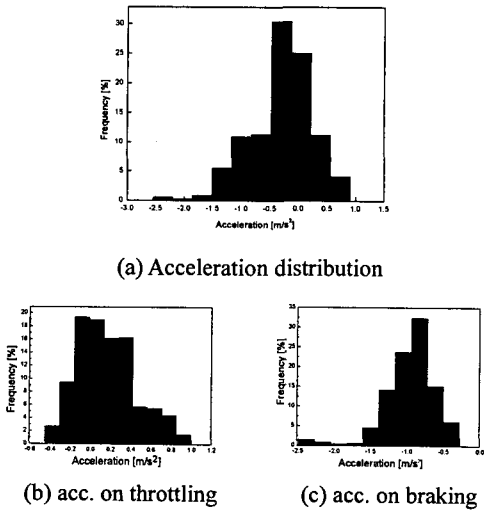


Fig. 6 Acceleration distribution during following

2.3.4 선행 차량 추종시의 가속도 분포

Fig. 6(a)는 선행 차량 추종시에 나타나는 가속도의 분포도이다. 저속과 고속 영역을 포함하는 모든 속도 구간에서, 가속도 $-2.5m/s^2 \sim 1.0m/s^2$ 범위내에서 선행 차량을 추종한다는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)는 각각 가속시와 감속시의 가속도 분포도이다.

3. 주행 특성을 고려한 적응 제어

지능형 순항 제어 시스템이나 정지/서행 제어 시스템과 같은 실제 제어 차량에서 사용하고 있는 목표 상대 거리는 식 (3)과 같다.[7,8]

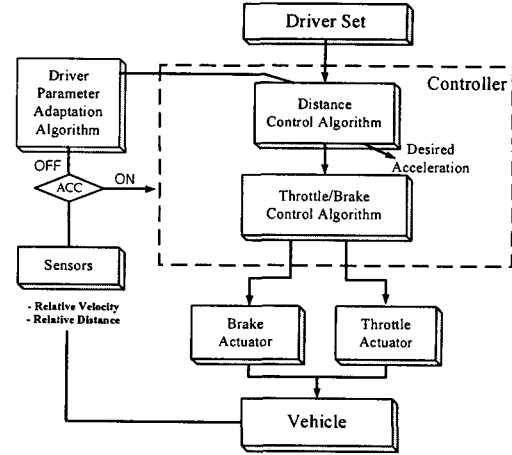


Fig. 7 Control algorithm with driving behavior parameter estimation

$$c_{des} = v_f \cdot \tau + c_o \quad (3)$$

또한 상대 거리와 상대 속도로부터 설계된 목표 가속도는 다음과 같다.

$$a_{des} = -k_1(c_{des} - c) - k_2(v_f - v_s) \quad (4)$$

여기에서 k_1 과 k_2 는 최적 제어 이론을 통해 얻게 되는 게인 값이다.[8]

Fig. 7은 주행 특성 파라미터를 고려한 지능화 차량의 적응 제어 알고리즘을 나타낸다. 운전자 주행 특성 파라미터로 타임 갭과 최소 유지 거리를 선정했고, 운전자가 주행하는 동안 타임 갭과 최소 유지 거리는 계속 갱신되어 현재의 주행 특성을 표현하게 되고, 이를 이용하여 운전 특성이 반영된 목표 가속도를 얻을수 있게 된다.

추정된 타임 갭과 최소 유지 거리를 제어에 반영하면 목표 상대 거리는 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$c_{des} = v_f \cdot \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2 \quad (5)$$

여기에서 $\hat{\theta}_1$ 과 $\hat{\theta}_2$ 는 각각 추정된 타임 갭과 최소 유지 거리를 나타낸다. 운전자가 주행하는 동안에 타임 갭과 최소 유지 거리는 귀납적 최소 자승 알고리즘 (Recursive Least-Square Algorithm)을 이용하여 계산된다.

$$\hat{\theta}(k) = \begin{cases} \hat{\theta}(k-1) + P(k)\varphi(k)(y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)) & \text{if } |TTC^{-1}| \leq \epsilon \\ \hat{\theta}(k-1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\hat{\theta}(0) = \hat{\theta}_0$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \left(p(k-1) - \left(\frac{p(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)p(k-1)}{\lambda + \varphi^T(k)p(k-1)\varphi(k)} \right) \right)$$

$$P(0) = P_0 > 0$$

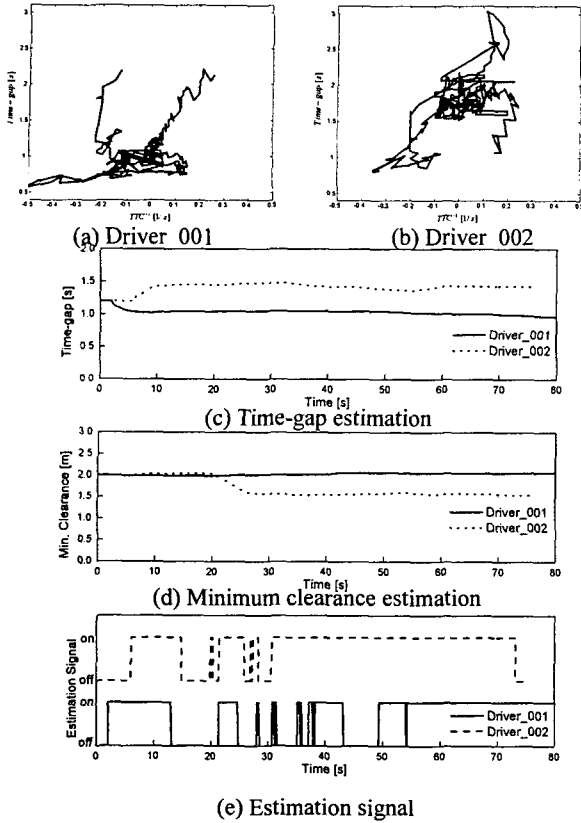


Fig. 8 Time histories of the estimated parameters for two human drivers and estimation signal

$$\begin{aligned}
 y(k) &= \varphi^T(k) \cdot \theta(k) \\
 \varphi^T(k) &= [\varphi_1 \ \varphi_2] = [v_p(k) \ 1] \\
 \theta(k) &= \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ c_0 \end{bmatrix} \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기에서 λ 는 forgetting factor, $y(k)$ 는 레이다 센서로부터 측정된 상대 거리, $v_p(k)$ 는 측정된 상대 속도와 자차 속도로부터 구한 선행 차량의 속도를 나타낸다. 2.3.3 절에 언급한 바와 같이, 타임갭-충돌 시간의 역 그래프 상에서 궤적이 작은 영역으로 수렴할 때가 운전자가 설정한 목표 타임갭이 되므로 $\hat{\theta}$ 는 TTC^{-1} 가 작은 구간에서 갱신되는 것이 바람직하다. 즉,

$$|TTC^{-1}| \leq \varepsilon \quad (7)$$

을 의미하며, 본 연구에서는 ε 을 0.05로 사용하였다.

Fig. 8은 귀납적 최소 자승 알고리즘을 통해 운전자의 주행 특성 파라미터가 추정되는 것을 보여준다. Fig. 8(a)와 (b)는 각기 다른 두 명의 운전자

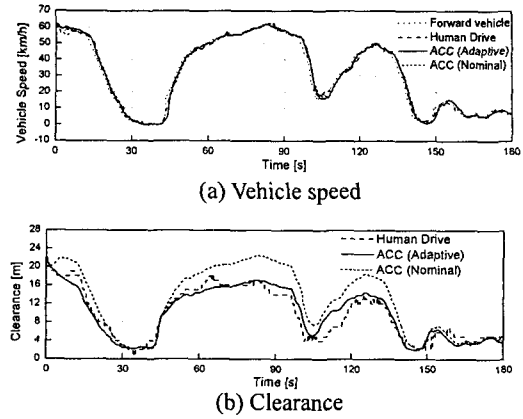


Fig. 9 Comparison of vehicle speed and clearance in a case of vehicle following

정보를 가지고 표현한 타임갭과 충돌 시간의 역 궤적이다. Fig. 8(c)는 타임갭으로, 두 명의 운전자의 경우 각각 0.89[s]와 1.42[s]로 추정되며, Fig. 8(d)는 최소 유지 거리로 2.1[m]와 1.6[m]로 추정된다. Fig. 8(e)는 $|TTC^{-1}| \leq \varepsilon$ 을 만족하는지의 여부에 따라 추정 파라미터를 갱신하도록 하는 신호를 나타낸다. 식 (7)이 만족되는 구간에서만 파라미터의 추정이 갱신된다.

4. 시뮬레이션을 통한 평가

Fig. 9는 선행 차량을 추종하는 경우의 차량 속도와 상대 거리 그래프이다. 그래프상의 'Human Drive'는 실제로 운전자가 주행한 도로 실험 데이터이다. 또한 'ACC(Adaptive)'은 적응 제어 알고리즘을 가진 제어 차량의 시뮬레이션 결과이다. 주행 특성 파라미터는 타임갭은 0.86[s], 최소 유지 거리는 2.28[m]로 추정되었다. 'ACC(Nominal)'은 주행 특성 파라미터의 추정 알고리즘이 없는 기존의 시뮬레이션 모델로 타임갭은 1.2[s], 최소 유지 거리는 2[m]로 고정되어 있다[7,8]. 시뮬레이션에 사용된 선행 차량의 속도 정보는 실험을 통해 취득한 실제 데이터를 이용하였다. Fig. 9(a)는 속도 그래프로 적응 제어나 기존 제어 기법을 사용하는 것 모두 선행 차량의 속도를 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 9(b)와 같이 상대 거리에서는 적응 제어 알고리즘을 도입한 쪽이 훨씬 실제 운전자의 주행 패턴과 흡사한 것을 알 수 있다.

Table 2는 위의 경우에 관한 두가지 제어 기법의 속도와 거리 최소 자승 오차를 비교한 것이다. 적응 제어 알고리즘을 사용한 결과가 거리 오차의 경우 60.4%나 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 운

Table 2 Comparison of RMS velocity and RMS clearance errors for ACC(Adaptive) and ACC(Nominal)

	ACC (Adaptive)	ACC (Nominal)
RMS Velocity Error [m/s](%)	1.03 (88.1%)	1.17 (100%)
RMS Clearance Error [m](%)	1.19 (39.6%)	3.01 (100%)

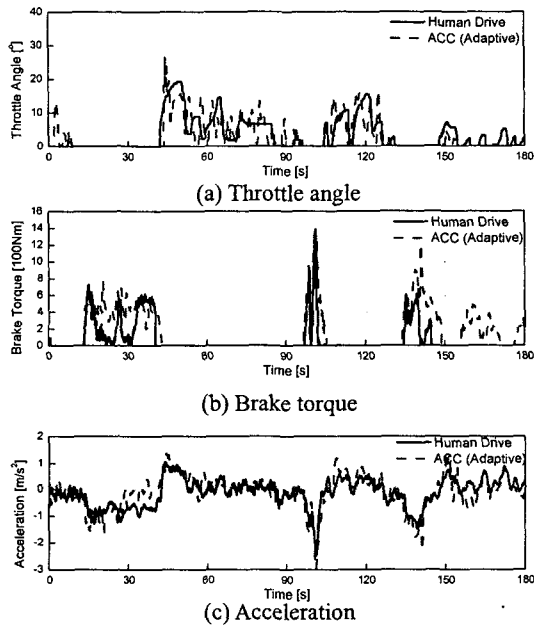


Fig. 10 Comparison of time histories of throttle angle, brake torque and longitudinal acceleration

전자의 주행 패턴이 적응 제어 알고리즘을 통해 재현될 수 있음을 보여준다. 다시 말해 운전자에게 심리적인 부담을 덜어주는 자연스럽게 편안한 제어가 가능하다.

Fig. 10 은 Fig. 9 에 보인 주행 상황의 경우에서 실험을 통해 취득한 쓰로틀 개도각과 브레이크 토크, 종방향 가속도 데이터와 적응 제어 알고리즘을 적용한 시뮬레이션에서의 데이터를 비교한 것이다. 실제 운전자의 주행 데이터와 시뮬레이션을 통해 예측된 데이터가 매우 흡사한 것을 알 수 있다.

5. 결론

운전자의 성향에 따라 주행 특성은 현저한 차이를 보인다. 이를 분석하기 위해 레이더 센서, 가속도 센서, 브레이크 페달 압력 센서등을 설치한 실험용 차량을 구성하였고, 이를 이용하여 선행 차량 추종시의 운전 특성에 관해 알아보았다.

선행 차량을 추종하는 경우 운전자는 각기 다

른 타임 갭과 최소 유지 거리를 설정하게 된다. 다양하게 나타나는 주행 특성 파라미터를 귀납적 최소 자승 알고리즘을 이용하여 제어에 적용하였다. 시뮬레이션을 통해, 적응식 제어 알고리즘을 적용한 차량의 데이터가 실제 운전자에 의해 주행된 차량의 데이터와 매우 유사함을 확인하였다.

후기

이 논문은 2001 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의해 연구되었음 (KRF-2001-041-E00082)

참고문헌

- (1) Yamamura, Y., Tabe, M., Kanehira, M., and Murakami, T., "Development of an Adaptive Cruise Control System with Stop-and-Go Capability," SAE Paper No. 2001-01-0798, 2001.
- (2) Weinberger, M., et al., "Adaptive Cruise Control Long-Term Field Operational Test," *Proc. Of AVEC2000, 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, 2000, Ann Arbor, Michigan, USA.
- (3) Venhovens, P., et al., "Stop and Go Cruise Control," *Proc. Of Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress*, June 12-15, 2000, Seoul, Korea.
- (4) Hedrick, J.K., McMahon, D., Narendra, V., and Swaroop, D., "Longitudinal Vehicle Controller Design for IVHS Systems," *Proceedings of the 1991 American Control Conference*, pp. 3107~3112, Boston, Massachusetts, June 1991.
- (5) Rajamani, R., Choi, S.B., Hedrik, J.K., and Law, B., "Design and experimental implementation of control for a platoon of automated vehicles," *Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division, ASME*, pp. 681~689, 1998.
- (6) Peng, H., "Evaluation of Driver Assistance Systems-A Human Centered Approach," *Proc. Of AVEC2002, 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, 2002, Japan.
- (7) Yi, K., Yoon, H., Huh, K., Cho, D., and Moon, I., "Implementation and Vehicle Tests of a Vehicle Stop-and-Go Cruise Control System," *Journal of Automobile Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D*, To be published, 2002, 10.
- (8) Yi, K., Hong, J. and Kwon, Y., "A Vehicle Control Algorithm for Stop-and-Go Cruise Control", *Journal of Automobile Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* Vol. 215 Part D, pp. 1099~1115, 2001
- (9) Lee, C. and Yi, K., "An Investigation of Vehicle-to-Vehicle Distance Control Laws Using Hardware-in-the-Loop Simulation," *Journal of KSME, Part A*, Vol. 26, No. 7, pp. 1401~1407, 2002.