

< 기술논문 >

다차량 추종 적응순항제어

문 일 기* · 이 경 수†

(2004년 8월 10일 접수, 2004년 11월 25일 심사완료)

Multi-Vehicle Tracking Adaptive Cruise Control

Moon Il ki and Yi Kyongsu

Key Words : Interacting Multiple Model(상호 다모델), Probabilistic Data Association Filter(확률적 데이터 연관 필터), Adaptive Cruise Control(적응순항제어), Advanced Safety Vehicle(첨단안전차량), Target Tracking(목표차량 추종)

Abstract

A vehicle cruise control algorithm using an Interacting Multiple Model (IMM)-based Multi-Target Tracking (MTT) method has been presented in this paper. The vehicle cruise control algorithm consists of three parts; track estimator using IMM-Probabilistic Data Association Filter (PDAF), a primary target vehicle determination algorithm and a single-target adaptive cruise control algorithm. Three motion models; uniform motion, lane-change motion and acceleration motion, have been adopted to distinguish large lateral motions from longitudinal motions. The models have been validated using simulated and experimental data. The improvement in the state estimation performance when using three models is verified in target tracking simulations. The performance and safety benefits of a multi-model-based MTT-ACC system is investigated via simulations using real driving radar sensor data. These simulations show system response that is more realistic and reflective of actual human driving behavior.

기호설명

- F : 천이행렬
- H : 측정행렬
- Q : 측정잡음 코베리언스 행렬
- i, j : 운동모델
- m : 개적
- r : 총 운동모델 개수 [개]
- v : 측정잡음
- w : 진행잡음
- Γ : 입력분포행렬
- μ : 확률
- π : 마르코비안 천이 확률

1. 서론

지난 수년간, 급속히 발전하고 있는 전자, 정보통신 분야의 기술을 자동차에 접목하여 운전자에게 편의성을 제공하고, 주행 안전성을 향상시키기 위한 첨단안전차량에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 첨단안전차량의 주요 연구 분야 중 하나인 자율 주행 기술은 차량의 주행 방향의 운행을 보조하는 적응순항제어와 횡 방향의 거동을 제어하는 차선유지 보조 시스템으로 구분될 수 있다. 이 적응순항제어 시스템⁽¹⁻⁴⁾은 차량이 주행중인 종 방향에 대한 가감속 제어를 부분적으로 자동화 함으로써 운전자의 부담을 줄이고 도로의 활용성을 높이기 위한 장치이다. 지난 10여 년 간의 다양한 연구를 통하여 기본적인 제어성능이 검증되었고, 1999년에는 벤츠와 재규어의 최고급 차종에 적응순항제어 시스템이 장착되었다.

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : kyongsu@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0455 FAX : (02)2296-0561

* 회원, 현대 모비스 카트로닉스 연구소

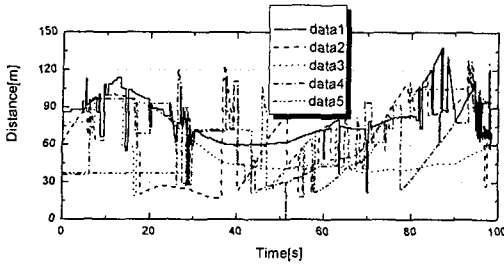


Fig. 1 Track data from mmW radar sensor

적용 순항제어 시스템은 주행차선 상에 위치한 차들 중 가장 근접한 차량의 상대 거리와 상대 속도 등의 정보를 이용하여 적절한 제어를 취하는 방법을 채택하고 있다. 하지만 일반 운전자들이 전방의 차량뿐만 아니라 주변 차선에서 주행하는 차량의 급 가감속 시 나 차선 변경이 예측될 때 경계심을 가지며 운행하는 것과는 차이가 있다. 이 같은 한계를 극복하기 위해서는 운전자의 전방에 주행중인 다차량에 대한 정보를 이용하여 차량 거동을 예측하는 기술이 필요하다. 밀리미터 웨이브 레이더(milli-meter wave radar) 센서⁽⁵⁾는 비전이나 레이저 타입의 센서들에 비해 눈, 비, 안개 등의 환경적인 요인에 강인한 장점을 가지고 있어서 적응순항제어 시스템의 전방 감지 센서로 선택되고 있다. 그러나 Fig. 1 에서와 같이 주행시 취득한 결과는 실제 차량의 신호 이외에 도로 표지판, 가드레일 등등의 신호 들이 섞여 있고, 전방 차량을 감지하는 도중에도 종종 차량을 놓쳐서 신호가 끊기는 현상이 발생 한다.

이런 원인들로 인해 mmW 레이더의 신호를 그대로 차량의 제어에 사용하기는 어렵고 필터링 기법을 이용하여 전방차량들을 추종하여야 한다. 초기에는 궤적 추정을 위해 단일 칼만 필터를 이용하였는데, 이 경우 어떠한 상태 공간 모델을 채택하느냐에 따라 추정 정밀도가 큰 영향을 받게 되는 문제가 있기 때문에 복수의 모델들을 사용하여 물체의 거동을 더 근사하게 표현 할 수 있는 다모델 기법들에 대한 연구가 진행 되었다. 1984 년에 Blom과 Bar-Shalom⁽⁶⁾에 의해 개발된 다모델간의 'soft' 전환 기술인 Interacting Multiple Model(IMM) 기술은 단일 칼만 필터를 사용하는 것에 비해 계산량 측면에서 소폭의 증가만을 보이는 장점을 가지고 있다. 이 같은 단일물체 추종 기법은 다물체 추종 기법으로 확장되었는데 여러 가지 기법 중 Probabilistic Data Association Filter (PDAF)은 장애물이 많은 환경에서도 우수한 성능을 보이며 특히 IMM 기법과 상호 보완적인 특징을 가지고 있다.

Bar-Shalom^(9,10)은 다양한 연구를 통하여 IMM 기법의 발전에 지대한 영향을 미쳤고, Derek⁽⁹⁾은 실차 실험을 통하여 IMM-PDAF 기법의 실시간 성능을 검증 하였다. 본 논문에서는 다차량 추종을 위해 IMM-PDAF 기법을 사용하였으며, IMM 기법에서 계산되는 확률을 이용하여 차량의 거동을 잘 표현 할 수 있는 운동모델을 제시하였다. 또한 이를 이용하여 목표 차량을 결정하는 알고리즘을 개발하였고 이 두 가지 기법과 단일 차량 적응순항제어 기법을 결합한 차량 주행 제어 기법의 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 다차량 추종 기법

2.1 IMM-PDAF 기법

IMM-PDAF 기법은 여러 공학분야에 응용되었다.⁽⁸⁻¹²⁾ 전방차량의 운동을 표현하기 위한 운동모델은 직교좌표계를 사용하여 식 (1)과 같이 이산시간 상태공간 모델의 형태로 표현되고 레이더의 측정모델은 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{x}[k] = \mathbf{F}\mathbf{x}[k-1] + \mathbf{\Gamma}\mathbf{w}[k-1] \quad (1)$$

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{H}\mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k] \quad (2)$$

IMM 기법은 복수의 칼만필터들을 이용하여 각기 다른 운동 모델을 적용하기 때문에 각 모델의 혼합초기값과 초기값의 코베리언스를 각각 식 (3), (4)와 같이 정의하였다.

$$\hat{\mathbf{x}}^0[k-1] = \sum_{i=1}^r \hat{\mathbf{x}}_i[k-1] \mu_{ij}[k-1] \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_i^0[k-1] = \sum_{i=1}^r (\mathbf{P}_i[k-1] + [\hat{\mathbf{x}}_i[k-1] - \hat{\mathbf{x}}^0[k-1]] \times [\hat{\mathbf{x}}_i[k-1] - \hat{\mathbf{x}}^0[k-1]]^T) \mu_{ij}[k-1] \quad (4)$$

위의 식에서 $\mu_{ij}[k-1]$ 는 혼합확률로써 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\mu_{ij}[k-1] \triangleq \frac{\pi_{ij} \mu_i[k-1]}{\sum_{i=1}^r \pi_{ij} \mu_i[k-1]} \quad (5)$$

예상상태추정과 코베리언스는 각각 식 (6), (7)과 같다. 본 연구에서는 IMM 기법의 운동모델의 특징을 표현하기 위해서 식 (7)의 진행 잡음(Process noise) 코베리언스 \mathbf{Q}_j 를 다르게 정의 하는 기법을 사용하였다.

$$\hat{\mathbf{x}}_j[k|k-1] = \mathbf{F}_j \hat{\mathbf{x}}_j^0[k-1] + \mathbf{\Gamma}_j \bar{\mathbf{w}}_j[k-1] \quad (6)$$

$$P_j[k|k-1] = F_j P_j^0[k-1] F_j^T + \Gamma_j Q_j[k] \Gamma_j^T \quad (7)$$

칼만필터를 통하여 추정되는 각 모델의 추정 상태는 식 (8)과 같고 이 같은 각 모델들의 추정 상태의 확률적인 평균으로 최종 추정값을 식 (9)와 같이 계산한다.

$$\hat{x}_j[k|k] = \hat{x}_j[k|k-1] + W_j[k] v_j \quad (8)$$

$$\hat{x}[k|k] = \sum_{j=1}^r \hat{x}_j[k|k] \mu_j[k] \quad (9)$$

단일 레이더로부터 측정되는 단일 데이터의 처리는 위의 IMM 기법으로 가능하다. PDAF 기법은 여러대의 차량들을 추종 하기 위하여 추정된 각각의 궤적에 대하여 유효 영역 내에 위치한 데이터들의 연관확률을 이용하여 궤적추정에 이용한다. 최종적인 각 궤적의 운동모델별 상태 추정은 식 (10)과 같고, 각 궤적의 상태추정은 식 (11)로 계산된다.

$$\hat{x}_{m,j}[k|k] = \hat{x}_{m,j}[k|k-1] + W_{m,j}[k] v_m[k] \quad (10)$$

$$\hat{x}_m[k|k] = \sum_{j=1}^r \hat{x}_{m,j}[k|k] \mu_{m,j}[k] \quad (11)$$

2.2 동적 운동 모델

기존의 IMM-PDAF 기법을 이용한 다물체 추종 연구는 주로 2 운동모델을 채택하였다. 2 운동모델은 대상물체의 가감속도 변화가 작은 정상 운동과 가감속도 변화가 큰 Maneuver 운동으로 구성되어 있다. 하지만 차량을 대상으로 하는 경우 차선변경을 판단하는 것이 중요하기 때문에 종방향의 가감속이 큰 경우와 횡방향의 가감속이 큰 경우가 구별될 필요성이 있다. 본 연구에서는 Maneuver 운동을 차선변경 운동과 감속 운동으로 구분한 3 운동 모델을 채택하였다. 그리고 기존의 연구들이 종방향과 횡방향의 상태에 각각 2 차나 3 차의 대칭형 운동모델을 적용한데 반해서 식 (12), (13)과 같이 종방향 2 차, 횡방향 1 차의 비대칭 운동모델을 제시하였다. 이는 고차의 횡방향 운동모델의 적용시에 차선변경 운동의 운동확률이 적절히 증감되지 않아 차선변경을 구별하기에 적합지 않은 문제를 해결하기 위하여 제안되었고, 시뮬레이션 을 통하여 제안된 모델의 적합성을 검증 하였다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[k] &= \mathbf{F}\mathbf{x}[k-1] + \mathbf{\Gamma}\mathbf{w}[k-1] \\ &= [x \ \dot{x} \ y]^T \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

실험을 통하여 취득한 데이터를 이용하여서 이와 같은 IMM-PDAF 모델에 적합한 진행잡음의 표준편차 값을 추정 한 결과는 Table 1 과 같다.

2.3 운동 모델 검증

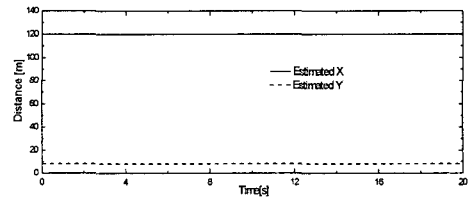
앞 절에서 제시한 3 차의 3 운동모델의 적용시 다차량의 궤적추정과 차량 운동의 적절한 예측이 가능한지를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2.3.1 정적으로 움직이는 경우

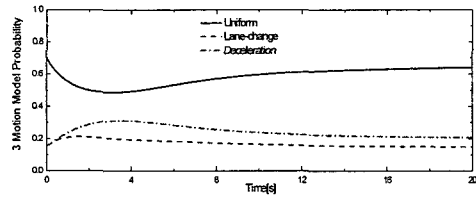
Fig. 2 는 전방의 차량이 종방향으로 120 m, 횡방향으로 8 m 의 상대거리를 가지면서 주행하는 경우의 시뮬레이션 결과이다. 3 운동모델을 적용한 경우의 각 운동의 확률을 나타내는데 상대적으로 정지해 있는 차량이므로 정상운동의 확률이 가장 크게 나타난다.

Table 1 Parameters of IMM-PDAF

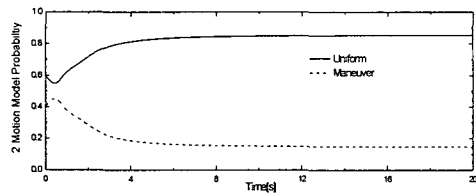
	Uniform	Lane-change	Deceleration
Long.Speed STD[m/s]	1.1×10^{-6}	1.23×10^{-3}	1.0×10^{-1}
Lat. Position STD[m]	1×10^{-8}	9.8×10^{-4}	1.20×10^{-7}



(a) Estimated position



(b) Probability of three motion models



(c) Probability of two motion models

Fig. 2 Target state estimation of a vehicle with zero relative motion

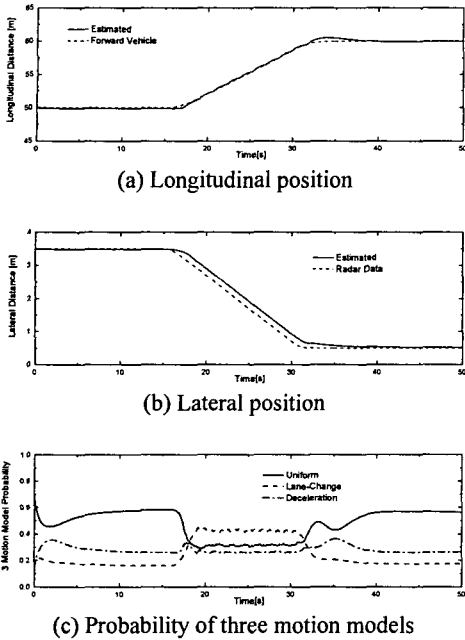


Fig. 3 Target state estimation of a vehicle performing a lane change

2.3.2 차선변경의 경우

Fig. 3 는 우측차선의 차량이 차선 변경을 하는 경우의 시뮬레이션 결과이다. Fig. 3(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 전방 차량은 약 16 초 무렵부터 우측 차선에서 주행차량의 전방으로 차선을 변경한다. 전방차량의 실제 위치와 추정된 위치간에 작은 오차가 존재함을 볼 수 있다. (c)의 운동확률 그래프에서는 이 같은 전방차량의 차선 변경시 차선변경 운동의 확률이 적절히 증가하는 현상을 볼 수 있고, 약 33 초 무렵 차선 변경이 끝난 이후에는 다시 정상운동의 확률이 증가한다.

2.3.3 급감속의 경우

전방차량이 급감속하는 경우의 실험데이터를 적용하여 시뮬레이션을 수행 하였다. Fig. 4(a), (b)의 그래프에서 전방에서 주행하는 차량의 위치를 적절히 추종하는 것을 볼 수 있다. (c)의 운동확률 그래프에서는 급감속이 시작되는 4.8 초 무렵부터 감속 운동의 확률이 급격히 증가하는 현상이 나타난다.

2.4 목표 차량 감지기법

mmW 레이더의 데이터에 IMM-PDAF 기법을 이용한 전방차량에 대한 궤적 추정을 수행하여 복수의 전방차량에 대하여 궤적들을 구하게 된다. 실제 적용순항제어 기법은 전방의 가장 근접한 한대의

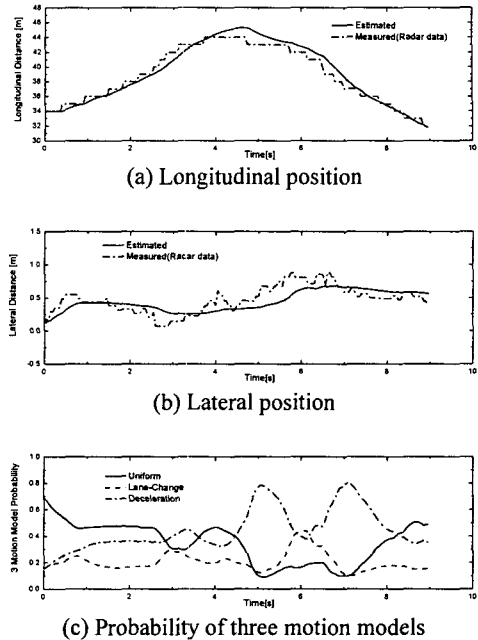


Fig. 4 Target state estimation of a rapidly braking vehicle

차량에 대해서 상대거리와 속도를 유지하는 개념이기 때문에 여러 궤적 중 하나의 목표 차량을 결정하는 기법이 필요하다. 레이더의 데이터는 제어차량을 기준위치로 하는 상대 정보이기 때문에, 전방차량이 현재 제어차량이 주행하고 있는 차선 상에 위치 했는지를 판단하기 위해서는 제어차량과 주행 차선간의 상대위치에 대한 정보가 필요하다. 일반 운전자는 전방의 차량을 주시하며 주행하는 도중에도 주변 차선에서 급격히 횡방향 변화를 보이는 차량이나 급격한 감속을 하는 차량에 대해 경계를 하면서 종합적으로 판단하고 대처하는 제어를 한다. 만약 주변차선의 차량이 급격히 차선 변경을 하여 제어차량의 주행 차선으로 진입하는 경우 단순히 횡방향 위치와 차선 폭의 비교를 통하여 차선 안쪽으로 진입하는 순간부터 자차선의 차량으로 판단하게 되면 급격한 감속 제어를 취할 가능성이 높아진다. 본 연구에서는 앞에서 제시한 3 운동모델의 궤적추종 기법에서 계산되는 각 운동확률을 이용하여서 차선변경가능성이 높은 경우 가중함수를 사용하여 실제 횡방향 위치에 비해서 좀 더 가까운 차량으로 판단하는 기법을 사용하였다. 이 방법을 통해서 여러대의 전방차량 궤적 중 자차선에 있는 차량들을 구별하고, 그들 중 가장 근접한 차량에 대해서 적용순항제어 기법을 적용하는 방법을 사용하였다. Fig. 5 는 이같은 목표 차량 감지기법의 흐름도이다.

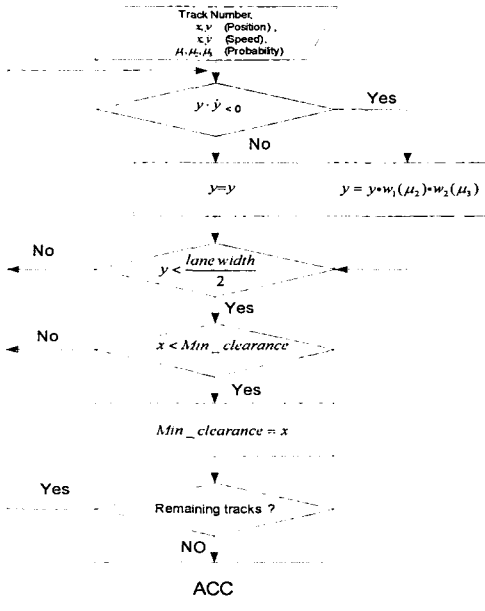
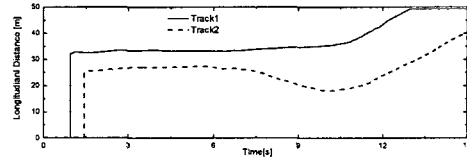
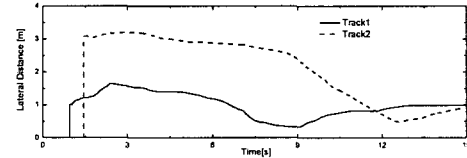


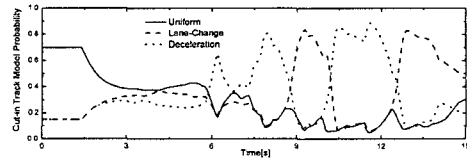
Fig. 5 Flowchart of the primary target determination algorithm



(a) Longitudinal position (Probability-based method)



(b) Lateral position (Probability-based method)



(c) 2nd track probability of three motion models (Probability-based method)

Fig. 7 ACC results using simple method versus probability-based method

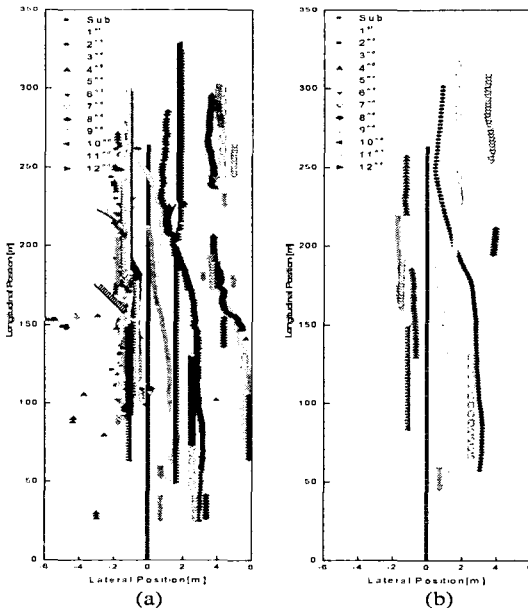


Fig. 6 MTT-ACC simulation results using driving data of a cut-in situation. (a) Data tracks from mmW radar (b) Estimated IMM-PDAF tracks

3. 다차량 적응순항제어 시뮬레이션

3.1 옆차선의 차량이 끼어드는 경우 앞에서 제시한 기법들과 적응순항제어 기법을

결합한 모델에 실제 도로를 주행하는 경우의 데이터를 적용하여 시뮬레이션을 수행 하였다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 옆차선의 차량이 제어차량의 전면으로 차선변경을 하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. Fig. 6(a)의 그래프는 mmW 레이더로부터 들어오는 원신호로 약 100 m 를 전후하여서 주행차선의 왼쪽편에 신호가 많이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 중앙분리대에 반사되어서 나타나는 잡음이다. Fig. 6(a)에서 보이듯 처음에는 전면에 위치하는 1 번 궤적의 차량이 있고, 약 6 초 후부터는 우측차선에 위치한 전방차량이 주행차선으로 접근하여 1 번 궤적의 차량과 제어차량의 사이로 끼어 들어와서, 약 12 초 무렵에는 주행차선에 위치하게 되는 상황이다. Fig. 6(b)는 적응제어 기법까지 적용 되었을때 IMM-PDAF 으로부터 계산된 전방 차량들의 주행 궤적이다. Fig. 6(a)에 비해서 잡음이 상당부분 제거 되었으며 몇몇 주행 차량들을 적절히 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7 의 그래프들은 Fig. 6 의 상황에서 제어차량에서 바라본 전방차량에 대한 결과이다. Fig. 7(a) 와 (b) 는 각각 1 번과 2 번 궤적 차량의 종방향과 횡방향 거리를 나타낸다. Fig. 7(b)의 횡방향 그래프에서 약 6 초 무렵부터 2 번 궤적의 차량이 급격히 횡방향 변화를 보이는 현상이 나타난다.

Fig. 7(c)는 2 번 궤적의 운동확률 그래프로써 차선 변경의 초기에 상당부분의 감속운동이 나타나는 현상을 볼 수 있고, 8 초 무렵부터 급격히 차선 변경운동의 확률이 증가하는 결과를 보인다. 운동

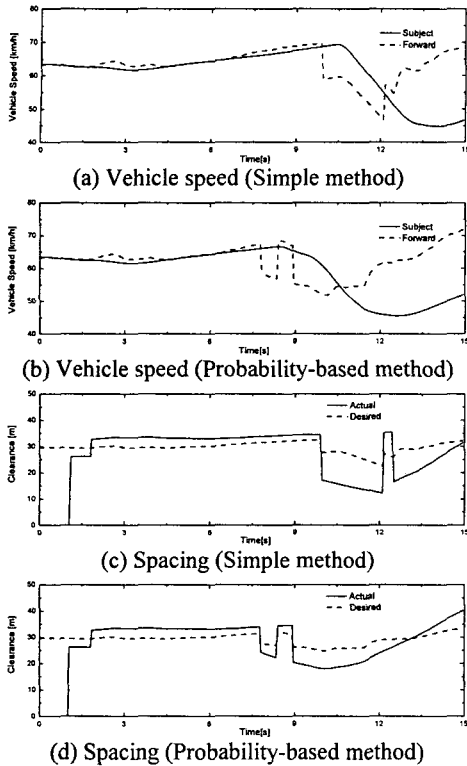


Fig. 8 Control results : simple method versus probability-based method

확률을 고려한 경우가 끼어드는 차량에 대해서 약 2.7 초 빠르게 판단을 내리는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 8 은 적응순항제어 기법의 제어 결과 그래프이다. Fig. 8(a)와 (b)는 각 기법을 적용한 경우의 속도 그래프이다. Fig. 8(b) 그래프는 속도가 더 낮은 2 번 궤적의 차량을 더 일찍 감지하기 때문에 제어 차량이 미리 감속하는 현상이 나타난다. 약 8 초 무렵에서 1 번 궤적과 2 번 궤적의 변경이 두번 발생하는 것은 2 번 궤적의 차량이 급 감속과 횡방향 운동을 동시에 하기 때문에 횡방향 위치 판단에 적용되는 가중함수가 과도하게 적용되어서 나타나는 현상이다. Fig. 8(c)와 (d) 그래프는 제어차량과 전방차량 간의 상대거리 그래프이다. Fig. 8(d)에서 제어차량간의 최소 상대거리가 약 17.9 m로 Fig. 8(c)의 결과보다 약 6.4 m 정도의 거리를 더 보장하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 도로 주행 시 여러 대의 차량이 주행하는 환경에서 적응순항제어가 가능하도록 다차량 추종 적응순항제어 기법을 제시하였다. 다차량 추종 적응순항제어 기법은 전방차량

의 궤적을 추정하기 위한 IMM-PDAF 기법, 운동 확률을 이용한 목표차량 감지기법과 단일 차량 적응순항제어기법으로 구성된다. IMM-PDAF 를 이용한 궤적추정기법은 실제 주행 시 주변 환경으로 인해 발생하는 mmW 레이더의 잡음을 적절히 제거하고, 주행중인 전방차량들을 적절히 잘 추종하는 결과를 보였다. 운동확률을 적용한 목표차량 감지기법은 제어차량의 전면으로 끼어드는 차량에 대해서 빠른 감지를 통하여 적절한 적응순항제어 성능을 보이는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인 할 수 있었다.

후 기

이 연구는 과학 기술부 국가지정 연구실(NRL)사업의 지원에 의해 수행 되었습니다.

참고문헌

- (1) Liang, C. and Peng, H., 1999, "Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed String Stability," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 32 No. 4-5, pp. 313~330.
- (2) Hedrick, J.K., McMahon, D., Narendra, V. and Swaroop, D., 1991, "Longitudinal Vehicle Controller Design for IVHS Systems," *Proceedings of the 1991 American Control Conference*, pp. 3107~3112.
- (3) Yamamura, Y., Tabe, M., Kanehira, M. and Murakami, T., 2001, "Development of an Adaptive Cruise Control System with Stop-and-Go Capability," SAE Paper No. 2001-01-0798.
- (4) Yi, K., Yoon, H.J., Huh, K. Cho, D. and Moon, I., 2002, "Implementation and Vehicle Tests of a Vehicle Stop-and-Go Cruise Control System," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Automobile Engineering*, Vol. 216, Part D, pp. 537~544.
- (5) Tokoro, Setsuo, 1996, "Automotive Application Systems of a Millimeter-wave Radar," *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium of the 1996 IEEE*, pp. 260~265.
- (6) Blom, H.A.P. and Bar-Shalom, 1984, "An Efficient Filter for Abruptly Changing Systems," *Proc. 23rd IEEE Conf. Decision Control*, pp. 656~658.
- (7) Bar-Shalom, Y., 1978, "Tracking Methods in a Multitarget Environment," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-23, pp. 618~626.
- (8) Bar-Shalom, Y. and Fortmann, T.E, 1988, *Tracking and Data Association*, Academic Press, New York, NY.
- (9) Caveney, D. and Hedrick, J.K, 2002, "Single versus Tandem Radar Sensor Target Tracking in the Adaptive Cruise Control Environment," *Proc. ACC 2002*, Anchorage, Alaska.
- (10) Moon, I., Lee, J., Min, S., Lee, G., Yi, K., 2004, "Collision Warning with Multi-target Tracking Algorithm," *2004 Spring Conference Proceedings of the Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. III, pp. 1535~1540.