

차량 군집주행을 위한 제어 네트워크의 변수 추정 및 제어

State Estimation and Control in a Network for Vehicle Platooning Control

최재원, 황태현, 김영호

(Jae Weon Choi, Tae Hyun Fang, and Young Ho Kim)

Abstract : In this paper, a platoon merging control system is considered as a remotely located system with state represented by a stochastic process. In the system, it is common to encounter situations where a single decision maker controls a large number of subsystems, and observation and control signals are sent over a communication channel with finite capacity and significant transmission delays. Unlike a classical estimation problem where the observation is a continuous process corrupted by additive noise, there is a constraint that the observation must be coded and transmitted over a digital communication channel with finite capacity. A recursive coder-estimator sequence is a state estimation scheme based on observations transmitted with finite communication capacity constraint. In this paper, we introduce a stochastic model for the lead vehicle in a platoon of vehicles in a lane considering the angle between the road surface and a horizontal plane as a stochastic process. In order to merge two platoons, the lead vehicle of the following platoon is controlled by a remote control station. Using the observation transmitted over communication channel, the remote control station designs the feedback controller. The simulation results show that the intervehicle spacings and the deviations from the desired intervehicle spacing are well regulated

Keywords : finitely recursive coder-estimator sequence, platoon merging control, remote control

I. 서론

피드백 제어시스템에서 제어기는 플랜트로부터 상태값을 피드백 받아 제어입력을 결정한다. 제어기와 플랜트가 충분히 떨어져 있다면 상호간에 통신을 통하여 상태값 피드백과 제어입력을 전송해야 한다. 현실적으로 통신 채널은 유한한 대역폭(bandwidth)을 가지고 있기 때문에 상태 관측값의 양자화(quantization) 수는 무한한 크기를 가질 수 없다. 또한 코드워드(codeword)의 길이가 길어질수록 전송시간이 길어지기 때문에 엔코딩(encoding)과 디코딩(decoding)에 의해 복원된 관측값의 정확성만 유지된다면 코드워드의 길이는 짧을수록 실시간 제어에 유리하다

전통적인 전송률 왜곡(rate-distortion) 이론[1]은 양자화를 실시할 데이터가 독립동일분포(independent identical distribution)하는 것으로 가정하고 있다. 그러나 동적 플랜트에서 측정된 값은 일반적으로 이러한 가정에 부합되지 않는다. 이와 같은 확률 동적 시스템의 측정치를 양자화, 엔코딩, 그리고 디코딩 과정을 통해 원격제어기에서 복원할 때, 상태값의 추정에 대한 문제가 최근에 활발히 연구되어 그 결과들이 발표되고 있다[2][3]. 특히, 참고문헌 [2]에서는 고정 길이 엔코딩(fixed length encoding)에 대한 코더 추정 시퀀스(coder-estimator sequence)를 제안하고 추정 오차의 크기가 유한함을 증명하였다.

군집주행(vehicle platooning)[4]은 미국의 PATH 연구

소에서 처음 제안된 시스템으로 하나의 집단에 속하는 두 대 이상의 차량이 서로간에 짧은 간격을 유지하면서 고속으로 주행하는 방식이다. 따라서 기존의 도로를 확장하지 않고도 차량의 흐름을 원활히 하여 도로의 차량 수용량을 현재보다 훨씬 높은 수준으로 증가시킬 수 있게 된다. 또한 운전자에게 쾌적하고 안전한 운행을 제공하고, 추종차량의 공기역학적인 마찰력의 감소로 인한 연료소비의 감소 및 공해배출의 감소 등과 같은 부가적인 효과도 거둘 수 있다.

군집(platoon)은 차선변경, 분리(split), 그리고 병합(merge) 등의 기동(manuevering)을 한다. 차선변경과 분리는 비교적 근거리 통신을 통하여 기동을 시작하고 완료하지만 병합은 원거리의 차량과의 통신을 필요로 한다[5]. 본 논문에서는 군집의 병합을 위한 자동주행 차량의 기동을 관제소(control station)를 통하여 원격으로 제어하는 방법에 관하여 고찰한다. 관제소에서는 차량의 상태정보를 유한한 대역폭을 가진 통신 채널을 통하여 전송받는다. 통신을 통한 신호의 시간 지연을 고려하지 않더라도 상태 관측값을 전송받은 관제소의 상태 추정은 일반적인 상태 추정 기법과는 다르다.

본 논문에서는 일반적으로 무시되어 왔던 도로 노면의 경사각을 확률적으로 모델링하여 4차의 운동 방정식을 구성하였고 이를 바탕으로 자동주행 차량의 상태를 추정하고 제어기를 설계하였다. 군집의 병합을 원하는 두 군집으로부터 모든 상태값에 대한 측정치를 전송받은 관제소는 코더 추정을 이용하여 각 상태값을 추정한다. 또한 관제소는 추정된 상태값을 이용하여 계산한 제어입력을 군집으로 전송한다. 두 개의 군집이 내부의 통신 네트워크가 구축된 하나의 완전한 군집을 이루도록 하는 준비 단계

접수일자 : 2000 5. 1., 수정완료 : 2000 6. 1

최재원 : 부산대학교 기계공학부, 기계기술 연구소

황태현 : 부산대학교 기계공학부

김영호 : 부산대학교 전기전자정보컴퓨터공학부

※ 본 논문은 정보통신연구진흥원의 대학 s/w 연구센터 지원사업으로 연구되었습니다. 또한 2000년 두뇌한국 21사업 핵심분야에 의하여 지원되었습니다.

로서 차량간의 간격이 목표 차간거리(target intervehicle spacing)를 추종하도록 하는 제어가 이루어진다. 본 논문에서는 이를 위하여 PID 제어 기법을 이용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 서론에 이어 II장에서는 네트워크를 통한 군집주행의 병합에서 다루고자 하는 문제를 기술하고, III장에서는 노면의 경사각을 고려한 차량의 운동을 모델링한다. 군집주행을 위한 제어에 대하여는 IV장에서 기술하고, V장에서는 네트워크에서의 변수 추정 알고리즘에 대해 서술한다. VI장에서는 네트워크에서의 추정값을 이용한 군집의 병합에 대한 시뮬레이션 결과를 고찰하고, 마지막으로 VII장에서 본 연구에 대한 결론을 맺는다.

II. 문제의 설정

군집주행의 가능한 기동(maneuver)은 차선변경, 분리(split), 병합(merge)이 있을 수 있다. 군집주행에서 기동은 차량 상호간의 통신을 통하여 기동 요구 및 허락과 같은 과정을 거쳐서 이루어진다[5]. 그러나 차선변경은 이웃 차선의 다른 차량과의 통신으로 그리고 분리는 군집내의 차량과의 통신을 통하여 이루어지는데 반해 군집의 병합은 비교적 원거리에 있는 차량과의 통신을 필요로 한다. 즉, 추종군집(following platoon)의 선도차량(lead vehicle)의 병합 요구에 선행군집(preceding platoon)의 선도차량이 허락 메시지를 송신함으로써 군집의 병합이 시작된다. 이때, 군집의 기존 병합 방법은 추종군집의 선도차량의 운전자에 의해 이루어진다. 이것은 엄밀한 의미의 자동 주행이 아니다.

본 논문에서는 군집의 병합을 군집 외부의 관제소에서 원격적으로 시행하는 시스템을 고려하며 이때의 상태추정 문제에 대해 고찰한다. 그림 1에 이러한 시스템 구성을 나타내었다. 추종군집의 선도차량이 관제소에 군집의 병합을 요청하면 관제소가 적절한 선행군집을 선택하여 추종군집 선도차량을 원격으로 운행하는 형식을 취한다. 추종군집과 목적지가 같고 거리가 가장 가까운 선행군집을 병합을 위해 적절한 군집으로 선택할 수 있는데 본 논문에서는 이러한 과정은 이미 처리되었다고 가정하고 추종군집의 선도차량에 대한 원격 제어에 초점을 맞춘다. 관제소는 선행군

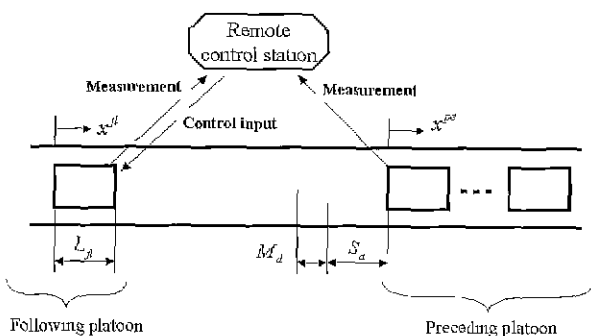


그림 1 원격제어에 의한 군집 병합 시스템.

Fig. 1. A remotely controlled platoon merging system.

집의 최후미 차량과 추종군집의 선도차량으로부터 수신한 상태 정보를 처리하여 추종군집의 선도차량에 제어 입력을 보낸다. 추종군집의 선도차량이 선행군집의 최후미 차량의 위치(x^{pc})에서 군집 회원 차량간의 안전거리(safety distance, S_d)에 군집의 병합을 위한 여유거리(margin distance, M_d)를 합한 거리만큼 떨어진 위치($x^{fc} - S_d - M_d$)에 도달하면 군집의 병합은 완료된 것으로 간주한다. 즉, $x^{fc} + L_f = x^{pc} - S_d - M_d$ 이면 군집의 병합은 완료된다 여기서 L_f 은 추종군집의 선도차량의 길이를 나타낸다.

III. 차량의 모델링

Sheikholeslam[4]은 차량의 위치, 속도, 그리고 가속도를 상태변수로 하여 차량의 운동을 모델링하였다. 그림 2는 군집주행 차량의 운동 모델을 나타낸다. 그림 2에서 x 는 도로상의 한 기준점에 대한 차량의 위치를 나타내고, m 은 차량의 질량을 나타낸다. θ 는 지면의 경사각을, 그리고 g 는 중력가속도를 각각 나타내며, ρ 는 공기밀도, S_c 는 차량의 단면적, C_d 는 차량의 마찰계수, 그리고 V_{wind} 는 바람의 속도를 나타낸다. 또한 d_m 은 차량의 기계적인 마찰력에 의한 감쇠력을 나타내며, τ 는 엔진의 시정수를 나타낸다. F_e 는 차량에 가해지는 엔진의 힘을 나타내고, u 와 a_r 은 엔진 입력과 차량에 대한 명령 가속도를 각각 나타낸다. F_a 는 공기에 의한 항력(air drag force)을 나타낸다. 명령 가속도 a_r 와 공기 항력 F_a 에 대한 운동 방정식은 각각 다음과 같다

$$\dot{a} = -\frac{a_r}{\tau} + \frac{u}{m\tau} \tag{1}$$

$$F_a = \frac{\rho S_c C_d}{2} (x + V_{wind})^2 \text{sgn}(x + V_{wind}) = \Omega(x + V_{wind}) \tag{2}$$

그림 2의 모델이 제어를 설계하기에 너무 복잡하기 때문에 Sheikholeslam은 지면은 수평이고($\theta=0$) 바람은 없다고($V_{wind}=0$) 가정함으로써 단순화하였다. 본 논문에서는 바람의 영향은 무시할 수 있다고 가정하지만 지면의 경사각은 수평이 아닌 확률 모델로써 고려하기로 한다.

노면의 경사각은 시간에 연관되어 있다. 예를 들어 100 km/h의 속도로 달리는 차량이 길이 100 m의 경사면을 주행한다면 3.6초 동안 영이 아닌 경사각이 지속된다. 따라서 경사각에 대한 자기상관함수(autocorrelation function)의 표현 모델을 다음과 같이 구성할 수 있다

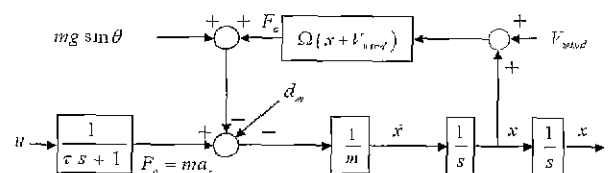


그림 2. 군집주행 차량의 운동 모델.

Fig. 2. A vehicle model in a platoon.

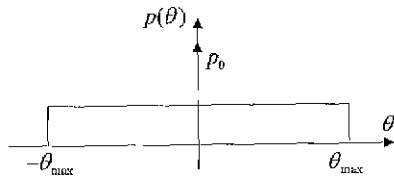


그림 3. 노면 경사각의 확률 밀도 모델.
Fig. 3. Probability density model for the angle between the road surface and a horizontal plane.

$$r(\xi) = E[\theta(t)\theta(t+\xi)] = \sigma_\theta^2 e^{-a|\xi|}, \quad a \geq 0 \quad (3)$$

여기서, σ_θ^2 는 경사각의 분산이며 a 는 경사각 시상수의 역수이다.

경사각의 분산은 그림 3을 이용하여 구할 수 있다. 차량은 노면이 수평인 도로에서 확률 p_0 ($p(0) = p_0$)로 주행하고 노면의 경사각은 $-\theta_{max}$ 와 θ_{max} 사이에서 $\theta \neq 0$ 일 때 확률 $(1-p_0)/2\theta_{max}$ 으로 균일 분포(uniform distribution)한다고 가정하면, 확률 밀도 함수를 이용하여 구한 경사각의 분산은 다음과 같게 된다.

$$\sigma_\theta^2 = E[(\theta - E[\theta])^2] = \frac{1}{3}(1-p_0)\theta_{max}^2 \quad (4)$$

경사각 $\theta(t)$ 는 백색화(whitening) 과정을 이용하여 백색잡음의 형태로 표현될 수 있다. $r(\xi)$ 를 Laplace 변환하면 다음과 같이 계산된다.

$$R(s) = \frac{-2a\sigma_\theta^2}{(s-a)(s+a)} = H_\theta(s)H_\theta(-s)W(s) \quad (5)$$

$$H_\theta(s) = \frac{1}{s+a} \quad (6)$$

$$W(s) = 2a\sigma_\theta^2 \quad (7)$$

여기서, $H_\theta(s)$ 는 백색화 변환 필터이고, $W(s)$ 는 백색잡음 $w(t)$ 의 Laplace 변환 항이다. 따라서 경사각에 대한 미분 방정식을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\dot{\theta}(t) = -a\theta(t) + w(t) \quad (8)$$

백색잡음 $w(t)$ 의 자기상관함수 $r_w(\xi)$ 는 다음을 만족한다.

$$r_w(\xi) = 2a\sigma_w^2 \delta(\xi) \quad (9)$$

여기서, $\delta(\cdot)$ 는 dirac delta 함수를 나타낸다.

바람의 영향은 없다고 가정하면 (1), (2), (8) 그리고 그림 2로부터 차량의 가속도에 대한 운동 방정식을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}^{(3)} = & -\frac{K_d}{cm} \dot{x}^2 - \frac{1}{\tau} \dot{x} + \frac{2K_d}{m} \dot{x}\ddot{x} - \frac{g}{\tau} \sin \theta \\ & - \alpha g \theta \cos \theta + \frac{u}{cm} - \frac{d_m}{cm} + gw \cos \theta \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, K_d 는 $\rho S_v C_d/2$ 를 나타낸다. 경사각이 충분히 작을 경우, $\sin \theta \approx \theta$ 그리고 $\cos \theta \approx 1$ 와 같은 선형화가 가능하다. 따라서 (8)과 (10)로부터 차량의 위치(x_1), 속도(x_2), 가속도(x_3), 그리고 경사각(x_4)에 대한 상태 방정식을 다음과 같이 구성할 수 있다

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{K_d}{cm} x_2^2 - \frac{1}{\tau} x_3 + \frac{2K_d}{m} x_2 x_3 - g\left(\frac{1}{\tau} + \alpha\right)x_4 \\ &+ \frac{u}{cm} - \frac{d_m}{cm} + gw \\ \dot{x}_4 &= -\alpha x_4 + w \end{aligned} \quad (11)$$

IV. 군집주행 제어

미국 캘리포니아 주의 법에 의하면 차량간의 거리는 16 km/h 증가할 때마다 그 차량의 길이만큼 증가한다. 이와 같이 결정되는 안전거리(safety distance)는 매우 보수적인 값을 가진다고 볼 수 있다. 그러나 자동화된 제어시스템과 우수한 성능의 센서를 이용하면 차량간의 안전거리를 이보다 상당히 줄일 수 있다. 군집주행에서 일반적으로 사용하는 군집 멤버 차량간의 안전거리 문제는 잘 알려져 있다 [6]. 본 논문에서는 기존의 안전거리 결정 방법을 바탕으로 군집 병합을 위한 원격 제어에서 요구되는 목표 차간거리 개념을 도입한다.

그림 4와 같이 N 대의 차량으로 구성된 임의의 군집을 고려해보자. L_j 는 j 번째 차량의 길이를 나타내고 Δ_j 는 선행차량의 후미로부터 추종차량의 선미와의 실제거리를 나타낸다. S_d 는 바람직한 안전거리를 나타내며 O_j 는 실제거리와 바람직한 안전거리간의 차이를 나타내는 거리 추종 오차이다. 선행차량과 추종차량은 동일한 운동방향을 가지는 것으로 가정한다.

추종차량은 선행차량이 갑자기 멈추었을 때 충돌을 피할 수 있는 충분한 안전거리를 유지하는 것이 필요하다. Ioannou[6]는 추종차량의 속도와 추종차량과 선행차량의 속도의 함수로써 다음과 같이 안전거리를 나타내었다.

$$S_d = \beta_1((x_2^j)^2 - (x_2^{j-1})^2) + \beta_2 x_2^j + \beta_3 \quad (12)$$

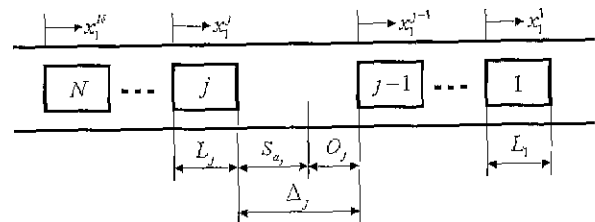


그림 4. 1번이 선도차량인 N 개의 차량으로 구성된 군집.

Fig. 4 A platoon of N vehicles with No. 1 being the lead vehicle.

여기서, β_3 는 안전여유를 위해 추가된 거리이며, 나머지 항은 선행차량이 급정거하였을 때 충돌을 회피할 수 있는 최소한의 이탈거리를 나타낸다.

차량간의 실제거리는 $A_j = x_1^{j-1} - x_1^j - L$, 이므로 거리 추종 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$O_j = x_1^{j-1} - x_1^j - L - \beta_1((x_2^j)^2 - (x_2^{j-1})^2) - \beta_2 x_2^j - \beta_3 \quad (13)$$

원격 제어에 의한 군집의 병합의 완료는 II장에서 언급한 바와 같이 선행군집의 최후미 차량과 추종군집의 선도 차량간의 거리가 군집주행의 순행을 위한 안전거리에 군집의 병합을 위한 여유거리를 합한 거리가 실제거리가 되었을 때이다. 이와 같은 여유거리는 군집의 병합이 완료된 후, 하나의 군집으로서의 체계가 확립될 때까지 차량간의 충돌을 방지하기 위하여 필요하다. 원격 제어에서 추종군집의 선도차량과 선행군집의 최후미 차량사이의 목표 차간거리는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S_t = S_d + M_d \quad (14)$$

그림 1에서와 같이 추종군집의 선도차량의 위치를 x_1^f 로 나타내고 선행군집의 최후미 차량의 위치를 x_1^{pe} 로 나타낸다면 목표 차간거리와 거리 추종 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_t = \beta_1((x_2^f)^2 - (x_2^{pe})^2) + \beta_2 x_2^f + \beta_3 + M_d \quad (15)$$

$$O = x_1^{pe} - x_1^f - L_f - \beta_1((x_2^f)^2 - (x_2^{pe})^2) - \beta_2 x_2^f - \beta_3 - M_d \quad (16)$$

PID 제어를 이용한 제어입력은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$u = K_p(u_r - x_1^f) + K_i \int (u_r - x_1^f) dt + K_d(\dot{u}_r - \dot{x}_1^f) \quad (17)$$

여기서, u_r 은 차량의 위치에 대한 기준입력(reference input)이며 다음과 같이 결정된다

$$u_r = x_1^{pe} - S_t - L_f \quad (18)$$

V. 네트워크에서의 변수 추정

차량 관제 시스템에서 센서에 의해 수신된 측정치는 통신 채널을 통하여 전송된다. 이러한 통신 채널은 현실적으로 유한한 대역폭을 가지며 심각한 시간 지연을 가지고 있다. Wong과 Brockett은 이러한 조건에서 상태 추정에 사용되는 코더 추정 시퀀스(coder-estimator sequence)[2]를 제안하고 추정 오차가 안정함을 증명하였다.

유한한 대역폭을 가진 통신 채널에서 전송된 측정치를 이용하여 상태값을 추정하는 것은 고전적인 상태 추정 문제와는 다르다. 고전적인 상태 추정 문제는 측정치를 첨가된 잡음을 포함하는 연속적인 확률 프로세스를 취급하는 반면에 전송된 측정치를 이용한 추정은 양자화 과정에 의

해 엔코딩(encoding)되고 수신지에서 디코딩(decoding)된 측정치를 이용하게 된다.

전송을 왜곡 이론과 같은 고전적인 정보 이론은 원본 데이터와 양자화된 표현 사이의 왜곡률이 최소가 되도록 엔코딩하고 디코딩하는 방법을 고안하는 것이었다. 이때 원본 데이터는 독립 동일 분포(independent identical distribution)를 가지는 것으로 가정하였으며 코딩과 디코딩은 비순환적(nonrecursive)으로 이루어졌다. 그러나 코더 추정 시퀀스는 동적 시스템의 상태값에 대한 코딩과 디코딩을 순환적(recursive)으로 구현하였다.

(11)을 수치해석적으로 이산화한 식과 측정 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{i+1} = f(x_i, u_i, d_{m,i}, \Delta t) + Gw_i \quad (19)$$

$$y_{i+1} = x_{i+1} + v_{i+1} \quad (20)$$

여기서, x_0 의 확률 밀도 함수는 알려져 있다고 가정한다. w_i 와 v_i 는 각각 공정잡음과 측정잡음이며 각각의 확률 밀도 함수도 알려져 있다고 가정한다. 측정된 값(y_i)은 k_i 로 코딩되고, 채널을 통하여 수신된 코드워드(codeword)는 c_i 로 나타낸다. Δt 는 샘플링 주기를 나타낸다.

확률 밀도 함수가 값을 가지는 변수값을 포함하는 가장 작은 폐집합을 지원구간(support interval)이라고 하고 x_0 , w_i , 그리고 v_i 의 확률 밀도 함수에 대한 지원구간을 각각 $[-X_0 \ X_0]$, $[-W \ W]$, 그리고 $[-V \ V]$ 으로 둔다. n bit 코드워드(codeword)를 사용하고 식 (11)에서와 같이 4개의 상태 변수를 전송하면, 샘플링 주기는 $4n\delta$ 가 된다. 여기서 δ 는 1bit를 전송하는 데 걸리는 시간을 나타낸다. 이때 코더 추정 시퀀스는 다음과 같은 알고리즘으로 표현될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \Phi_0 \\ \Psi_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -X_0 \\ X_0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$U_i = \max_{x \in [\Phi_i, \Psi_i]} f(x, u_i, d_{m,i}, 4n\delta) + GW + V \quad (22)$$

$$D_i = \min_{x \in [\Phi_i, \Psi_i]} f(x, u_i, d_{m,i}, 4n\delta) - GW - V \quad (23)$$

$$M_j = \frac{j}{2^n} (U_i - D_i), \quad \text{for } j = 1, \dots, 2^n \quad (24)$$

D_i 와 M_j 를 이용하여 차량에서는 다음과 같이 각각의 상태 변수를 엔코딩한다.

$$\text{if } D_{i,k} + M_{j-1,k} \leq y_{i,k} < D_{i,k} + M_{j,k} \\ h_{i,k}(y_{i,k}) = j \quad (25)$$

여기서, 아래첨자 k 는 벡터의 k 번째 요소를 나타내는 색인이다. 관제소에서 수신된 코드워드 c_i 는 다음과 같이 디코딩된다.

$$\hat{x}_{i,k}(c_{i,k}=j) = D_{i,k} + M_{j-\frac{1}{2},k} \quad (26)$$

$$\begin{pmatrix} \Phi_{i-1,k}(c_{i,k}=j) \\ \Psi_{i+1,k}(c_{i,k}=j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \max(D_{i,k} + M_{j-1,k} - V_k, D_{i,k} + V_k) \\ \min(D_{i,k} + M_{j,k} + V_k, U_{i,k} - V_k) \end{pmatrix} \quad (27)$$

(27)은 추정값 \hat{x} 에 대한 지원구간을 갱신시키는 것을 나타낸다.

1차의 선형 연속 시간 시스템에서 n bit 코드워드를 사용하는 코더 추정 시퀀스의 추정 오차는 다음의 조건을 만족하면 안정하다[2].

$$\lambda \delta \log_2 e < 1 \quad (28)$$

여기서, λ 는 1차의 시스템을 나타내며 선형 다변수 시스템에서는 시스템 행렬의 고유값으로 대치될 수 있다. 이때, 다음의 부등식이 성립한다.

$$T_{i+1} \leq (e^{\lambda \delta} T_i + 2W + 2V) / 2^n + 2V \quad (29)$$

여기서, T_i 는 i 번째까지 코드워드의 조건부 확률 밀도 함수에 대한 지원구간 중에서 길이가 가장 긴 지원구간의 길이를 나타낸다. W 와 V 는 1차 시스템에서 정의된 공정잡음과 측정잡음의 지원구간의 상한을 나타낸다. (28)과 (29)에 대한 자세한 증명은 참고문헌 [2]를 참조하기 바란다.

군집의 병합을 위해서 상태 측정치를 전송한 후 제어 입력이 되돌아올 때까지 다음 측정치 전송을 기다리는 원격 제어 방식(stop-and-wait scheme)을 사용한다고 가정하자. (11)을 선형 연속 시간 시스템으로 근사화했을 때의 고유값을 λ 로 나타내고, 데이터 처리에 의한 시간지연은 없다고 가정한다면 추정값 \hat{x}_k 의 추정 오차에 대한 안정조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$4\lambda_k(\delta_1 + \delta_2) \log_2 e < 1 \quad (30)$$

여기서, δ_1 과 δ_2 는 각각 차량에서 관제소로 1bit를 전송하는 데 걸리는 시간과 반대 방향으로 1bit를 전송하는 걸리는 시간을 나타낸다.

차량의 원격제어를 위한 무선 통신 방식으로 ALOHA, CSMA(Carrier Sense Multiple Access), 또는 TDMA(Time Division Multiple Access)와 같은 다중 액세스 프로토콜(multiple access protocol)을 사용한다면 δ 는 약 8.2×10^{-6} 이 되므로 전송지연시간을 고려한다고 하더라도 (30)의 좌변 항은 충분히 작다고 볼 수 있다. 전송지연이 없다는 가정 하에서 다중 액세스 프로토콜을 사용할 때, δ_1 과 δ_2 가 같다면 코더 추정 시퀀스의 추정 오차가 안정하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\lambda_k < \frac{1}{8\delta \log_2 e} \cong 1.05 \times 10^4 \quad (31)$$

차량의 운동에서 현실적으로 λ_k 가 (31)을 만족하지 않는 것은 어렵다. 따라서 추정 오차는 안정한 것으로 가정할

수 있다.

i 번째까지 코드워드의 조건부 추정값의 분산은 T_i^2 에 의해 제한된다. 본 논문에서는 추정 오차가 Gaussian 분포를 가진다는 가정 하에서 지원구간이 추정값을 포함하고 있을 확률이 0.997이 되도록 추정 오차의 분산을 다음과 같이 정의한다.

$$E[(\hat{x}_{i,k} - x_{i,k})^2] = (T_{i,k}/6)^2 \quad (32)$$

이와 같이 정의된 분산은 해석적으로 구해진 결과가 아니므로 시뮬레이션을 통하여 수치적인 값과 비교하기로 한다.

최종적으로 (15)와 (17)에 (26)에서 구한 상태 추정값을 대입함으로써 제어입력을 결정할 수 있다.

VI. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 장에서는 군집의 병합을 원격제어를 통하여 구현하는 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 고찰한다

차량의 진행방향은 일정하고 엔진의 시정수 τ 와 기계적인 항력 d_m 은 각각 0.25초와 4 kg/s^2 이며 차량의 주행속도에 대해 일정하다고 가정한다. 차량의 질량은 $m=2000 \text{ kg}$ 이고 공기항력계수는 $K_d=0.51 \text{ kg/m}$ 이다. 추종군집의 선도차량의 길이는 $L=10 \text{ m}$ 로 설정하였다. 안전거리 결정을 위한 안전거리계수는 각각 $\beta_1=0.0001$, $\beta_2=0.27$ 및 $\beta_3=0.08$ 로 설정하였고 목표 차간거리 결정을 위한 여유거리는 $M_d=30 \text{ m}$ 로 설정하였다.

노면의 최대 경사각과 경사각이 0이 될 확률을 각각 $\theta_{\max}=6^\circ$ 와 $b_0=0.6$ 으로 설정하였고 $\alpha=1/20$ 으로 설정하였다.

차량과 관제소는 데이터 전송을 위하여 4bit 코드워드를 사용한다. 각 상태변수에 대한 측정치는 직접 측정가능하며 측정잡음은 영평균 Gaussian의 백색잡음으로 가정하였고 측정잡음의 표준편차는 위치, 속도, 가속도, 그리고 경사각에 대하여 각각 3m , 1m/s , 1.5m/s^2 , 그리고 0.2° 로 설정하였다. 지원구간은 각 표준편차 σ 에 대하여 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 으로 설정하였다.

관제소에 의해 차량의 병합을 시작할 때, 추종군집의 선도차량과 선행군집의 최후미 차량은 2000m 떨어져 있으며 선행군집은 100 km/h 의 속도를 유지하고 있다.

PID 제어를 위한 제어게인은 랜덤잡음이 없다고 가정된 상황에서 시행착오법에 의해 각각 $K_b=11$, $K_v=1.24 \times 10^{-4}$, 그리고 $K_d=5$ 으로 결정하였다.

그림 5는 추종군집 선도차량의 시간에 대한 속도 변화를 나타낸다. 군집의 병합은 시뮬레이션이 시작되고 10초 이후부터 시행되기 때문에 속도가 10초 이후부터 증가하는 것을 볼 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 가속도의 최대값을 5 m/s^2 으로 제한하였지만 저크(jerk)의 최대값을 제한하지 않았기 때문에 속도가 비교적 급속히 증가하는 것을 알 수 있다. 100초 이후부터는 속도의 감소가 거의 없는 데 이것은 추종군집의 선행차량이 목표 차간거리 근방에

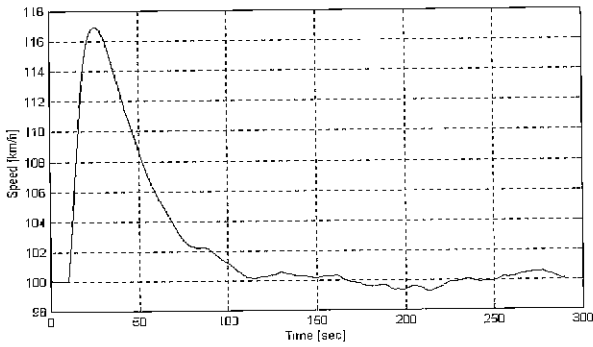


그림 5. 군집 병합 제어에서 추종군집 선도차량의 속도.

Fig. 5. Speed of the lead vehicle in the following platoon for platoon merging control.

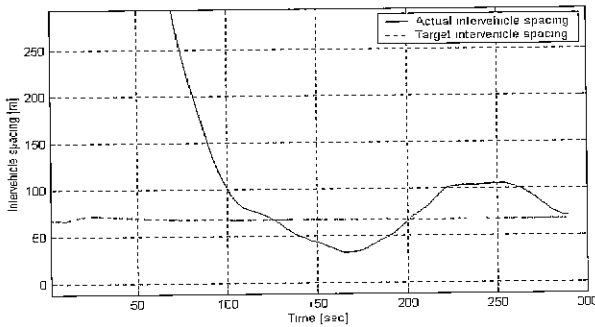


그림 6. 추종군집의 선도차량과 선행군집의 최후미 차량간의 거리 ($x_1^{le} - x_1^{fl} - L_{fl}$).

Fig. 6. Distance between the lead vehicle of the following platoon and the end vehicle of the preceding platoon.

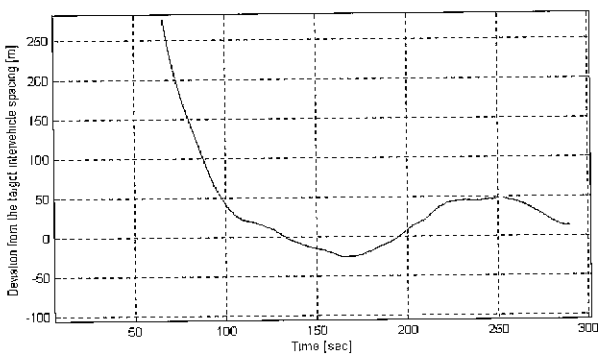


그림 7. 목표 차간거리와의 오차.

Fig. 7. The deviation from the target intervehicle spacing.

도달하였기 때문이다.

그림 6은 추종군집의 선도차량과 선행군집의 최후미 차량간의 거리를 나타낸다. 실선은 차량간의 실제거리

($x_1^{le} - x_1^{fl} - L_{fl}$)를 나타내며 점선은 목표 차간거리를 나타낸다. 그림 5에서 예상했던 것과 같이 차량간의 거리는 100초 이후에 목표 차간거리 근방에 도달하는 것을 알 수 있다. 차량간의 거리가 0이하로 떨어지지 않으므로 차량의 충돌은 발생하지 않고 성공적으로 제어가 시행되고 있다는 것을 알 수 있다. 100초 이후의 목표 차간거리의 평균이 67.1 m로 나타났으며 차량간의 최저 거리는 32.04 m로 나타났다. 그림 7은 차량간의 거리가 가지는 목표 차간거리에 대한 오차를 도시한 것이다. 거리오차는 0을 중심으로 진동하는 형태를 보여준다. 이때, 100초 이후의 최대 오차는 48.26 m로 나타났다.

이와 같이 두 군집이 목표 차간거리를 유지하는 동안 군집주행을 위한 차량간의 근거리 통신을 구축한다면 하나의 완전한 군집을 이룰 수 있다.

표 1은 (31)에서 제안한 코더 추정 시퀀스의 추정 오차의 분산에 대한 분석 결과를 보여준다. 차량의 위치 추정 값에 대한 분산을 제외하면 본 논문에서 제안한 분산이 실제 분산과 거의 일치함을 알 수 있다.

표 1. 코더 추정 시퀀스의 추정 오차 분산

Table 1. Variance of estimation error in coder-estimator sequence.

	$(\sum_i T_{i,k}/6I)^2$	$\sum_i (\hat{x}_{i,k} - x_{i,k})^2/I$
$k=1$	6.9967	9.0589
$k=2$	1.0686	1.0063
$k=3$	2.4938	2.2791
$k=4$	0.0428	0.0403

VI. 결론

본 논문에서는 군집의 병합을 관제소를 통한 원격제어의 관점에서 고찰하였다. 피드백 제어를 위해 차량의 위치를 관제소에 전송하는데, 측정잡음뿐만 아니라 공정잡음까지 포함하는 측정치를 엔코딩하고 디코딩하기 위해 코더 추정 시퀀스를 사용하였다. 본 논문에서는 노면의 경사각에 의한 차량의 가속 또는 감속 효과를 고려하기 위해 노면의 경사각을 차량의 운동 모델링에 추가함으로써 차량의 운동을 확률 시스템으로 모델링하였다. 이러한 운동 방정식에서 추정된 상태값을 이용하여 차량간의 목표 차간거리를 결정하였으며 PID 제어를 구현하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제시된 방법의 타당성을 확인하였다.

참고문헌

[1] T. Berger, *Rate Distortion Theory*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1971.
 [2] W. S. Wong, and R. W. Brockett, "Systems with finite communication bandwidth constraints-part I: State estimation problems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 9, pp. 1294-1299, September, 1997.
 [3] N. G. Dokuchaev, and A. V. Savkin, "Recursive state

estimation via limited capacity communication channels," *Proc. of the 38th Conference on Decision and Control*, pp. 4929-4932. December, 1999.

[4] S. Sheikholeslam, and C. A. Desoer, *Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles: III: Nonlinear Model*, PATH Research Report, UCB-ITS-PRR-90-1, April, 1990.

[5] S. L. Streisand, and J. Walrand, *A Communication Architecture for IVHS*, PATH Research Report, UCB-ITS-PRR- 92-10, December, 1992.

[6] P. A. Ioannou and C. C. Chien. "Autonomous intelligent cruise control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 42, no. 4, pp. 657-672, November, 1993.

최재원

제어·자동화·시스템공학논문지 제5권, 제7호, 참조.



김영호

1982년 서울대 컴퓨터공학과 졸업. 동대학원 석사(1984), 동대학 박사(1991). 1989년~현재 부산대학교 전자전기정보공학부 교수. 관심분야는 High-tech Information System, Time Synchronization, Parallel Processing, Micro Robot Control.



황태현

1994년 부산대 기계공학과 졸업. 부산대 기계공학부 석사(1999). 1999년~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 표적 추적 필터 설계, 혼잡 제어, 지능형 교통 시스템(ITS).