

군집 선행차의 원격제어를 위한 통신 시퀀스 결정

Optimal Communication Sequence for Remote Control of Lead Vehicle

황 태 현

(부산대학교, 박사과정)

최 재 원

(부산대학교, 부교수)

목 차

I. 서론

II. 시스템 정의

III. 선도차 제어

IV. 최적 시퀀스 결정

V. 결론

I. 서론

AVHS(Advanced Vehicle and Highway System)(Varaiya, 1993)는 컴퓨터, 전자제어, 센서 등의 첨단 시스템을 이용하여 차량의 주행 안전 거리를 현저히 줄임으로써 도로상의 단위 시간당 주행할 수 있는 차량의 수를 증가시키는 것을 목표로 한다. 차량 충돌을 방지하면서 차량 사이의 간격을 현저히 줄일 수 있는 방안으로써 군집주행(platooning)이 매우 효과적인 것으로 알려져 있다(Sheikholeslam and Desoer, 1992; 1993). 하지만 군집주행은 10대 내외의 차량들이 집단을 이루는 군집에 대해서만 적용될 수 있다. 기존의 군집주행 장점을 그대로 유지하면서 도로 상의 전체 차량을 직접적으로 관리할 수 있는 시스템을 개발한다면 효과적인 AVHS를 구현할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 본 연구에서는 군집(platoon)의 선두에서 군집을 이끄는 선도차량(lead vehicle)을 원격지에 소재한 관제소(control station)에서 원격제어(remote control) 하는 방법에 대해 기술한다.

도로상의 차량은 속도의 변화가 없는 순항(cruise)과 가속을 가지는 기동 운동을 한다(Godbole and Lygeros, 1994; Huang 등, 2000). 군집의 병합(merge), 분리(split), 차선변경(lane change) 등과 같은 기동은 순항에 비해 급속한 제어입력의 변화를 필요로 한다. 또한 관제소는 각각의 차량에 필요한 서로 다른 제어입력을 송신하여야 하기 때문에, 통신 시스템이 가지는 대역폭이 이를 충분히 지원하지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 그러나 도로상의 모든 차량들에 기동이 발생하는 것은 아니므로, 급격한 제어입력의 변화

가 발생하는 차량에 통신 자원을 보다 많이 할당함으로써 한정된 대역폭 내에서 효과적으로 전체 차량을 제어하는 시스템을 구성할 수 있다.

최근에 통신채널을 할당하는 문제가 활발히 연구되고 있다(Rehinder and Sanfridson, 2000; Lincoln and Rantzer, 2001). 본 연구에서는 차량의 효율적인 통행을 위한 원격제어 시스템의 구성을 목표로 두고 차량과 관제소간의 통신 채널의 할당을 위하여 통신 시퀀스를 결정하는 문제를 조사한다. 최적의 시퀀스는 최소 오차의 관점에서 시뮬레이션을 통하여 결정된다.

II. 시스템 정의

차량의 운동은 다음과 같은 3차의 비선형 미분 방정식으로 표현된다(Sheikholeslam and Desoer, 1993).

$$x_i^{(3)} = b_i(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) + a_i(\dot{x}_i)w_i \quad (1)$$

$$a_i(\dot{x}_i) = \frac{1}{m_i\tau_i(\dot{x}_i)} \quad (2)$$

$$b_i(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) = -\frac{2K_{d_i}}{m_i} \dot{x}_i \ddot{x}_i - \frac{1}{\tau_i(\dot{x}_i)} \times \left[\ddot{x}_i + \frac{K_{d_i}}{m_i} \dot{x}_i^2 + \frac{d_{m_i}}{m_i} \right] \quad (3)$$

여기서, 아래첨자 i 는 도로상 i 번째 군집의 선도차량을 나타내고 x_i 는 임의의 고정된 기준점에 대한 차량의 위치를 나타낸다. m_i 는 차량의 질량, τ_i 는 엔진의 시상수(time constant)를, w_i 는 엔진입력을, K_{d_i} 는 공기항력 계수(aerodynamic drag coefficient)를, 그리고 d_{m_i} 는 기계적 항력(mechanical drag)을 각각 나타낸다.

본 논문에서는 차량의 종방향 제어(longitudinal control)만을 고려하기로 한다. 또한 시스템의 단순화를 위해서 피드백 제어에 이용되는 전체 상태값이 직접적으로 측정가능하고, 식 (3)의 시스템 파라미터들은 알려져 있다고 가정한다.

특정한 비선형 시스템에서 피드백 제어입력을 적절히 선정하면 선형의 페루프 시스템을 구성할 수 있다. 이것은 피드백 선형화(feedback linearization) 기법으로 알려져 있다(Isidori, 1989). 다음과 같은 제어입력을 선정한다면 선형화된 시스템을 구할 수 있다.

$$w_i = \frac{1}{a(x_i)} [-b(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) + u_i] \quad (4)$$

결과적으로 구해진 선형화된 시스템은 다음과 같으며, 차량의 제어를 위해서는 선형 시스템에서 입력 u_i 를 적절히 선정하기만 하면 된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ \ddot{x}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ \ddot{x}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i \quad (5)$$

III. 선도차 제어

차량의 위치와 속도에 대한 원하는 값과의 차이를 나타내기 위해 아래와 같이 두 개의 변수를 정의한다.

$$e_i = x_{i-1} - x_i - L_{i-1} - (\lambda_v \dot{x}_i + \lambda_p) \quad (6)$$

$$v_i = \frac{100(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i)}{\dot{x}_i} \quad (7)$$

여기서, L_{i-1} 은 $i-1$ 번째 군집의 길이를 나타낸다. λ_v 는 i 번째 군집의 선도차량이 바람직한 군집간 거리를 이동하는데 걸리는 시간이 되도록 선정하고, λ_p 는 이때에 추가적으로 주어지는 여유거리이다.

차량의 스트링 안정성(string stability)을 보장하기 위해서 단일 제어를 사용하는 것은 부적절한 것으로 알려져 있다(Godbole and Lygeros, 1994; Huang et al, 2000). e_i 와 v_i 의 값의 크기가 작다는 가정하에 설계된 제어기는 e_i 와 v_i 가 큰 값을 가지는 경우에는 시스템 안정화를 위해서 매우 큰 가속 또는 감속을 필요로 한다. 이러한 큰 입력이 엔진의 최대 출력을 초과할 수 있다. e_i 와 v_i 에 값에 따라서 4개의 영역으로 구분하여 각각에 대한 제어를 설계하고, 각 제어기로부터 산출된 4개의 제어입력을 하나로 통합하는 방법이 제안되었다. 각 영역별 제어기는 다음과 같이 정리할 수 있다(Godbole and Lygeros, 1994).

영역 1: $e_i < 0, v_i \geq 0$

$$(-\lambda_p \leq e_i(0) < 0)$$

$$u_{i,1} = c_i \int \hat{e}_i dt + c_p \hat{e}_i + c_v \dot{\hat{e}}_i + k_{11}(\ddot{x}_i - \ddot{x}_i(0)) + k_{12}(\dot{x}_i - \dot{x}_i(0)) \quad (8)$$

$$\hat{e}_i(t) = \begin{cases} e_i & \text{for } t \geq e_i(0)/\eta_p \\ e_i - e_i(0) - \eta_p t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$(e_i(0) < -\lambda_p)$$

$$u_{i,1} = c_i \int \hat{e}_i dt + \hat{c}_p \hat{e}_i + c_v \dot{\hat{e}}_i + \hat{k}_{11}(\ddot{x}_i - \ddot{x}_i(0)) + \hat{k}_{12}(\dot{x}_i - \dot{x}_i(0)) \quad (10)$$

$$\hat{e}_i = \begin{cases} e_i - \gamma_v \dot{x}_i & \text{for } t \geq \lambda_p/\eta_p \\ e_i - \eta_p t + \lambda_p & \text{for } t \geq \frac{\lambda_p + e_i(0)}{\dot{x}_i(0)\eta_v} \\ e_i & \text{for } t \geq \frac{\lambda_p + e_i(0)}{\dot{x}_i(0)\eta_v} \\ & \text{and } t \geq \lambda_p/\eta_p \\ e_i - \eta_p t + \lambda_p - \gamma_v \dot{x}_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$\gamma_v(0) = (\lambda_p + e_i(0))/\dot{x}_i(0) \quad (12)$$

$$\dot{\gamma}_v = -\eta_v \operatorname{sgn}(\gamma_v) \quad (13)$$

$$\hat{c}_p = c_p - \gamma_v c_i \quad (14)$$

$$\hat{k}_{11} = k_{11} + \gamma_v c_v \quad (15)$$

$$\hat{k}_{12} = k_{12} + \gamma_v(c_p - \lambda_v c_i - \gamma_v c_i) \quad (16)$$

영역 2: $e_i > 0, v_i > 0$

$$u_{i,2} = k_{21} \ddot{x}_i + k_{22}(\dot{x}_i - \dot{x}_i(0^-)) + k_{23}(x_i - x_i(0^-) - \int \dot{x}_i(0^-) dt) \quad (17)$$

영역 3: $e_i < 0, v_i < 0$

$$u_{i,3} = k_{31} \ddot{x}_i + k_{32}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - k_{33} e_i \quad (18)$$

영역 4: 센서 탐지 영역 내에 차량 부재

$$u_{i,4} = k_{41} \ddot{x}_i + k_{42}(\dot{x}_i - \dot{x}_d) + k_{43}(x_i - x_d) \quad (19)$$

여기서, x_d 와 \dot{x}_d 는 링크 레이어에서 공급되는 차량의 바람직한 차간거리와 속도를 각각 나타낸다.

차량의 순행을 위한 제어입력은 4개의 영역에서 구해진 입력을 다음과 같이 통합함으로써 산출된다.

$$u_{i,c} = \sum_{j=1}^4 g_j u_{i,j}, \quad \text{for } \sum_j g_j = 1 \quad (20)$$

차량의 병합(merge)과 분리(split)를 위한 제어입력은 다음과 같이 계산된다.

$$u_{i,m} = x_d^{(3)} + k_{51}(\ddot{x}_i - \ddot{x}_d) + k_{52}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1} + \dot{x}_d) + k_{53}(x_i - x_{i-1} - L_{i-1} + x_d) \quad (21)$$

여기서, x_d 는 미리 계산된 차량의 바람직한 기동 궤적을 나타낸다. 이것은 병합을 시도하는 선행군집과의 거리와 차량에서 허용되는 저크와 가속의 범위를 바탕으로 산출된다. 자세한 내용은 Godbole 과 Lygeros(1994)의 결과를 참조하기 바란다.

IV. 최적 시퀀스 결정

도로상의 일정 구간에서 주행하고 있는 N 개의 군집을 고려해 보자. 관제소가 N 개의 군집의 선도차를 원격 제어할 때, 주어진 통신 자원의 한계로 인하여 관제소는 한번의 샘플링 시간에 하나의 선도차에 대한 제어입력만을 갱신시킬 수 있다고 가정하자. 이때, 차량의 제어입력이 갱신되는 순서는 주기적인 통신 시퀀스(commun-ication sequence)를 통하여 지정되며 다음과 같이 정의된다(Rehbinder and Sanfridson, 2000).

$$S_p = \{s = s_1 s_2 \dots | s_k = s_{k+p} \forall k \geq 1\} \quad (22)$$

$$s_k = i, \text{ if vehicle } i \text{ is updated at } t = kT \quad (23)$$

시간 $t = kT$ 에서 i 번째 차량에 가해지는 입력은 다음과 같이 정리 될 수 있다.

$$\bar{u}_{i,k} = \sigma_i(s_k) u_{i,k} + \sigma_i^*(s_k) \xi_{i,k} \quad (24)$$

$$\sigma_i(j) = \begin{cases} 1, & j = i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

여기서, $\sigma_i^*(s_k) = 1 - \sigma_i(s_k)$ 이고 $\xi_{i,k}$ 는 가장 최근에 갱신된 제어입력을 이전 시간에서 가져오기 위해서 도입된 추가적인 변수를 나타내며 다음 식을 만족한다.

$$\xi_{i,k} = \sigma_i(s_{k-1}) u_{i,k-1} + \sigma_i^*(s_{k-1}) \xi_{i,k-1} \quad (26)$$

$$\xi_{i,0} = 0 \quad (27)$$

(26)과 (27)에 의하여 $\xi_{i,k}$ 의 해는 다음과 같이 구해진다.

$$\xi_{i,k} = \sum_{l=1}^k \left[\sigma_i(s_{k-l}) \prod_{m=1}^{l-1} \sigma_i^*(s_{k-m}) \right] u_{i,k-l} \quad (28)$$

$$= U_{i,k-1} \Sigma_{i,k-1}$$

$$U_{i,k-1} = [u_{i,k-1} \ u_{i,k-2} \ \dots \ u_{i,1}] \quad (29)$$

$$\Sigma_{i,k-1} = \begin{bmatrix} \sigma_i(s_{k-1}) \\ \sigma_i^*(s_{k-1}) \sigma_i(s_{k-2}) \\ \sigma_i^*(s_{k-1}) \sigma_i^*(s_{k-2}) \sigma_i(s_{k-3}) \\ \vdots \\ \sigma_i^*(s_{k-1}) \dots \sigma_i^*(s_2) \sigma_i(s_1) \end{bmatrix} \quad (30)$$

(5)를 이산화한 식에 입력 (23)을 대입하면, 다음과 같은 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i,k+1} &= A \mathbf{x}_{i,k} + B u_{i,k} \sigma_i(s_k) \\ &\quad + B \xi_{i,k} \sigma_i^*(s_k) \\ &= A \mathbf{x}_{i,k} + [B u_{i,k} \ BU_{i,k-1}] \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \sigma_i(s_k) \\ \Sigma_{i,k-1} \sigma_i^*(s_k) \end{bmatrix} \\ &= A \mathbf{x}_{i,k} + B U_{i,k} \Sigma_{i,k} \end{aligned} \quad (31)$$

여기서, $\mathbf{x}_{i,k} = [x_{i,k} \ \dot{x}_{i,k} \ \ddot{x}_{i,k}]^T$ 이다.

N 개의 군집에서 전체 선도차에 대한 시스템을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = A_a \mathbf{x}_k + B_a U_k \Sigma_k \quad (32)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = [\mathbf{x}_{1,k+1}^T \ \dots \ \mathbf{x}_{N,k+1}^T]^T \in R^{3 \cdot N \times 1} \quad (33)$$

$$A_a = \begin{bmatrix} A & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & A \end{bmatrix} \in R^{3 \cdot N \times 3 \cdot N} \quad (34)$$

$$B_a = \begin{bmatrix} B & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & B \end{bmatrix} \in R^{3N \times N} \quad (35)$$

$$U_k = \begin{bmatrix} U_{1,k} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & U_{N,k} \end{bmatrix} \in R^{N \times kN} \quad (36)$$

$$\Sigma_k = [\Sigma_{1,k}^T \ \Sigma_{2,k}^T \ \dots \ \Sigma_{N,k}^T]^T \in R^{kN \times 1} \quad (37)$$

Σ_k 는 시간 k 에서 각 선도차량에 주어지는 엔진입력을 결정하는 시퀀스 입력이라고 할 수 있으며, 최적의 Σ_p 를 결정하면 최적의 통신 시퀀스를 결정할 수 있다.

대역폭 제한이 없는 환경하에서의 차량 상태값은 위치 n 을 이용하여 나타내기로 한다. 이때, N 대의 차량에 대한 통신 시퀀스가 적용된 상태값과의 차이는 다음과 같다.

$$V_k(\Sigma_k) = \sum_{i=1}^N | \mathbf{x}_{i,k}^n - \mathbf{x}_{i,k} | \quad (38)$$

차량이 기동하는 시간은 허용되는 가속 및 저크에 의해서 결정되며 샘플링 주기 T 에 p 를 곱한 값보다 크다. 따라서 차량의 기동이 $k=1$ 에서 시작하여 $k=m$ 에서 중지한다고 하면 정수 l 에 대하여 $(l-1) \cdot p < m \leq l \cdot p$ 를 만족하는 $l \cdot p$ 가 존재한다. (38)을 이용하여 최적 시퀀스 선정을 위한 가격함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V(\Sigma_{l,p}) = \left(\sum_{k=1}^{l \cdot p} V_k \right)^T Q \left(\sum_{k=1}^{l \cdot p} V_k \right) \quad (39)$$

여기서, Q 는 가중행렬이며 차량의 안전주행을 위해서는 위치 차이에 가중을 두어야 할 필요가 있다.

문제를 단순화시키기 위해 한 대에 차량에 대해서만 균일하지 않은 입력 갱신이 이루어진다고 가정한다. 일반적인 차량간 통신의 프로토콜(protocol)에서 한 대의 차량이 기동을 완료할 때까지는 다른 차량은 기동을 시작하지 않으므로 이러한 가정은 타당할 수 있다. 결론적으로 최적의 시퀀스를 결정하는 문제는 주기적인 시퀀스의 길이 p 를 결정하는 문제로 축소될 수 있다.

p 는 $p \geq N$ 를 만족한다. 이것은 통신 시퀀스의 주기 동안에 각 차량에 적어도 한번은 입력 갱신이 이루어져야 한다는 것을 의미한다. 또한 $p - N$ 은 기동하는 차량에 집중적으로 할당되는 채널을 의미한다. 즉, N 이 6이고 기동하는 차량이 6번째 차량이라고 할 때, $p - N = 2$ 라면 통신 시퀀스는 다음과 같이 정의된다.

$$s = 123456661234566612345666 \dots \quad (40)$$

최종적으로 최적 시퀀스 결정을 위한 문제를 다음과

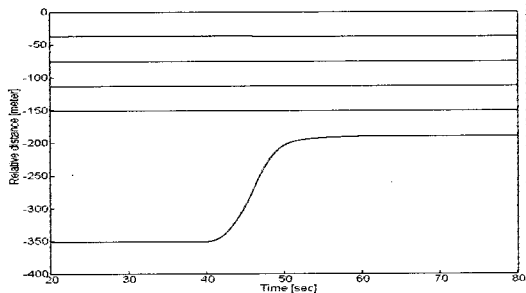
같이 정의할 수 있다.

$$\min_{p-N} V(\Sigma_{l,p}) \quad (41)$$

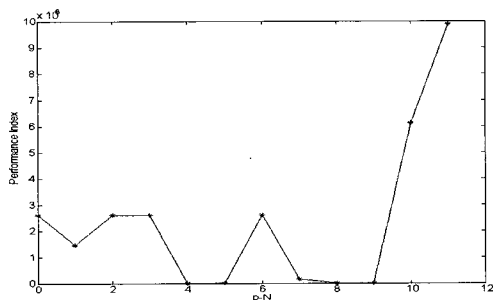
최적의 $p-N$ 은 시뮬레이션을 통하여 구할 수 있다. 시뮬레이션을 위한 대표적인 설정값은 다음과 같다. 시뮬레이션에서는 모두 6개의 군집이 운행하는 것으로 하였고, 바람직한 속도는 $100m/s$ 이고, 차량의 가능한 저크(jerk)와 가속은 각각 $[-5 \ 5]m/s^3$ 와 $[-5 \ 5]m/s^2$ 에 있도록 하였다. 6번째 군집은 5번째 군집의 최후미와 $153m$ 떨어진 거리에서 출발하고 군집간의 바람직한 안전거리는 약 $40m$ 이다. 1번째 군집에서 5번째 군집까지의 초기 거리는 바람직한 안전거리와 거의 동일하다. 시뮬레이션이 시작하고 일정시간이 지나면 6번째 군집의 선도차는 5번째 군집과의 병합을 시작한다. 균등하지 못한 통신 시퀀스는 군집의 병합이 시작될 때부터 적용된다.

〈그림 1〉은 1번째 군집에 대한 나머지 5개의 군집의 상대거리를 시간에 대해 나타낸 것이다. 병합은 40초에 시작하여 약 60초에 중지한다. 군집의 병합은 차량의 미리 설정된 궤적을 추적하는 형식을 취한다. 그림 1은 대역폭에 대한 제약조건이 없는 경우에 대한 결과로서 효과적인 통신 시퀀스 결정을 통하여 가장 근접하고자 하는 목표가 된다.

위치의 차이에 가중을 주기 위해 $Q = \text{diag}(2, 1, 1)$ 와 같이 가중행렬을 설정할 때, $p-N$ 에 따른 가격의 변화는 그림 2에 나타내었다. 계산된 결과를 통하여 최적의 통신 시퀀스는 주어진 가격함수에서 $p-N=5$ 로 판정할 수 있다.



〈그림 1〉 군집간의 상대거리



〈그림 2〉 $p-N$ 에 대한 $V(\Sigma_{l,p})$

V. 결론

본 논문에서는 다수 군집의 선도차를 효과적으로 원격 제어하기 위해서 필요한 방법을 고찰하였다. 차량과 원격 관제소의 통신에는 현실적으로 대역폭의 한계가 존재하는데, 입력의 급격한 변동이 발생하는 차량에 통신 채널을 추가적으로 할당함으로써 전체 시스템을 효율적으로 운영할 수 있다. 채널의 할당은 통신 시퀀스를 통하여 이루어지며, 본 논문에서는 상태값의 변동에 기반한 가격함수를 설정하여 최적의 통신 시퀀스를 도출하였다. 가격함수를 만족하는 최적의 시퀀스는 시뮬레이션을 통하여 선정되었으며 앞으로 이를 실시간으로 구하는 연구가 추가로 필요하다.

참고문헌

1. D. N. Godbole, and J. Lygeros, "Longitudinal control of the lead car of a platoon," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 43, No. 4, pp. 1125-1135, 1994.
2. S. Huang, W. Ren, and S. C. Chan, "Design and performance evaluation of mixed manual and automated control traffic," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, Vol. 30, No. 6, pp. 661-673, 2000.
3. A. Isidori, *Nonlinear control systems*, New York: Springer-Verlag, 1989.
4. B. Lincoln, and A. Rantzer, "Optimizing linear system switching," *Proceedings of the Conference on Decision and Control*, pp. 2063-2068, 2001.
5. H. Rehbinder, and M. Sanfridson, "Scheduling of a limited communication channel for optimal control," *Proceedings of the Conference on Decision and Control*, pp. 1011-1016, 2000.
6. S. Sheikholeslam, and C. A. Desoer, "Combined longitudinal and lateral control of a platoon of vehicles," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 1763-1767, 1992.
7. S. Sheikholeslam, and C. A. Desoer, "Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information: a system level study," *IEEE Transaction on Vehicle Technology*, Vol. 42, No. 4, pp. 546-554, 1993.
8. P. Varaiya, "Smart cars on smart roads: Problems of control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 38, No. 1, pp. 195-207, 1993.