

Impedance Control for a Vehicle Platoon System

李 壽 榮*

(Soo-Yeong, Yi)

Abstract - In this paper, an impedance control using a serial chain of spring-damper system is proposed for a vehicle platoon. For safety of the vehicle platoon, it is required to regulate the distance between each vehicle at a preassigned value even in case of vehicle model error, or noise in the measurement signal. Since the spring-damper system is physically stable and widely used to represent the interaction with the uncertain environments, it is appropriate to the longitudinal control of the vehicle platoon. By considering the nonholonomic characteristics of the vehicle motion, the lateral control and the longitudinal control for the vehicle platoon are unified in the proposed algorithm. Computer simulation is carried out to verify the robustness against the uncertainties such as the vehicle model error and the measurement noise.

Key Words : Vehicle platoon system, Impedance control, Serial spring-damper system, Longitudinal and lateral control

1. 서 론

지능형 교통 시스템(Intelligent Transportation System)의 하나로 PATH 프로젝트를 통해 제안된 차량 집단 주행(platoon) 시스템은 도로의 소통 효율을 극대화함으로써 도로 개발에 따르는 경제 비용을 최소화하고 탑승자의 편의를 도모하기 위한 것인데, 이는 하나의 집단에 속하는 여러 대의 차량이 서로 일정한 거리 간격을 유지하면서 주행하도록 제어하는 방식이다[1][2]. 집단 주행을 위한 각 차량의 운행 제어는 각 차량이 추종해야 할 궤적을 생성하는 차량 추종 제어와 생성된 궤적 명령에 따라 차량의 동력학을 제어하는 하위의 차량 토크 제어로 이루어진다. 차량 추종 제어는 다시 횡방향 제어(lateral control)와 종방향 제어(longitudinal control)로 나누어지는데, 횡방향 제어는 각 차량이 주어진 차선 궤적을 따라 주행하도록 조향축을 제어하는 것이며[3], 종방향 제어는 차량간의 종방향 간격을 미리 설정된 값으로 유지시키기 위해 구동축을 제어하는 것이다[4][5]. 차량 추종 제어 알고리즘의 하나로써 Shladover는 그림 1에서 보이는 것처럼 집단내의 모든 차량에 선도 차량의 속도, 가속도 정보를 전달하는 방식을 제안한 바 있다[6]. 이러한 방식은 선도 차량과 각 차량간의 전역 통신망이 필요하고, 따라서 통신망의 시간 지연이나 잡음에 따라 전체적인 추종 제어의 성능이 크게 영향받을 수 있다[7]. 이러한 점을 고려하여 그림 2에서 보이는 것처럼 선도 차량과 각 차량간의 전역 통신망을 배제하고 앞 뒤 차량간의 지역 통신망에 의존하는

지역 방식이 제안되기도 하였다[8]. 한편 차량 토크 제어는 탑승자의 안전을 위해서 차량 추종 제어 단계에서의 오차나 동력학 모델에서의 불확실성 등 외부 잡음에 대한 강인성이 필요한데, 단순하게는 PID 제어 알고리즘에서부터[5], 제어 시스템의 강인성에 초점을 맞춘 슬라이딩 모드 제어[9], 퍼지 논리 제어[10] 알고리즘 등이 제안된 바 있다.

일반적으로 평면상에서의 차량 운동 모델은 x , y 축 속도 성분과 방향각, θ 성분으로 이루어지는 3차 모델로 표현되며, 각 x , y 축 속도 성분이 방향각 성분에 의존하는 nonholonomic한 특성이 있다[11]. 따라서 조향축 제어를 위한 횡방향 제어와 구동 속도 제어를 위한 종방향 제어는 엄밀한 의미에서 분리, 접근될 수 없고 통합 개발되어야 한다. 물론 거시적인 관점에서는 근사화 과정을 통해서 차량 추종 제어를 횡방향 제어와 종방향 제어로 나눌 수 있고, 이러한 이유로 기존의 알고리즘들이 각각을 분리, 개발하여 왔던 것이 사실이다. 한편 차량 집단 주행 제어 문제는 각 차량이 전후방 차량과 상호 작용하는 일련의 관계로 이해될 수 있으며, 따라서 제어 시스템과 주변 환경과의 상호 작용을 표현하는 방법으로 제안된 스프링-댐퍼의 순응 임피던스 관계식에 의해 모델링될 수 있다[12]. 이러한 경우 각 차량의 위치, 속도 측정에 있어서의 신호 잡음이나, 혹은 차량 모델링 과정에서의 오차에 의한 불확실성이 내재되어 있을 때, 물리적으로 매우 안정한 직렬 스프링-댐퍼 임피던스 관계가 차량 집단 주행 전체 시스템을 안정화하는데 매우 효과적인 것으로 기대된다. 이러한 직렬 스프링-댐퍼 시스템은 이동 로봇의 충돌 회피 궤적 생성을 위해 실제 로봇의 전방에 가상으로 정의된 가상 이동 로봇의 장애물 근접 상황을 스프링-댐퍼의 임피던스 특성을 이용하여 전달하는 방식으로 사용된 바도 있다[13].

* 正 會 員 : 國立全北大 電子情報工學部 專任講師 · 工博
 接受日字 : 2001年 3月 30日
 最終完了 : 2001年 6月 4日

본 논문에서는 직렬 스프링-댐퍼 시스템의 임피던스 특성을 이용하여 차량 집단 주행을 위한 차량간의 상호 작용을 모델링하고, 이를 nonholonomic한 특성이 있는 차량 모델에 적용함으로써 일반적으로 분리, 개발되어졌던 종방향, 횡방향 제어를 통합한 새로운 집단 주행 알고리즘을 개발하고자한다. 본 논문의 2장에서는 집단 주행 시스템을 위한 차량 추종 제어로서 임피던스 제어 알고리즘을 제안하고 추종 안정성에 대해 논한다. 그리고 3장에서 스프링-댐퍼 시스템의 임피던스 구현을 위해 nonholonomic 특성이 있는 차량 동역학 모델에 대한 차량 토크 제어 알고리즘을 설계한다. 4장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 모델 오차나 신호 잡음등에 대한 본 알고리즘의 강인성을 검증하며, 5장에서 결론을 맺는다.

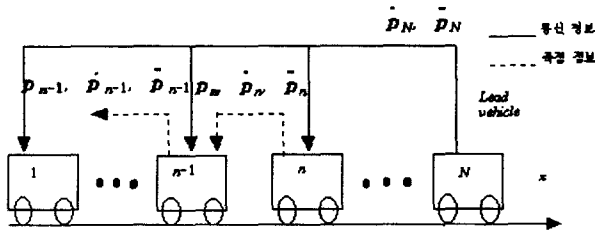


그림 1. 전역 통신망을 이용한 군집 주행 알고리즘
Fig. 1. The vehicle platoon algorithm using the global communication

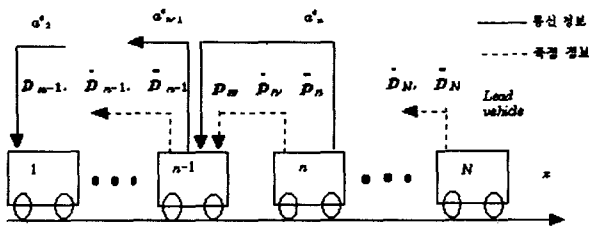


그림 2. 지역 통신망을 이용한 군집 주행 알고리즘
Fig. 2. The vehicle platoon algorithm using the local communication

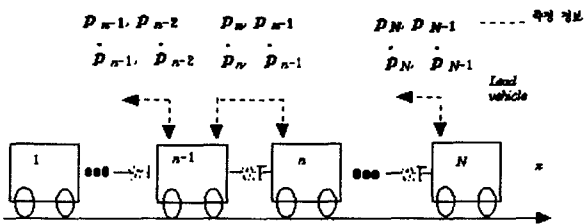


그림 3. 스프링-댐퍼 시스템을 이용한 차량 추종 제어
Fig. 3. The vehicle following control using the spring-damper system

2. 직렬 스프링-댐퍼의 임피던스를 이용한 차량 추종 제어

그림 3과 같이 N개의 차량으로 구성되어 있는 차량 집

단을 생각하자. 집단내 각 차량의 질량이 m이고, 이들이 탄성 계수 k와 댐핑 계수 c를 갖는 스프링-댐퍼 관계에 따라 앞 뒤 차량과 연동되어 집단 주행한다면 이 시스템의 운동 방정식은 다음과 같이 표현될 수있다.

$$\ddot{p}_n = \begin{cases} \frac{k}{m} (p_2 - p_1 - d_1) + \frac{c}{m} (\dot{p}_2 - \dot{p}_1) & n = 1 \\ \frac{k}{m} (p_{n+1} - p_n - d_n) - \frac{k}{m} (p_n - p_{n-1} - d_{n-1}) \\ \quad + \frac{c}{m} (\dot{p}_{n+1} - \dot{p}_n) - \frac{c}{m} (\dot{p}_n - \dot{p}_{n-1}) & 2 \leq n \leq N-1 \\ -\frac{k}{m} (p_N - p_{N-1} - d_{N-1}) - \frac{c}{m} (\dot{p}_N - \dot{p}_{N-1}) & n = N \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $p_n = [x_n, y_n]^t$ 는 n번째 차량의 2차 평면상에서의 위치를 나타내며, $d_n = d \frac{p_{n+1} - p_n}{\|p_{n+1} - p_n\|^{1/2}}$ 이고, $d > 0$ 는 미리 설정된 각 차량간의 유지 간격이다. 식 (1)의 유도 과정은 본 논문 마지막 부분의 (부록 1)에서 보인다. 임피던스 특성을 따르는 추종 제어 시스템에 관련된 운동 에너지와 탄성 에너지의 합은 다음과 같다:

$$E = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} m \dot{p}_n^t \dot{p}_n + \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{2} k (p_{n+1} - p_n - d_n)^t (p_{n+1} - p_n - d_n) \quad (2)$$

식 (2)의 시간에 대한 미분은 식 (3)으로 주어진다
 $\frac{dE}{dt} = \sum_{n=1}^N \frac{\partial E}{\partial p_n}^t \frac{d p_n}{dt} + \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\partial E}{\partial p_n}^t \frac{d p_n}{dt} \quad (3)$

이제 식 (2)로부터, 다음을 얻을 수 있다:

$$\frac{\partial E}{\partial p_n} = m \dot{p}_n, \quad 1 \leq n \leq N \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial p_n} = \begin{cases} -k(p_2 - p_1 - d_1) & n = 1 \\ -k(p_{n+1} - p_n - d_n) + k(p_n - p_{n-1} - d_{n-1}) & 2 \leq n \leq N-1 \\ k(p_N - p_{N-1} - d_{N-1}) & n = N \end{cases} \quad (4-2)$$

식 (4-2)의 유도 과정도 본 논문 마지막의 (부록 2)에서 보인다. 식 (4-1), (4-2)와 시스템 식 (1)을 식 (3)에 대입하면, 계수 k에 관련된 탄성항들은 모두 상쇄되고, 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\frac{dE}{dt} = c(\dot{p}_2 - \dot{p}_1)^t \dot{p}_1 + c(\dot{p}_3 - \dot{p}_2)^t \dot{p}_2 - c(\dot{p}_2 - \dot{p}_1)^t \dot{p}_2 + \dots + c(\dot{p}_{n+1} - \dot{p}_n)^t \dot{p}_n - c(\dot{p}_n - \dot{p}_{n-1})^t \dot{p}_n$$

$$\begin{aligned} & \dots \\ & -c(\dot{\mathbf{p}}_N - \dot{\mathbf{p}}_{N-1})^t \dot{\mathbf{p}}_N \\ & = -c \sum_{n=1}^{N-1} (\dot{\mathbf{p}}_{n+1} - \dot{\mathbf{p}}_n)^t (\dot{\mathbf{p}}_{n+1} - \dot{\mathbf{p}}_n) \quad (5) \\ & \leq 0 \quad \forall t \geq 0 \end{aligned}$$

이는 식 (2)로 주어지는 시스템의 에너지가 항상 감소하고, 정상 상태에서 0에 접근하며, 따라서 각 차량간의 거리, $\|\dot{\mathbf{p}}_{n+1} - \dot{\mathbf{p}}_n\|$ 가 미리 설정한 유지 간격 d 로 수렴함을 의미한다. 그러므로 각 차량의 운동이 스프링-댐퍼 시스템에 의한 임피던스 특성을 따르도록 한다면, 전체적인 집단 주행 시스템은 설정 간격, d 를 항상 유지하는 안정한 주행 성능을 갖게 된다. 본 알고리즘을 그림 1의 전역 방식과 비교하면, 전역 방식의 경우 집단내의 모든 차량이 선도 차량의 속도, 가속도 정보를 요구하므로 전역 통신망이 필요하지만, 그림 3에서 보이는 본 알고리즘의 경우에는 집단내의 각 차량이 단지 자신과 앞 뒤 차량간의 상대 거리 및 상대 속도라는 국지 정보만을 필요로 한다. 따라서 전역 통신망의 시간 지연이나 잡음등에 따르는 주행 성능 저하를 피할 수 있다.

3. 차량 동역학 제어

앞 절의 차량 추종 제어는 차량 집단이 전체적으로 스프링-댐퍼 임피던스 특성을 갖기 위해 따라야할 운동 궤적을 생성하는 과정이다. 이렇게 생성된 운동 궤적을 각 차량이 따르기 위해서는 차량의 구동 액츄에이터와 조향 액츄에이터의 동특성을 고려한 차량 토크 제어가 필요하다. 본 절에서는 nonholonomic한 특성을 갖는 차량의 기구학 모델과 각 액츄에이터의 동특성을 고려하여 차량 토크 제어 알고리즘을 설계한다.

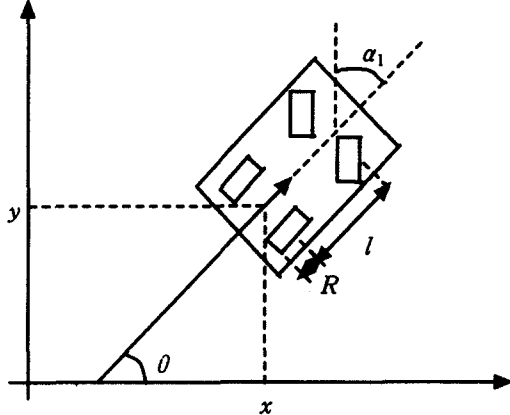


그림 4. 차량 모델
Fig. 4. The vehicle model

그림 4에서 보이는 차량의 운동 모델은 다음 식 (6-1)~(7-5)와 같이 표현된다[14].

$$\dot{x}_n = \cos \theta v_1 \quad (6-1)$$

$$\dot{y}_n = \sin \theta v_1 \quad (6-2)$$

$$\dot{\theta} = v_2 \quad (6-3)$$

$$v_1 = R\omega \cos \alpha_1 \quad (7-1)$$

$$v_2 = \frac{R}{l} \omega \sin \alpha_1 \quad (7-2)$$

$$\dot{\omega} = -H_2 \omega + u_1 \quad (7-3)$$

$$\dot{\alpha}_1 = a_2 \quad (7-4)$$

$$\dot{a}_2 = -H_1 a_2 + u_2 \quad (7-5)$$

여기서 R 은 구동 바퀴의 반지름, l 은 앞 뒤 바퀴사이의 거리, H_1, H_2 는 각각 구동 액츄에이터-부하 시스템의 마찰 계수, 조향 액츄에이터-부하 시스템의 마찰 계수이며, θ 는 자동차의 방향각, ω 는 구동 바퀴의 각속도, α_1, a_2 는 각각 방향 조정 액츄에이터의 각도 및 각속도, u_1, u_2 는 각 액츄에이터의 제어 입력이다. 식 (6-1)~(6-3)에서 v_1 과 v_2 는 각각 진행 방향으로의 차량 속도와 조향 각속도를 의미하게 된다. 식 (6-1), (6-2)에서 x 와 y 의 밀수 $n, 1 \leq n \leq N$ 은 n 번째 차량을 나타내며, 나머지 식에서 다른 변수들은 모두 n 번째 차량에 속하는 변수들로 밀수를 생략한다. 식 (6-1)~(6-3)은 $x-y$ 평면에서 차량의 기구학을 나타내며, 방향각, θ 가 각 축방향 속도 성분, 즉 \dot{x}_n, \dot{y}_n 에 의존하는 nonholonomic한 특성을 갖는다.

주어진 대상 시스템에 임피던스를 구현하는 방법은 위치 정보를 이용하는 것과, 속도, 혹은 가속도 정보를 이용하는 것이 있다. 식 (6-1)~(6-3)의 차량 기구학 모델이 속도 식으로 표현되므로, 본 논문에서는 속도 기반 임피던스 구현 방법을 제시한다. 먼저 상위의 임피던스 모델에서 주어지는 속도 정보, $[\dot{x}_{dn}, \dot{y}_{dn}]^t$ 를 추종하기 위해서 요구되는 진행 방향 속도와 조향 각속도, v_{d1}, v_{d2} 는 식 (6-1)~(6-3)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다 :

$$v_{d1} = \sqrt{\dot{x}_{dn}^2 + \dot{y}_{dn}^2} \quad (8)$$

$$v_{d2} = \frac{d}{dt} \left\{ \tan^{-1} \frac{\dot{y}_{dn}}{\dot{x}_{dn}} \right\}$$

그러므로 식 (7-1)과 (7-2)를 이용하면, 하위 액츄에이터 제어를 위한 추종 명령은 다음과 같이 된다:

$$\omega_d = \frac{\sqrt{v_{d1}^2 + l v_{d2}^2}}{R} \quad (9)$$

$$\alpha_{d1} = \tan^{-1} \frac{l v_{d2}}{v_{d1}}$$

이제 하위 제어 시스템의 제어 입력은 다음과 같이 설계할 수 있다:

$$u_1 = \dot{\omega}_d + H_2 \omega - k_1(\omega - \omega_d)$$

$$u_2 = \dot{\alpha}_{d1} + H_1 \dot{\alpha}_1 - k_2(\alpha_1 - \alpha_{d1}) - k_3(\alpha_1 - \alpha_{d1}) \quad (10)$$

식 (10)과 식 (7-3)~(7-5)로 이루어지는 페루프 제어 시스템의 안정성은 다음과 같이 보일 수 있다. 즉, 식 (10)과 식 (7-3)~(7-5)에서 제어 시스템의 상태 변수 ω , α_1 , α_2 에 대한 오차식은 다음과 같이 된다:

$$\dot{e}_\omega + k_1 e_\omega = 0 \tag{11-1}$$

$$\dot{e}_{\alpha_1} + k_2 \dot{e}_{\alpha_1} + k_3 e_{\alpha_1} = 0 \tag{11-2}$$

여기서 $e_\omega = \omega - \omega_d$, $e_{\alpha_1} = \alpha_1 - \alpha_{d1}$, $e_{\alpha_2} = \dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_{d1}$ 이다. 그러므로 $k_1 > 0$ 으로, 그리고 k_2 와 k_3 는 식 (11-2)가 안정하게 되도록 설계하면, $\lim_{t \rightarrow \infty} \omega = \omega_d$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha_1 = \alpha_{d1}$, 그리고 $\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha_2 = \alpha_{d2}$ 가 된다. 전체적인 제어 시스템의 구조를 그림 5에 보인다.

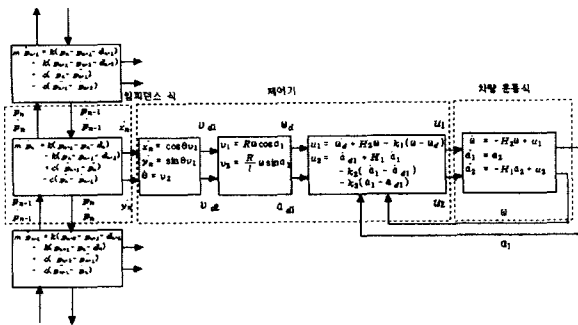


그림 5. 전체적인 제어 시스템 구조
Fig. 5. The overall control system structure

4. 컴퓨터 모의 실험

임피던스 기반 차량 집단 주행 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 5대의 차량으로 이루어진 차량 집단에 대한 컴퓨터 모의 실험을 실행하였다. 진술한 바와 같이 차량 집단 주행 제어에서는 안전을 위하여 거리 측정 잡음이나 차량 모델 오차에 대한 설정 거리 유지 성능이 중요하다. 그러므로 본 논문에서는

- (i) 차량 모델 변수 오차에 대한 강인성[8]
- (ii) 거리 및 속도 측정 오차에 대한 강인성

을 주요 성능 지수로 삼았다. 집단에 속하는 차량의 수를 5로 하였고, 임피던스 설계 변수로서 질량을 일반 승용 차량의 질량을 고려하여 $m=1,300 \text{ kg}$ 로, 댐핑 계수를 $c=95,000 \text{ kg/sec}$ 로, 그리고 탄성 계수를, $k=30,000 \text{ kg/sec}^2$ 로 설정하였다. 선도 차량에 대한 명령 궤적은 다음 식에 의해 그림 6과 같이 생성하였다.

$$p_d = \begin{bmatrix} x_d(t) \\ y_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\pi/6) \cdot at - \sin(\pi/6) \cdot M \sin(bt) \\ \sin(\pi/6) \cdot at - \cos(\pi/6) \cdot M \sin(bt) \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서 $a = 10.0$, $M = 50.0$ 이고 $b = 0.0652$ 이다. 이는 2차 평면에서 $y = \frac{\pi}{6} x$ 축을 기준으로한 사인 함수 곡선이다. 각 차량 간격 설정 거리는 $dx = 10.0 \text{ m}$, $dy = 10.0 \text{ m}$

로 하였다. 그러므로 2차 평면상에서 설정 거리는 $d \approx 14.14 \text{ m}$ 이다. 차량 운동 식 (7-1)~(7-5)에서 모델 변수의 공칭값은 $R = 0.3 \text{ m}$, $l = 2.0 \text{ m}$, $H_1 = 1.0 \text{ sec}^{-1}$, $H_2 = 1.0 \text{ sec}^{-1}$ 로 설정하였다. 모의 실험은 식 (1)에서 $N = 6$ 으로 가정하고, 선도($n = 6$) 차량이 식 (11)의 움직임에 따른 때 $n = 1, 2, \dots, 5$ 의 차량이 식 (1)에 따라 운동하도록 한 것이다.

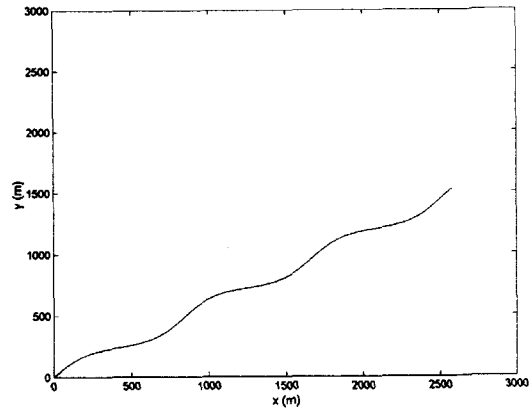
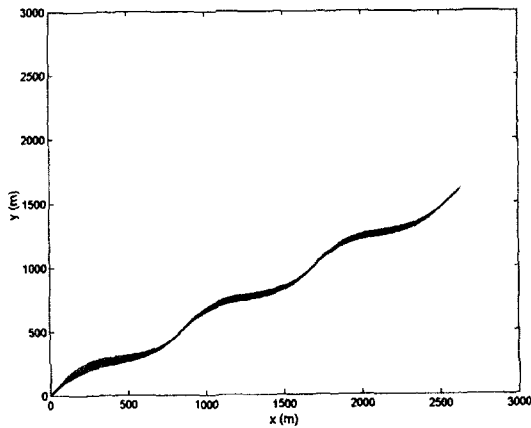


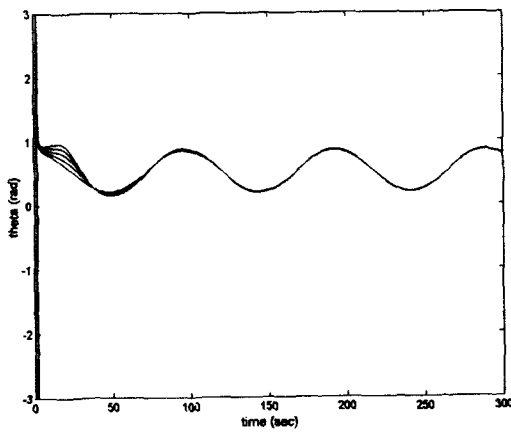
그림 6. 선도 차량에 대한 명령 궤적
Fig. 6. Desired trajectory for the lead vehicle

(i) 차량 모델 변수 오차에 대한 강인성

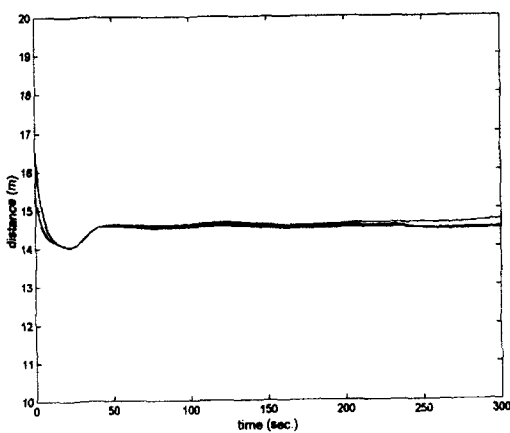
탑승자의 수나 바퀴의 마모 상태등에 따라 각 차량의 모델 변수가 달라질 수 있다. 여기서는 차량 모델 변수들이 공칭값을 기준으로 $\pm 10\%$ 범위내의 임의의 값을 갖는 것으로 가정하고 모의 실험을 행하였다. 그림 7 (a)는 2차 평면상에서 각 차량의 궤적이다. 각 차량의 궤적을 구분하기는 어렵지만 전체적으로 그림 6의 명령 궤적을 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다. 초기의 각 차량간 거리는 임의의 간격으로 배치하였다. 그림 7. (b)는 각 차량의 방향각, θ 의 궤적이다. 그림에서 볼 수 있듯이 선도 차량에 대한 명령 궤적의 기준 축에 따라 $\theta = \frac{\pi}{6}$ 을 기준으로 사인 곡선을 그리고 있다. 초기에 매우 큰 진폭의 변화를 보이는 것은 실제적으로는 구현할 수 없는 불합리한 값인데, 이는 방향각의 초기값이 명령 궤적에서 요구되는 값과 일치하지 않는 것 때문이다. 그러므로 명령 궤적을 각 차량의 초기 방향값을 고려하여 설계하면 이를 쉽게 해결할 수 있다. 정상 상태에 이르러서는 위치 궤적과 방향각 궤적이 모두 안정한 추종 상황을 보여준다. 그림 7. (c)는 각 차량간의 거리의 변화를 보여주는데, 미리 설정한 거리 간격, $d \approx 14.14 \text{ m}$ 부근의 값을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 이로부터 제안하는 알고리즘이 차량 모델 변수 변화에 강인하다고 할 수 있다.



(a) 2차 평면상에서 각 차량의 위치 궤적
(a) Position trajectory of each vehicle in 2D plane



(b) 방향각, θ
(b) Heading angle, θ

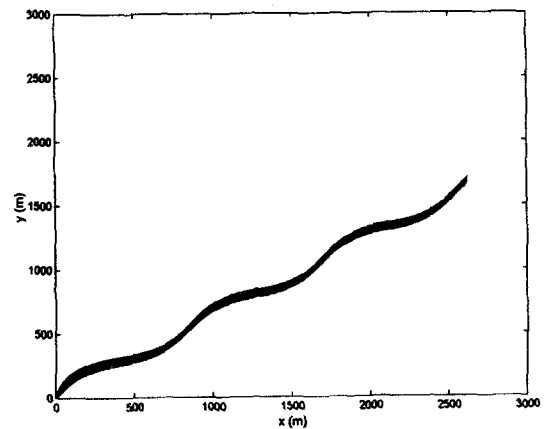


(c) 각 차량간 거리 간격 궤적
(c) Distance between each vehicle

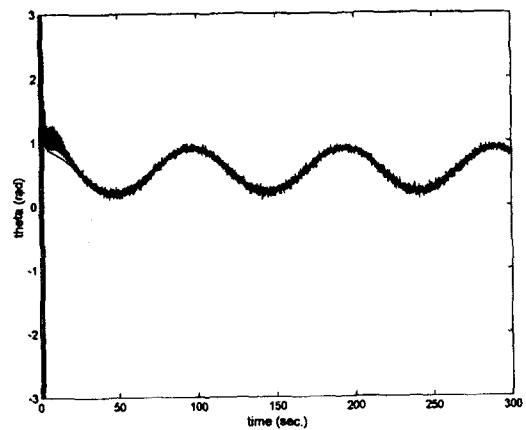
그림 7. 차량 모델 오차에 대한 강인성
Fig. 7. Robustness against the vehicle model error

(ii) 거리 및 속도 측정 오차에 대한 강인성

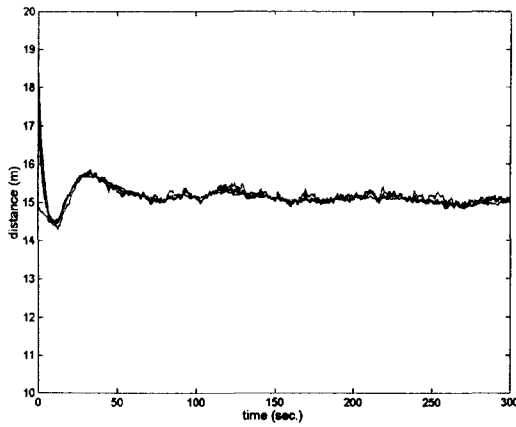
제안하는 차량 추종 제어 알고리즘은 전후방 차량과의 상대 거리 및 속도 정보를 필요로 한다. 거리나 속도 정보를 획득하기 위해서는 센서를 통해 측정해야하는데, 측정시에는 어쩔 수 없이 잡음에 의한 오차가 들어가고, 이 때문에 전체적인 집단 주행 성능이 저하될 수 있다. 여기서는 전후방 차량과의 거리 및 상대 속도 정보 오차에 대한 강인성을 확인하기 위해 각 측정 정보에 $\pm 10\%$ 크기의 백색 잡음을 부가하여 식 (1)에서 $d_{n+1} \leftarrow \hat{d}_{n+1}$, $v_n \leftarrow \hat{v}_n$, $d_{n-1} \leftarrow \hat{d}_{n-1}$, 그리고 $\dot{d}_{n+1} \leftarrow \hat{\dot{d}}_{n+1}$, $\dot{v}_n \leftarrow \hat{\dot{v}}_n$, $\dot{d}_{n-1} \leftarrow \hat{\dot{d}}_{n-1}$ 로 대체하였다. 여기서 $\hat{y} = y + \delta$, δ 는 랜덤 변수이다. 즉 임피던스를 구성하는 측정 정보에 잡음을 의도적으로 부가하였으며, 따라서 이러한 정보를 기반으로하는 제어기 (8), (9), (10)에는 잡음의 영향이 있게 된다. 그림 8은 이 때의 집단 주행 성능을 보여준다. 신호에 잡음이 부가되어 있지만, 각 차량의 방향각, θ 값이나 차량 간격이 전체적으로 안정함을 볼 수 있다. 이는 기본적으로 스프링-댐퍼 시스템의 탄성 특성에 의한 완충 효과에 의한 것이다.



(a) 2차 평면상에서 각 차량의 위치 궤적
(a) Position trajectory of each vehicle in 2D plane



(b) 방향각, θ
(b) Heading angle, θ



(c) 각 차량간 거리 간격 궤적
(c) Distance between each vehicle

그림 8. 측정 오차에 대한 강인성
Fig.8. Robustness against the measurement error

5. 결 론

차량의 운동 모델은 각 x, y 방향 속도가 방향각, θ 에 의존하는 nonholonomic한 특성을 갖는다. 그러므로 엄밀한 의미에서 차량 주행 제어 시스템 설계는 종방향 제어와 횡방향 제어로 나뉘어질 수 없고 통합 개발되어야 한다. 본 논문에서는 차량 집단 주행 시스템을 위한 차량 추종 제어 문제에 있어 스프링-댐퍼 시스템의 임피던스 특성을 이용하고, 이를 차량 토크 제어로서 nonholonomic한 특성이 있는 차량 운동 모델에 적용함으로써 종방향 제어와 횡방향 제어를 통합한 차량 집단 주행 알고리즘을 제안하였다. 스프링-댐퍼 시스템은 직관적으로 쉽게 이해할 수 있듯이 매우 안정한 시스템이며, 불확실성이 있는 주변 환경과의 상호 작용을 표현할 때 임피던스 제어의 형태로 많이 사용된다. 도로의 소통 효율과 탑승자의 안전성 및 편의성을 극대화하기 위한 차량 군집 주행에서의 종방향 제어 문제는 각 차량이 전후방 차량과 상호 작용하는 일련의 관계로 이해될 수 있으며, 따라서 직렬 스프링-댐퍼 시스템의 특성이 잘 적용될 수 있다. 특히 각 차량의 위치나 속도 측정에 있어서의 측정 잡음이나, 혹은 차량 모델링 과정에서의 모델 오차에 의한 불확실성이 내재되어 있을 때, 물리적으로 매우 안정한 스프링-댐퍼 관계가 전체 주행 시스템을 안정화하는데 매우 효과적이다. 본 논문에서 제안한 집단 주행 알고리즘의 전후방 차량 속도 측정 오차 및 차량 모델 오차등에 대한 강인성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] D. H. McMahon and J. K. Hedrick, "Longitudinal development for automated roadway vehicles", *PATH Research Report UCB-ITS-PRR-89-5*, Oct., 1989
[2] S. Sheikholeslam and C. A. Desoer, "Longitudinal control of a platoon of vehicles I: Linear model",

PATH Research Report UCB-ITS-PRR-89-3, Aug., 1989

[3] J. K. Hedrick, M. Tomizuka, and P. Varaiya, "Control issues in automated highway systems", *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 21-32, Dec., 1994
[4] 김 응석, 김 동현, 양 해원, "관측자를 이용한 직진 주행 차량의 적응 제어", *대한전기학회논문지*, 제50권, 제3호, pp. 130-135, 2001
[5] S. E. Shladover, "Longitudinal control of automotive vehicles in close-formation platoons", *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, vol. 113, pp. 231-241, 1991
[6] S. E. Shladover, "Review of the state of development of advanced vehicle control systems", *International Journals of Vehicle System Dynamics*, vol. 24, pp. 551-595, 1995
[7] 최 재원, 황 태현, 김 영호, "차량 군집주행을 위한 제어 네트워크의 변수 추정 및 제어", *제어자동화시스템공학회 논문지*, 제6권, 제8호, pp. 659-665, 2000
[8] T. S. No and K. T. Chong, "Longitudinal Spacing Control of Vehicles in a Platoon", *ICASE Transaction on Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 92-97, 2000
[9] 이 구도, 김 상우, "퍼지-슬라이딩 모드 알고리즘을 이용한 종방향 군집제어 시스템", *제어계측.자동화.로보틱스연구회합동학술발표회 논문집*, pp. 119-122, 1999
[10] 정 종형, 오 세영, "차량 군집 주행의 횡방향 제어를 위한 진화 퍼지 제어기의 구현", *Proc. of 13th KACC*, pp. 857-860, 1998
[11] J. Laumond, P. Jacobs, M. Taix, and R. Murray, "A Motion Planner for Nonholonomic Mobile Robots", *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 5, pp. 577-593, 1994
[12] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation: Part I-theory", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 107, pp1-7, 1985
[13] 이 수영, 이 석한, 홍 예선, "이동 로봇을 위한 실시간 충돌 회피 궤적 계획과 제어", *제어자동화시스템공학회 논문지*, 제5권, 제1호, 1999
[14] W. L. Nelson and I. J. Cox, "Local Path Control for an Autonomous Vehicle", *Proc. of 1988 IEEE conf. on Robotics and Automation*, pp. 1504-1510, 1988

(부록 1) 식 (1)의 유도 과정:

차량간의 설정 거리는 각 차량의 크기에 비해 상대적으로 크므로, 직렬 스프링-댐퍼의 운동에 따르는 차량 집단 주행 시스템은 다음 그림 9와 같이 표현될 수 있다. 그림에서 m 은 점으로 모델링된 차량의 질량이고 k 와 c 는 각각 스프링과 댐퍼의 탄성 계수와 마찰 계수이다. 그림 9에서 n 번째

차량의 전방 차량 및 후방 차량과의 힘 관계, f_f 와 f_r 는 다음과 같이 된다:

$$f_f = k(p_{n+1} - p_n - d_n) + c(\dot{p}_{n+1} - \dot{p}_n) \quad (12)$$

$$f_r = k(p_n - p_{n-1} - d_{n-1}) + c(\dot{p}_n - \dot{p}_{n-1})$$

그러므로 다음 식 (13)의 힘 평형 관계식으로부터 식 (1)을 얻을 수 있다:

$$\begin{aligned} m \ddot{p}_1 &= f_f & n &= 1 \\ m \ddot{p}_n &= f_f - f_r & 2 \leq n &\leq N-1 \\ m \ddot{p}_N &= -f_r & n &= N \end{aligned} \quad (13)$$

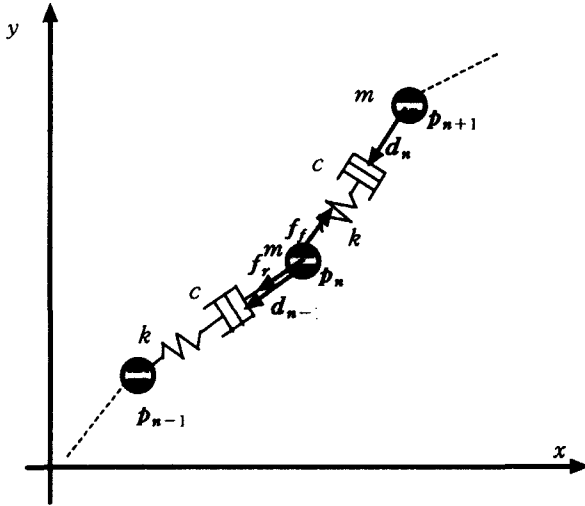


그림 9. 직렬 스프링-댐퍼 시스템
Fig. 9. Serial spring-damper system

(부록 2) 식 (4-2)의 유도 과정:

식 (2)로부터, $1 < n < N$ 에 대해서

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial p_n} &= \frac{\partial}{\partial p_n} \left\{ \frac{1}{2} k (p_{n+1} - p_n - d_n)^2 (p_{n+1} - p_n - d_n) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} k (p_n - p_{n-1} - d_{n-1})^2 (p_n - p_{n-1} - d_{n-1}) \right\} \\ &= \frac{1}{2} k \frac{\partial}{\partial p_n} (A_n + A_{n-1}) \end{aligned} \quad (14)$$

이다. 여기서 A_n 과 A_{n-1} 은 다음과 같이 정의된다:

$$A_n = (p_{n+1} - p_n - d_n)^2 (p_{n+1} - p_n - d_n) \quad (15-1)$$

$$A_{n-1} = (p_n - p_{n-1} - d_{n-1})^2 (p_n - p_{n-1} - d_{n-1}) \quad (15-2)$$

먼저 A_n 을 풀어쓰면 다음과 같다:

$$\begin{aligned} A_n &= (p_{n+1} - p_n)^2 (p_{n+1} - p_n) \\ &\quad - 2(p_{n+1} - p_n)^2 d_n + d_n^2 d_n \\ &= (p_{n+1} - p_n)^2 (p_{n+1} - p_n) \\ &\quad - 2\alpha \{ (p_{n+1} - p_n)^2 (p_{n+1} - p_n) \}^{1/2} + \alpha^2 \end{aligned} \quad (16)$$

그러므로 p_n 에 대해서 미분하면 다음을 얻을 수 있다:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_n}{\partial p_n} &= -2(p_{n+1} - p_n) - \alpha \{ (p_{n+1} - p_n)^2 (p_{n+1} - p_n) \}^{-1/2} \\ &\quad - 2(p_{n+1} - p_n) \\ &= -2(p_{n+1} - p_n) + 2\alpha \frac{p_{n+1} - p_n}{\|p_{n+1} - p_n\|^{1/2}} \\ &= -2(p_{n+1} - p_n - d_n) \end{aligned} \quad (17-1)$$

이다. 또, A_{n-1} 에서 d_{n-1} 은 p_n 에 무관한 변수이므로 A_{n-1} 을 p_n 에 대해 미분한 것은 다음과 같다:

$$\frac{\partial A_{n-1}}{\partial p_n} = 2(p_n - p_{n-1} - d_{n-1}) \quad (17-2)$$

그러므로 식 (17-1)과 (17-2)를 결합하면, 식 (14)가 다음과 같음을 알 수 있다:

$$\frac{\partial E}{\partial p_n} = -k(p_{n+1} - p_n - d_n) + k(p_n - p_{n-1} - d_{n-1}) \quad (18-1)$$

임을 얻을 수 있다. 유사한 방법으로, $n = 1$ 과 $n = N$ 에 대해서 다음을 얻을 수 있다:

$$\frac{\partial E}{\partial p_1} = -k(p_2 - p_1 - d_1), \quad (18-2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial p_N} = k(p_N - p_{N-1} - d_{N-1}) \quad (18-3)$$

저 자 소 개

이 수 영 (李壽榮)

1964년 10월 2일 생. 1988년 2월 연세대 전자공학과 졸업. 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학). 1995년 3월-1999년 8월 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터 선임연구원. 1997년 2월-1998년 2월 Univ. of Southern California, Dept. of CS, Post Doc. 1999년 9월-현재 국립전북대 전자정보공학부 전임강사.

Tel : 063-270-4283, Fxs : 063-270-2451

E-mail : suylee@moak.chonbuk.ac.kr