

역보행 제어 형태의 궤환 선형화를 이용한 양방향 플레톤 제어

Bidirectional Platoon Control Using Backstepping-Like Feedback Linearization

권 지 옥*
(Ji-Wook Kwon¹)

¹Department of Electronic Engineering, Chosun University

Abstract: This paper proposes a bidirectional platoon control law using a coupled distance error based on the backstepping-like feedback linearization control method for an interconnected mobile agent system with a string structure. Unlike the previous results where the single agent was controlled using the only own information without other agents, the proposed control law cannot show the only distance error convergence of each agent, but also the string stability of the whole system. Also, the control performances are improved by the proposed control law in spite of low performance of bidirectional control strategy in the previous results. The proposed bidirectional platoon control algorithm is based on the backstepping-like feedback linearization control method. The position errors between each agent and the preceding and the behind agents are coupled by weighted summation. By the proposed control law, the distance error of each agent can converge to zero while the string stability is guaranteed when the coupled errors can converge to zero. To this end, the back-stepping control method is employed. The pseudo velocity input is determined considering the kinematic relationship between agents and the string stability. Then, the actual dynamic control input is determined to make the actual velocity converge to the pseudo velocity input. The stability analysis and the simulation results of the proposed method are included in order to demonstrate the practical application of the proposed algorithm.

Keywords: platoon system, interconnected mobile agent system, back-stepping control, mobile agent, coupled error

I. 서론

차량간의 거리 유지 시스템에 대한 연구는 차량의 안전과 운송 효율성 증가를 위한 시스템 (예를 들어, 지능형 운송 시스템(ITS: Intelligent Transportation System), 적응 순항 제어 (ACC: Adaptive Cruise Control), 지능형 고속도로 시스템(HIS: Intelligent Highway System) 등)에 대한 관심이 증가하면서 많은 주목을 받고 있다. 차량 주행 및 운송 시스템들을 안전하고 효율적으로 구성하기 위하여 로봇 제어 및 다개체 시스템 제어 기술이 응용되어 왔다. 또한, 위 시스템들은 상호 연관 다개체 시스템(interconnected multi-agent system)으로 표현될 수 있는 만큼 개별 개체의 제어뿐만 아니라 개체 간 상호 연관성에 의하여 발생할 수 있는 현상들에 대한 고려가 강조되었다[3-10].

차량간 거리 유지 시스템과 같이 끈 구조(string structure)를 가지는 상호 연관성을 갖는 시스템에서 개별 개체만을 고려한 제어[1,2]는 slinky type effect에 의하여 개체들간의 오차가 뒤따라 오는 개체들에 전달되고 누적되어 전체 시스템의 안정도를 해치게(sting instability) 된다[3-6]. 1차원적 열 대형을 이루는 상호 연관 시스템에서 끈 안정성(string stability)으로 명명된 시스템의 전체 안정성은 [3,4]에서 잘 정의되어 있으며, 많은 연구들이 이 정의에 따라 상호 연관 시스템의 플레톤 제어를 수행하여 왔다. 먼저, 끈 안정성을 유지하면서 차

량간의 간격을 제어하기 위하여 개별 차량의 제어기 설계 시 최 선도 차량의 정보를 사용하는 선도-선행 전략(leader-predecessor strategy)들이 등장하였다[3-5]. 이 방법은 이 후 많은 연구들에 영향을 주었고 [7-10]등의 연구들이 수행되었다. 이 방법은 시스템 내의 모든 차량에 최 선도 차량의 정보를 전달해야 하는 문제를 가진다. 실제 시스템을 고려하였을 때 최 선도 차량의 정보를 뒤 따라 오는 모든 차량에 제 시간에 정보를 전달하는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 주변 차량들의 지역적 정보만을 이용하는 양방향 제어 전략(bidirectional strategy)이 제안되었다. 이 기법은 앞 뒤의 차량의 정보를 on-board 센서로 측정가능하고 통신을 통한 정보전달의 필요가 없어 적용비용이 적고 실제 시스템에 적용할 수 있는 가능성이 높다. 그러나 [6]에서 언급된 것과 같이 이 기법은 선도-선행 전략에 비해 성능이 떨어질 수 있고 [4]에서 언급한 것과 같이 전체 시스템의 끈 안정성을 보장하는 것이 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고, 양방향 제어전략은 선도-선행 전략에 비해 다수 차량의 플레톤 제어를 실제 시스템에 적용할 수 있는 여지가 높아 지속적인 관심의 대상이 되어왔다.

따라서 본 논문에서는 오차결합을 이용한 역보행 제어 형태의 궤환 선형화 기법(Backstepping-like Feedback Linearization) 기반의 양방향 플레톤 제어 법칙을 제안한다. 제안된 제어 법칙은 오차 결합(error coupling)을 이용하여 양방향 제어 전략의 성능을 향상 시키고 동시에 상화 연관 시스템의 끈 안정성을 보인다. 본 논문에서 제안하는 양방향 제어 기법은 앞, 뒤 차량과의 거리 오차들을 가중합하여 결합하고 이를 제어한다. 이를 위하여 역보행 기법 형태의 궤환 선형화 기법 [11]을 사용한다. 이 제어기법은 기존의 역보행 제어

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received February 20, 2013 / revised March 10, 2013 / accepted March 15, 2013

권지옥: 조선대학교 전자공학과(bluemichael00@gmail.com)

※ 본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A1A1041216).

(backstepping control)에 비하여 모듈화되어 있어 매우 심플할 뿐만 아니라 성능과 안정성 면에서도 뒤지지 않는다[11]. 본 논문에서는 두 번의 변환 선형화 기법을 통하여 제어 대상의 기구학적 특징으로부터 유사 제어입력을 생성하고 실제 시스템에서 생성된 유사 제어입력을 발생할 수 있도록 동역학 모델을 바탕으로 동적 제어 입력을 생성하여 제어 목적을 달성하도록 한다.

본 논문에서 제안하는 역보행 기법 형태의 변환 선형화 기반의 양방향 플레톤 제어 기법의 장점은 다음과 같다. 첫째로, 기존 연구의 주를 이루고 있는 최 선도 개체의 정보를 시스템 내의 모든 개체에 전달해야 하는 선도-선행 전략 [3-10]에 비하여 on-board 센서들만을 이용하여 주변 개체들의 정보를 획득할 수 있어 시스템의 구성 및 실현성이 [3-10]의 전략에 비해 매우 높다. 다음으로, [6]에서 저 평가 되어 분석된 양방향 제어전략의 성능을 향상시킨다. 본 논문에서 제안된 제어 기법을 통하여 선도-선행 전략 수준의 제어 성능을 확인할 수 있다. 셋째로, 오차를 가중합하여 결합함으로써 전체 끈 안정도를 상수로 결정할 수 있게 되어 기존의 방법들에 비해 전 주파수 영역에서 사용 가능하다. 마지막으로, 주로 2차 이상의 시스템을 다루는 상호 연과 시스템에서 기구학 및 동역학 모델을 동시에 고려하는 기존의 연구 결과들과는 달리 개체들간의 기구학적 관계만을 이용함으로써 제어기 설계가 복잡하지 않고, 실제 시스템에 적용하는 것이 용이하다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 II 장에서 대상 시스템과 문제를 정의한다. III 장에서 유사 제어 입력을 설계 후 끈 안정도를 확인하고, IV 장에서 실제 시스템에서 유사 제어입력이 실현될 수 있도록 동적 제어입력을 설계한다. 설계된 제어 법칙의 안정성과 유효성을 확인하기 위하여 V 장에서 모의실험 결과를 확인한 후 VI 장에서 결론 맺는다.

II. 시스템 및 문제 설정

본 논문에서 대상으로 하는 시스템은 그림 1에 나타난 것과 같이 n 대의 개체들로 구성된 상호 연과 시스템으로 개별 개체들은 [4]와 [13]에서 언급된 비선형 동역학 모델을 사용한다. 그림 1에서 x_i 는 i번째 로봇의 위치와 목표거리이고 이때 최 선도 개체의 인덱스는 0이다. \dot{x}_i 는 각 개체의 속도이고 각 개별개체는 다음과 같은 동적 모델을 가진다.

$$\ddot{x}_i = \frac{u_i - c_i \dot{x}_i^2 - f_i + D_i}{M_i} \quad (1)$$

여기서 u_i 는 제어입력, c_i 는 공기역학적 끌림 계수(aerodynamic drag coefficient), f_i 는 회전 저항 마찰력(rolling resistance friction), D_i 는 시스템 불확실성, M_i 는 개체의 질량이다. 본 논문에서는 $-f_i + D_i \leq \bar{D}_i \leq \bar{D}$ 이고, \bar{D} , c_i , M_i 는 알려진 양의 상수임을 가정한다. 또한, 본 논문에서는 차량간의 목표 거리, x_d 를 [14]에서와 같이 고정 상수로 정의하여 사용한다. 고정된 상수의 목표거리를 도입하였을 때 [14]와 [4]에서 언급된 것과 같이 전체 시스템 내의 개체들의 밀도를 높이고 에너지 효율을 향상시킬 수 있다. 이로부터 오차변수 $e_i = x_{i-1} - x_i - x_d$ 를 결정하여 사용한다.

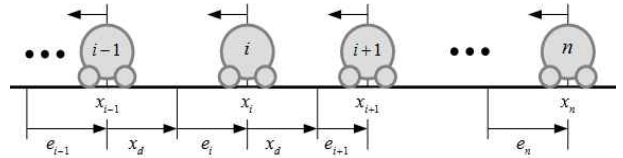


그림 1. 상호 연과 개체 시스템.
Fig. 1. The interconnected agent system.

이와 같은 시스템을 바탕으로 본 논문의 다음과 같이 2가지 제어 목적을 가진다.

- 1) 각 개체들 간의 거리를 목표거리 x_d 로 유지시킨다.
- 2) 전체 시스템의 끈 안정성을 유지시킨다.

본 논문의 제어 목적을 달성하기 위하여 각 개별 개체의 오차를 0으로 수렴시키고 다음과 같이 [3-5]에서 정의된 끈 안정도의 정의를 만족하도록 한다.

정의 1(끈 안정성): $\|e_i(0)\|_\infty < \delta \Rightarrow \sup_t \|e_i(t)\|_\infty < \varepsilon$ 이 되는 어떤 $\varepsilon > 0$ 에 대하여 $\delta > 0$ 가 존재하면, (1)의 동적 모델을 가지는 그림 1에 나타난 개체들의 상호연과 시스템은 원점 $e_i = 0, i \in N$ 에서 끈 안정(string stable)하다.

정의 2(강 끈 안정성): 만약 오차 전달 함수 $H_i(s) := E_{i+1}(s)/E_i(s)$ 의 크기가 모든 $i \in N$ 에 대하여 $|H_i(s)| \leq 1$ 를 만족하면, (1)의 동적 모델을 가지는 그림 1에 나타난 개체들의 상호연과 시스템은 원점 $e_i = 0, i \in N$ 에서 강한 끈 안정성을 가진다.

위의 두 정의로부터, 본 논문에서 제안된 유사 역보행 기반 플레톤 제어 기법은 오차전달함수의 크기가 $|H_i(s)| \leq 1$ 를 만족할 수 있도록 설계되어야 함을 알 수 있다.

III. 유사 입력 생성

본 장에서는 오차의 가중합을 이용한 결합 오차를 수렴시키는 유사 입력 생성을 제안하고 제안된 유사 입력에 의하여 각 결합 오차와 개별 오차들이 0으로 수렴하고 전체 시스템이 끈 안정성을 만족할 수 있음을 보인다. 유사 입력을 생성하기 위하여 결합 오차 $\varepsilon_i = qe_i - e_{i+1}$ 를 생성한다. 여기서, $q > 0$ 상수이고 이후에 전체 시스템의 끈 안정도를 보장하기 위하여 범위를 설정한다. 이때, 마지막 개체는 뒤따라 오는 개체가 존재하지 않기 때문에 $e_{n+1} = 0$ 으로 설정하고 $\varepsilon_n = qe_n$ 으로 한다. 제안된 설계입력에 의하여 결합 오차 ε_i 가 0이 되면 다음의 보조정리 1에 의하여 개별오차 e_i 가 0이 될 수 있다.

보조정리 1: $i = 1, \dots, n$ 에 대하여 결합 오차 $\varepsilon_i = 0$ 이면 $e_i = 0$ 이다.

증명: 모든 i 에 대하여 ε_i 와 e_i 의 관계를 나열하면 $\mathbf{E} = \mathbf{M}\mathbf{e}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서,

$$\mathbf{E} = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \dots \quad \varepsilon_n]^T,$$

$$\mathbf{e} = [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_n]^T,$$

$$M = \begin{bmatrix} q & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & q & -1 & \cdots & 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & \cdots & q & -1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & q \end{bmatrix}$$

이다. $q > 0$ 상수 이기 때문에 M 은 가역 행렬이고 따라서 $\mathbf{E} = \mathbf{0} \rightarrow \mathbf{e} = \mathbf{0}$ 이다. ■

보조정리 1에서 나타난 것과 같이 $\varepsilon_i = 0, i = 1, \dots, n$ 이 되도록 하는 유사 제어 입력을 설계한다. 결합오차 ε_i 의 시간미분은 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_i &= q\dot{\varepsilon}_i - \dot{\varepsilon}_{i+1} \\ &= -(q+1)\dot{x}_i + q\dot{x}_{i-1} + \dot{x}_{i+1}. \end{aligned} \quad (2)$$

이를 바탕으로, 다음과 같은 유사 속도 입력을 생성할 수 있다.

$$\dot{x}_i^p = \frac{1}{q+1} \{q\dot{x}_{i-1} + \dot{x}_{i+1} + k_p \varepsilon_i\}. \quad (3)$$

여기서 \dot{x}_i 이 \dot{x}_i^p 에 추종하면 다음 정리 2와 같이 결합 오차 ε_i 는 0으로 수렴하여 각 개체들의 오차를 0으로 수렴시키면서 전체 시스템의 끈 안정도를 만족시킬 수 있다.

정리 1: 그림 1과 같은 상호연결 시스템에 (3)의 유사 속도 입력을 적용하면 결합오차 ε_i 가 0으로 수렴할 뿐만 아니라 끈 안정도를 만족시킬 수 있다.

증명: (2)에 나타난 ε_i 의 시간미분 식의 양변에 ε_i 를 곱하면 다음과 같이

$$\varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_i \{-(q+1)\dot{x}_i + q\dot{x}_{i-1} + \dot{x}_{i+1}\} \quad (4)$$

표현되고, 이는 리아프노프 후보 함수, $V_p = \varepsilon_i^2 / 2$ 의 시간 미분이 된다. (4)에 (3)의 유사 속도 입력 \dot{x}_i^p 를 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i &= \varepsilon_i \left\{ -(q+1) \left[\frac{1}{q+1} \{q\dot{x}_{i-1} + \dot{x}_{i+1} + k_p \varepsilon_i\} + q\dot{x}_{i-1} + \dot{x}_{i+1} \right] \right\} \\ &= -k_p \varepsilon_i^2 \end{aligned} \quad (5)$$

(5)로부터, 리아프노프 함수 V_p 는 모든 시간에 대하여 유한하며 유한시간에 0으로 수렴함을 알 수 있다[12]. 식 (5)와 보조정리 1에 의하여 ε_i 가 0이 되면 e_i 도 0이 된다. 또한, 각 개체들의 속도가 (3)의 유사 속도 입력이 되었을 때 e_i 와 e_{i+1} 의 관계를 (3)으로부터 얻으면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \frac{1}{q+1} \{q\dot{x}_{i-1} + \dot{x}_{i+1} + k_p \varepsilon_i\} \\ (q+1)\dot{x}_i &= q\dot{x}_{i-1} + \dot{x}_{i+1} + k_p (q e_i - e_{i+1}) \\ \dot{x}_i - \dot{x}_{i+1} + k_p e_{i+1} &= q\dot{x}_{i-1} - q\dot{x}_i + k_p q e_i \\ \dot{e}_{i+1} + k_p e_{i+1} &= q(\dot{e}_i - k_p e_i). \end{aligned}$$

이를 라플라스 변환을 하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} sE_{i+1}(s) + k_p E_{i+1}(s) &= q(sE_i(s) - k_p E_i(s)) \\ (s + k_p)E_{i+1}(s) &= q(s + k_p)E_i(s) \\ \frac{E_{i+1}(s)}{E_i(s)} &= q. \end{aligned}$$

이때, 초기값은 기존의 연구 결과들[3-10]과 같이 0으로 가정하고 q 를 1보다 작거나 같은 상수로 결정하면 오차 전달함수는

$$|E_{i+1}(s)/E_i(s)| \leq 1 \quad (6)$$

가 되고, q 에 오차 전달함수의 크기를 조절할 수 있음을 알 수 있다. 이로부터 오차 전달함수는 정의 1에 의하여 전체 시스템의 끈 안정성을 유지할 수 있음을 알 수 있다. ■

IV. 유사입력 구현을 위한 궤환 선형화 제어

(3)의 유사제어 입력은 시스템의 실제 속도 입력이 아니기 때문에 실제 개체의 속도 \dot{x}_i 가 \dot{x}_i^p 가 되도록 실제 동적 제어 입력을 설계하여야 한다. 개체의 동적 모델 (1)과 유사제어 입력 (3)으로부터 속도오차 $e_i^v = \dot{x}_i^p - \dot{x}_i$ 를 설정한다. 이 오차변수의 시간미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_i^v &= \frac{d}{dt}(\dot{x}_i^p) - \ddot{x}_i \\ &= \frac{d}{dt}(\dot{x}_i^p) - \frac{1}{M_i}(u_i + c_i \dot{x}_i^2 - f_i + D_i). \end{aligned} \quad (7)$$

이때, (7)의 속도 오차 e_i^v 가 0으로 수렴하였을 때 (2)의 ε_i 가 0이 될 수 있음을 보일 수 있어야 한다. 이는 다음의 보조정리 2에 나타나 있다.

보조정리 2: 속도 오차 e_i^v 가 유한시간에 0으로 수렴하였을 때 결합 오차 ε_i 가 0으로 수렴한다.

증명: (3)의 유사 속도 입력을 다음과 같이 재구성한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i^p &= \frac{1}{q+1} \{q\dot{x}_{i-1} + \dot{x}_{i+1} + k_p \varepsilon_i\} \\ &= \frac{1}{q+1} \{q\dot{x}_{i-1} - q\dot{x}_i - \dot{x}_i + \dot{x}_{i+1} + k_p \varepsilon_i\} + \dot{x}_i \\ &= \frac{1}{q+1} \{q\dot{e}_i - \dot{e}_{i+1} + k_p \varepsilon_i\} + \dot{x}_i \\ &= \frac{1}{q+1} \{\dot{e}_i + k_p \varepsilon_i\} + \dot{x}_i. \end{aligned} \quad (8)$$

(8)의 우변의 \dot{x}_i 을 좌변으로 이항하면

$$\dot{x}_i^p - \dot{x}_i = e_i^v = \frac{1}{q+1} \{\dot{e}_i + k_p \varepsilon_i\}$$

로 표현될 수 있다. 여기서 e_i^v 가 유한시간에 0이 되면

$$\dot{e}_i = -k_p \varepsilon_i$$

가 된다. 이와 같이 e_i^v 는 ε_i 의 미끄럼 평면(sliding surface) [12]과 같은 형태로 나타나고 e_i^v 가 유한시간에 0이 됨에 따

라 ε_i 는 자연스럽게 0으로 수렴할 수 있고, 여기서 ε_i 의 수렴 특성은 $k_p/(q+1)$ 에 의하여 결정될 수 있다. ■

보조정리 2에 의하여 속도 오차 e_i^v 가 0이 되었을 때 결합 오차 ε_i 가 자연스럽게 0으로 수렴함을 알 수 있다. 이를 위하여 (7)의 오차변수의 시간미분으로부터 제어 입력 u_i 를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$u_i = -c_i \dot{x}_i^2 - (\bar{D} + \bar{k}) \text{sgn}(e_i^v) + M_i \left(\frac{d}{dt} \dot{x}_i^p + k_v e_i^v \right) \quad (9)$$

여기서 $k_v > 0, \bar{k} > 0$ 상수이다. 이렇게 결정된 동적 제어 입력 u_i 에 의하여 오차변수 $e_i^v \rightarrow 0$ 가 되어, 개체의 실제 속도가 유사입력에 수렴할 수 있다. 이는 다음의 정리 2에 나타나 있다.

정리 2: 개체의 동적 모델 (1)과 오차변수 e_i^v 와 그 시간 미분 (7)을 고려하였을 때 동적 제어입력 (9)을 적용하면 오차변수 e_i^v 는 유한시간에 0으로 수렴될 수 있다.

증명: 제안된 동적 제어입력의 안정성을 보이기 위하여 (5)를 바탕으로 다음과 같은 새로운 리아프노프 후보함수를 선택한다.

$$V_d = (e_i^v)^2 / 2. \quad (10)$$

(10)의 시간 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_d &= e_i^v \dot{e}_i^v \\ &= e_i^v \left\{ \frac{d}{dt} (\dot{x}_i^p) - \frac{1}{M_i} (u_i + c_i \dot{x}_i^2 - f_i + D_i) \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

(11)에 (9)에서 설계된 동적 제어입력을 대입하면

$$\dot{V}_d = -k_v (e_i^v)^2 - \bar{k} |e_i^v| \leq 0. \quad (12)$$

(12)에 의하여 V_d 는 전 시간에 대하여 유한함 [12]을 알 수 있고, (12)는 다음의 조건을 만족하게 되어

$$\begin{aligned} \dot{V}_d &= -k_v (e_i^v)^2 - \bar{k} |e_i^v| \\ &\leq -\bar{k} \sqrt{2V_d} \end{aligned} \quad (12)$$

유한시간에 0으로 수렴 할 수 있다. ■

V. 모의 실험 결과

지금까지 III장에서 개체들간의 기구학적 관계를 이용하여 각 개체의 오차를 0으로 수렴시키고, 전체 시스템의 끈 안정성을 보장할 수 있는 유사 제어 입력을 설계하였고, IV장에서 설계된 유사 제어 입력을 실제 시스템에서 구현하기 위한 동적 제어 입력을 설계하였다. 본 장에서는 제안된 역보행 기법 형태의 궤환 선형화를 이용한 플레톤 제어기법의 유효성과 성능을 분석하기 위한 모의실험 결과를 보인다. 모의실험을 위하여 그림 1과 같은 상호연관 시스템을 고려한다. 제안된 결합오차를 이용한 제어전략의 성능을 확인하기 위하여 개별 개체의 선행(predecessor) 오차만을 고려한 제어입력

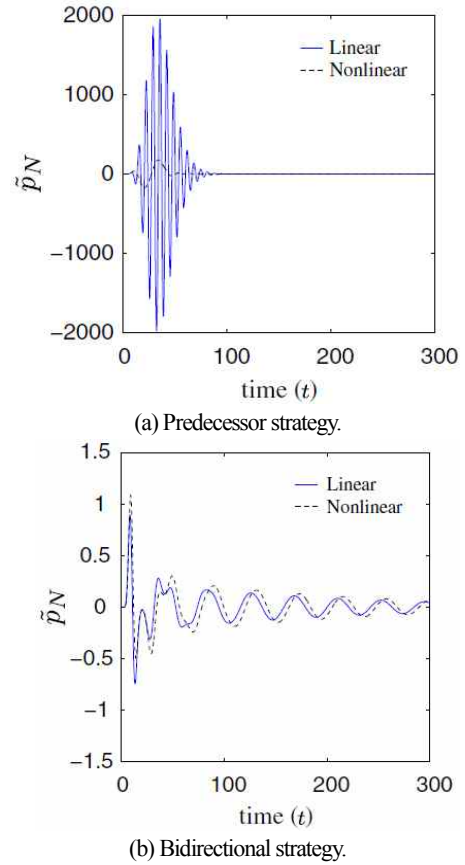
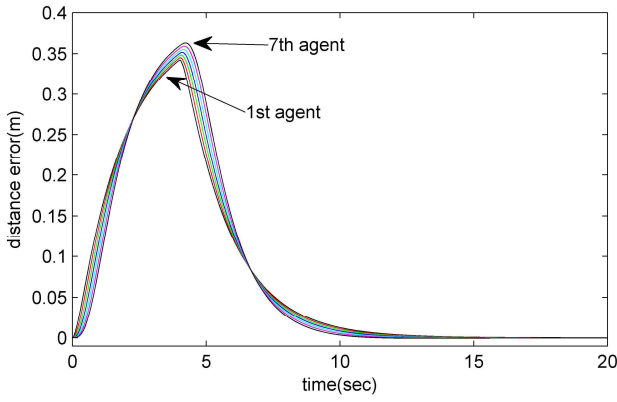


그림 2. [6]에서 보인 Predecessor와 Bidirectional 전략의 성능 비교.
Fig. 2. The performances of predecessor and bidirectional strategies in [6].

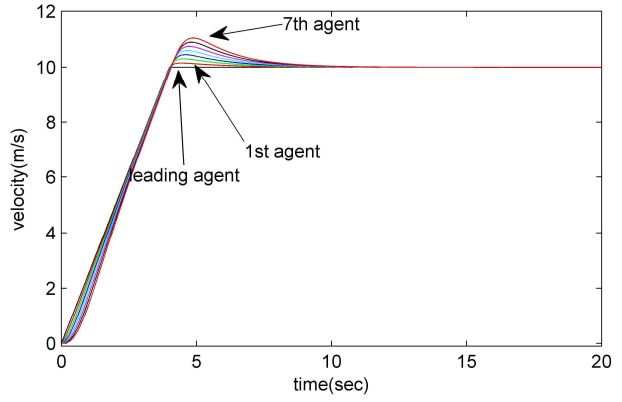
의 결과와 비교하고, 기존의 선도-선행 전략과 비교하여 성능을 분석한다.

모의실험을 위하여 사용된 개체들의 정보는 다음과 같다. 사용된 개체는 최선도 개체를 포함하여 8대이며 초기위치 $x_i(0)(m) (i=0, \dots, 7)$ 는 0, -2, -4, -6, -8, -10, -12, -14 이고, 개체들간의 목표거리는 $x_d = 2$ 로 결정한다. 각 개체의 (1)의 동적 모델의 매개변수는 $c_i = 0.01, f_i = 0.003, M_i = 1000, \bar{D} = 1$ 로 한다. 또한, 제어 변수 q 는 그림 2의 [6]에서 언급된 양방향 전략과의 비교를 위하여 $q = 1$ 로 선택하고 $k_p = 6, k_v = 1, \bar{k} = 1$ 로 결정한다.

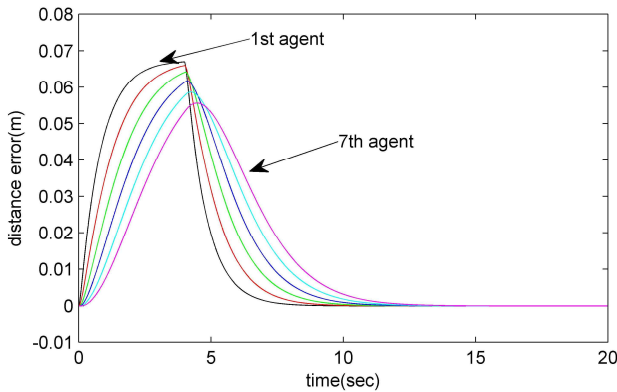
최 선도 개체의 속도를 그림 3(b), (d), (f)에 표시된 leading agent와 같이 설정하였을 때 그림 1에서 구성된 상호연관 시스템의 구성 개체들의 오차 변화와 속도 변화는 그림 3에 나타나 있다. 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 각 개체들이 바로 앞 개체의 정보만을 이용하여 제어하였을 때, 개체들의 index가 커질수록(다시 말해서, 뒤의 개체일수록) 개체들의 거리 오차는 점차 누적되어 커짐을 알 수 있고, 이에 따라 단순히 바로 앞 개체의 정보만으로는 전체 시스템의 끈 안정성을 보장할 수 없다는 것을 알 수 있다. 반면, 그림 3(c)와 (e)의 선도-선행 전략과 본 논문에서 제안된 양방향 전략과 같이 바로 앞의 개체의 정보뿐만 아니라 최 선도 개체나 뒤 따라 오는



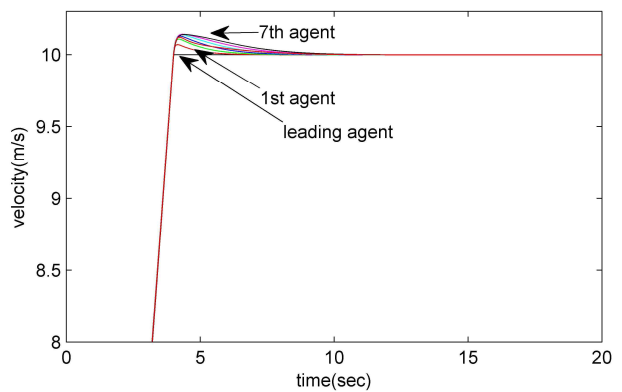
(a) The single agent strategy: the distance errors.



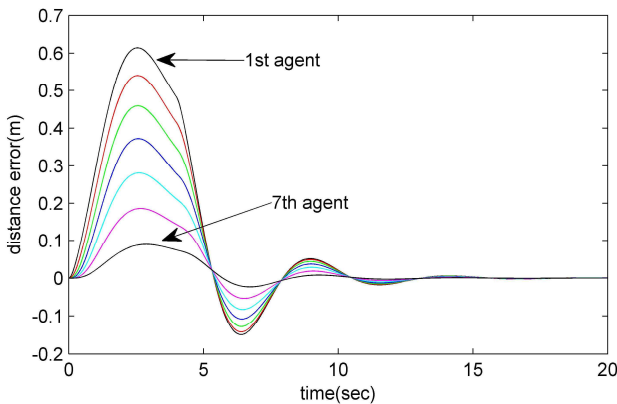
(b) The single agent strategy: the velocities



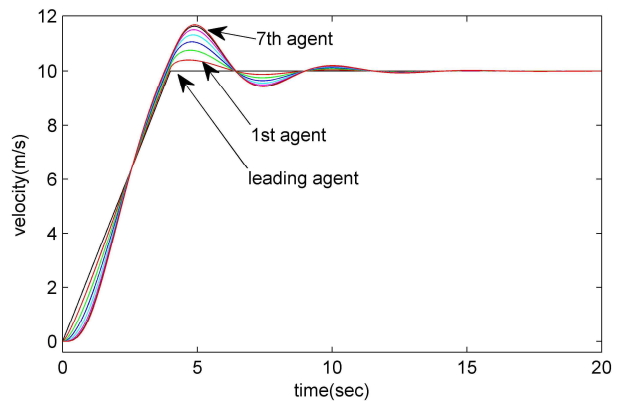
(c) The leader-predecessor strategy: the distance errors.



(d) The leader-predecessor strategy: velocities.



(e) The proposed bi-directional strategy: the distance errors.



(f) The proposed bi-directional strategy: the velocities.

그림 3. 세가지 제어 전략에 따른 플레톤 제어 성능 비교.
Fig. 3. Performances of three control strategies.

개체의 정보를 이용하여 제어입력을 설계하였을 때 에는 개체들의 index가 커짐에도 불구하고 오차의 최대값이 줄어들었음을 알 수 있고, 따라서 전체 시스템의 끈 안정도를 만족할 수 있음을 알 수 있다. 그림 3(c)의 선도-선행 전략과 (e)에서의 제안된 양방향 전략의 성능을 비교하였을 때 선도-선행 전략이 양방향 전략에 비하여 오차의 최대값에 대한 성능이 높은 것 같이 보이나 오차의 수렴 속도나 전체 시스템의 안정성 면에서 성능 차이가 크게 나지 않음을 알 수 있다. 또한, 그림 2에서 표시된 [6]에서 언급된 양방향 전략의 성능 저하문제는 그림 3(e)와 비교해 보았을 때 본 논문에서 제안된 결합 오차를 이용한 역보행 제어 형태의 궤환 선형화를 통하여 충분히 개선되었음을 알 수 있다.

앞서 보인 제안된 플레톤 제어 법칙의 안정성과 모의실험 결과를 통하여 실제 개체의 속도입력이 유한시간에 유사제어 입력으로 수렴하고, 결합된 거리 오차가 0으로 수렴하게 되어 개별 개체의 제어 및 전체 시스템의 안정성을 보장할 수 있음을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문은 끈 모양으로 생성된 상호연관 시스템에서 각 개체의 오차를 제어하면서, 또한 전체 시스템의 끈 안정성을 보장할 수 있는 결합오차를 이용한 역보행 기법 형태의 궤환 선형화를 이용한 플레톤 제어기법을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 제어 기법을 통하여 개별 개체의 정보만을 기반한

전략이 가지는 slinky effect 문제를 해결하였다. 또한, 이전 연구들을 통하여 알려진 선도-선행 전략과 비교되는 양방향 전략의 성능 저하 문제를 해결하였다. 기존 선도-선행 전략의 결과를 본 논문에서 제안된 플레톤 제어전략과 비교해 보았을 때 오차의 크기 면에서 우수하다고 보였으나 오차들의 수렴속도나 수렴 정도를 비교하였을 때에는 크게 차이가 남을 볼 수 없었다. 실제 시스템에 대한 구현 면에서 서론에서도 언급하였듯이 최 선도개체의 정보를 시스템의 모든 개체에 전달해야 하는 선도-선행 전략에 비해, on-board 센서를 만으로 구현 가능한 양방향 전략이 적은 비용이 들 뿐만 아니라 실제 시스템의 적용할 수 있는 가능성이 매우 높다. 따라서 본 논문에서 제안한 결합오차를 이용한 역보행 기법 형태의 폐환 선형화를 이용한 플레톤 제어기법을 통하여 양방향 전략의 성능저하 문제를 해결함으로써, 끈 안정성을 보장하면서도 성능저하가 없는 플레톤 제어 시스템의 실제 시스템으로의 적용 가능성이 증가하였다. 앞으로 본 논문에서 제안된 플레톤 제어 법칙을 실제 시스템에 적용하여 실제 환경의 성능과 안정성을 검증하고 구현 가능성을 보인다.

참고문헌

- [1] A. Ferrar and P. Pisu, "Minimum sensor second-order sliding mode longitudinal control of passenger vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 20-32, 2004.
- [2] J. Naranjo, C. Conzalez, J. Reviejo, R. Garcia, and T. de Pedro, "Adaptive fuzzy control for inter-vehicle gap keeping," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 132-142, 2003.
- [3] D. Swaroop and J. K. Hedrick, "String stability of interconnected systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 41, no. 3, pp. 349-357, Mar. 1996.
- [4] P. Seiler, A. Pant, and K. Hedrick, "Disturbance propagation in vehicle strings," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 10, pp. 1835-1841, Oct. 2004.
- [5] D. Swaroop, J. K. Hedrick, and S. B. Choi, "Direct adaptive longitudinal control of vehicle platoons," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 150-161, Jan. 2001.
- [6] H. Hao and P. Barooah, "Stability and robustness of large platoons of vehicles with double-integrator models and nearest neighbor interaction," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, pp. 1-26, doi: 10.1002/rnc.2872.
- [7] G. Guo and W. Yue, "Autonomous platoon control allowing range-limited sensors," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 7, pp. 2901-2912, 2012.
- [8] S. S. Stankovic, M. J. Stanojevic, and D. D. Siljak, "Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 816-832, Sep. 2000.
- [9] R. Rajamani and C. Zhu, "Semi-autonomous adaptive cruise control systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 51, no. 5, pp. 1186-1192, Sep. 2002.
- [10] P. Barooah, P. G. Mehta, and J. P. Hespanha, "Mistuning-based control design to improve colose-loop stability margin of vehicular platoons," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, no. 9, pp. 2100-2113, Sep. 2009.
- [11] D. Chwa, "Tracking control of differential-drive wheeled mobile robots using backstepping-like feedback linearization," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, vol. 40, no. 6, pp. 1285-1295, 2010.
- [12] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 2002.
- [13] C.-M. Lin and C.-H. Chen, "Car-following control using recurrent cerebellar model articulation controller," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 6, pp. 3660-3673, 2007.
- [14] L. Xiao and F. Gao, "Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 1184-1194, 2011.



권지욱

2005년 아주대학교 전자공학부 졸업.
2012년 동 대학원 박사. 2013년~현재 조
선대학교 박사후 과정중. 관심분야는
비선형 적응제어, 로봇제어 응용, 다개
체 로봇 제어 및 응용.