

뉴로퍼지를 이용한 자율운송시스템의 차량합류제어

Neuro-Fuzzy Control of Converging Vehicles for Automated Transportation Systems

류 세 희, 박 장 현

(Se-Hee Ryu and Jahng-Hyun Park)

Abstract : For an automated transportation system like PRT(Personal Rapid Transit) system or IVHS, an efficient vehicle-merging algorithm is required for smooth operation of the network. For management of merging, collision avoidance between vehicles, ride comfort, and the effect on traffic should be considered. This paper proposes an unmanned vehicle-merging algorithm that consists of two procedures. First, a longitudinal control algorithm is designed to keep a safe headway between vehicles in a single lane. Secondly, 'vacant slot and ghost vehicle' concept is introduced and a decision algorithm is designed to determine the sequence of vehicles entering a converging section considering energy consumption, ride comfort, and total traffic flow. The sequencing algorithm is based on fuzzy rules and the membership functions are determined first by an intuitive method and then trained by a learning method using a neural network. The vehicle-merging algorithm is shown to be effective through simulations based on a PRT model.

Keywords : vehicle-merging, ghost vehicle, energy consumption, traffic flow, PRT, IVHS, fuzzy logic, neural network

1. 서론

최근 자동화 및 통신 기술의 급속한 발전에 힘입어 궤도형 승용차(PRT), 자동화 고속도로(IVHS) 등과 같은 자율 운송 시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 시스템은 차량 운행의 무인 자동화를 목표로 하므로 도로 상황을 고려하여 능동적으로 차량을 운행할 수 있는 지능적인 제어기를 요구한다.

도로상에서의 차량의 운행은 크게 1차원 운행과 합류 운행으로 나눌 수 있다. 한 집단의 차량들이 1차원 상에서 움직이는 경우에 대해서는 이미 연구된 바 있고, 그에 따르면 선두 차량은 PI 제어로 위치 제어를 하고, 후속 차량들은 차량의 성능과 현재 속도 등을 고려하여 결정된 안전 거리를 전방의 차량과 항상 유지하도록 PD 제어를 한다[1,2]. 그러나 교차로에서 차량이 진입을 시도하는 합류 운행의 경우에는 차량의 1차원 운행과는 다른 별도의 제어 방법이 요구된다. 이에 대하여 Pilutti 등은 주어진 정보를 이용, 규칙에 근거하여 적정 진입 지점을 찾는 합류 알고리즘을 개발하였고[3], Chiu는 운동학적 비선형성을 고려한 합류 알고리즘을 개발하였다[4]. 그러나 이 연구들은 초기 상태에서 미리 합류 차량의 속도 및 가속도의 변화 과정을 시간 또는 위치에 대하여 계산한 후 이를 이용하여 차량의 속도를 제어하여 합류를 시도하는 방법으로서 다른 도로상에서 주행중인 차량들이 등속으로 운행된다는 가정하에 모든 계산이 이루어지므로 차량의 속도가 변화되는 실제의 도로 상황에 적용하는데 한계가 있고, 속도 및 가속도의 계산이 이루어진 후에야 진입을 시도할 수 있게 되어 시간 지연이

발생한다. 또한 이러한 문제점을 극복하고자 시도된 퍼지 논리를 이용한 합류[5]에서는 실제 교통 상황에 적용하기에 비교적 적합한 합류 알고리즘을 제시하였으나 합류 차량 외의 다른 차량들의 흐름을 고려하는데 부족한 면이 있었다.

따라서 본 논문의 목적은 실제의 교통 상황에 적용 가능하며, 승객의 안전 및 승차감, 차량의 에너지 소모 및 전체적인 교통 흐름 등을 동시에 고려하여 차량의 진입 문제를 효과적으로 해결하기 위한 차량 합류 제어 알고리즘을 제시하는데 있다.

실제 교통 상황에서 차량들은 합류 이전에 주행중인 도로상에서 각각 1차원 종방향 제어를 받고 있으므로 효율적으로 차량 합류를 수행하기 위해서는 기존의 1차원 차량 제어 기법[6]을 활용한 합류 제어가 바람직하다. 여기서는 '가상 슬롯, 가상 차량'의 개념을 도입한 합류 제어 알고리즘을 제안하는데, 이 방법에 따르면 두 개의 도로가 만나는 경우, 상대 도로상의 차량의 움직임이 자신의 도로상에도 존재한다고 가정하여 기존의 1차원 차량 제어 기법을 활용하여 차량 합류 제어를 수행한다. 이 알고리즘은 유연하고 신속한 차량 합류 제어를 가능하게 하고, 아울러 합류 위치를 변경할 수 있으므로 만약 제어기가 차량 합류시 발생하는 전체적인 차량 흐름의 변화를 미리 고려하여 적절한 합류 위치를 선택할 수 있다면 도로상의 전체적인 교통 흐름을 고려한 차량 합류 제어를 수행할 수 있는 장점이 있다.

한편 최적 합류 위치를 판단하기 위한 성능 지수로서는 차량의 에너지 소모를 의미하는 비용 함수를 도입하여 사용하고, 제어기는 각 차량들에 대한 위치 및 속도 정보로부터 차량 합류시의 비용 함수값을 추정하여 최적의 합류 위치를 선택한 후 가상 슬롯, 가상 차량 개념을 이용한 합류 제어를 수행한다. 그리고 비용 함수값의 추

접수일자 : 1998. 11. 15., 수정완료 : 1999. 9. 15.

류세희, 박장현 · 한양대학교 기계공학부

※본 연구는 한국과학재단의 1998년도 핵심전문연구과제 지원으로 수행되었습니다

정을 위하여는 적응 뉴로 퍼지 추론 시스템을 이용한 추정기를 구현하는데, 그 과정은 다음과 같다. 우선 합류 위치 결정을 실제로 인간 운전자가 수행하는 경우를 고려하여 퍼지 규칙들을 만들고, 이 규칙에서의 결론부를 비용 함수를 이용하여 표시한다 이후 변형된 퍼지 추론 시스템을 동가의 신경 회로망으로 모델링하고, 차량 시뮬레이션을 통하여 획득한 학습 데이터들을 사용하여 각 규칙의 멤버십 함수 및 선형 계수들을 훈련시켜 보다 정확한 비용 함수값을 예측할 수 있는 추정기를 얻는다.

본문의 후반부에서는 완성된 합류 제어 알고리즘을 교차로에서의 차량 합류 시뮬레이션 예제에 적용해 보고, 그 결과의 분석을 통해 제안된 알고리즘의 우수성을 입증한다.

II. 합류 구간에서의 차량

1. 종방향 차간 거리 제어

자율 운행 차량들의 안전한 1차원 운동을 위해서는 선차량이 급정차하는 경우에도 후차량이 선차량과 충돌하지 않도록 각 차량은 속도 및 성능을 고려하여 계산된 안전 거리를 항상 유지해야 한다. 이미 연구된 바에 따르면[2,4,5], 모든 차량들이 동일한 최대 가속도와 최대 저크를 갖고, 또한 속도차가 작다고 가정할 경우에 차량의 속도를 고려한 차량간 안전 거리는 다음과 같다.

$$H = \lambda v + H_0 \tag{1}$$

여기에서 λ 는 시간 지연, 최대 가속도 및 저크에 의해 결정되는 상수, v 는 차의 속도, H_0 는 안전 여유 거리값이다. 자율 운송 시스템은 주행중인 차량들을 집단 별로 구분하여 선두 차량은 비례-적분(PI) 제어기로써 위치 제어를 하고, 모든 후속 차량들은 비례-미분(PD) 제어기로써 선차량에 대한 안전 거리를 유지하도록 한다. 이 경우의 제어 입력은 다음과 같이 결정된다.

$$u = k_p(x_f - x_b - H) + k_v(v_f - v_b) \tag{2}$$

여기에서 x_f, x_b, v_f, v_b 는 각각 전, 후방 차량의 위치와 속도, H 는 안전 거리, u 는 제어 입력을 나타낸다.

2. 가상 슬롯 및 가상 차량 개념 도입

여기서는 주도로상에서 종방향 제어를 받고 있는 여러 대의 차량들 사이로 부도로상의 차량이 진입하는 방법을 논하고자 한다. 그림 1(a)에서 합류 차량 MV가 주도로상으로 진입하는 경우를 고려해 보자. 새로운 차량이 진입을 하려면 후방에 있는 모든 차량들은 새로 진입하는 차량을 고려하여 미리 감속해야 합류로 인한 충돌을 피할 수 있다. 이는 기존의 1차원 제어만으로는 수행하기가 어려운데, 이를 위해 다음과 같은 가상 슬롯, 가상 차량의 개념을 도입한다. 즉 그림 1(a)에서, 만약 차량 V_i 와 V_{i+1} 사이의 공간으로 합류 차량 MV를 진입하고자 한다면 제어기는 두 차량 V_i 와 V_{i+1} 의 산술 평균 위치에서 두 차량의 산술 평균 속도로 가상 차량 GV, 가 주행중인 것으로 가정하고, 또 합류 지점을 기준으로

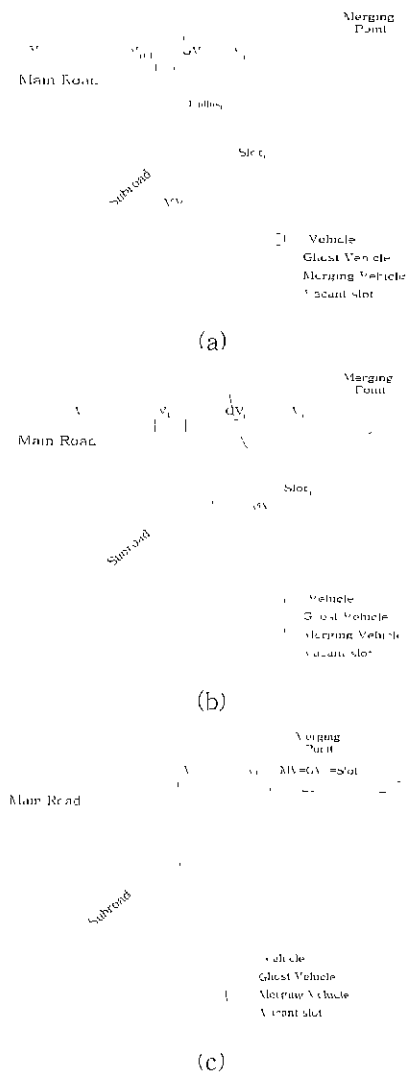


그림 1. 가상 차량 및 가상 슬롯의 개념. (a) 가상 슬롯과 가상 차량의 선택, (b) 각 차선에서의 종방향 제어, (c) 교차로에서 합류 완성.

Fig. 1 Concept of a vacant slot and a ghost vehicle. (a) selection of vacant slot and ghost vehicle. (b) longitudinal control in both lanes. (c) merging completion at intersection.

가상 차량과 대칭적인 움직임을 갖는 가상 슬롯이 부도로 상에 존재하는 것으로 가정한다. 그리고는 그림 1(b)와 같이 주도로상에서는 가상 차량 GV,도 실제 차량으로 간주하여 각 차량이 선차량에 대하여 안전 거리를 유지하도록 1차원 제어를 수행하고, 동시에 부도로 상에서는 합류 차량 MV가 가상 슬롯 slot,의 빈 공간에 자신을 일치시키도록 제어를 수행한다

만약 위에서 언급한 위치 제어가 합류 차량이 합류점에 도달하기 전에 모두 완성된다면, 결국 그림 1(c)에서와 같이 합류 지점에서는 가상 슬롯, 가상 차량, 합류 차량 모두가 일치하면서 성공적인 합류가 완성될 것이다. 이 방법은 기존의 방법에 비해 교통 상황 변화에 대처하는 유연성, 신속성면에서 매우 우수하고, 도로상의 전체

적인 차량의 움직임을 고려하여 진입 위치를 선택할 수 있는 장점이 있다. 한편 가상 슬롯의 위치를 정하기에 앞서 선택된 지점의 합류 가능 지역내 존재 여부를 검토해야 한다[5,7,8]

III. 뉴로 퍼지를 이용한 차량 합류 알고리즘

1. 퍼지 추론을 이용한 진입 위치 선정

1.1 퍼지 규칙 및 비용 함수 정의

교차로에서 차량이 진입을 시도할 경우 인간 운전자는 자신의 차와 다른 차들과의 상대적 위치, 속도 등으로부터 최적의 진입 공간을 선택한다. 예를 들면 만약 다른 도로상에서 주행중인 차량들 사이의 어떤 공간의 위치가 도로의 합류점을 기준으로 자기 차량의 현재 위치와 비슷하고, 차량들의 속도도 자기 차의 속도와 비슷하면, 그 공간으로 진입을 시도할 경우 차량의 급격한 가속 없이도 합류가 가능하므로 그 공간은 바람직한 합류 위치라는 판단을 내릴 것이며, 이는 다음과 같은 퍼지 규칙으로 생각해 볼 수 있다.

“진입 예정 공간과의 속도차와 위치차가 작을수록, 진입의 조건이 양호하다.”

이와 유사한 일련의 퍼지 규칙들을 정의하여 이용하면 자율 운행 차량 스스로가 주어진 교통 상황을 판단하여 바람직한 합류 위치를 결정해 낼 수 있다[5]. 본 논문에서는 제어기가 초기 정보를 이용하여 최적 합류 위치를 판단하도록 하기 위하여 위의 퍼지 규칙의 결론부를 일종의 비용 함수로 표현하였으며, 이를 위하여 다음과 같은 비용 함수를 정의하였다.

$$\Gamma = \int_{t_0}^{t_s} u^2(t) dt \quad (3)$$

여기에서, $u(t)$ 는 시간 t 에서의 차량에 가해주는 제어 입력, t_0 는 위치 제어 시작 시간, t_s 는 위치 제어 정착 시간(settling time)을 나타낸다. 즉 차량 합류를 위한 차량의 갑작스런 위치 변화 명령을 기준 입력으로 보고, 정상 상태에 이를 때까지의 제어 입력의 제곱의 총합을 비용 함수로 정한 것으로 이 값을 최소화하는 위치를 최적 합류 위치로 판단하기로 한다. 왜냐하면 차량이 가속을 하는 것은 차량의 추가적인 제어 입력을 의미하고 이 값이 작을수록 동력 소모가 감소하며, 에너지 소모가 감소하면 승차감이 향상될 가능성이 높기 때문이다.

1.2 퍼지 규칙을 위한 변수 설정

그림 2에서와 같이 합류 가능 지역내에 $n-1$ 개의 가상 슬롯이 있다고 가정하면, 가상 슬롯 slot_i를 합류 위치로 선정하는 경우에 가상 차량 GV_i의 합류 차량 MV에 대한 상대 거리 및 상대 속도는 다음과 같다.

여기에서 X_{gi} , V_{gi} 는 i 번째 가상 차량의 위치, 속도를 X_m , V_m 은 합류 차량의 위치, 속도를 나타내는데

$$\Delta X_m = X_{gi} - X_m \quad (4)$$

$$\Delta V_m = V_{gi} - V_m \quad (5)$$

는 다음과 같이 가상 차량 전후방 차량들의 위치, 속도

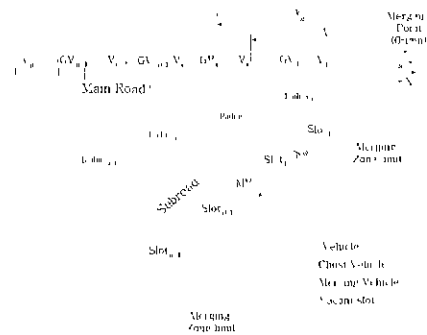


그림 2. 합류 제어를 위한 변수 설정.
Fig. 2 Definition of variables for merging control.

각각의 평균값으로 정한다

$$X_{gi} = \frac{X_i + X_{i+1}}{2} \quad (6)$$

$$V_{gi} = \frac{V_i + V_{i+1}}{2} \quad (7)$$

1.3. 비용 함수 분석 및 학습 데이터 선정

앞에서 정한 비용 함수값의 결정에 영향을 주는 요인들을 수식으로 분석하면 다음과 같다. 먼저 차량이 PD 제어기를 사용할 경우 매 단계마다 제어 입력은 다음과 같이 계산된다.

$$u = -k_p \Delta x - k_v \Delta v + c \quad (8)$$

따라서 제어 입력 u 는 Δx , Δv 의 함수임을 알 수 있다. 한편 v 가 크면 같은 Δx 값에 대하여도 정상 상태에 도달할 때까지의 정착 시간이 작아져서 제어 입력이 변화하므로 정착 시간은 v , Δx , Δv 의 함수이다.

$$t_s = f(\Delta x, \Delta v, v) \quad (9)$$

결국 비용 함수는 다음과 같이 합류 차량의 속도, 합류 차량과 가상 슬롯과의 상대 위치, 상대 속도의 함수임을 알 수 있다.

$$\Gamma = \int_{t_0}^{t_s} u^2(t) dt = f(v, \Delta x, \Delta v) \quad (10)$$

1.4. 차량 모델링 및 학습 데이터 생성

본 논문에서 사용한 차량의 모델링은 다음과 같다.

$$Ma = u - k_d v^2 - F_r \quad (11)$$

여기에서, M 은 차량의 질량, a 는 차량의 가속도, u 는 추진력을 의미하는 입력 변수, v 는 차량의 속도, k_d 는 공

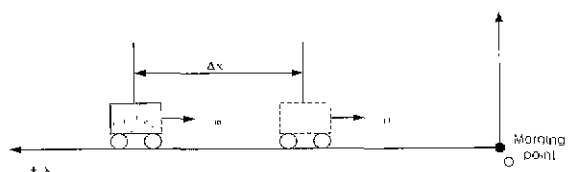


그림 3. 학습 데이터 생성.
Fig. 3. Generation of training data

기 항력 계수, F_r 은 구름 마찰 저항력을 나타낸다. 이제 그림 3과 같이 합류 차량과 합류 대상으로 선정된 가상 슬롯이 임의의 위치 및 속도를 갖는 경우에 대하여, PD 제어를 통해 합류 차량이 움직이는 가상 슬롯의 빈 공간 안으로 들어가서 슬롯과 동일한 주행 상태를 가질 때까지 요구되는 제어 입력값의 제공의 총합을 시뮬레이션을 통하여 구하였다.

2. 뉴로 퍼지 모델 구현 및 학습

위에서 구한 데이터들을 이용하여 차량 합류 이전의 각 차량에 대한 위치 및 속도 정보로부터 차량 합류시의 비용 함수값을 추정하는 뉴로 퍼지 모델을 구현하고자 한다. 앞서 논한 바와 같이 입력 정보는 $v, \Delta x, \Delta v$ 값이고, 따라서 이들 각각의 퍼지 멤버십 함수를 3개씩 취하여 임의의 입력 정보에 대한 비용 함수값을 추정해 내는 뉴로 퍼지 모델을 그림 4와 같이 구현하였다.

여기서는 1차 Sugeno형 퍼지 시스템과 등가인 신경망을 구성, 사용하였고, 이 모델을 실험 데이터로써 학습시키면서 멤버십 함수를 수정하고 퍼지 시스템의 추정 오차를 점진적으로 감소시켜 보다 정확한 비용 함수 추정기를 구현하였다. 한편 학습은 전방향 및 역방향 학습으로 나뉘어 전자의 경우에는 퍼지 규칙의 후건부에 있는 선형 계수가 최소 자승 추정법으로, 후자의 경우에는 규칙 전건부의 멤버십 함수가 그래디언트 하강법으로 각각 학습된다[9]. 그림 5(a),(b),(c)에 후방향 학습에 의한 멤버십 함수의 변화를 도시하였고, 그림 5(d)에는 추정기의 오차가 감소하는 과정을 보였다.

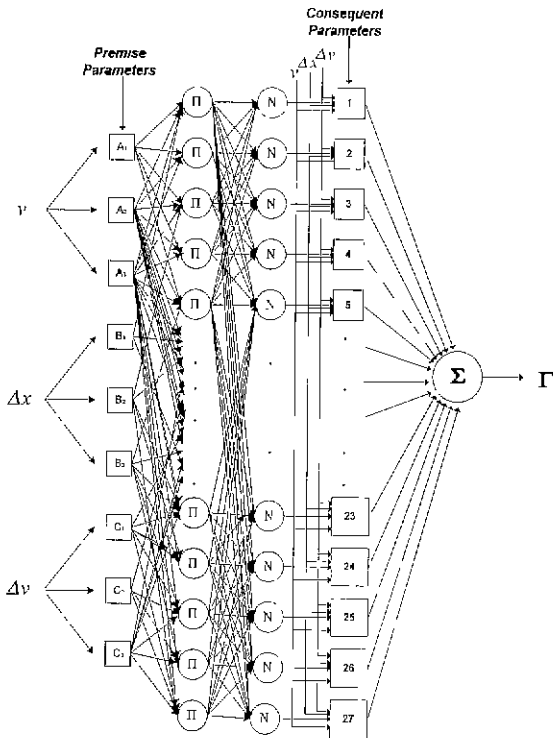
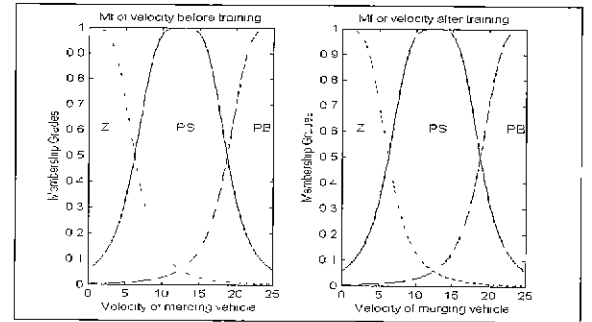
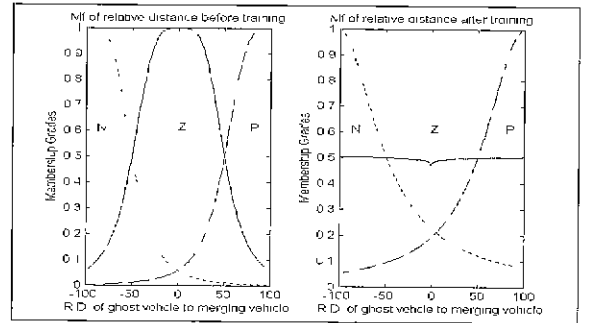


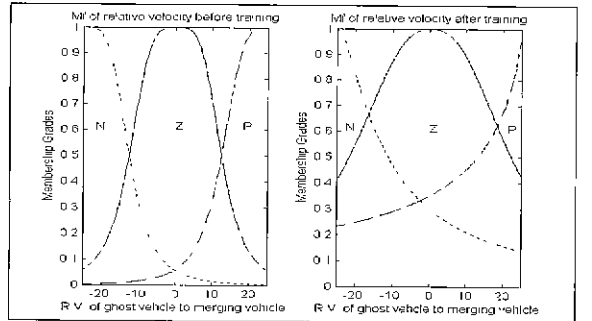
그림 4. Sugeno형 적응 뉴로 퍼지 추론 시스템.
Fig. 4. FIS architecture for a three-input Sugeno fuzzy model with 27 rules.



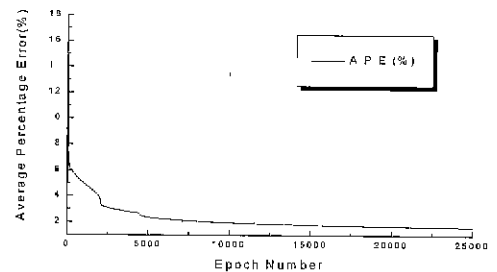
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. 적응 뉴로 퍼지 시스템의 학습 결과 1. (a) 속도의 멤버십 함수, (b) 상대 거리의 멤버십 함수, (c) 상대 속도의 멤버십 함수, (d) 적응 뉴로 퍼지 시스템의 학습 선도.

Fig. 5 Training results 1 of ANFIS model. (a) MF of velocity, (b) MF of relative distance, (c) MF of relative velocity, (d) learning curve of ANFIS

그리고 전방향 학습에서는 뉴로 퍼지 모델에 사용된 각 규칙의 후건부의 선형 계수들이 학습되는데, 그 결과는 그림 6과 같다.

퍼지 규칙의 후진부 $r_i = p_i x + q_i y + r_i z + s_i$
 규칙 1: If v is zero, Δx is negative, Δv is negative, then...
 $p_1 = -0.477, q_1 = -104.1, r_1 = -1042, s_1 = -3.941e+004$
 규칙 2: If v is zero, Δx is negative, Δv is zero, then...
 $p_1 = -0.1982, q_1 = 20.59, r_1 = 71.41, s_1 = -1947$

그림 6. 적응 뉴로 퍼지 시스템의 학습 결과 2
 Fig. 6. Training results 2 of ANFIS model.

3. 시뮬레이션 예 1

이제 학습을 통해 구현된 추정기로 비용 함수값을 추정하여 합류 공간을 선택, 차량 진입을 수행하는 합류 제어 알고리즘을 실제에 적용할 경우의 차량 합류 제어 성능을 예를 통해 검토하고자 한다. 그림 7과 같이 주도로상에서 여섯 대의 차량이 모두 10 m/sec의 등속도로

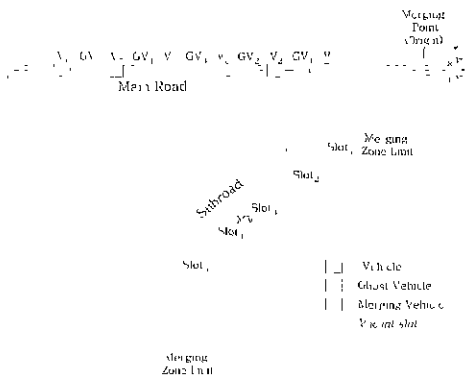


그림 7 합류 제어 예제 1의 초기 조건.
 Fig. 7 Initial conditions of merging control example.

표 1 합류 제어 예제 1의 초기 조건.

Table 1. Initial conditions of merging control example 1.

Vehicle ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6	MV
initial position(m)	-108	-121	-134	-147	-160	-173	-150
initial velocity(m/sec)	10	10	10	10	10	10	15

표 2. 예제 1의 슬롯 위치별 예상 비용 함수값.

Table 2. Estimated cost function values for each merging slot of example 1.

Selected Slot ID	Δx	Δv	Cost of Merging Vehicle	Order
Slot ₁	35.5	-5	15507	4
Slot ₂	22.5	-5	6830	2
Slot ₃	9.5	-5	1027	1
Slot ₄	-3.5	-5	9727	3
Slot ₅	-16.5	-5	17765	5

주행중인 상황에서 부도로상에서 15 m/sec의 속도로 주행하던 차량 MV가 주도로상으로 진입을 시도하는 경우를 고려하여 초기 조건이 표 1과 같이 주어진다 가정하자. 이 경우 합류 가능 구역 내에는 모두 5개의 합류 가능한 가상 슬롯 위치가 존재한다 추정기는 각각의 위치로 진입을 시도할 경우에 대한 합류 차량의 비용 함수값을 추정하였고, 그 결과는 표 2와 같다. 위치 정보상으로는 합류 차량으로부터 가장 가까운 곳에 있는 slot₁가 최적 진입 위치일 것 같지만, 합류 차량의 주행 속도 주도로상의 차량들보다 현저히 빠르기 때문에 slot₁보다 앞쪽에 위치한 slot₃가 선택되었고, 이는 물리적으로도 타당하다 실제로 각 슬롯을 합류 위치로 선택하여 합류를 시도한 경우를 시뮬레이션해 보았고, 그 결과로 얻어진 합류 차량의 속도, 가속도 변화를 아래의 그림 8 (a), (b)에 도시하였다.

위의 그림으로부터 차량이 slot₃ 위치로 진입할 때, 합류 차량의 속도 및 가속도 변화가 최소로 됨을 알 수 있고, 따라서 합류 제어기는 올바른 판단을 한 것으로 생각할 수 있다 한편 그림 8(c)에는 이 경우의 합류 차량이 도로의 교차 지점(그림 8(c)에서 위치 0, 시간 약 13 초인 지점)에 도달하기 전에 성공적으로 차량 대열에 진입하는 과정이 도시되어 있다.

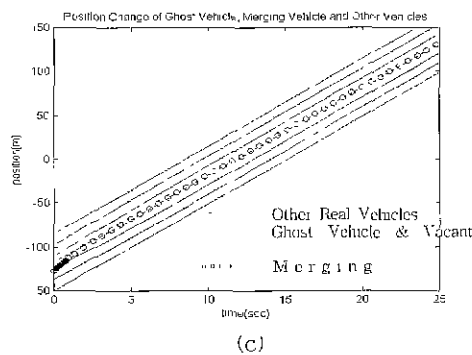
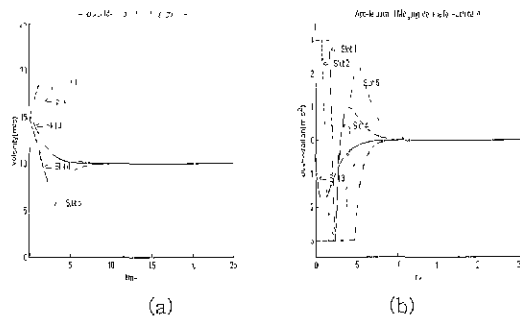


그림 8. 합류 제어 예제 1의 시뮬레이션 결과. (a) 슬롯 위치별 합류 차량의 속도 변화, (b) 슬롯 위치별 합류 차량의 가속도 변화, (c) 가상 차량과 실제 차량들의 위치 변화.

Fig. 8 Simulation results of merging control example 1. (a) merging vehicle's velocity profiles for each different merging case, (b) merging vehicle's acceleration profiles for each different merging case, (c) position profiles of ghost vehicle and real vehicles.

IV. 교통 흐름을 고려한 차량 합류 알고리즘

1. 합류 위치 선정

앞 절에서는 합류 차량의 에너지 소모를 고려하여 차량 합류 위치를 선택하였는데, 실제 상황에서 고려해야 할 또 다른 중요한 점은 전체적인 교통 흐름이다. 이미 앞에서 차량의 속도, 진입 예정 공간에 대한 위치차 및 속도차가 주어지면 합류까지 요구되는 제어 입력의 제공의 총합을 예측하는 뉴로 퍼지 모델이 구성, 학습된 상태이므로 이제 이를 이용하여 교통 흐름을 고려한 차량 합류 알고리즘을 제안하고자 한다.

앞 절의 그림 2에서와 같이 합류 가능 지역내에 $n-1$ 개의 가상 슬롯이 있다고 가정하면, 가상 슬롯 slot을 합류 위치로 선정하는 경우에 가상 차량 GV_i 의 합류 차량 MV에 대한 상대 거리 및 상대 속도는 이미 앞에서 정한 바 있다. 그런데 만약 합류 차량이 어느 위치로 진입을 하면, 그 후방에 위치한 차들은 안전 거리 확보를 위해서 감속을 해야 하고, 이 현상에 의해 전체적인 교통 흐름이 변화된다. 그래서 다음과 같이 후방 차량들의 제어 입력값의 총합을 예측하여 이를 뉴로 퍼지 모델의 비용 함수값에 추가하면, 그 결과로 얻어지는 합류 위치 결정은 전체 차량의 움직임을 고려한 셈이 된다. 한편 가상 차량 GV_i 의 후방에는 $n-i$ 대의 실제 차량이 주행중이고, 이 경우 GV_i 의 주도로상 k 번째 차량에 대한 상대 위치, 상대 속도는 다음과 같이 정한다.

$$\Delta X_k = X_{gv} - h_s(k-i) - X_k \quad (12)$$

$$\Delta V_k = V_{gv} - V_k$$

where, $k = i+1, i+2, \dots, n$ (13)

위에서 h_s 는 안전 거리를 나타내는데 앞에서 살펴본 바와 같이 차량의 속도와 여유 안전 거리에 의해 결정되는 상수이다. 여기서는 각 차량의 속도가 다른 경우도 고려하여, 합류 가능 지역내에서 주행중인 차들 중 선택된 가상 차량의 후방에 위치한 모든 차들의 속도의 평균 값을 이용하여 다음과 같이 정하기로 한다.

$$h_s = \lambda V_{avg} + h_o$$

where, $V_{avg} = \frac{\sum_{k=i+1}^n V_k}{n-i}$ (14)

위의 (12), (13), (14)를 이용하면 진입 위치 후방에 있는 차량 각각에 대하여도 에너지 소모량을 예측할 수 있고, 퍼지 규칙 결론부에 사용될 비용 함수를 다음과 같이 수정하면 모든 차량의 합류로 인한 총 에너지 소모량을 추정할 수 있다.

$$\bar{F} = F_1 + F_2 \quad (15)$$

여기에서 F_1 은 합류 차량에 대한 비용 함수값, F_2 는 진입 위치 후방 차량들의 비용 함수값의 총합이다. 만약 제어가 초기 차량 주행 정보를 이용하여 수정

된 비용 함수값을 최소화하는 합류 위치를 선택하도록 하면, 선택된 공간은 차량 합류 과정에서 발생하는 총 에너지 소모를 최소화하는 위치가 되어 각 차량에 탑승한 승객들의 평균적인 승차감이 향상될 가능성이 높고, 간접적으로 전체적인 교통 흐름을 고려한 최적 합류 위치가 된다.

2. 시뮬레이션 예 2

여기서는 각 차량이 임의의 속도 및 위치를 갖는 경우에 대한 예를 들어 수정된 비용 함수를 이용한 합류 제어 알고리즘의 제어 성능을 검토하고자 한다. 표 3과 같은 초기 주행 상황이 주어지고 부도로상의 차량 MV가 주도로상으로 진입을 시도하려 한다고 가정하자(그림 9 참조).

이 경우에 대한 비용 함수값의 추정 결과는 표 4와 같다. 합류 차량의 비용 함수만을 고려하면 slot₃가 최적 진입 위치인데, 진입 위치 후방 차량들의 비용 함수값들을 추가적으로 합산한 결과로는 slot₃가 최적 위치이다.

물리적으로 이 위치는 차량의 간격이 크고, 합류 차량보다 후방에 위치하여, 합류 차량의 속도가 다른 차량들보다 현저히 느린 본 예제의 교통 상황에서 가장 적합한 차량 진입 위치로 판단될 수 있다. 만약 slot₁을 택할 경우는 후방 차량들의 비용 함수값은 최소로 되지만, 합류 차량 스스로가 많은 감속을 해야 하므로 전체적인 에너지 소모량 및 가속도 변화는 slot₃를 선택한 경우보다 크게 된다. 이 경우에 합류 제어기는 전체 차량의 움직임을 간접적으로 고려하여 최적 합류 위치를 선택한 것으로 생각할 수 있다. 한편 합류 위치 선택 후 합류 차량 MV의 합류 성공 과정을 그림 10에 도시하였다.

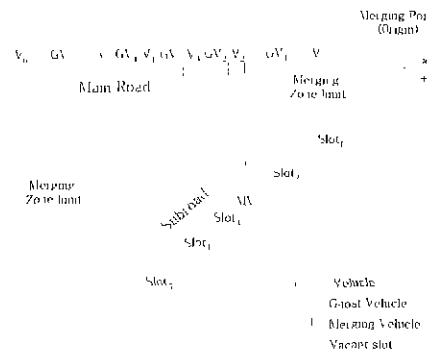


그림 9. 합류 제어 예제 2의 초기 조건.
Fig. 9. Initial conditions of merging control example 2.

표 3 합류 제어 예제 2의 초기 조건.
Table. 3. Initial conditions of merging control example 2.

Vehicle ID	V1	V2	V3	V4	V5	V6	MV
Content							
initial position(m)	-125	-142.5	-147.5	152.5	-157.5	-175	-150
initial velocity(mv/sec)	10	12	8	8	8	12	6

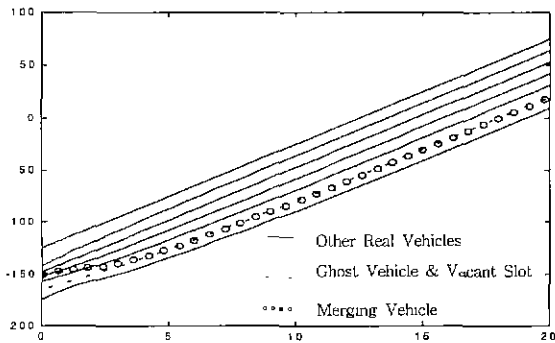


그림 10. 합류 제어 예제 2의 시뮬레이션 결과.
Fig. 10. Simulation results of merging control example 2.

표 4 예제 2의 슬롯 위치별 예상 비용 함수값
Table 4 Estimated cost function values for each merging slot of example 2.

Selected Ghost Vehicle ID	Cost of Merging Vehicle ($N^2 + soc$)	1st Order	Cost of Behnd Vehicle ($N^2 + soc$)	2nd Order	Total Sum of Costs ($N^2 + sec$)	Fmal Order
GV ₁	4053	5	7965	1	12018	2
GV ₂	1819	3	12163	4	13982	4
GV ₃	813	1	13857	5	14670	5
GV ₄	954	2	12151	3	13105	3
GV ₅	2468	4	8937	2	11405	1

V. 결론

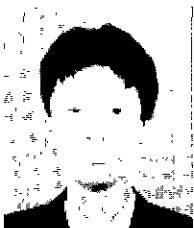
본 논문에서는 자율 운송 시스템의 교차로에서의 안전하고 효율적인 차량 합류 제어를 위한 차량 합류 알고리즘을 제안하였다. 우선 차량의 1차원 운행에 대하여는 차량간 안전 거리를 계산 후 PD 제어로써 전후 차량이 서로 안전 거리를 유지하도록 하였고, '가상 슬롯, 가상 차량' 개념을 도입하여 기존의 1차원 제어를 이용한 차량 합류를 시도하였다. 그리고 이 과정에서 제어가 차량의 최적 진입 위치를 판단하여 차량 합류 제어를 수행하도록 하였는데, 판단을 위한 성능 지수로는 차량의 에너지 소모를 의미하는 비용 함수를 도입하여 사용하였다. 한편 주어진 교통 상황에서의 각 차량들에 대한 위치 및 속도 정보로부터 차량 합류시의 비용 함수값을 추정하기 위해서 적응 뉴로 퍼지 추론 시스템을 이용하여

추정기를 구성하였고, 그 과정은 다음과 같다. 우선 합류 위치 결정을 실제로 인간 운전자가 수행하는 경우를 고려하여 퍼지 규칙들을 정의하고, 이 규칙에서의 결론부를 비용 함수값을 이용하여 표시하였다. 그리고 변형된 퍼지 추론 시스템을 등가의 신경 회로망으로 모델링하고, 차량 시뮬레이션을 통하여 획득한 학습 데이터들을 사용하여 각 규칙의 멤버십 함수 및 선형 계수들을 훈련시켜 보다 정확한 비용 함수값을 예측할 수 있는 추정기를 구현하였다.

끝으로 제안된 차량 합류 알고리즘을 사용하여 교차로에서의 차량 합류 시뮬레이션을 수행한 결과, 차량의 안전한 진입이 가능하였고, 합류 차량 및 기존 차량들의 합류로 인한 가속도 변화를 최소화하여, 승객의 승차감 향상과 도로상의 전체적인 교통 흐름을 동시에 효과적으로 고려하는 차량 합류 제어 성능을 보였다.

참고문헌

- [1] A. J. Puc, "Implementation trade-offs for a short-headway vehicle-follower automated transit system", *IEEE Trans. Vehicular Tech.* vol. 42, no. 4, pp. 657-672, February, 1979.
- [2] S. Sheikholeslam, and C. A. Desoer, "Longitudinal control of a platoon vehicles", ACC, pp 291-295, 1991
- [3] T. Pilutti, U. Raschke, and Y. Koren, "Computerized defensive driving rules for highway maneuvers", ACC, pp. 809-811, 1991.
- [4] H. Y. Chu, "A state-constrained vehicle follower approach to the station-egress problem", *IEEE Trans. Vehicular Tech.* vol. VT-28, no. 1, pp. 70-79, February, 1979
- [5] 이세영, "퍼지 논리를 이용한 PRT 시스템의 차량 합류 알고리즘 개발". 대한기계학회 춘계 학술대회는 문집, pp 154-159, 1997, 4.
- [6] R. E. Fenton, "A headway safety policy for automated highway operations", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. VT-28, February, 1979.
- [7] J. E. Anderson, *Transit System Theory*, Lexington Books, 1978.
- [8] J. H. Irving, *Fundamentals of Personal Rapid Transit*, Lexington Books, 1978.
- [9] J.-S. R. Jang, and C.-T. Sun, *Neuro-Fuzzy Modeling and Control*, 1995.



류 세 희

1973년 10월 15일생. 1996년 한양대 기계공학과 졸업. 동대학원 기계설계학과 석사(1998), 1998년~현재 동대학원 기계설계학과 박사과정. 관심분야는 로봇 공학 및 지능 제어.



박 장 현

1961년 2월 25일생 1983년 서울대 기계공학과 졸업 동대학원 기계설계학과 석사(1985), 미국 MIT대학 박사(1992). 1994년~현재 한양대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 로봇 공학 및 지능 제어.