◎ 논 문

http://dx.doi.org/10.22680/kasa2019.11.3.037

보행자 충돌 회피를 위한 자율주행 차량의 종방향 거동 계획

김유진* · 문종식* · 정용환* · 이경수*,†

Longitudinal Motion Planning of Autonomous Vehicle for Pedestrian Collision Avoidance

Yujin Kim*, Jongsik Moon*, Yonghwan Jeong*, Kyongsu Yi*,†

Key Words : Autonomous Vehicle(자율주행차량), Active Safety(능동안전), Collision Avoidance(충돌회피), Pedestrian (보행자), Acceleration control(가속도제어)

ABSTRACT

This paper presents an autonomous acceleration planning algorithm for pedestrian collision avoidance at urban. Various scenarios between pedestrians and a vehicle are designed to maneuver the planning algorithm. To simulate the scenarios, we analyze pedestrian's behavior and identify limitations of fusion sensors, lidar and vision camera. Acceleration is optimally determined by considering TTC (Time To Collision) and pedestrian's intention. Pedestrian's crossing intention is estimated for quick control decision to minimize full-braking situation, based on their velocity and position change. Feasibility of the proposed algorithm is verified by simulations using Carsim and Simulink, and comparisons with actual driving data.

1. 서 론

완전 자율주행 기술에 도달하기에 앞서 운전자의 안전한 주행을 돕는 ADAS(Advances Driver Assistance System)가 널리 대중화되고 있으며 기술 범위의 확장을 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 자율화의 범위가 점차 넓어짐에 따라 주행 시 안전에 대한 우려와 관심 또한 증가하고 있다. 주행 시 고려해야 할 사항 중 보행자의 안전 확보는 무엇보다도 가장 우선시 된다.

Euro NCAP(European New Car Assessment Programme)에서는 2016년부터 능동형 안전 시스템의 안전도 평가 항목으로 보행자 안전을 위한 AEB pedestrian 을 추가하였다. 또한 2018년 우버 자율주행 차량의 보행자 사망사고가 발생하면서 보행자의 안전 확보에 대한 문제가 다시 한번 대두되었다. 이와 같이 완전 자율주행 차량의 도래를 위해서는 보행자의 안전을 확보하는 기술이 필수적이며 보행자의 거동에 따른 적절한 차량의 종방향 제어가 필요하다.

차량이 추종할 종방향 속도를 결정하기 위해서는 앞서 보행자 거동에 대한 분석과[1~3] 보행자의 횡단 의도 파악이[4~7] 진행되어야 한다. 기존 연구에서는 보행자의 나이와 성별에 따른 거동 속도를 통계적으로 분석하였다. 그러나 보행자는 방향 전환이 잦고 급격히 변할 수 있기 때문에 요 방향의 보행자 거동 분석은 미비하다. 보행자의 거동 분석은 3 장에서 다뤄진다. Christophe F. Wakim[4]은 보행자의 거동을 Markovian model로 구성하여 보행자의 이동 속도와 방향 전환을 확률적으로 분석하였다. 보행자의 횡단 의도 파악에 대한 기존 연구는 카메라 센서를 이용한 머신 러닝을 통해 보행자의 횡단 의도를 파악하는 방식과[5] KF(Kalman Filter)와 UKF(The Unscented Kalman Filter)를 통해 보행자 거동을 예측하는 방식으

* 서울대학교 차량 동역학 및 제어 연구실
†교신 저자, E-mail : kyi@snu.ac.kr
E-mail : zxc123xc@snu.ac.kr

자동차안전학회지:제11권, 제3호, pp. 37~42, 2019
논문접수일: 2019.7.8, 게재확정일: 2019.9.17

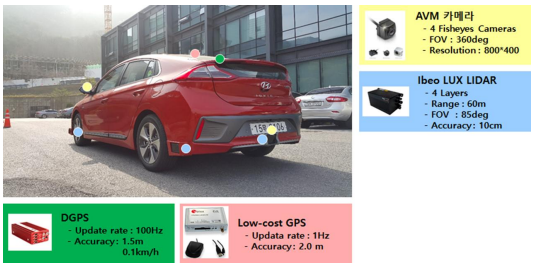
로[6] 진행되었다.

본 논문에서는 도심 환경에서 보행자와의 충돌을 회피하고 차량의 주행 승차감을 고려하여 종방향 속도 계획을 제안한다. 먼저 사용한 차량의 센서 구성 분석과 시뮬레이션 상에 재현할 보행자 거동에 대한 분석이 진행되었으며 이는 기존 보행자 거동 분석 자료를 참고하였다. 주변 장애물 중 보행자를 분류하고 보행자의 위치와 속도 등의 상태 정보를 취득하는데 사용된 센서는 Ibeo 라이다 센서와 카메라 센서를 퓨전하여 사용하였다. 또한 보행자의 의도 판단은 보행자 속도와 위치를 바탕으로 예측하였으며, 추종할 종방향 속도를 결정하는 데는 자차량과 보행자의 속도, TTC(Time to Collision) 그리고 보행자의 횡단 완료까지 예측되는 시간이 적용되었다. 이렇게 설계된 보행자 거동 계획 알고리즘은 실제 운전자의 거동과 비교하고 분석했으며, 센서의 인지 범위와 확인된 보행자 분류 가능 영역을 적용하여 Carsim과 Matlab/Simulink tool로 시뮬레이션 하였다.

2. 차량 및 센서 구성

실제 주행 데이터와 보행자 데이터를 수집하기 위해 사용된 차량, 전체적인 센서 구성과 센서의 FOV(Field of view)는 Fig. 1과 같다. 차량은 현대 자동차의 아이오닉 차량이며, 센서 구성은 차량 측위를 위한 고성능 GPS와 저가 GPS가 장착되어 있고 주변 정보를 얻기 위한 센서

(a) Front-side



(b) Rear-side

Fig. 1 Vehicle and Sensors configuration

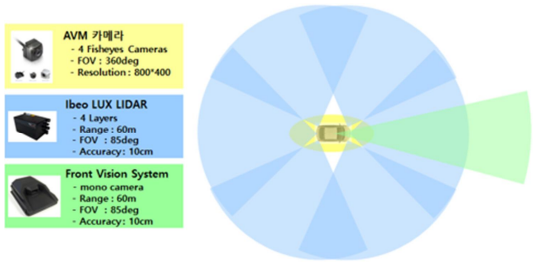


Fig. 2 Vehicle and Sensors FOV

는 전 방향 모니터링 카메라(Around View Monitoring, AVM)와 전방 카메라 센서 그리고 Ibeo 라이다 센서로 구성되어있다.

3. 보행자 거동 분석

3.1. 보행자 거동 속도 분석

Coffin, A[1]는 보행자의 거동 속도를 성별에 따라 분류하였으며 여성의 평균 속력은 1.24m/s, 남성의 평균 속력은 1.29m/s 로 정의하였다. Knoblauch, R. L[2]은 와 65세 이상의 노년층 보행자로 분류하여 평균 속력은 각각 1.51m/s 와 1.25m/s로 정의했다. Jeannette Montufar[3]는 보행자의 평균 속도와 횡단하는 보행자의 평균 거동 속도를 분석했으며, 샘플 보행자를 65세 이상의 보행자와 20~64세의 보행자 그리고 각 각의 성별에 따라 분석을 진행했다. 각 분류의 평균 속력은 Table 1 같다. 이러한 이전 연구들을 바탕으로 5장에 언급될 시뮬레이션의 보행자 거동 속도를 설정하였다.

Table 1 Average walking speed of pedestrians

	Age	Gender	Normal	Crossing
Average Walking Speed (m/s)	Above 65	All	1.14	1.36
		Woman	1.11	1.33
		Man	1.19	1.40
	20-65	All	1.36	1.61
		Woman	1.33	1.57
		Man	1.41	1.65

4. 차량 종방향 거동 계획 알고리즘

본 논문에서 제시하는 보행자 안전을 위한 차량 종방

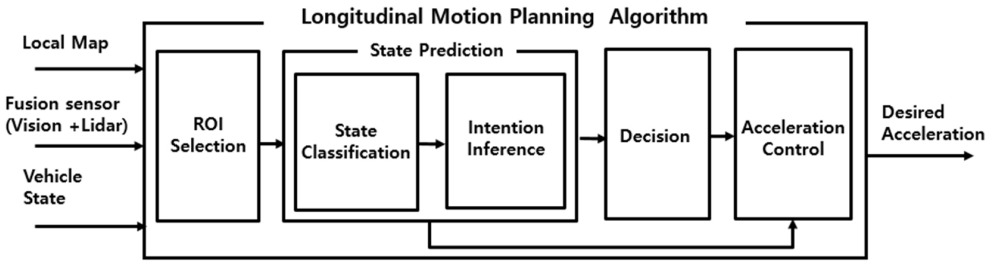


Fig. 3 Longitudinal motion planning algorithm block diagram

향 거동 계획 알고리즘의 전체적인 블록 다이어그램은 Fig. 3과 같다. 해당 알고리즘의 입력으로는 퓨전 센서로부터 보행자로 분류된 타겟 데이터와 카메라 센서를 통한 로컬 차선 맵 정보와 캔 통신을 통해 들어오는 위치, 속도, 가속도, 요(Yaw)각 등의 자 차량 정보가 있다. 이를 통해 해당 알고리즘은 최종적으로 차량이 추종해야 할 가속도를 도출한다.

4.1. 보행자 상태 예측 및 판단

4.1.1. 보행자 상태 분류

빠른 제어를 위해 차량이 주행하는 차선 중앙 경로에서 양 쪽으로 각각 6m 범위를 관심 영역(ROI)으로 설정하고, 관심 영역 내에 감지된 보행자의 필터링된 보행자의 요(Yaw)각이 차도를 향하는 보행자들을 주요 보행자로 분류하였다. 또한 주요 보행자가 다수일 경우에는 차도 안으로 들어온 인레인 보행자와 차량과의 거리에 가중치를 두어 제어에 영향을 줄 타겟 보행자를 선정하였다.

4.1.2. 보행자 의도 파악 및 모션 판단 설계

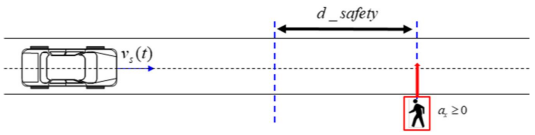
보행자의 의도 파악은 보행자의 요(Yaw)방향과 속도 변화에 따라 판단하였다. 우선적으로 인레인 타겟일 경우 횡단 의도가 있는 보행자로 정의하였고, 보도의 보행자일 경우 요(Yaw) 는 도로로 향하고 속도를 높이는 보행자 또한 횡단 의도가 확실한 보행자로 판단하였다. 반대로 인레인 밖에서 속도를 낮추어 정지하는 보행자는 횡단 의도가 없음으로 파악하여 차량이 통행 우선권을 갖도록 설계하였다. 가장 주의해야 할 보행자는 점점 속도를 낮추며 차도 안으로 계속 들어오는 보행자이다. 이 경우에는 보행자의 의도를 판단하기에 어려움이 있으므로 설정한 안전 거리 에서 차량이 감속하면 충분히 충돌 전에 멈출 수 있도록 현재의 차량 속도를 계산된 안전 속도로 낮추면서 진입하도록 설계했다. 낮은 속도로 주행하면서 실시간으로 보행자 의도를 파악하게 되고 보행자의 의도가 파악되면 그에 맞는 제어가 들어가도록 설계되었다.

반면, 보행자와 차량 사이에는 다양한 상황이 존재하므로 미처 예상치 못한 상황이 전개되거나 갑자기 안전거리가 확보되지 않는 거리에서 보행자가 튀어나오는 경우가 있을 수 있다. 또한 인지에 지연이 있을 경우와 보행자 분류에 지연이 있거나 분류 오류의 발생 시 위험 상황이 발생할 수 있어 비상 제동 모드를 독립적으로 가지도록 설계했다.

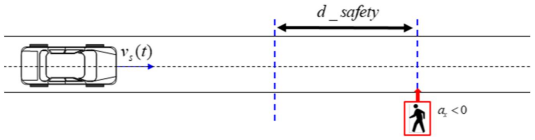
4.2. 종방향 주행 가속도 설계

차선 정보와 보행자의 거동 속도를 기반으로 하여 도출한 보행자의 횡단을 완료 시간을 예측했고, 이를 바탕으로 추종할 가속도를 설계하였다. 또한 4.1.2에서 분류한 각 각의 상황을 고려하여 설계 되었다.

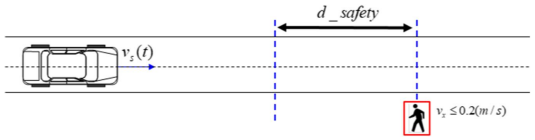
종방향 주행 가속도는 크게 세 가지의 상황으로 분류된다. 첫 번째로 보행자의 횡단 의도가 확실하여 보행자에게 통행 우선권을 주는 경우, 두 번째로는 보행자가 속도를 늦추면서 계속 다가오는 경우, 보행자가 차량에게 통행 우선권을 주는 경우 그리고 안전 거리가 확보되지 않는 비상 상황의 경우로 나뉜다. 각 상황은 Fig. 4와 같다. 각 상황에서의 추종할 가속도는 차례로 식 (1), (2), (3), (4)와 같이 설계했다. 여기서 파라미터 d는 타겟 보행자와 차량 간 거리, d_{safety}는 설정한 안전 거리 6m, $a_{x,\max}$ 는 최대 감속도 $-5m/s^2$, t_{cross}는 보행자가 횡단을 완료하는 데 걸리는 예상 시간, V_{safety}는 d_{safety}내에서 최대 감속 시 충돌 전 멈춤 수 있는 안전 속도이다. 식 (1)은 타겟 보행자가 횡단을 완료하는 시점에 안전 거리를 두고 차량이 지나가도록 설계됐고, 식 (2)는 안전거리에서 최대 감속하면 충분히 멈출 수 있게 속도를 미리 낮추



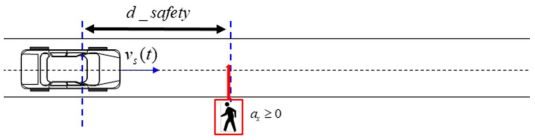
(a) Scenario 1



(b) Scenario 2



(c) Scenario 3



(d) Scenario 4

Fig. 4 Scenarios for acceleration planning

도록 설계하였다. 또한 식 (4)는 최대 감속을 하도록 설계 하였다. 해당 종방향 모션 계획 알고리즘은 보행자의 안전을 우선시하는 범위 내에서 최대한 제동의 변화가 완만한 기울기를 갖도록 설계했으며, 제어 시점이나 보행자의 거동에 따른 제어 판단은 최대한 실제 운전자의 주행과 유사하도록 부드러운 제동을 통해 충돌을 회피하도록 설계했다.

$$1: a_{x,des} = \frac{2(d - d_{safety} - V_{car}(2t_{cross} - t_{delay}))}{(t_{cross} - t_{delay})^2} \quad (1)$$

$$2: a_{x,des} = \frac{-(V_{car}{}^2 - V_{safety}{}^2)}{2(d - d_{safety} - t_{delay}V_{car} - 3)^2} \quad (2)$$

$$3: a_{x,des} = 0 \quad (3)$$

$$4: a_{x,des} = -5m/s^2 \quad (4)$$

$$V_{safety} = \frac{a_{x,\max} + \sqrt{a_{x,\max}{}^2 - 2a_{x,\max}d_{safety}}}{2} \quad (5)$$

5. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 Matlab 환경에서 실제 주행 데이터와 설계된 주행 가속도를 통한 주행 데이터를 비교하였다. 또한, 안정성을 평가하기 위해 Simulink와 Carsim을 연동하여 실제 차량 모델과 횡단하는 무작위의 보행자 모델을 넣고 MFCC 피드백 제어기를 사용하여 추종한 가속도를 입력으로 주행한 결과를 바탕으로 안정성을 테스트하였다.

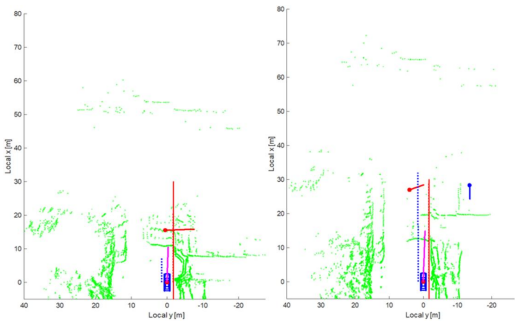
5.1. 실제 운전자의 주행 데이터와 설계 데이터 비교

실험은 보행자 발견 당시의 보행자와의 거리가 단거리인 경우와 중거리인 경우로 나누어서 진행했다. 실험을 통해 보행자 중심의 주행 특성을 가진 능숙한 운전자의 판단 및 종방향 속도 계획 데이터를 확보하고, 또한 퓨전 센서로 취득한 보행자 정보를 바탕으로 설계한 종방향 모션 계획을 적용하여 비교해보았다. 결과는 Fig. 5와 같다. 빨간색으로 표시된 부분이 인지된 보행자 중 타겟 보행자를 뜻하며, 이어진 막대 부분은 보행자의 요(Yaw)방향와 속도의 크기를 뜻한다. 보행자가 감지된 순간부터 보행자와의 거리를 기록했으며, 차량의 속도와 거리가 실제 거동과 유사함을 확인했다. 또한 보행자가 횡단 하는 동안의 TTC를 고려한 상대 속도와 보행자와의 거리 그래프에서도 실제 데이터와 유사하게 확보됨을 확인함으로써 종방향 모션 설계 알고리즘의 유효성을 확인했다. TTC는 식 (6)과 같다.

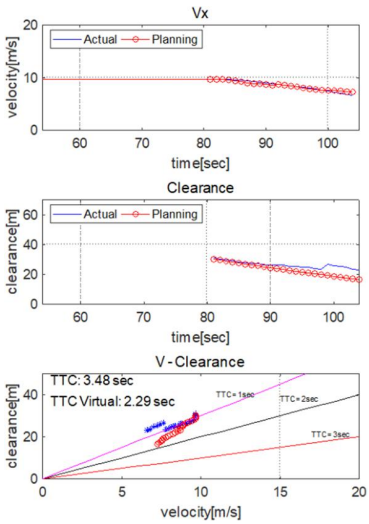
$$TTC(s) = \frac{Clearance(m)}{V_{rel}(m/s)} \quad (6)$$

5.2. 안전성 테스트

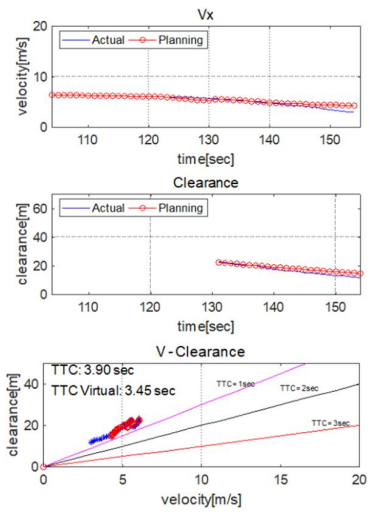
설계된 알고리즘의 안전성을 테스트하기 위해 Carsim 툴과 연동하여 Simulink 상에서 시뮬레이션을 진행하였다. Carsim에서 차량 특성을 고려한 가상의 차량에 가속도 설계 알고리즘을 통해 도출된 추종 가속도를 대입하였고, 차량은 미리 추출한 서울대학교 교내 맵에서 추종 가속도에 따라 주행하도록 설계했다. 또한 가상의 보행자는



(a) Short / Middle distance scenario environment



(b) Short distance scenario plot



(c) Middle distance scenario plot

Fig. 5 Simulation result compared with experiment data

충돌이 발생할 수 있는 단거리 상황만을 다루기 위해 차량으로부터 10-50m의 범위에서 무작위로 횡단하도록 설계했다. 시뮬레이션 환경은 다음의 Fig. 6과 같다. 검정색 점이 횡단하는 보행자를 나타내며, 포물선을 그리는 파란 선은 퓨전 센서의 FOC(Field Of Classification)를 나타낸다. Fig. 7의 그래프는 안전성을 확인하기 위해 상대 속도와 보행자와의 거리를 나타내며, 각 색 상 별로 한

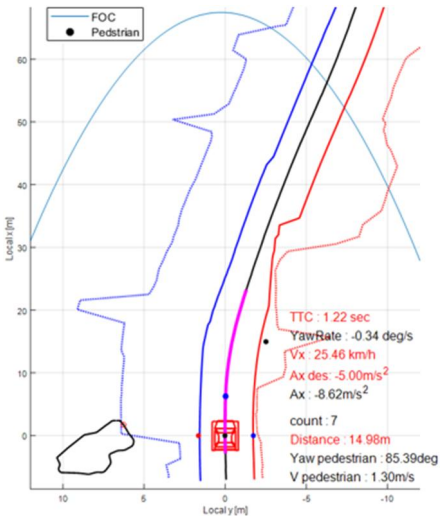


Fig. 6 Carsim / Simulink simulation environment

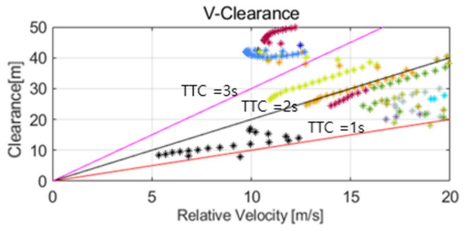


Fig. 7 Relative velocity-clearance simulation result

Table 2 TTC simulation result (sample 100 pedestrian)

Range(sec)	TTC
T< 0	0
0-0.5	2
0.5-1	10
1-2	64
2-3	15
3-4	7
4-5	2

명의 보행자가 인지된 순간부터 횡단을 완료할 때까지의 데이터이다. 횡단하는 보행자가 감지가 된 순간부터 상대 속도가 줄어들면서 TTC가 늘어나며 횡단 완료까지 안전 TTC를 확보한 것을 확인했다. Table 2는 해당 시뮬레이션을 통해100명의 보행자를 샘플로 하여, 횡단 완료 순간의 확보된 TTC를 조사한 결과이며 충돌 상황은 발생하지 않음을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 보행자 안전을 위한 자율 주행 차량의 종방향 거동 계획 알고리즘을 제안했다. 퓨전 센서를 통해 인지된 보행자의 위치, 속도 그리고 요(Yaw) 방향을 통해 보행자의 상태를 분류했으며, 타겟 보행자를 결정하고 타겟 보행자의 횡단 속도와 횡단 완료 시점을 추정하여 차량의 추종 가속도를 결정하였다.

개발한 알고리즘의 유효성과 안정성을 검증하기 위해 Matlab과 Carsim, Simulink툴을 이용해 시뮬레이션을 진행하였다. 능숙한 운전자의 보행자 감지 후 판단 시점과 주행 특성을 설계한 알고리즘에서 도출된 추종 가속도를 통한 주행 거동과 비교했다. 또한, 차량 특성을 고려한 피드백 제어를 통해 무작위의 보행자에 대한 차량 주행 시뮬레이션을 반복 수행했다. 그 결과로 충돌 상황이 발생하지 않음을 확인했고, 보행자를 인식한 시점부터 속도를 줄임으로써 보행자의 횡단 완료 시점까지 TTC 확보하여 안전하게 주행함을 검증했다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원(NRF – 2016R1E1A1A01943543)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

(1) Coffin, A. and J. Morrall. Walking Speeds of Elderly Pedestrians at Crosswalks. In Transportation Research Record 1487, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1995, pp. 63~67.

(2) Knoblauch, R. L., M. Pietrucha, and M. Nitzburg. Field Studies of Pedestrian Walking Speed and Start-Up Time. In Transportation Research Record 1538, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996, pp. 27~38.

(3) Montufar, J., Arango, J., Porter, M., and Nakagawa, S. (2007), Pedestrians' Normal Walking Speed and Speed When Crossing a Street. Transportation Research Record, 2002(1), 90~97.

(4) Christoph G. Keller and Dariu M. Gavrila, 2014, Will the Pedestrian Cross? A Study on Pedestrian Path Prediction, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 15, No. 2. M.

(5) S. Kohler, M. Goldhammer, S. Bauer, K. Doll, U. Brunsmann, and K.Dietmayer. Early detection of the pedestrian's intention to cross the street. In Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on, pages 1759~1764, Sept 2012.

(6) Meuter, U. Iurgel, S.-B. Park, and A. Kummert, "The unscented Kalman filter for pedestrian tracking from a moving host", in Proc. IEEE Intell. Veh. Symp., 2008, pp. 37~42.

(7) 허슬기, 정용환, 이경수, "자율주행 차량을 위한 보행자 대상 속도제어 전략", 한국자동차안전학회 춘계 학술대회, 2018.