

초음파 위치인식 시스템과 INS 결합을 통한 차량의 자율 주행

Autonomous Navigation of the Vehicle Via Ultrasonic Positioning System and INS Integration

신태영*

Taek-Young Shin*

〈Abstract〉

For a vehicle to follow a reference path accurately, its position must be estimated accurately and reliably. In this paper, we propose a lateral control algorithm for autonomous navigation of a vehicle via USAT(Ultrasonic Satellite System), which is an absolute position measurement system using an ultrasonic wave and INS(Inertial Navigation System) integration. In order to estimate the vehicle's parameters, a J-turn test is used. And the autonomous navigation performances of proposed lateral control algorithm and validity of proposed lateral control algorithm are verified and evaluated by simulation and experiments.

Keywords : Autonomous Navigation, Vehicle, Ultrasonic Positioning System, INS, Kalman filter

* 연암공과대학교 기계공학과, 교수
E-mail: tyshin@yc.ac.kr

* Dept. of mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology

1. 서론

최근 사람의 운전 없이 주행할 수 있는 자율주행차 상용화에 대한 기대감과 함께 자율주행차 시장 규모가 점차 확대되고 있다. 그에 따라 국내외 자율주행 기술은 지속적으로 고도화 되고 있으며, 자율주행 관련 산업 또한 발전을 거듭하고 있다. 자율주행 자동차에 대한 정의를 내려보면 운전자의 개입 없이 주변 환경을 인식하고 주행 상황을 판단하여, 차량을 제어함으로써 스스로 주어진 목적지까지 주행하는 자동차를 말한다. 이러한 자율주행 자동차는 교통사고를 줄이고 교통 효율성을 높이며 연료를 절감하고 운전을 대신해줌으로써, 편의를 증대시킬 수 있는 미래 개인 교통수단이 될 것으로 기대된다.

2022년 9월 국토교통부에서 발표한 모빌리티 혁신 로드맵에 따르면 정보는 2025년까지 운전자가 개입하지 않는 Level 4 단계의 완전자율주행 대중교통을, 2027년까지 완전자율주행 승용차를 출시하겠다는 목표를 세웠다[1,2].

차량의 자율 주행을 주위 환경 정보를 획득하고 자신의 위치를 추정하기 위한 센서 융합 기술과 함께 자율적으로 원하는 목표점에 가장 합리적인 방법으로 도달할 수 있어야 한다. 그러기 위해서는 먼저 차량의 위치를 정확히 추정하는 것이 중요하며 이를 바탕으로 정해진 궤적을 정확히 추종할 수 있는 알고리즘이 연구되어야 된다. 차량의 자율 주행을 위한 위치 추정에는 GPS가 현재 가장 널리 사용되고 있으며 GPS의 단점을 보완할 수 있도록 GPS/INS 등의 센서 융합을 통한 위치 추정에 관한 연구가 널리 진행되고 있다[3,4]. 또한 차량의 자율 주행을 위해서는 차량의 종방향 및 횡방향 제어가 우선적으로 수행되어야 하며 다양한 환경에서도 적용 가능한 제어 기술에 관한 연구도 필요하다. 그러나 실외에서의 차량의 자율

주행 성능을 평가하기 위해서는 공간적 제약과 실제 도로에서의 테스트는 많은 문제점이 있으므로 자율 주행 성능을 정확히 평가하기 어렵다[5,6].

본 논문에서는 차량의 무인화를 연구함에 있어 문제점인 차량의 자율 주행을 실내에서 실험 가능하도록 축소차량을 제작하고 실내에서는 GPS를 이용할 수 없으므로 실내에서 정밀한 위치추정이 가능한 초음파 위치인식 시스템[7]을 이용하고 특히 횡방향 제어의 목적을 달성하기 위해서는 방향각(heading angle)을 정확하게 추정하는 것이 중요하므로 초음파 위치인식 시스템과 INS(Inertial Navigation System)를 칼만필터로 결합하여 차량의 방향각을 정확히 추정하도록 시스템을 구성한다. 또한 기존의 횡방향 제어기의 문제점을 극복하기 위하여 새로운 횡방향 제어 알고리즘을 제안하고 이를 검증하기 위하여 먼저 실험을 통하여 두 바퀴 모델(single-track model)의 모델링 파라미터를 추정하고 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다. 그러나 실제 자율 주행 차량과 시뮬레이션에 사용된 모델 사이에는 모델링 오차 및 파라미터 오차가 존재하므로 실제 차량을 통한 실험으로 제안한 횡방향 제어 알고리즘의 자율 주행 성능을 평가한다.

2. 초음파 위치인식 시스템과 INS의 결합

2.1 초음파 위치인식 시스템

이동할 등이 제안한 초음파를 이용한 정밀위치 인식 시스템[7]은 MURATA사의 40kHz 초음파 센서를 이용하여 Fig. 1과 같이 구성된 초음파 송수신기를 바탕으로 Fig. 2와 같이 기반시설송신 방식으로 일정 영역 안의 고정된 위치에 초음파 송신기가 4개 설치된다. 측정 대상물에 초음파 수신

기가 설치되고 각각의 초음파 송신기로부터 들어오는 라디오 주파수 동기 신호와 초음파 신호를 받아서 각각의 거리를 측정하게 되고 이를 바탕으로 3차원 위치를 인식하게 된다. 지금부터 초음파를 이용한 정밀위치인식 시스템을 초음파 위성 시스템 (Ultrasonic Satellite System, USAT) 이라 한다.

초음파 송신기와 수신기 간의 초음파 시간지연 측정을 위하여, 고정 측의 초음파 송신부와 이동 측의 수신부는 동기화 되어야 한다. 이를 위해서 라디오 주파수 동기신호를 이용하여 초음파 송신 시점을 동기화 한다. 가까운 거리이므로 라디오 주파수 송수신부 간의 시간지연은 없는 것으로 가정 하였다. 동일영역 내, 여러 대의 초음파 송신기에서 동시에 음파를 발신할 경우 음파 간의 간섭으로 개별 신호의 구분이 힘들어지므로 각각의 초음파 송신기는 라디오 주파수와 같이 순차적으로 동기화된다. Fig. 3은 라디오 주파수 동기신호에 의해서 초음파 수신기가 초음파를 수신하는 타이밍도이다. 초음파 수신기는 라디오 주파수 동기 신호 기준으로 초음파 송신기로부터 받은 초음파의 체공시간을 계산하고 각각의 초음파 송신기와 초음파 수신기 간의 거리 $d_i(i=1, \dots, 4)$ 를 계산한다. 초음파 수신기가 초음파 송신기로부터 라디오 주파수 동기신호를 받고 다음 초음파 신호를 받기 위해 동기신호를 기다릴 때까지 걸리는 시간은 Fig. 3에서 보듯이 100ms가 소요된다.

초음파 위성 시스템의 위치인식은 초음파 수신기에서 수행된다. 초음파 수신기는 각각의 초음파 송신기와 라디오 주파수 동기신호를 수신 받아서 각각 초음파 송신기 간의 거리를 계산하게 되며, 다음 식과 같다.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2 \quad (1)$$

여기서, x, y, z 는 초음파 수신기의 위치 좌표이고, $(x_i, y_i, z_i)(i=1, \dots, 4)$ 는 각 초음파 송신기의 고정된 위치 좌표이고, $d_i(i=1, \dots, 4)$ 는 각 송수신기간의 거리이다.

식 (1)로부터 위치를 계산하기 위하여 2차 항을 소거하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & (x_1 - x_2)x + (y_1 - y_2)y + (z_1 - z_2)z \\ &= \frac{1}{2} \{ (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) + (z_1^2 - z_2^2) - (d_1^2 - d_2^2) \} = \alpha \\ & (x_2 - x_3)x + (y_2 - y_3)y + (z_2 - z_3)z \\ &= \frac{1}{2} \{ (x_2^2 - x_3^2) + (y_2^2 - y_3^2) + (z_2^2 - z_3^2) - (d_2^2 - d_3^2) \} = \beta \quad (2) \\ & (x_3 - x_4)x + (y_3 - y_4)y + (z_3 - z_4)z \\ &= \frac{1}{2} \{ (x_3^2 - x_4^2) + (y_3^2 - y_4^2) + (z_3^2 - z_4^2) - (d_3^2 - d_4^2) \} = \gamma \\ & \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1 - x_2) & (y_1 - y_2) & (z_1 - z_2) \\ (x_2 - x_3) & (y_2 - y_3) & (z_2 - z_3) \\ (x_3 - x_4) & (y_3 - y_4) & (z_3 - z_4) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

식 (3)에서 역행렬이 존재하도록 초음파 송신기를 배치하게 되면 초음파 수신기의 위치를 계산할 수 있다.

이동체로부터 얻는 위치정보에서 이동체가 움직이고 있는 위치에 대한 정보도 중요하지만 이동체가 어떤 방향으로 향하고 있는지 알고 있는 것 또한 중요하다. 그러므로 초음파 위성 시스템을 이용하여 이동체나 기타 장비에서 위치 정보뿐만 아니라 방향각 정보까지 인식하기 위해서는 초음파 수신부 2개 또는 그 이상을 사용할 수 있다.

Fig. 4는 이동체 중심선의 앞부분과 뒷부분에 위치좌표를 인식하는 초음파 수신부 2개를 설치하는 경우를 보여준 것이며, 각각의 위치 좌표가 식 (3)로 부터 결정되면 다음과 같이 이동체의 방향각을 인식할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_f - y_r}{x_f - x_r} \right) \quad (4)$$

여기서, θ 는 x 축에 대한 이동체의 방향각이다. 식 (4)로부터 이동체의 방향을 결정할 수 있으며 이를 통하여 이동체의 위치 및 방향각 인식이 가능하다.

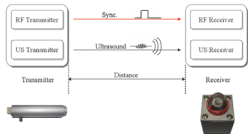


Fig. 1 Configuration of ultrasonic and RF transmitter and receiver

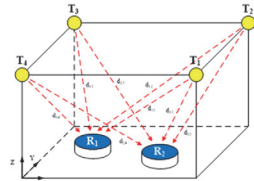


Fig. 2 Infrastructure Transmitting type

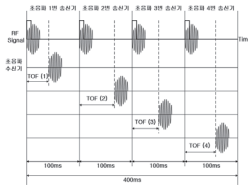


Fig. 3 The timing diagram of the USAT

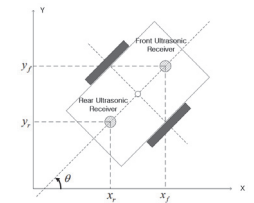


Fig. 4 Definition of heading angle

2.2 초음파 위치인식 시스템과 INS의 결합

자율 주행의 목적을 달성하기 위해서는 차량의 상태 즉 위치와 방향각을 추정해 내는 것이 중요하다. 특히 횡방향 제어의 목적을 달성하기 위해서는 방향각을 정확하게 추정해 낼 필요가 있다. 따라서 초음파 위성 시스템으로부터 얻어진 위치와 방향각을 INS와 칼만필터로 결합하여 정도 높은 차량의 방향각 정보를 추정해 낸다.

INS의 측정치는 DC 오프셋과 스케일팩터(scale factor) 및 바이어스(bias)를 가지고 있다고 가정하면 다음과 같다.

$$\varphi = sf \times c \times V + b \text{ (deg/sec)} \quad (5)$$

여기서 φ 는 INS에서 얻어지는 회전각속도(angular

velocity), V 는 INS 출력 전압(gyro voltage output)이고 c 는 변환계수(conversion factor)이고 sf 는 크기계수(scale factor)이고 b 는 드리프트 바이어스(drift bias)이다.

INS에서 나오는 각속도(angular velocity) 데이터를 적분하면 현재 차량의 방향각 ψ 를 구할 수 있다.

$$\psi = \int \dot{\psi} dt + \psi_{\in} \quad (6)$$

$$\psi(k+1) = \psi(k) + (\varphi(k) - \varphi(k-1)) \times \Delta t / 2 \quad (7)$$

여기서 Δt 은 time interval이다.

관성센서의 특성상 빠른 샘플링 주기와 한정된 시간영역에서 좋은 특성을 보이는 INS와 장시간에도 오차 누적이 없는 초음파 위성 시스템을 칼만 필터를 통해 결합하게 되면 정확한 방향각의 추정이 가능하다. INS를 이용하여 방향각을 얻기 위한 상태방정식은 다음과 같다.

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k \quad (8)$$

여기서 $X = [\psi \ \varphi]^T$ 는 상태벡터이고 W 는 평균이 0이고 공분산(covariance)이 Q 인 백색 가우시안 잡음(White Gaussian random noise)으로 가정한다. 또한 Φ_k, W_k 는 다음과 같이 나타난다.

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, W_k = \int_0^{\Delta t} \Phi(\tau) \Gamma Q \Gamma^T \Phi(\tau)^T d\tau \quad (9)$$

초음파 위성 시스템과 INS의 결합을 위한 측정 방정식은 다음과 같다.

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (10)$$

여기서 $z_k = [\psi_u]$ 는 초음파 위성 시스템에서 측정

된 방향각이다. 측정행렬 H 는 [10]이고 v 는 평균이 0이고 공분산이 R 인 백색 가우시안 잡음으로 가정한다.

위의 상태방정식과 측정 방정식으로부터 최적의 방향각을 추정하기 위한 칼만필터 알고리즘을 다음과 같다[8].

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= \Phi_k x_k \\ P_{k+1} &= \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \\ K_k &= P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_k + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k) \\ P_k &= (I - K_k H_k) P \end{aligned} \tag{11}$$

3. 차량의 모델링

차량의 요각속도(yaw rate)와 횡방향 가속도(lateral acceleration)는 전통적인 두 바퀴 모델로 계산된다. Fig. 5에서 보듯이 두 바퀴 모델은 전륜 2바퀴, 후륜 2바퀴를 각각 차량 중심선상의 가상의 바퀴로 등가화 한 모델이다[9]. 이는 조향 제어가 목적이므로 차량의 롤, 피치운동을 무시하며, 작은 요 방향의 각도 차와 종방향 속도가 일정하게 유지됨을 전제로 한다. 이와 같은 조건 하에서 선형화가 이루어진다. 차량 무게중심(C.G.: Center of Gravity)의 횡방향에 대한 평형조건들로부터 차량의 기구학적 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m a_y &= s(F_f + F_r) \\ I_{zz} \dot{\gamma} &= a \cdot F_f - b \cdot F_r \end{aligned} \tag{12}$$

여기서, a_y 는 횡방향 각속도이고, γ 는 요각속도, m 은 차량의 전체무게, I_{zz} 는 요관성모멘트 (yaw moment of inertia), F_f 와 F_r 는 전후륜 타이어에 작용되는 횡방향력(lateral force), 그리고 a 는 차량

의 앞축에서 무게중심까지의 거리이다. $|a_y| \leq 0.3g$ 일 경우 선형적인 타이어의 모델을 이용할 수 있으므로 전륜 타이어와 후륜 타이어에 작용하는 횡방향력 들은 다음과 같이 얻어진다.

$$F_f = C_f \cdot \alpha_f, F_r = C_r \cdot \alpha_r \tag{13}$$

여기서, C_f 와 C_r 는 전륜 타이어와 후륜 타이어의 코너링 강성(cornering stiffness)들이다. 다음으로 전륜 타이어의 미끄럼각(side slip angle) α_f 와 후륜 타이어의 미끄럼각 α_r 은 다음과 같이 표현된다.

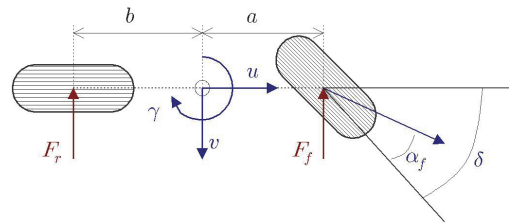


Fig. 5 Coordinates of the single-track model

$$\alpha_f = \delta - \frac{a \cdot \gamma + v}{u}, \alpha_r = \frac{b \cdot \gamma - v}{u} \tag{14}$$

여기서, δ 는 조향각이고, v 와 u 는 차량의 횡방향 속도(lateral velocity)와 종방향속도(longitudinal velocity), 전후륜 타이어에 작용되는 횡방향력, b 는 차량의 뒷축에서 무게중심까지의 거리이다. 차량의 기구학 방정식으로부터 a_y 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_y = \dot{v} + u \cdot \gamma \tag{15}$$

상태변수 $X = [v \ \gamma \ \psi]^T$ 이고 제어입력 δ 일 때 차량의 상태 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2(C_f + C_r)}{m\mu} & -u - \frac{-2(aC_f + bC_r)}{m\mu} & 0 \\ \frac{-2(aC_f - bC_r)}{I_{zz}\mu} & \frac{-2(a^2C_f + b^2C_r)}{I_{zz}\mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \gamma \\ \psi \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$+ \begin{bmatrix} 2C_f/m \\ 2aC_f/I_{zz} \\ 0 \end{bmatrix} \delta$$

4. 차량의 자율 주행을 위한 횡방향 제어기 설계

4.1 차량의 자율 주행을 위한 주행 경로 생성

기준 경로(Reference path)는 Fig. 6과 같이 여러 개의 목표 지점(target point)으로 구성되어 있다. 차량이 기준 경로를 따라 이동할 경우 미리 정해진 목표 지점 $P_T(x_i, y_i)$ 를 목표로 차량이 주행하고 차량의 위치와 i 번째의 목표 지점과의 거리 d_T 가 다음과 같이 일정한 오차 범위 이하가 될 경우 목표 지점을 다음 목표 지점으로 전환시킨다.

$$d_T \leq D_e \quad (17)$$

그러나 차량이 반드시 목표지점의 일정범위 안을 지나게 된다고 가정할 수 없으며 차량이 식 (17)을 만족시키지 못하고 지나치게 되면 목표지점을 다음 목표 지점으로 변환해야 한다. 그러므로 Fig. 7과 같이 차량이 일정 거리오차 내에 수렴하지 못하고 목표 지점을 지나칠 때를 고려하여 목표 방향각 ψ_T 이 다음과 같이 일정한 오차 범위 이상 되는 경우 목표 지점을 다음 목표 지점으로 전환시킨다.

$$\psi_T \geq \psi_e \quad (18)$$

4.2 Tsugawa's method를 이용한 횡방향 제어기

Fig. 8은 Tsugawa's method를 이용한 횡방향 제어 방법을 나타내고 있다[10,11]. 그림에서 보듯이 (X_0, Y_0) 와 θ_0 를 고정기준좌표계(fixed reference frame)에서의 차량의 현재 위치와 방향각이라 두고 (X_1, Y_1) 는 현재 목표 지점(target point), θ_1 는 그 지점에서의 예측되는 차량의 방향각이다. 차량의 질량 중심을 원점으로 하는 동체좌표계(body frame)에서 현재 차량의 위치와 목표 지점 (X_1, Y_1) 에서의 차량의 목표 각도(target heading angle)는 현재 차량의 위치와 목표 지점 사이를 관통하는 궤적의 접선각으로 나타낼 수 있다. 그러므로 두 점을 지나는 유일한 cubic curve는 다음과 같다.

$$y = ax^3 + bx^2 \quad (19)$$

여기서

$$a = \frac{x_1 \tan \theta_1 - 2y_1}{x_1^3}, b = \frac{3y_1 - x_1 \tan \theta_1}{x_1^2} \quad (20)$$

목표지점까지의 원하는 궤적은 중방향속도에 독립적이므로 cubic curve를 이용하여 목표 지점 (x_1, y_1) 와 목표 각도 θ_1 로 이동하기 위한 조향제어각도(steering control angle)는 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha = \tan^{-1}(2lb) \quad (21)$$

Tsugawa's method를 이용한 횡방향 제어기 일 $ab < 0$ 경우 목표 경로가 Fig. 9와 같이 나타난다. 이런 경우 목표 지점에서의 목표 각도가 급격히 증가하여 차량의 횡방향 제어 입력이 과도하게

들어가 차량의 주행이 불안정해지며 목표 경로를 이탈할 수 있다.

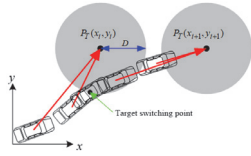


Fig. 6 Switching method by distance error

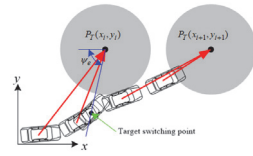


Fig. 7 Switching method by angle error

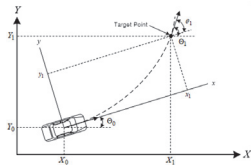


Fig. 8 Tsugawa's method

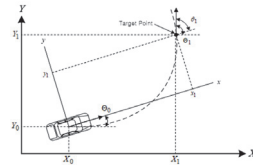


Fig. 9 Unreachable trajectory

4.3 방향각 변조기를 이용한 횡방향 제어기

방향각 변조기(Heading angle modulator)를 이용한 횡방향 제어 알고리즘은 Fig. 10에서와 같이 목표 지점과의 방향각 오차 θ_e 를 0으로 유지하도록 차량의 방향을 제어한다[12]. 피드백 루프는 Fig. 11에서와 같이 최초 목표지점 $P_p(x, y)$ 가 주어지게 되면 그때의 차량위치 $P_c(x, y)$ 를 피드백 받아서 차량의 목표각 θ_{r1} 이 생성된다. 이때의 각을 기준입력으로 하여 각도센서를 통해서 들어오는 차량의 방향각 θ 를 이용하여 방향각 오차 θ_{e1} 를 0으로 수렴하도록 PID제어기를 이용하여 목표 지점 $P_p(x, y)$ 로 이동하게 된다.

이전 연구의 자율 주행 차량 시스템은 차량의 위치를 측정하는 초음파 위성 시스템의 샘플링 타임과 각도를 측정하는 전자 나침반의 샘플링 타임에 차이가 존재하여 방향각 변조기가 필요하였으나 본 논문에서는 위치와 각도를 측정하는 센서의 샘플링 타임이 동일하므로 Fig. 12와 같이 수정하여 알고리즘을 적용한다.

4.4 차량의 자율 주행을 위한 횡방향 제어기

먼저 Tsugawa의 cubic curve에서 나타나는 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 13과 같이 목표 지점을 동체 좌표계의 원점으로 정의한다. 동체 좌표계의 원점을 목표 지점이라고 할 때의 궤적(trajjectory)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_b = f(x_b) \tag{22}$$

다음의 궤적은 원점에서의 위치, 각도, 곡률의 연속성을 위하여 아래 조건을 만족해야 한다.

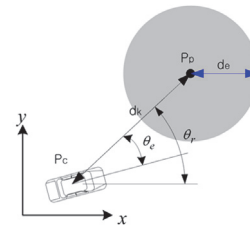


Fig. 10 Lateral control algorithm

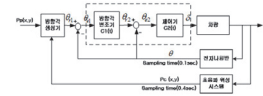


Fig. 11 Block diagram

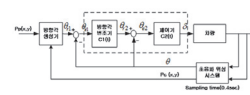


Fig. 12 Modified block diagram

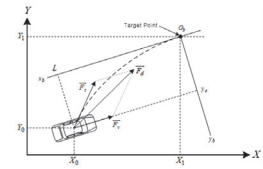


Fig. 13 Modified block diagram

$$f(x_b) |_{x_b=0} = 0, \frac{df(x_b)}{dx_b} |_{x_b=0} = 0, \frac{d^2f(x_b)}{dx_b^2} |_{x_b=0} \tag{23}$$

위의 조건을 만족하는 최소 차원의 다항식은 다음과 같다.

$$f(x_b) = cx_b^3 \tag{24}$$

여기서 Fig. 13에서 보듯이 동체 좌표계에서 차량의 위치는 (L, y_e) 로 나타나므로 최종적인 차량의

궤적은 다음과 같다.

$$f(x_b) = \frac{y_e}{L^3} x_b^3 \quad (25)$$

Fig. 13에서 차량이 주행하는 궤적의 접선 방향 벡터 \vec{F}_t 의 각도는 다음과 같다.

$$\left. \frac{df(x_b)}{dx_b} \right|_{x_b=L} = \frac{3y_e}{L} \quad (26)$$

방향각 변조기를 이용한 횡방향 제어기에서는 방향각 오차만 이용하여 제어입력이 만들어진다. 특히 방향각 오차가 커지게 되면 과도한 제어입력이 들어갈 수 있으므로 본 논문에서 제안하는 횡방향 제어 알고리즘은 궤적의 접선방향의 각도에 의해 과도한 제어입력이 들어가는 것을 방지하기 위하여 차량의 현재 위치에서의 궤적의 접선 벡터 \vec{F}_t 와 차량의 현재 위치에서의 방향 벡터 \vec{F}_v 의 합을 통해 차량이 실제 주행할 방향을 계산한다. 이때의 주행 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있으며 주행 벡터의 각도가 차량의 제어입력으로 들어가게 된다.

$$\vec{F}_d = \vec{F}_v + \vec{F}_t \quad (27)$$

특히 차량 위치에 따라 궤적의 접선 벡터와 차량의 현재 위치에서의 방향 벡터에 가중치를 다음과 같이 부여한다.

$$\vec{F}_d = \alpha \vec{F}_v + \beta \vec{F}_t \quad (28)$$

여기서 $\alpha = L/(L+y_e)$, $\beta = y_e/(L+y_e)$ 로 나타낸다. 가중치를 부여함으로써 목표지점과의 거리에 따라 주행 벡터가 목표 지점을 좀 더 정확히

추종 할 수 있도록 하며 차량의 제어입력이 과도하게 들어가는 것을 방지할 수 있다.

5. 차량 자율 주행 시뮬레이션

차량의 자율 주행 알고리즘을 검증하기 위해서 실제 차량에 적용하기 이전에 시뮬레이션을 통해 먼저 평가하기로 한다. 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 실제 실험에 사용될 차량의 모델링 파라미터를 측정하기 위하여 최소자승법을 이용한다. 측정된 파라미터를 바탕으로 기존의 제어 알고리즘과 본 논문에서 제안한 횡방향 제어 알고리즘을 비교 평가하기 위하여 reference lane tracking에 대해서 시뮬레이션을 수행한다.

5.1. 차량의 구성 및 파라미터 추정

본 논문에서 자율 주행 실험으로 사용할 축소 모형 차량은 Fig. 14와 같으며 실제 차량으로 실험하기에는 비용이나 공간상의 제약이 많으나 축소 모형을 이용하여 쉽게 적용하였다. 차량은 후륜구동으로 최대속도는 1.2m/s이며 조향 각도는 최대 30°이다. 차량의 위치 및 방향각 인식을 위해서 실내에서 정밀한 위치인식이 가능한 시스템인 초음파 위성 시스템과 INS을 이용하였으며 측정 주기는 0.4 초이다[7]. 차량의 위치 및 방향각은 블루투스(bluetooth)를 이용한 무선 통신으로 PC로 전송되고 차량의 제어입력을 수신받아 자율 주행된다.

차량의 파라미터 중 차량의 무게 m , 차량의 앞축과 뒷축에서 무게중심까지의 거리 a , b 는 실제 측정을 통해 쉽게 구할 수 있다. 그러나 전륜과 후륜 타이어의 코너링 강성 C_f , C_r 와 I_{zz} 는 실제로 측정하기 어렵다. 그러므로 측정 불가능한 파라미

터는 최소자승법(LSE: Least Square Estimation)을 이용하여 파라미터를 추정하기로 한다. 파라미터 추정을 위해서 식 (16)을 다음과 같이 나타낸다[9].

$$\begin{aligned} & (2v + 2a\gamma - 2u\delta) \cdot C_f + (2v - 2b\gamma) \cdot C_r \\ & = -(\dot{m}v + \mu^2\gamma), \\ & u\gamma \cdot I_{zz} + (2av + 2a^2\gamma - 2au\delta) \cdot C_f + (2b^2\gamma - 2bv) \cdot C_r \\ & = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

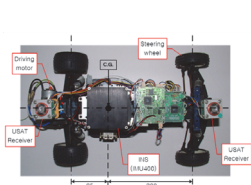


Fig. 14 scale-down vehicle

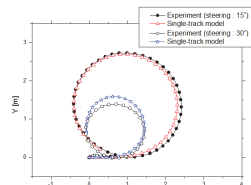


Fig. 15 the J-turn test.

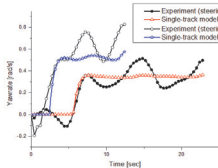


Fig. 16 Yaw rates

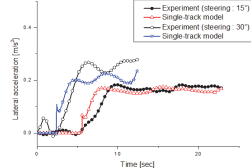


Fig. 17 Lateral accelerations.

파라미터 추정을 위한 실험으로 J-turn 테스트를 수행하였다. 차량의 조향각도는 15°와 30°로 일정하게 유지하고 종방향속도 u 는 약 0.50 m/s로 유지하였다. Fig. 15~17은 두 바퀴 차량 모델과 실제 차량에서의 J-turn 테스트 실험 결과를 나타낸다. 실험 결과에서 보듯이 두 바퀴 차량 모델링에 의한 오차가 존재하나 실제 차량의 주행 결과와 비슷한 것을 알 수 있다. 그러므로 주어진 속도에서 두 바퀴 차량 모델을 이용하여 본 논문에서 제안하는 자율 주행 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 검증할 수 있다.

5.2 Lane tracking 자율 주행 시뮬레이션

Fig. 18(a)에서 보듯이 차량의 목표 지점 $P_T(x_i, y_i)$ ($i = 1, \dots, 20$)을 따라서 차량을 약 0.5m/s의 속도

로 자율 주행 시뮬레이션을 수행하고 평가하였다. 여기서 목표 지점의 범위 D_e 는 0.1 m로 ψ_e 는 60°로 설정하였다.

Fig. 18은 lane tracking 시뮬레이션 결과를 나타내며 Fig. 18(a)는 3가지 방식의 횡방향 제어를 이용하여 lane tracking 할 때의 차량의 자율 주행 궤적을 나타낸다. Fig. 18(b)는 차량이 목표 지점을 따라서 자율 주행할 때 제어되는 조향각도를 나타낸다. Fig. 18(c)와 (d)는 자율 주행 중 차량의 요각속도와 횡방향 가속도를 나타낸다.

Fig. 18(a)의 lane tracking 시뮬레이션 결과를 살펴보면 3가지 횡방향 제어기 모두 목표 지점을 따라 안정적으로 자율 주행 가능한 것을 알 수 있다. 그러나 Tsugawa의 횡방향 제어기를 이용할 경우 직선 구간에서는 크게 문제가 되지 않으나 곡선 구간에서 오차가 가장 커지는 것을 알 수 있다. 방향각 변조기를 이용한 횡방향 제어기와 본 논문에서 제안한 횡방향 제어기 모두 안정적으로 거의 비슷한 성능을 나타내고 있다. Fig. 18(b)에서 보듯이 세 가지 횡방향 제어기로부터

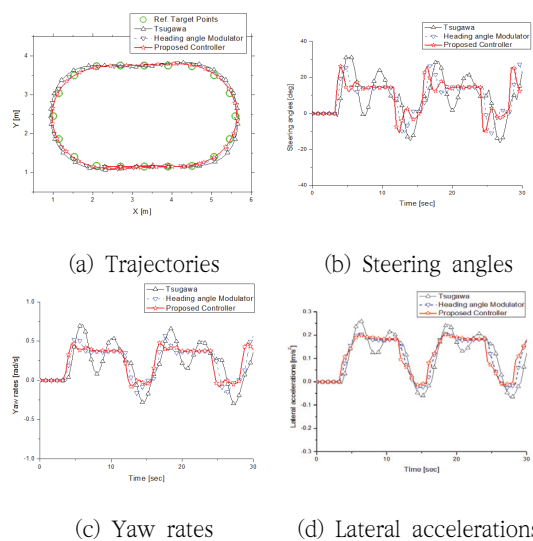


Fig. 18 Simulation results of the lane tracking maneuvering

제어되는 조향각도의 변화는 Tsugawa의 횡방향 제어기의 제어 입력이 다른 두 제어기 보다 크게 나타나고 있으며 다른 두 제어기는 거의 비슷한 경향을 나타내고 있다. Fig. 18(c)와 (d)의 요각속도와 횡방향 가속도의 변화량은 본 논문에서 제안한 횡방향 제어기가 가장 적게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 이는 차량이 자율 주행할 경우 보다 좋은 승차감과 안전한 주행이 가능하다는 것을 의미한다.

6. 차량 자율 주행 실험

앞서 설명한 바와 같이 차량의 자율 주행 알고리즘의 검증에 위한 실제 차량의 횡방향 제어는 많은 위험성을 가지고 있으며 실험 장소를 구하는 것도 쉽지 않다. 또한 차량의 모델링과 차량의 파라미터를 실험을 통해 추정하였으므로 차량 선형화에 따른 모델링 오차와 파라미터 오차가 존재하므로 앞에서의 자율 주행 시뮬레이션 결과로부터 시스템의 안정성을 완벽히 검증했다고 볼 수 없다. 따라서 본 논문에서는 축소차량을 이용한 횡방향 제어를 위한 통합적인 시스템을 구성하고 시뮬레이션 결과를 토대로 차량의 자율 주행 테스트를 실시하였다. 실제 실험에서의 주행 알고리즘은 비슷한 성능을 나타내는 방향각 변조기와 본 논문에서 제안한 횡방향 제어기 두 가지만 비교 평가한다. 실험은 실내에서 X축으로 7m, Y축으로 5m인 공간에서 이루어졌다.

앞에서의 lane tracking 시뮬레이션과 동일한 조건에서 실제 차량을 이용하여 Fig. 19(a)와 같이 목표 지점 $P_T(x_i, y_i)$ ($i = 1, \dots, 20$)을 따라서 차량을 약 0.5m/s의 속도로 자율 주행 실험을 수행하고 평가하였다. 초기 출발 위치는 Fig. 19(a)에서

보듯이 X축으로 6m, Y축으로 4.25m에서 시작하여 반시계방향으로 주행하였다.

Fig. 19는 lane tracking 자율 주행 실험 결과를 나타내며 Fig. 19(a)는 방향각 변조기를 이용한 횡방향 제어기와 본 논문에서 제안한 횡방향 제어를 이용하여 lane tracking 할 때의 차량의 자율 주행 궤적을 나타낸다. Fig. 19(b)는 차량이 목표 지점을 따라서 자율 주행할 때 제어되는 조향각도를 나타낸다. Fig. 19(c)와 (d)는 자율 주행 중 차량의 요각속도와 횡방향 가속도를 나타낸다.

Fig. 19(a)의 lane tracking 실험 결과를 살펴보면 방향각 변조기를 이용한 횡방향 제어기와 본 논문에서 제안한 제어기 모두 목표 지점을 따라 안정적으로 자율 주행하는 것을 확인할 수 있으며 시뮬레이션 결과와 비슷하게 곡선 구간에서 본 논문에서 제안한 제어기의 성능이 조금 좋게 나타난다. Fig. 19(b)의 횡방향 제어기로부터 제어되는 조향각도의 변화는 두 제어기는 거의 비슷한 경향을 나타내고 있으나 차량의 위치추정 오차 및 노이즈 그리고 모델링 오차로 인하여 시뮬레이션 결과와 달리 조향각도 변화가 크게 나타나는 것을

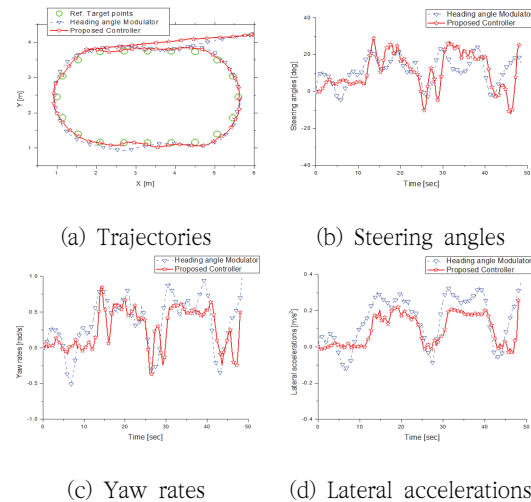


Fig. 19. Experimental results of the lane tracking maneuvering

알 수 있다. Fig. 19(c)와 (d)에서 나타나는 요각 속도와 횡방향 가속도의 변화량 또한 시뮬레이션 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있으나 실제 자율 주행에서는 변화 폭이 크게 나타난다. 그러나 앞의 시뮬레이션 결과에서 보듯이 실제 실험 결과에서도 본 논문에서 제안한 제어기가 방향각 변조기를 이용한 횡방향 제어를 이용할 때보다 전체적으로 안정적인 주행을 하고 있는 것을 확인할 수 있다.

7. 결론

차량의 무인화를 위해서는 먼저 차량의 위치를 정확히 추정하는 것이 중요하며 이를 바탕으로 목표 지점으로 안전하게 차량이 주행되어야 한다. 특히 차량의 자율 주행을 위해서는 차량의 종방향 및 횡방향 제어가 수행되어야 한다. 종방향 제어는 차량의 속도를 조정하여 차량 간의 간격이 적절하도록 조절하는 것이며, 횡방향 제어는 운전자의 승차감을 고려하여 목표지점으로 주행하는 것이다. 그러나 실제 차량으로 자율 주행 실험을 하기에는 공간적 제약이 존재한다. 실외에서의 테스트는 많은 공간을 필요로 하며 실제 도로에서의 테스트는 많은 문제점이 있으므로 자율 주행 성능을 평가하기 어렵다.

본 논문에서는 실내에서 자율 주행 실험이 가능하도록 실내에서 정밀한 위치인식이 가능한 초음파 위성 시스템을 이용하여 축소차량의 자율 주행 시스템을 구성하였다. 또한 차량의 자율 주행에서 목표 지점으로 정확하게 이동하기 위해 중요한 횡방향 제어 알고리즘을 제안하였다. 특히 기존의 제어알고리즘과의 비교를 위하여 먼저 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하였다. 시뮬레이션을 위한 차량의 모델링에서 모델링의 파라미터

추정의 문제점은 J-turn테스트 실험을 통해 실제로 파라미터를 추정하였다. 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 횡방향 제어 알고리즘의 안정성을 검증하였으나 시뮬레이션에 사용된 모델링 시스템은 기본적으로 모델링 오차 및 파라미터 오차가 존재하므로 실제 실험을 통해 제안한 횡방향 제어 알고리즘의 자율 주행 성능을 비교 평가하였다. 실험 결과로부터 본 논문에서 제안한 횡방향 제어 알고리즘의 적합성을 검증하여 보다 안정적인 자율 주행이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

사 사

이 연구는 연암공과대학교 교비연구비에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 박다운, 배상훈, Trinh Tuan Hung, 박부기, 정보경, “심층강화학습 기반 자율주행차량의 차로변경 방법론,” 한국ITS학회, Vol.22, No.1, pp.276-290, (2023)
- [2] 주백수, 김지은, “자율주행 자동차 산업의 미래 시나리오 예측 연구,” 기술혁신연구 v.30 no.2, pp.01-27, (2022).
- [3] S. P. Hong, M. H. Lee, H. H. Chun, S. H. Kwon, and J. Speyer, “Experimental Study on the Estimation of Lever Arm in GPS/INS,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 55, No. 2, pp.431-448, (2006).
- [4] 정광윤, 조영석, 심덕선, “무인탐사체 항법을 위한 GPS/INS 초강결합 성능분석,” 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제12권, 제8호, pp. 773-779, (2006).
- [5] 채홍석, 정용환, 이명수, 신재곤, 이경수, “자율

- 주행 안전성 평가 시나리오 개발 및 검증,” 자동차안전학회지, v.9, no.2, pp.6-12, (2017).
- [6] 안경환, 이상우, 한우용, 손주찬, “자율주행 자동차 기술 동향,” 전자통신동향분석, pp. 35-44, (2013).
- [7] 이동환, 김수용, 윤강섭, 이만형, “무인 이동 로봇 위치추정을 위한 초음파 위성 시스템,” 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제13권, 제10호, pp. 956-961, (2007).
- [8] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering: with MATLAB exercises and solutions*, Wiley, (1997).
- [9] C. S. Kim, S. Y. Kim, J. H. Ryu, and M. H. Lee, “LMI-Based Lateral Control of an Autonomous Vehicle by Look-Ahead Sensing,” *International Journal of Automotive Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 609-618, (2006).
- [10] S. Tsugawa, “Vision-based vehicles in Japan: machine vision systems and driving control systems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 41, No. 4, pp. 389-405, (1994).
- [11] S. Tsugawa, “An overview on control algorithms for automated highway systems,” *IEEE/IEEEJ/JSAI International Conference*. pp. 234-239, (1999).
- [12] 김수용, 이정민, 이동환, 이만형, “초음파 위치 인식 시스템을 이용한 차량의 무인주행,” 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제13권, 제9호, pp. 875-882, (2007).
- [13] 진태석, “미지환경에서 무인이동체의 자율주행을 위한 확률기반 위치 인식과 추적 방법,” *한국산업융합학회 논문집*, Vol.25, No.3, pp. 341-347, (2022).

(접수: 2023.03.31. 수정: 2023.04.05. 게재확정: 2023.04.10.)