

자율 주행차량의 경로추종 제어 알고리즘

안정우*, 박동진*, 권태종*, 한창수**

A Path Tracking Control Algorithm for Autonomous Vehicles

Jung-Woo Ahn*, Tong-Jin Park*, Tae-Jong Kweon*, and Chang-Soo Han**

ABSTRACT

In this paper, the control algorithm for an autonomous vehicle is studied and applied to an actual 2 wheel-driven vehicle system. In order to control a nonholonomic system, the kinematic model for an autonomous vehicle is constructed by relative velocity relationship about the virtual point at distance from the vehicle's frame. And the optimal controller that based on the kinematic model is operated on purpose to track a reference vehicle's path. The actual system is designed with named 'HYAV1' and the system controller is applied. Because all the results of simulation don't satisfy the driving conditions of HYAV1, a reformed control algorithm that satisfies an actual autonomous vehicle is applied at HYAV1. At the results of actual experiments, the path tracking works very well by the reformed control algorithm. An autonomous vehicle that applied this control algorithm can be easily used for a path generation algorithm.

Key Words : Autonomous vehicle (자율 주행차량), Kinematic model(기구학적 모델), Nonholonomic(논홀로노믹) Quadratic optimal control(정방최적제어), Path tracking(경로추종), Reference path(기준경로)

	기호설명		θ_1	Angular position of the right wheel [rad]
d	Distance from the M	[m]	θ_2	Angular position of the left wheel [rad]
D	A point located at a distance d from the wheels' axis	[m]	Ψ	AV's orientation with respect to the F_0
F_0	Global frame			
F_M	AV's frame			
M	Center of the wheels' axis			
r	Radius of actuated wheel	[m]		
R	Half the wheels' axis length	[m]		
v	AV's translation velocity	[m/s]		
v_r	Reference AV's velocity	[m/s]		
x, y	Coordinates of the F_M			
x_p, y_p	Coordinates of the point P in the F_0			
x_M, y_M	Coordinates of the F_0			

1. 서론

산업 현장 자동화에 따른 물류 자동화 시스템에 관련하여, 현장에서 유용하게 적용할 수 있는 주행차량에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 적용되는 시스템에 따라 여러 타입의 주행차량이 있지만, 자동화 입장에서 설정된 주행차량은, 대개 고정된 궤도만을 따라 주행하는 것이 대부분이다. 주행차량의 고정 궤도 타입은, 새로운 작업 환경에 대한 적응에 많은 시간과 자금을 요구하고 있어서, 주행

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
 ** 회원. 한양대학교 기계공학과

차량 스스로 경로를 생성하여 주행하는 자율 주행 차량 타입도 많이 개발되어 활발히 연구되고 있다.

자율 주행차량이 갖추어야 할 기본적인 기능은, 주행하고자 하는 목표 지점까지 이동과 동시에, 주행 중에 부딪히는 여러 가지 상황에 대해 적절하고도 유용한 경로를 스스로 생성하여 이동할 수 있는 능력이다. 현재 자율 주행차량의 연구는 경로 계획과 그에 수반되는 장애물 회피 주행과 센서 장비를 이용한 자기 위치 추정과 지도 작성등에 치중하고 있다.

하지만 좀 더 향상된 성능의 자율 주행을 위해, 주행차량의 모델링에서부터 심도 있는 연구가 있어야 한다. 그 이유로 첫번째는, 차량 운동학적인 모델을 기반으로 적절한 액츄에이터의 제어가 이루어지므로, 주행차량의 제어를 보다 더 향상시킬 수 있다. 둘째는 이를 바탕으로 한 경로생성을 위한 제어 알고리즘이 쉽게 개발, 또는 향상이 가능하다는 점이다. 이것 역시 차량 모델이 적용되는 시스템이므로, 그것이 가지고있는 비선형성과 논홀로노믹(nonholonomic)특성을 직접 제어하기 위한 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는, 이러한 비선형성을 제어하기 위해 적절한 주행차량 모델링을 설정하고, 이 모델을 바탕으로 설정한 기준경로를 추종하는 제어를 설계한다. 즉, 주행차량의 비선형성을 제어함과 동시에 경로추종을 할 수 있는 제어 알고리즘에 대해 연구한다. 이 제어 알고리즘을 이용하여, 실제 주행차량을 직접 제작 및, 이에 적용함으로써, 제어 알고리즘의 타당성을 검증한다. 그리하여 주행차량의 기구학적 모델과 제어기에 의한 액츄에이터의 제어를 통해 기준경로 추종에 밀바탕이 될 수 있게 하고, 나아가 전체적인 자율 주행이 가능한 새로운 경로생성 알고리즘을 쉽게 적용할 수 있도록 한다.

2. 차량 모델링 및 제어

2.1 기구학적 모델

주행차량은 2 개의 전동 액츄에이터에 의해 양 바퀴의 속도차에 의해 조향을 이루는 형태를 그 대상으로 한다. 기구학적인 모델을 구현하기 위한 그림은 Fig. 1 과 같다.

Fig.1은 두개의 구동 바퀴를 가지는 자율주행 차량의 모델이다. 그림에서 M 은 차량의 무게중심점으로써, 차량 위치의 기준점이 된다. F_0 는 고

정된 기준 프레임이며 F_M 은 움직이는 차량의 프레임이다. O 는 기준 좌표계의 원점이며 M 은 차량 좌표계의 원점이다.

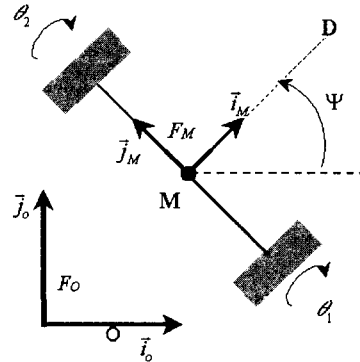


Fig. 1 Schematic diagram of an 2-WD vehicle

간단한 기구학 모델을 얻기 위해 차량 바퀴는 지면에 대해 완전 구름 조건을 만족하고, 측면 미끄러짐도 없다고 가정한다. 이 가정을 통하여 다음과 같은 기구학 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_M &= \frac{r}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \Psi \\ \dot{y}_M &= \frac{r}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \Psi \\ \dot{\Psi}_M &= \frac{r}{2}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \end{aligned} \quad (1)$$

이 식은 가장 일반화 된 2륜 구동 차량의 기구학 방정식이지만 제어는 쉽지않다. 그 이유는 식(1)의 처음 두 식은 완전하게 적분 될 수 없는 논홀로노믹 특성을 갖기 때문이다.⁽²⁾ 이 제어를 수월하게 하기 위해, 차량 프레임에 대한 기구학 방정식을 유도한다.⁽¹⁾

먼저 차량에 가상적으로 연결되어 있는 점 D 는 바퀴 축에 거리 d 만큼 떨어져있다고 하면,

$$\overline{MD} = d \cdot \vec{i}_M \quad (2)$$

이며 x, y 를 차량 프레임, F_M 의 원점에 대한 벡터의 좌표값이라고 하면 다음 식(3)과 같다.

$$\overline{DO} = x \cdot \vec{i}_M + y \cdot \vec{j}_M \quad (3)$$

이제 구성 벡터를 쓰면 다음 식(4)와 같다.

$$X = [x \quad y \quad \Psi]^T \quad (4)$$

보조 제어 벡터를 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$U = [v \ \Psi]^T \quad (5)$$

여기서 v 는 \vec{i}_M 축을 따르는 차량의 접선 방향 속도이다. 제어벡터 U 는 구동 바퀴의 회전 속도에 의해 구속되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = E \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2R} & -\frac{r}{2R} \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서, 다음과 같은 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{X} = B(X)U \quad (7)$$

제어 행렬 $B(X)$ 를 구하기 위해 고정 프레임 F_O 에서 바라본 임의의 점 $P(x_p, y_p)$ 에 대한 상대 속도식은 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{V}_{P/F_O} = \vec{V}_{P/F_M} - \vec{V}_{M/F_O} - \vec{\omega}_{F_M/F_O} \times \overline{MP} \quad (8)$$

여기서 $\vec{\omega}_{F_M/F_O}$ 는 고정 프레임 F_O 에 대한 차량의 프레임 F_M 의 순간 각속도이다. 또한 $\vec{\omega}_{F_M/F_O}$ 와 \overline{MP} 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_{F_M/F_O} &= \dot{\theta} \cdot \vec{k}_O \\ \overline{MP} &= \overline{MD} + \overline{DP} \\ &= (d+x) \cdot \vec{i}_M + y \cdot \vec{j}_M \end{aligned} \quad (9)$$

$$\vec{\omega}_{F_M/F_O} \times \overline{MP} = y \dot{\theta} \cdot \vec{i}_M - (d+x) \dot{\theta} \cdot \vec{j}_M$$

차량의 프레임 F_M 에 대한 점 M 의 속도는

$$\vec{V}_{M/F_O} = v \cdot \vec{i}_M \quad (10)$$

가 되므로 식(9),(10)을 식(8)에 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & y \\ 0 & -(d+x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi \\ -\sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 점 P 를 고정 프레임 F_O 의 원점을 O 라 놓으면 $\dot{x}_p = \dot{y}_p = 0$ 이 된다. 이제 식(11)에서, $B(X)$ 가 구해진 식(7)의 관계식은 다음 식(12)으로 정리 된다.

$$B(X) = \begin{bmatrix} -1 & y \\ 0 & -(d+x) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$X = [x \ y \ \Psi]^T, U = [v \ \Psi]^T$$

2.2 제어 알고리즘

2.2.1 제어기 설계

기준경로에 추종하는 제어 입력을 선정하기 위해 정방 최적 제어(Quadratic optimal control) 알고리즘을 적용 하였다.⁽¹⁾ 기준차량과 실제차량의 방향 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{\Psi} = \Psi - \Psi_r \quad (13)$$

여기서 Ψ_r 은 기준차량의 방향을 나타낸다. 따라서 상태 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = [x \ y \ \tilde{\Psi}]^T \quad (14)$$

$v_r(t)$ 를 기준차량의 궤적에 대한 접선 속도라 놓는다. 이제 궤적 추종의 시스템 방정식을 얻기 위해 제어 벡터를 다음과 같이 선정 하였다.

$$U = \begin{bmatrix} \tilde{v} \\ \tilde{\dot{\Psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v - v_r \\ \dot{\Psi} - \dot{\Psi}_r \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (12)를 이용하여 다음과 같은 시스템 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(X,t)X + B(X)U \\ A(X,t) &= \begin{bmatrix} 0 & \dot{\Psi}_r(t) & h_1(\tilde{\Psi},t) \\ -\dot{\Psi}_r(t) & 0 & h_2(\tilde{\Psi},t) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ B(X) &= \begin{bmatrix} -1 & y \\ 0 & -(d+x) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

$$h_1(\tilde{\Psi},t) = v_r(t) \frac{\cos \tilde{\Psi} - 1}{\tilde{\Psi}} + d \dot{\Phi}_r(t) \frac{\sin \tilde{\Psi}}{\tilde{\Psi}}$$

$$h_2(\tilde{\Psi},t) = d \dot{\Psi}_r(t) \frac{\cos \tilde{\Psi} - 1}{\tilde{\Psi}} - v_r(t) \frac{\sin \tilde{\Psi}}{\tilde{\Psi}}$$

시뮬레이션하기 위한 전제 조건을 다음과 같이

설정한다

$$\dot{\Psi}_r = 0 \quad (\text{기준차량 회전각속도}=0)$$

$$v_r = c \quad (\text{기준차량 속도=상수}) \quad (17)$$

정방 최적 제어를 위한 수행 지수(performance index)를 선정한다.

$$J = \int_0^{+\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt \quad (18)$$

이 값을 최소화 시키는 선형 제어 입력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U &= KX \\ K &= -R^{-1} B^T P \end{aligned} \quad (19)$$

식(19)의 P는 다음과 같은 Riccati 방정식을 풀어 구할 수 있다.

$$(A - KB)^T P + P(A - KB) + Q + K^T R K = 0 \quad (20)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -v_r \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ P &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{1+2|v_r|}}{|v_r|} & -\text{sign}(v_r) \\ 0 & -\text{sign}(v_r) & \sqrt{1+2|v_r|} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

그리하여 식(19)에 식(20)을 대입하면 다음과 같은 제어이득(Control gain)을 얻을 수 있다.

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sign}(v_r) & -\sqrt{1+2|v_r|} \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.2.2 시뮬레이션(Simulation)

주행차량에 대한 제어기 성능을 검토하기 위해, 우선 기준차량의 경로에 잘 추종하는지 여부를 알아 보도록 한다. 제어된 주행차량의 시뮬레이션 결과는 Fig. 2 와 같다.

Fig. 2는 초기상태가 $x=1, y=0, \tilde{\Psi} = -\pi/6$ 일 때 기준차량의 경로를 제어기가 사용된 실제 차량이 추종하는 상황을 나타내었다. 기준차량의 초기 상태와 유사한 운동을 이탈한 주행차량이 잘 추종

하고 있음을 보여 주고 있다.

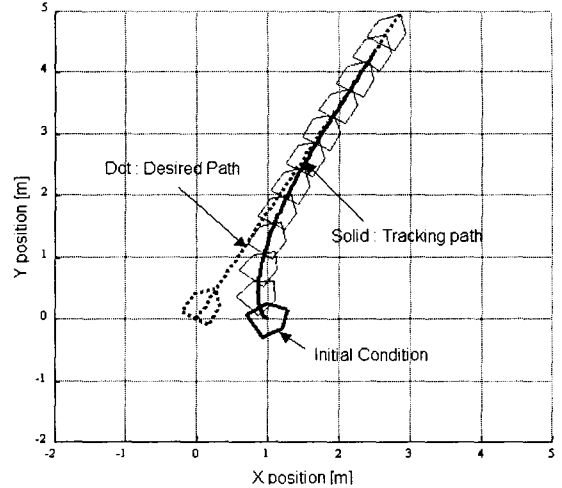


Fig. 2 Controlled model simulation when the initial condition is $\tilde{\Psi} = -\pi/6, x=1, y=0$

Fig. 3은 기준경로에 대해 상당히 이탈된 자세로 있는 주행차량이 원하는 주행경로에 비교적 잘 추종하는 상황을 보여 주고 있다.

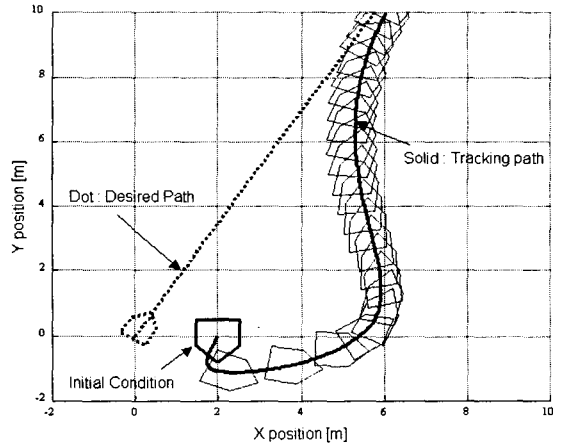


Fig. 3 Controlled model simulation when the initial condition is $\tilde{\Psi} = -5\pi/6, x=2, y=0$

이 제어 알고리즘을 사용하면, 주행차량 이 어느 곳에 위치 하든지, 어느 방향으로 되어 있는시간에 기준경로에 수렴하게 된다.

하지만 Fig. 3 과 같은 주행상황은 컴퓨터에서 할 수 있는 시뮬레이션이며, 실제 주행차량 제어 알

고리즘에 적용하기에는 적절하지 않은 경로 추종이다.

그 이유로 첫째는, 본 연구에서 실제 주행하고자 하는 경로도 자유로운 경로 환경이 아니었다. 즉, 기준 경로에 수렴하기 위해 Fig. 3 과 같은 경로는 상당히 경로공간이 넓어야 되는 상태에서 가능하다. 실제 주행차량 실험을 위한 대상경로의 폭은 5m 정도이다. 이러한 조건을 극복하기 위해서는, 바로 기준차량 경로에 수렴하는 초기조건이 유용하다. 그리고 둘째는 전동 액츄에이터의 용량은 한정되어 있으므로 바로 기준차량 경로에 수렴하기 위해 과도한 액츄에이터의 구동이 요구된다.

그러므로 실제 자율 주행차량의 원활한 주행을 위해 적합한 제어 알고리즘을 더 추가해야 한다.⁽⁴⁾

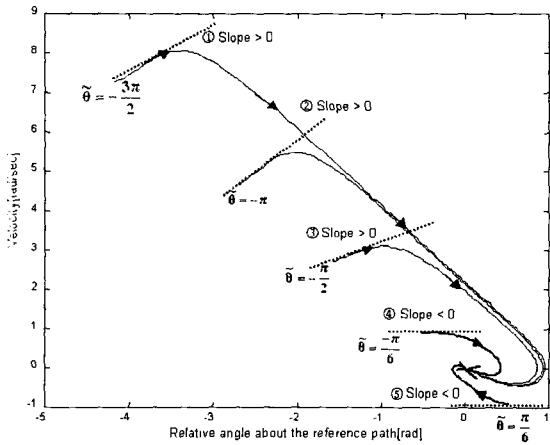


Fig. 4 Phase portrait of a autonomous vehicle

Fig. 4 는 여러가지 주행차량의 초기조건에 따라 기준차량 경로에 수렴하는 정도를 나타내고 있다. 여기서 ①~⑤ 기울기(slope) 형태를 갖는 초기 조건에서는, 물론 최종적으로 수렴하지만, 주행차량이 초기 상태에서 발산하는 구간이 있다. 즉, 실제 액츄에이터에 과도한 응답을 요구하게 되고, 시스템이 동작하지 않는 경우가 생길 수도 있다. 이것은 앞서 유도한 제어 알고리즘을 이용하여, 액츄에이터 반응을 시뮬레이션 해보면 알 수 있다. 주행차량의 초기 각도가 기준 경로 차량의 각도에 $\pm\pi/2$ 보다 큰 경우에 대한, 각 액츄에이터의 속도는 Fig. 5 와 같다.

Fig. 5 에서 보는 바와 같이, Fig. 4 의 초기조건 기울기가 0 이상인 경우, 액츄에이터가 발산해야 하

는 구간이 생긴다. 이와같은 초기 조건일 경우, 앞서 유도한 제어 알고리즘에 의해 액츄에이터를 구동하기 어렵다.

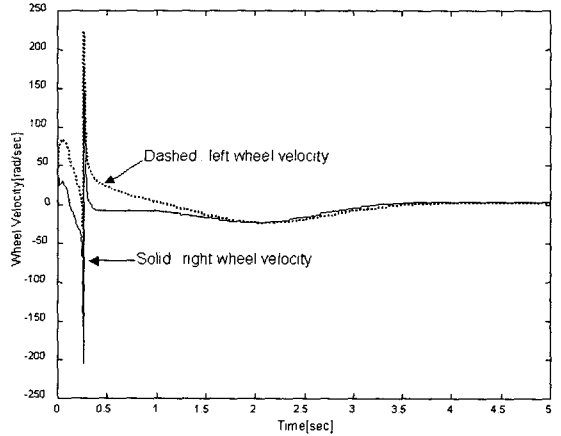


Fig. 5 Wheel velocities when initial condition is $\tilde{\Psi} = -\pi, x = 1, y = 0$

Fig. 4 의 ④, ⑤ 의 경우 즉, 초기조건 기울기가 0 보다 작은 경우에는 안정적인 액츄에이터의 제어가 가능하여 기준경로에 잘 수렴할 수 있다. 이에 대한 액츄에이터의 속도를 나타내면 Fig. 6 과 같다.

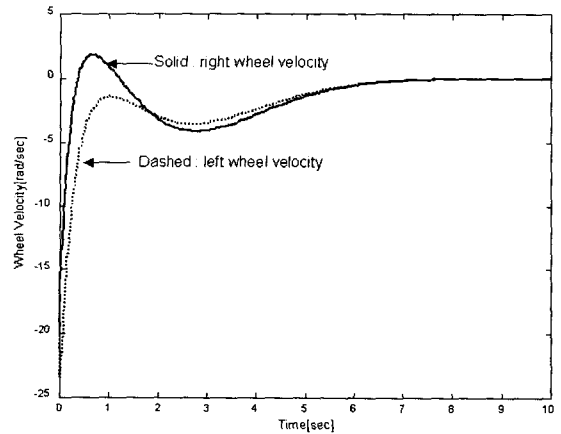


Fig. 6 Wheel velocities when initial condition is $\tilde{\Psi} = -\pi, x = 1, y = 0$

그리하여, 본 연구에서는 여기에 이탈경로 조건에 대한 구속조건을 제어 알고리즘에 추가하여, 실제 기준경로 추종에 있어서, 주행차량의 액츄에

이터 구동에 적합한 제어가 이루어지도록 한다.
이에 따른 구속조건은 다음 식과 같다.

$$\Phi = \left| \tilde{\Psi} + \nu, \dot{\tilde{\Psi}} \right| \leq \left| \frac{\pi}{2} \right| \quad (22)$$

이 구속조건 영역을 실제 주행차량의 안정성을 보장하는 영역으로 설정한다. Fig. 7은 이 영역을 나타내고 있다.⁽⁶⁾

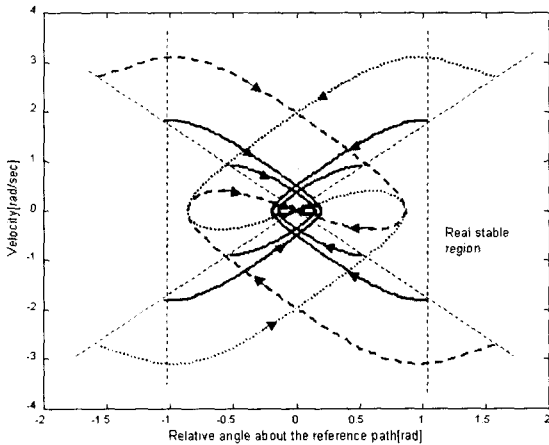


Fig. 7 Phase portrait of a autonomous vehicle and stable region

Fig. 8은 구속조건식 (22)식이 적용된 제어 알고리즘을 시뮬레이션 한 결과이다. 이 제어 알고리즘에 의해 실제 제작된 주행차량의 전동 액츄에이터를 안정하게 제어할 수 있다.

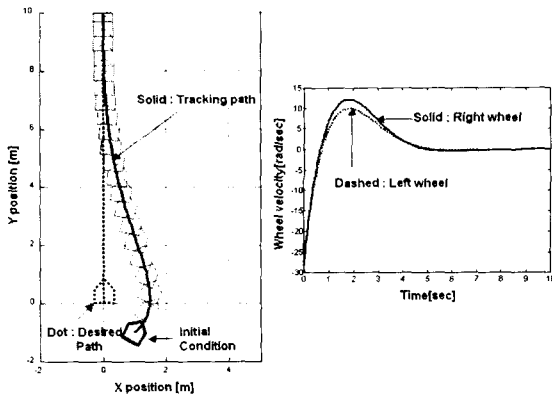


Fig. 8 Controlled model simulation when the initial condition is $\tilde{\Psi} = -\pi/6, x=1, y=-1$

그리하여 실제 주행차량이 주행할 때, 안정된

전동 액츄에이터 제어 뿐만 아니라, 장애물 회피, 경로추종 등에 이용하는 경로생성 알고리즘에 적용할 수 있게 된다.

3. 주행차량 적용

3.1 주행차량의 구성

자율 주행차량의 실제 제작에 있어서 가장 중요한 부분은 전동 액츄에이터, 즉 전동 모터의 성능이다. 이 모터의 선정은 제어의 용이함과 용량을 고려하여 AC-Servo 모터를 사용하였다. 이 모터는 주전원 24V의 입력을 받는 바퀴 일체형으로 실제 산업 현장에서 자율 주행차량 개발용 모터로 많이 사용되는 모델이다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 좌우 양쪽에 구동 모터를 장착하고 전후에 캐스터(caster)를 장착하였다.

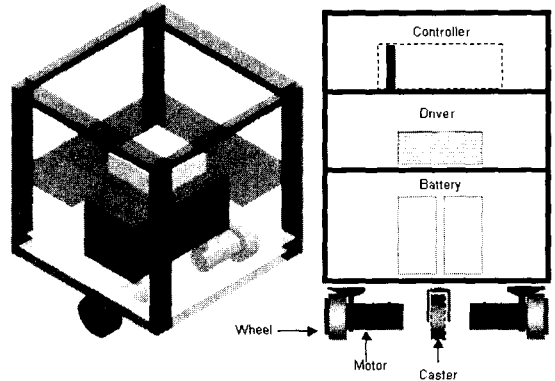


Fig. 9 The scheme of autonomous vehicle

캐스터는 앞서 설정된 모델링 과정에서 포함되지 못했다. 실제 주행 실험에서 캐스터에 의한 오차를 줄이기 어렵다. 물론 오차의 크기는 구동 바퀴에 비해 상대적으로 작다고 생각할 수 있다.

선정한 모터는 최고 속도는 45cm/min으로 24V의 직류 전원 입력을 받는다. 전원 입력을 위하여 12V 배터리를 전원으로 사용하였다. 배터리는 직렬로 연결하여 24V의 출력을 내며 모터의 최고 속도로 연속 주행 시 2시간 정도의 운행을 할 수 있을 정도의 용량을 갖는다. 이 제작된 차량을 본 연구에서는 HYAVI으로 명명하였다.

3.2 주행차량 실험

제어기(Controller)에 의한 제어 입력을 양쪽 바퀴의 각속도로 주었다. Fig. 10 은 실제로 제작된 차량, HYAV1 차량이 경로 추종을 하는 모습을 보여 주고 있다.

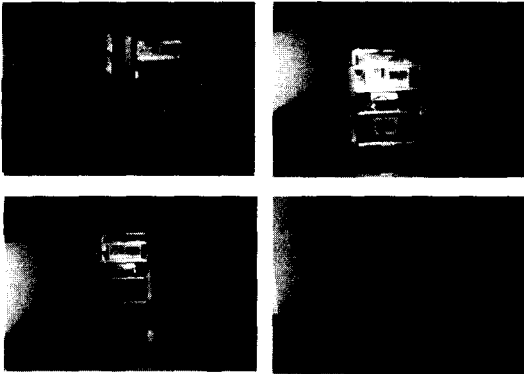


Fig. 10 Photos of trajectory tracking HYAV1

시뮬레이션의 각속도는 곡선의 모양을 하고 있으나 실제 실험에서는 0.5 초의 수집시간(sampling time)으로 각속도 명령을 수행 하므로 계단모양의 끊김이 있다. 물론 이러한 계단 형상의 속도 명령도 최종 도착지점의 오차를 가중 시킬 수 있으나 무시할 수 있다고 가정하였다. 또한 드라이버에 의한 모터의 구현 각속도의 한계를 고려하여 최대 각속도를 9.23(rad/sec)로 정하였다.

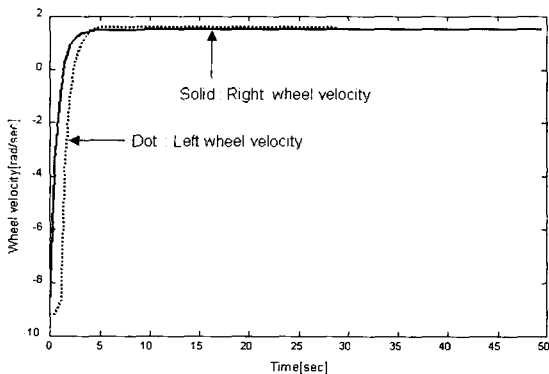


Fig. 11 Wheel velocities about the HYAV1 car experiment (1) when the initial condition is $\tilde{\Psi} = \pi / 6, x=1, y=0$

Fig. 11 은 궤적 추종 실험의 첫번째으로써, 제어되는 HYAV1 차량의 양쪽 구동 바퀴에 실제 입력

되는 각속도이다. 결과에서 보듯이, 경로 추종을 위한 바퀴 속도 제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12 는 궤적 추종 실험의 두 번째로써, 제어되는 HYAV1 차량의 양쪽 구동 바퀴에 실제 입력되는 각속도이다. 이번 실험은 시뮬레이션 결과 Fig. 4 의 상황에 구속조건 식 (22)가 적용되어, 양 바퀴가 반대로 회전하여 HYAV1 차량의 방향을 $\Phi \leq \pi / 2$ 만족시킨 후 기준경로에 수렴하기 위한 속도 제어 과정을 나타내고 있다.

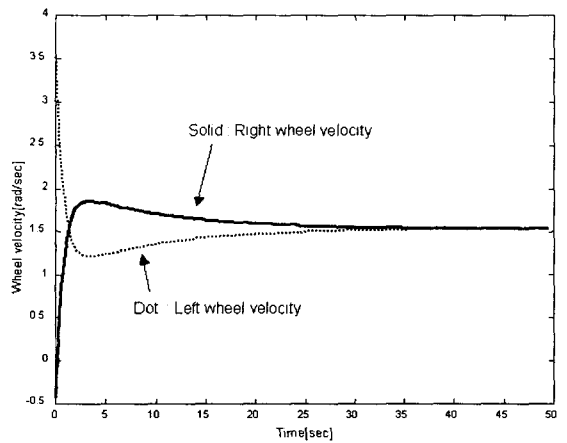


Fig. 12 Wheel velocities about the HYAV1 car experiment (2) the initial condition is $\tilde{\Psi} = -\pi / 2, x=1, y=0$

이 실험에서 비교적 바퀴의 제어는 잘 이루어졌지만, 추종 경로에 대한 오차가 어느 정도 발생하였다. 오차의 측정은 실험 구동 시간(40sec) 후에 도착한 최종 도착 지점에서의 기준차량의 진행방향과 제어되는 AV 차량의 원점과의 수직거리로만 측정 하였다. 바닥면이 정확한 2 차원 평면이라 할 수 없으므로, 먼저 바닥면과 차량의 바퀴와의 고정 오차를 측정하여 궤적 추종의 실험 오차 값에 고려하는 것이 타당하다.

고정 오차 측정은 기준차량의 궤적을 따라 실험 시간인 40 초 동안 기준차량의 속도(10cm/sec)로 실제 차량을 정속 직선 주행하여 기준차량의 진행방향과의 수직 거리를 고정 오차로 놓았다. 여러 번의 같은 실험을 통해 고정 오차가 평균 5.2cm 임을 알았다. 물론 얻어낸 수치가 정확한 고정 오차라 할 수는 없으나, 바닥면에 의해 직선 주행만으로

도 오차가 발생함을 알 수 있고, 이를 최종 실험 경우(1),(2)에서 오차측정에 고려하였다.

최종 실험에서의 오차의 평균값은 실험(1)이 6.6cm 이었고 실험(2)는 9.8cm 이었다. 앞에서 미리 구한 고정 오차를 고려하면 실험(1)은 1.4cm, 실험(2)는 4.6cm 의 오차가 생긴다고 여겨질 수 있다.

오차의 원인은 여러 가지가 있겠으나, 가장 크게 영향을 준 것은 지면과 구동바퀴와의 마찰과 미끄러짐이다. 실험을 고마찰 노면에서 한다면 이러한 오차는 상당히 개선 시킬 수 있으며, 실험 결과에서 나온 오차도 단위 m 에 비해 충분히 작아질 것이라 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 2륜 구동 자율 주행차량의 기구학 모델링을 바탕으로 차량의 위치에 따른 경로 추종을 위한 제어를 논하였으며, 실제 차량을 제작, 적용하였다. 이를 바탕으로 실제 차량에 적용된, 제어 알고리즘의 타당성을 몇 가지 실험으로 검증하였다.

궤적 추종은 일정 속도로 직선 주행을 하는 주어진 기준차량의 움직임을 따라가는 간단한 경우에 대해서만 다루었으나 향후 선회 주행도 고려해야 전체적인 경로계획을 수립할 수 있을 것이다. 실험 또한 직선 주행의 궤적 추종에만 한정하였으나 추측 항법을 기본으로 하는 시스템이기 때문에 실제 주행에선 오차를 피할 수 없다. 이는 구동바퀴와 바닥면과의 마찰과 미끄러짐 그리고 바닥면의 굴곡 등을 고려하지 않았기 때문이다. 초음파 센서나 비전 시스템의 도입 등으로 실제 차량의 위치와 방향에 대한 오차를 어느 정도 보상해 줄 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 98년도 한양대학교 교내 연구비에 의하여 연구 되었습니다.

참고문헌

1. 손백락, "2 륜 구동 자율 주행차량의 피드백 제어에 관한 연구," 한양대학교 대학원 석사학위논문, 1997.
2. X. Yun and Nilanjan Sarkar, "Dynamic Feedback Control of Vehicle with Two Steerable Wheels," IEEE Inter. Con. on Robotics and Auto., pp. 3105-3110, April 1996.
3. J.H. Jang and C.S. Han, "The State Sensitivity Analysis of the Front Wheel Steering Vehicle: In the Time Domain," KSME International Journal, Vol. 11, No. 6, 1997.
4. M. Krstic, I. Kanellakopoulos and P. Kokotovic, "Nonlinear and Adaptive Control Design," Jon Wiley & Sons, Inc, 1995.
5. Luis E. Aguilar, T. Hamel and P. Soueres, September 7-11, "Robust Path Following Control for Wheeled Robots via Sliding Mode," Proc. IROS 97, pp. 1389-1395, 1997.
6. Y. Zhao and M. Reyhanoglu, "Nonlinear Control of Wheeled Mobile Robots," Proc. Of the 1992 IEEE/RSJ Inter. Con. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1967-1973, July 7-10 1992.