

스키드스티어 차량의 경로추종을 위한 모델기반 적응 제어기 설계

The Design of a Model-based Adaptive Controller
for the Lateral Control of Six-Wheel Skid-steering vehicles

강정훈*, 윤용산*, 최세범*, 임경빈*, 허진욱**, 강신천**
*한국과학기술원(car21000@kaist.ac.kr), **국방과학연구소

Key Words : 무인, 경로추종, 모델기반, 적응제어

요약문

스키드스티어 차량의 조향은 기존의 애커만 조향 방식과는 달리 좌·우 바퀴의 토크 차에 의하여 조향된다. 본 연구에서는 스키드스티어 차량의 모델기반 적응 제어기를 설계하였다. 모델 기반의 제어기는 모델과 현재 상태에 대한 정확한 정보를 필요로 하지만 적응 제어기법을 도입함으로써 이러한 단점을 극복하고 강인한 제어기를 설계하였다. Matlab을 통한 Numerical simulation을 통하여 적응제어 기법의 유효성을 확인해보았다.

NOMENCLATURE

m	Vehicle mass
I_z	Yaw moment of inertia
J	Wheel moment of inertia
M_z	Yaw moment
$F_{xL(R)i}$	Left(Right) ith longitudinal tire force
$F_{yL(R)i}$	Left(Right) ith lateral tire force
$\omega_{L(R)i}$	Left(Right) ith wheel velocity
ψ	Yaw angle
θ	Pitch angle
ϕ	Roll angle
ψ_{des}	Desired yaw angle
e_L	Lateral distance error at the sensing point
ρ	Road curvature
L_s	Lookahead distance
R_{tire}	Tire radius
e_0	Model error
\hat{e}_0	Estimated model error
\tilde{e}_0	Model error uncertainty

I. 서론

군사용 무인주행 차량은 다양한 환경에서 운용된다. 일반 도로, 산, 자갈, 모래밭 등 다양한 노면을 주행해야 하기 때문에 군사용 로봇을 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이러한 연구 분야 중 경로추종 알고리즘에 대

한 연구는 가장 핵심적인 부분의 하나로써 여러 가지 제어 기법이 연구되고 있는데 크게 퍼지 제어와 모델기반 제어로 나눌 수 있다. 퍼지 제어의 경우 모델에 대한 정보가 없을 때 모델기반 제어보다 좋은 성능을 나타내지만 모델에 대한 정보를 획득 가능할 때는 모델기반 제어의 성능이 더 좋다. 하지만 모델에 대한 정보를 정확히 얻기가 사실상 불가능하고 이는 제어기의 성능을 떨어뜨린다. 이러한 모델기반 제어의 단점을 극복하고자 애커만 조향방식 차량에서의 적응 제어를 이용한 연구가 수행되어 왔으며 모델기반 제어기를 더욱 강인하게 하는 것으로 실험 결과 나타났다[1].



그림 1. 록히드 마틴 Mule

최근 무인주행 차량은 그림1처럼 애커만 방식보다는 제자리 회전이 가능하여 회전반경을 현저히 줄일 수 있고 기계적인 구조가 아주 간단한 스키드스티어 방식을 많이 사용하는 추세이다.

본 연구에서는 모델기반 제어와 적응 제어를 이용하여 스키드스티어 차량의 경로추종을 위한 제어기를 설계하고자 한다.

II. 본 론

1. 동역학 모델링

동역학 모델은 횡방향 운동, 종방향 운동, 요 운동, 각 바퀴의 운동을 고려한 9자유도의 모델로 구성하였다[2]. 단, 공기저항이나 마찰은 없다고 가정하였다. 타이어 모델은 Pacejka 모델을 사용하였고 GM Tahoe SUV에 장착되는 타이어의 데이터를 사용하였다.

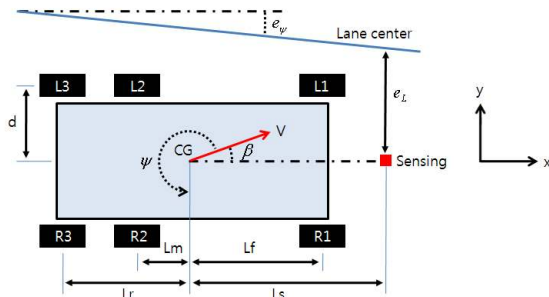


그림 2. 차량 모델

1.1 Longitudinal motion

$$m\ddot{x} = F_{xL1} + F_{xL2} + F_{xL3} + F_{xR1} + F_{xR2} + F_{xR3} + mgsin\theta \quad (1)$$

1.2 Lateral motion

$$m(\ddot{y} + V_x\dot{\psi}) = F_{yL1} + F_{yL2} + F_{yL3} + F_{yR1} + F_{yR2} + F_{yR3} - mgsin\phi \quad (2)$$

1.3 Yaw motion

$$I_z\ddot{\psi} = (F_{yL1} + F_{yR1})L_f - (F_{yL2} + F_{yR2})L_m - (F_{yL3} + F_{yR3})L_r + (-F_{xL1} - F_{xL2} - F_{xL3} + F_{xR1} + F_{xR2} + F_{xR3})d \quad (3)$$

1.4 Wheel motion

$$\begin{aligned} J\dot{\omega}_{L1} &= T_{L1} - R_{tire}F_{xL1} \\ J\dot{\omega}_{L2} &= T_{L2} - R_{tire}F_{xL2} \\ J\dot{\omega}_{L3} &= T_{L3} - R_{tire}F_{xL3} \\ J\dot{\omega}_{R1} &= T_{R1} - R_{tire}F_{xR1} \\ J\dot{\omega}_{R2} &= T_{R2} - R_{tire}F_{xR2} \\ J\dot{\omega}_{R3} &= T_{R3} - R_{tire}F_{xR3} \end{aligned} \quad (4)$$

2. 모델 기반 제어

2.1 모델 기반 제어기 설계

서론에서 말한 것과 같이 모델기반 제어는 모델에 대한 정보가 정확할 때 좋은 성능을 발휘한다. 모델에 대한 정보 중 가장 큰 비중을 차지하는 것이 타이어 모델

이다. 일반적으로 제어기 설계시 타이어 모델은 선형화 모델을 사용하지만 타이어의 비선형적 특성을 반영하지 못하는 단점이 있다. 그러므로 Pacejka 모델을 사용하여 타이어 횡력, 구동력을 예측한 값을 제어기에서 사용한다.

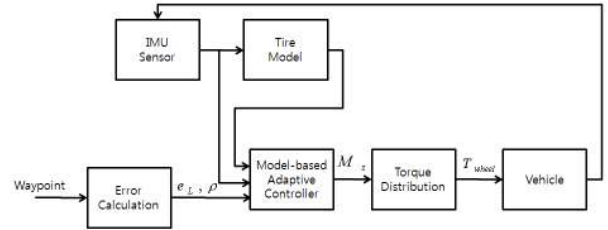


그림 3. Block diagram

그림3의 블록다이어그램을 살펴보자. 관성센서(IMU)에서 출력된 값을 이용하여 타이어 수직하중, 슬립각(slip angle), 슬립률(slip ratio)을 예측하고 타이어 모델을 이용하여 타이어의 횡력, 구동력을 예측한다. 웨이포인트의 형태로 들어온 경로정보로부터 차량의 횡방향 거리 에러, 요 각도 에러를 계산한다. 이 에러 값들과 타이어 횡력, 구동력을 제어기에 입력으로 넣어서 요 모멘트(M_z) 값을 출력한다. 이 모멘트 값을 Torque distribution 알고리즘을 이용하여 각 바퀴 모터의 토크 값을 계산 후 모터에 입력으로 가한다. 여기서는 타이어 수직하중을 고려한 토크분배 방식을 사용하였다.

$$F_{yL1} + F_{yL2} + F_{yL3} + F_{yR1} + F_{yR2} + F_{yR3} = a \quad (5)$$

$$(F_{yL1} + F_{yR1})L_f - (F_{yL2} + F_{yR2})L_m - (F_{yL3} + F_{yR3})L_r = b \quad (6)$$

로 치환을 하고 모터의 토크가 100% 타이어 구동력으로 전달된다고 가정을 하면 (2), (3)은 (7), (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m(\ddot{y} + V_x\dot{\psi}) = a - mgsin\phi \quad (7)$$

$$I_z\ddot{\psi} = b + M_{z: model} \quad (8)$$

e_L 은 다음과 같이 정의된다[2].

$$\ddot{e}_L = -\ddot{y} - V_x(\dot{\psi} - \dot{\psi}_{des}) - L_s(\ddot{\psi} - \ddot{\psi}_{des}) \quad (9)$$

(7), (8)을 (9)에 대입하여 (10)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{e}_L &= -\frac{1}{m}(a - mgsin\phi) + V_x\dot{\psi}_{des} \\ &\quad - \frac{L_s}{I_z}(b + M_{z: model}) + L_s\ddot{\psi}_{des} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\ddot{e}_L + 2\xi\omega_n\dot{e}_L + \omega_n^2e_L = 0 \quad (11)$$

(11)이 되록 제어기를 설계하면 (12)가 된다.

$$\begin{aligned} M_{z: model} &= \frac{I_z}{L_s}(2\xi\omega_n\dot{e}_L + \omega_n^2e_L - \frac{a}{m} + gsin\phi \\ &\quad + V_x\dot{\psi}_{des} + L_s\ddot{\psi}_{des}) - b \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 시뮬레이션

$V_x = 36km/h$, Wet jennite($\mu = 0.4$), 모델의 오차가 없는 상황을 가정하고 Matlab을 이용하여 Numerical 시뮬레이션을 수행하였다.

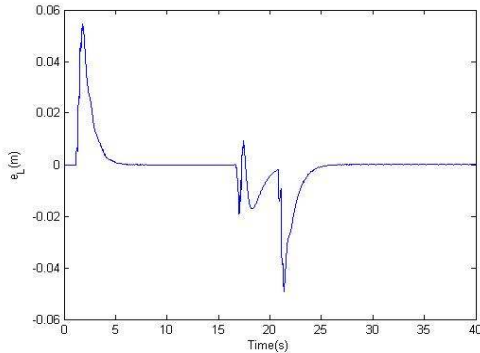


그림 4. Model based control

그림4, 그림5를 통하여 e_L 이 0으로 수렴하면서 S형태의 경로를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 모델의 오차가 없는 상황에 대하여 시뮬레이션을 수행하였기 때문에 정상상태의 오차가 발생하지 않았다.

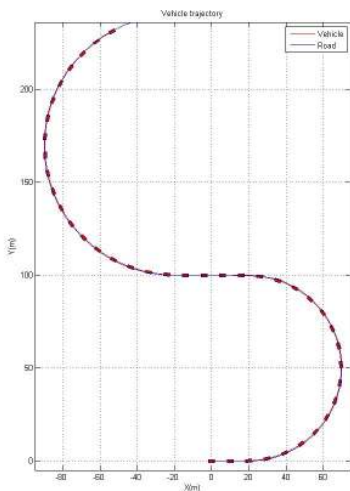


그림 5. Vehicle trajectory

3. 적응 제어

3.1 적응 제어기 설계

모델의 오차가 존재할 경우

$$\ddot{e}_L + 2\xi\omega_n \dot{e}_L + \omega_n^2 e_L + e_0 = 0 \quad (13)$$

e_0 때문에 e_L 은 0로 수렴하지 않는다.

여기에서 e_0 는 모델의 오차이다.

그러므로 이러한 모델의 오차로 인한 정상상태의 오차를 제거하기 위하여 새로운 요 모멘트를 정의한다.

$$M_z : adapt \equiv M_z : model - \frac{I_z}{L_s} \hat{e}_0 \quad (14)$$

요 모멘트 값을 (14)와 같이 정의하고 (10), (13), (14)를 정리하면 (15)가 된다

$$\ddot{\tilde{e}}_0 + 2\xi\omega_n \dot{\tilde{e}}_0 + \omega_n^2 \tilde{e}_0 = 0 \quad (15)$$

여기서 $\tilde{e}_0 = e_0 - \hat{e}_0$ 이다. 그러므로 $\dot{\tilde{e}}_0 = 0$ 즉

$e_0 = \hat{e}_0$ 이 되면 정상상태 오차는 0으로 수렴하게 된다.

$\tilde{e}_0 = 0$ 이 되게 하는 \hat{e}_0 값을 구하기 위하여 절대 0보다 큰 함수 V 를 (16)과 같이 정의하고 e_0 는 천천히 변하는 변수라고 가정한다.

$$V = \frac{1}{2} (\dot{e}_L + \tau e_L)^2 + \frac{1}{2K_{adapt}} \tilde{e}_0^2 \quad (16)$$

e_0 는 천천히 변하는 변수이므로 V 를 미분하고 (15)를 대입하면 (17)과 같이 된다.

$$\dot{V} = (\dot{e}_L + \tau e_L) \left\{ - (2\xi\omega_n - \tau) \left(\dot{e}_L + \frac{\omega_n^2}{2\xi\omega_n - \tau} e_L \right) \right\} - \tilde{e}_0 \left\{ (\dot{e}_L + \tau e_L) + \frac{\dot{\tilde{e}}_0}{K_{adapt}} \right\} \quad (17)$$

$$\tau \equiv \frac{\omega_n^2}{2\xi\omega_n - \tau} \Rightarrow \tau = (\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n \quad (18)$$

$$\dot{\tilde{e}}_0 \equiv -K_{adapt} (\dot{e}_L + \tau e_L) \quad (19)$$

$\tau, \dot{\tilde{e}}_0$ 를 (18), (19)와 같이 정의하면 (20)이 된다.

$$\dot{V} = -2(\xi\omega_n \mp \sqrt{\xi^2 - 1})(\dot{e}_L + \tau e_L)^2 \quad (20)$$

(20)에 (18)을 대입하면 $\dot{V} \leq 0$ 이 되므로 Lyapunov 이론[3]에 의하여 V 는 0으로 수렴한다. 그러므로 \tilde{e}_0 는 0으로 수렴하게 되고 동시에 e_L 도 0으로 수렴하게 된다.

(19)를 (4)에 대입하여 적응 제어를 통한 요 모멘트를 구하면 (21)과 같다.

$$M_z : adapt \equiv \frac{I_z}{L_s} (2\xi\omega_n \dot{e}_L + \omega_n^2 e_L - \frac{a}{m} + g \sin \phi + V_x \psi_{des} + L_s \psi_{des}'' - b) + \frac{I_z}{L_s} \int_0^t K_{adapt} (\dot{e}_L + \tau e_L) dt \quad (21)$$

3.2 시뮬레이션

$V_x = 36km/h$, Wet jennite($\mu = 0.4$)인 상황에서 3 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

첫 번째는 실제 $\phi = 10^\circ$ 이지만 제어기에서는 $\phi = 0^\circ$ 로 인식하는 상황이다.

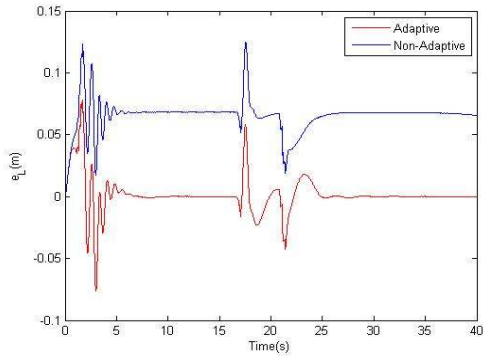


그림 6. Adaptive vs Non-Adaptive

그림 6에서 적응 제어를 한 경우는 e_L 이 0으로 수렴하지만 하지 않은 경우는 e_L 이 0으로 수렴하지 않는 것을 확인할 수 있다.

두 번째는 타이어 모델에서 예측한 횡력과 구동력이 실제의 30% 밖에 되지 않는 상황이다.

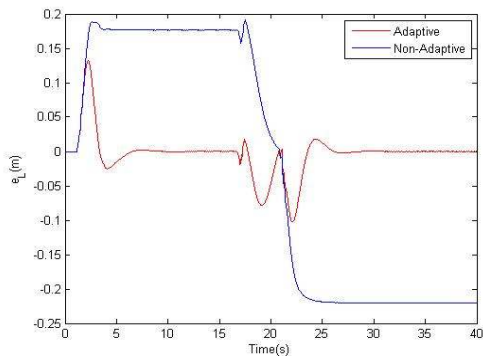


그림 7. Adaptive vs Non-Adaptive

그림 7에서도 적응 제어를 한 경우는 e_L 이 0으로 수렴하지만 하지 않은 경우는 e_L 이 0으로 수렴하지 않는 것을 확인할 수 있다.

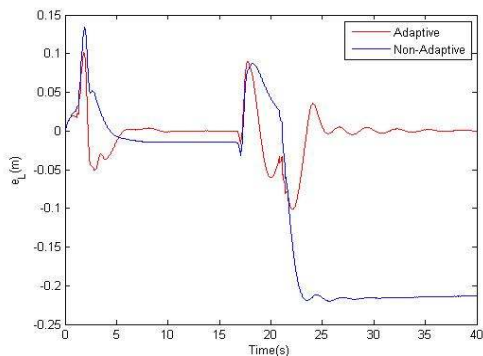


그림 8. Adaptive vs Non-Adaptive

마지막은 첫 번째와 두 번째 상황이 동시에 일어나고 있는 상황이다.

그림 8에서도 적응 제어를 한 경우는 e_L 이 0으로 수렴하지만 하지 않은 경우는 e_L 이 0으로 수렴하지 않는 것을 확인할 수 있다.

앞의 세 경우 모두 적응 제어의 경우 모델의 불확실성이 있음에도 불구하고 e_L 이 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 정상상태 오차를 제거하기 위하여 I 계인을 사용하지만 이 경우 시스템이 불안정해진다. 하지만 적응 제어를 적용한 결과 시스템의 안정성을 유지하면서 모델의 불확실성으로 인한 정상상태 오차를 제거할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다.

IV. 결론

지금까지 스키드스티어 차량의 경로추종을 위한 모델 기반 적응제어기를 설계하였다. 모델기반 제어기를 설계하여 시뮬레이션을 수행한 결과 모델 오차가 존재하지 않는 경우 정상상태 오차가 0으로 수렴하며 제어가 잘 되었지만 모델 오차가 존재할 경우 정상상태 오차가 0으로 수렴하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 모델의 불확실성으로 인한 오차를 제거하기 위하여 Lyapunov 이론에 근거하여 적응 제어기를 설계하였고 시뮬레이션 결과 안정성을 유지하면서 정상상태 오차가 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 다시 말하면 모델과 현재의 상태에 대한 예측이 어느 정도 부정확한 상황에서도 경로추종이 잘 됨을 확인할 수 있었다. 그러므로 모델기반 제어기에 적응 제어를 도입함으로써 모델 기반 제어의 단점을 극복하고 제어기의 성능이 향상됨을 확인하였다. 하지만 실제 차량을 통한 실험이 수행되지 않았기 때문에 실제 차량을 통한 실험을 통하여 결과를 검증하는 작업이 추후에 시행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Choi, Seibum B., "The Design of a Look-Down Feedback Adaptive Controller for the Lateral Control of Front-Wheel-Steering Autonomous Highway Vehicles", IEEE Transactions on Vehicular Technology, VOL. 49, NO. 6, NOVEMBER (2000)
- [2] Rajesh Rajamani, "Vehicle Dynamics and Control", Springer, pp. 27-43 (2006)
- [3] Jean-Jacques E. Slotine, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall International, Inc., pp. 61 (1991)