

Model Predictive Control with Powertrain Delay Consideration for Longitudinal Speed Tracking of Autonomous Electric Vehicles

감상 논문

한양대학교 ERICA 기계공학과 4학년 공민수

Minsu Kong (2020077792)

초 록

해당 논문은 powertrain delay를 pure delay와 actuation lag로 구분하고 이 특성을 MPC모델에 통합함으로써 더욱 실제 차량 환경과 맞게 모델을 설계하였다. 또한, 목표 토크를 달성하기 위한 스로틀 및 브레이크 입력을 제공하는 토크 맵을 구축하여 정밀한 제어 구현이 가능하도록 하였다. 이러한 두가지 접근방식을 통해 차량의 속도 추종 성능은 기존 MPC모델 방법과 PID 제어 방법보다 응답 성능과 속도 추정 성능에서 우수한 결과를 보였으며, 가감속 오버 슈트 또한 감소시켰다. 뿐만 아니라 평균 계산 시간 1.32ms를 확보하며 실시간 성능을 보장하였다. 해당 논문을 분석해보며, 판단영역에서 내린 trajectory를 실제 차가 추종하기 위한 전반적인 제어 시스템 구조에 대해 이해해 보고 powertrain delay를 고려한 제어기에 대한 인사이트를 넓히려고 한다. 순서는 0. 용어 정리, 1. Introduction, 2. System Architecture, 3. MPC Module, 4. Wheel Torque Table Module, 5. Experiments, 6. Reflection, 7. Reference 순으로 진행하였다.

0. 용어 정리

-Mechanical filtering: 제어 시스템의 명령에 실제 차량은 샤프트의 비틀림, 서스펜션 탄성, 타이어 변형 등의 이유로 물리적으로 필터링된 결과가 나타남.

-driveline: 엔진에서부터 바퀴까지 동력을 전달하는 전체 기계적 구성

-cubic spline: 3차 함수 보간

-ABS(Anti-lock Braking System): 브레이크 압력을 짧은 주기로 증감하면서 브레이크가 잠기는 것을 방지하는 시스템

1. Introduction

전기차와 자율주행차의 발전으로 전기차 특성에 최적화된 속도 제어 시스템의 연구가 활발해지고 있으며, 이는 주어진 speed profile을 정확히 추종하고 부드러운 throttle 및 brake 제어를 달성하는 데 목적이 있다.

기존 PID제어기는 구현이 쉽지만 제어 안정성에 중요한 영향을 미칠 수 있는 시스템 동역학 또는

외란에 대한 한계가 존재한다. 이를 보완하기 위해 SMC(Sliding Mode Control), LQR(Linear Quadratic Regulator), MPC(Model Prediction Control) 제어기가 사용될 수 있는데 이중 자율주행자동차 분야에서 모델 기반 접근법으로 가장 널리 연구되고 있는 MPC제어기를 중점적으로 설명하고 있다.

MPC 제어기는 설계 초기단계에서 다양한 입력 변수와 제약조건들을 적용할 수 있으며 현재 상태를 기반으로 한 동작 예측과 최적 제어 입력의 반복을 통해 최적 제어를 수행해 나간다. 이러한 MPC 특성상 모델의 정확도는 성능을 좌우함을 알 수 있으며 따라서 실제 차량의 동적 특성 중 하나인 Powertrain delay를 MPC 모델에 추가하는 방안을 제안하고 있다.

Powertrain delay는 Pure delay와 Actuation lag로 구분하고 있으며 Pure delay는 CAN 통신 지연, driveline freeplay, Computation process 등이 원인이 되며 Actuation lag는 actuation의 반응성, Low Level Control의 design, 탄성 소재 등이 원인이 된다. 이러한 특성을 반영한 'FOPDT(First Order Plus Dead Time)'모델을 통합한 MPC 제어기를 제안한다.

2. System Architecture

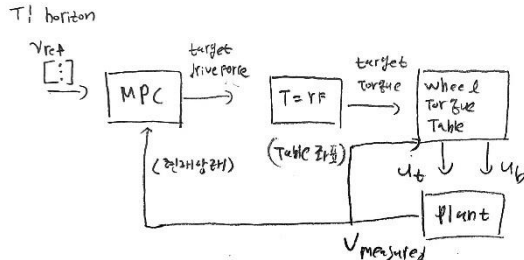


Figure 1 Overall System Architecture

시스템 구조는 다음과 같다.

1. MPC module 입력: Planning 단계의 결과 값인 speed profile
2. MPC module 목적: 레퍼런스 속도와 예측 속도 차이, 힘 변화량의 합 => 최소화
3. MPC module 출력: Target drive force
4. Table module 입력: Target drive Torque
5. Table module 역할: 현재 속도 기준 Target drive Torque를 도달하기 위한 throttle 및 brake 값 도출
6. Table module 출력: Throttle 또는 Brake 값.
7. 차량의 측정된 속도는 MPC, Torque Table에서 사용된다. (현재상태)

3. MPC Module

해당 논문에서 상태는 $x = [v, F_{lag}, F_{Nd}, F]$ 로 입력은 $u = [\Delta F]$ 정의하였으며 MPC 설계 방법은 1, 2, 3, 4, 5번으로 분석해 볼 수 있었다.

1. Baseline Vehicle Model

차량의 종방향 동역학에 한정한다. 횡방향 동역학, 서스펜션 구성요소, driveline, tire model의 추가 구성을 포함하지 않았다.

2. Powertrain Delayed Vehicle Model

시간에 따른 입력 힘을 시상수와 Dead Time을 포함한 1차 미분방정식으로 모델링하였다[FOPDT]. Dead Time은 unit step function을 shift한 것으로 예를

들 수 있다. 만약 unit step function이라면 Figure 2와 같은 그래프를 얻을 수 있으며 이를 통해 pure delay와 actuation lag을 단순한 모델로 가정하여 디자인한 것을 알 수 있었다.

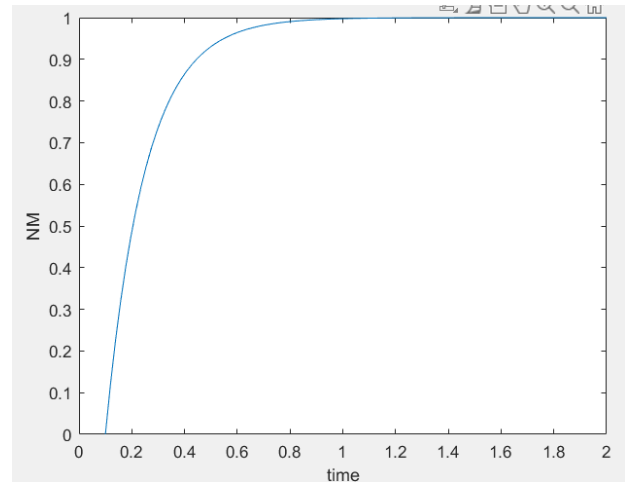


Figure 2 FOPDT ($D = 0.1s$, $\tau = 0.15s$)

3. Discrete Time Model

이산시간 모델에서 FOPDT는 FIFO 구조를 통해 delay를 모델링 하였다. 그리고 입력이 속도에 영향을 미치기까지 Figure 3과 같은 과정을 거친다.

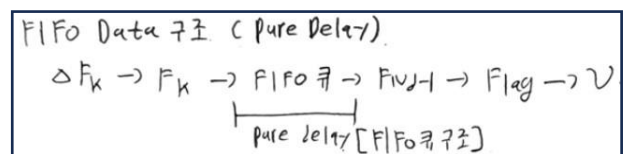


Figure 3 이산 모델 입력 이동 구조도

추가로 1, 2의 연속 시간 모델도 Eq1, Eq2와 같이 이산화 모델로 변경 가능하다.

$$v_{k+1} = v_k + \frac{F_{lag,k} - mgsin(\theta) - fmgcos(\theta) - 0.5\rho AC_d v^2}{m} dt \quad \text{--- (Eq1)}$$

$$F_{lag,k+1} = F_{lag,k} + \frac{-F_{lag,k} + F_{Nd-1,k}}{\tau} dt \quad \text{--- (Eq 2)}$$

4. State & State Function

1, 2, 3을 종합하여 상태 x 는 Figure 4와 같다. 상태 행렬이 비선형임으로 이를 state function으로 보고 1차 테일러 근사화를 통해 선형화 작업이 필요하다. 이 때 feature들을 상태들로 각각

편미분하는 자코비안 행렬이 요구되며 상세한 풀이는 Figure 5와 같다.

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} v_{k+1} \\ F_{lag,k+1} \\ F_{Nd-1,k+1} \\ \vdots \\ F_{0,k+1} \\ F_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_k + \frac{F_{lag,k} - mg \sin \theta - fmg \cos \theta - 0.5 \rho A C_d v_k^2}{m} dt \\ F_{lag,k} + \left(\frac{-F_{lag,k} + F_{Nd,k}}{\tau} \right) dt \\ F_{Nd-2,k} \\ \vdots \\ F_k \\ F_k + \Delta F_k dt \end{bmatrix}$$

Figure 4 상태 행렬

• 선형근사 (자코비안행렬 사용)

$$\hat{x}_{k+1} \approx \hat{x}_{kH} + \left. \frac{\partial \hat{x}(x,u)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k, u=\hat{u}_k} (\hat{x}_k - \hat{x}_k) + \left. \frac{\partial \hat{x}(x,u)}{\partial u} \right|_{x=\hat{x}_k, u=\hat{u}_k} (\hat{u}_k - \hat{u}_k)$$

(\hat{x} : 상태, \hat{u} : 입력)

$$\hat{x}_{k+1} \approx A \hat{x}(k) + B \hat{u}(k) + d$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial \hat{x}_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \hat{x}_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \hat{x}_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial x_1} & \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial u} \\ \frac{\partial \hat{x}_2}{\partial u} \\ \vdots \\ \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial u} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial v_k} & \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial F_{lag,k}} & \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial F_{Nd,k}} & \dots & \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial F_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial v_k} & \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial F_{lag,k}} & \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial F_{Nd,k}} & \dots & \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial F_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\rho A C_d v_k}{m} & \frac{1}{m} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 - \frac{f}{m} & \frac{1}{m} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial u_k} \\ \frac{\partial \hat{x}_2}{\partial u_k} \\ \vdots \\ \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial u_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{x}_1}{\partial t} \\ \frac{\partial \hat{x}_2}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial \hat{x}_n}{\partial t} \end{bmatrix}$$

$$d = \hat{x}_{kH} - \left. \frac{\partial \hat{x}(x,u)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k} \hat{x}_k - \left. \frac{\partial \hat{x}(x,u)}{\partial u} \right|_{x=\hat{x}_k} \hat{u}_k$$

Figure 5 QP 유도 과정

5. MPC Problem Formulation

해당 MPC 모델은 다변수 최적화 문제이며 속도 오차와 구동력 변화량 합을 최소화하는 방향으로 최적화된다. 또한 과도한 가감속을 제한하기 위한 제약조건이 추가되었다.

4. Wheel Torque Table Module

Table을 만들기 앞서 MPC Module의 출력값인 drive force를 drive torque로 바꾼다. 그리고 throttle과 brake의 입력이 동시에 발생하지 않도록 throttle과 brake pedal들이 0일 때의 회생 제동 토크 값을 중립값으로 사용하였으며 이 값보다 크면 torque table을 사용하고, 작으면 brake torque table을 사용한다.

4.1 Throttle Pedal

Throttle Pedal Table을 만드는 과정을 1, 2, 3과 같이 요약할 수 있다.

1. EV Powertrain 구조 특성상 drive motor에 대한 하나의 torque table만 요구된다 (내연기관차와 대조됨)
2. 차량의 현재 속도(RPM)에 따라 특정 Torque를 내기 위해 필요한 throttle 위치가 상이하다.
3. 2와 같은 이유로 차량 속도, throttle position, motor torque의 관계를 테스트를 통해 data를 얻은 후 3차원 그래프로 나타내었다. (Cubic Spline 적용)

4.2 Brake Pedal

Brake Pedal Table을 만드는 과정을 1, 2, 3과 같이 요약할 수 있다.

1. 유압 브레이크 장치로 인해 brake input과 제동력은 비례하는 관계를 가지기 때문에 목표 토크만 알면 input을 만들 수 있다. (차량 속도 불필요)
2. Braking torque value는 CAN통신으로 얻을 수 없기 때문에 종방향 가속 데이터를 사용하여 역계산한다.
3. 관계도를 보면 70% 이상 input이 주어질 시 ABS로 인해 Wheel torque가 비슷한 것을 관찰할 수 있다.

5. Experiments

5.1 Comparative controllers

Powertrain delay를 고려하지 않은 MPC제어기와 PID제어기가 해당 논문에서 제시하는 MPC 모델과 비교대상이 된다.

5.2 Experimental conditions & Result

시뮬레이션, 실차 테스트 모두 step speed profile, trapezoidal speed profile 두가지 시나리오에 대해 테스트를 진행하였다.

두 테스트 환경 모두 제시된 모델에서 반응성, 속도 추종 오차, 수렴 속도, Mp, Oscillation 모두 비교군보다 우수한 성능을 보여주었다. 비록 실차 테스트에서 외부 외란, 실제 모델에 대한 근사 등의 이유로 시뮬레이션 보다 속도 추종 오차가 증가하였지만 여전히 비교군 보다 우수한 성능을 보여주었다.

계산량 증가로 계산 시간이 증가하였지만 CAN 통신 주기인 10ms이하인 1.32ms를 보여주며 실시간성 보장을 확인해주었다.

6. Reflections

SV의 Motion Prediction에 관한 논문 분석 이후 판단 영역에서 도출한 trajectory를 추종하는 제어기에 관한 논문이 궁금해 해당 논문을 분석해 보았다.

우선 MPC 제어를 동역학 모델, 이산모델, QP form과 같이 설계 과정을 상세하게 공부할 수 있는 기회가 되어 MPC모델에 좀 더 깊이 이해할 수 있었다. 특히 EKF_FILTER에서 사용되는 1차 테일러 근사 방법이 MPC모델에서도 적용되어 인상 깊은 경험이었다.

그리고 비록 단순화된 Powertrain delay모델이지만 Delay 모델 유무가 제어 성능면에서 차이가 있음을 확인하고 MPC 제어기 특성 대해 다시 한번 생각해 보는 계기가 되었다.

최종적으로 motion prediction을 통한 trajectory 생성 그리고 이를 추종하기 위한 제어분야 전반의 구조에 대해 이해할 수 있는 좋은 경험이었다.

7. References

1. Lee, J.; Jo, K. Model Predictive Control with Powertrain Delay Consideration for Longitudinal Speed Tracking of Autonomous Electric Vehicles. World Electr. Veh. J. 2024, 15, 433. <https://doi.org/10.3390/wevj15100433>