

〈응용논문〉

자율주행 시스템 검증 시나리오를 위한 Reference Governor 기반의
 차량 추종 모델 개발

문 일 경¹⁾ · 조 건 희¹⁾ · 이 형 철^{*2)}

한양대학교 전기공학과¹⁾ · 한양대학교 전기생체공학부²⁾

Development of a Car-Following Model Based on Reference Governor for
 Autonomous Driving System Verification Scenario

Ilkyoung Mun¹⁾ · Kunhee Cho¹⁾ · Hyeongcheol Lee^{*2)}

¹⁾Department of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

²⁾Division of Electrical/Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 31 October 2022 / Revised 15 November 2022 / Accepted 21 November 2022)

Abstract : This paper represents a reference governor-based, car-following model for an autonomous driving system verification scenario. A reference governor(RG) is an add-on control scheme that enforces state and control constraints on stabilized systems by modifying the reference whenever the constraints are violated. Unlike existing controllers that do not handle states and input constraints, the proposed method handles constraints by using a maximal invariant that is set to consider actuator limits, ride quality, and vehicle safety with low computational effort. The proposed method was validated with simulation under various driving scenarios, such as acceleration, deceleration, and driving cycles. The RG-based, car-following model showed efficient computational performance while satisfying the defined constraints, and was able to simulate actual traffic flow.

Key words : Autonomous driving system(자율주행 시스템), Adaptive cruise control(적응형 순항 제어), Car-following model(차량 추종 모델), Reference governor(기준 입력 조정기), Model predictive control(모델예측제어), Robust maximal invariant set(강건 최대 불변 집합)

Nomenclature

K_L : system gain
 T_L : time constant
 τ_h : time headway
 ν : vehicle velocity
 a : acceleration
 u : control input
 O_∞ : robust maximal invariant set

ADS : autonomous driving system
 ACC : adaptive cruise control
 LQT : linear quadratic tracker
 RG : reference governor
 MPC : model predictive control

Subscripts

ADAS : advanced driver assistance system

1. 서론

자율주행 시스템(Autonomous Driving System, ADS) 및 첨단 운전자 지원 시스템(Advanced Driver Assistant System, ADAS)은 운전자의 편의성과 안전성을 확보하기 위한 기술로 최근 빠르게 성장하고 있는 분야이다.¹⁻⁵⁾

*Corresponding author, E-mail: hclee@hanyang.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

자율주행의 핵심 기능으로는 종방향 제어 시스템인 ACC(Adaptive Cruise Control), AEB(Autonomous Emergency Brake)가 있으며, 횡방향 제어 시스템으로는 LCS(Lane Change System), LKA(Lane Keeping Assistance) 등이 있다. 해당 시스템들은 안전과 밀접하게 연관이 되어 있어 다양한 시나리오를 통해 검증이 요구된다.

ADAS, ADS의 검증을 위한 시나리오 설계 방안으로는 평가-표준기반, 테스트 매트릭스 기반, 악의조건 시나리오 기반, 교통 시뮬레이션 기반의 방법들이 널리 알려져 있다.⁶⁻¹⁴⁾ 대표적으로 유럽 신차평가프로그램(The European New Car Assessment Program, Euro NCAP)과 국제표준기구(International Organization for Standardization, ISO)에서는 ADS, ADAS 검증을 위한 표준 평가 시나리오를 제시한다. 차량의 안전도 평가, 또는 시스템 표준을 제정한다는 점에서 시험목적의 차이는 존재하지만, 시스템이 만족해야 하는 최소한의 기준을 제시하는 점에서 유사하다. 이러한 시나리오는 많은 차량 제조사들의 실험을 통해 검증된 시험 시나리오를 제공하지만, 다양한 상황에 대한 시나리오로 이를 확장하여 검증할 필요가 있다.

특정한 상황이 아닌, 더욱 포괄적인 환경에서 검증을 수행하는 방법으로는 교통 시뮬레이션을 이용하는 방법이 있다. 교통 시뮬레이션은 도로나 신호체계 설계를 위해 교통량을 거시적으로 분석하는 방법으로 최근에는 ADS, ADAS의 검증을 위해 그 활용도를 높이고 있으며, 차량 추종모델을 이용하여 교통흐름을 모사한다. 대표적인 차량 추종 모델로는 Pipe, Gazis, Newell, Tyler, Gipps 모델 등이 있다.¹⁵⁻²⁰⁾ 각 차량 추종 모델들은 차량의 속도, 가속도, 전방차량과의 상대거리를 기반으로 정의된다. 하지만 이러한 차량 추종 모델들의 경우 차량의 동적 특성과 제약조건이 고려되어 있지 않아 비정상적인 거동과 제어입력을 야기하므로 정합성 높은 검증에 사용되기에는 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 차량의 종/횡방향 동적 특성을 반영한 모델예측제어(Model Predictive Control, MPC) 기반의 차량 추종 모델이 제안되었다.²¹⁾ MPC는 이산시간에서 현재로부터 유한한 시간 영역에 대해 제약 조건을 만족시키면서 목적함수를 최소화하는 제어 입력을 계산하는 제어 방법으로, 기존의 교통모델의 한계점을 극복하는 차량 추종 모델 설계가 가능하다. 하지만 MPC는 샘플 시간마다 최적화 문제를 풀어 제약조건을 만족하는 입력 값을 계산하므로 연산량이 많아 교통 환경의 모든 차량들에 대해 적용하기에는 한계가 있다. 더불어 다양한 시나리오를 통해 검증된 기존 제어기의 특성을 유지할 수 없다는 단점이 있다.

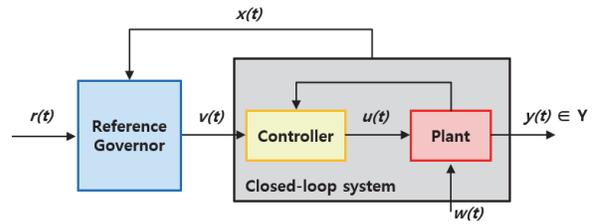


Fig. 1 Reference governor applied to closed-loop system

본 논문에서는 RG(Reference Governor) 기반의 적응형 순항 제어 시스템(ACC)을 설계하여 기존 방법들의 한계를 극복한 차량 추종 모델을 제안한다. RG는 Fig. 1과 같이 Closed-loop system의 밖에 위치하여 제약 조건을 만족하도록 Reference를 가변해주는 장치를 의미한다. RG는 기존의 제약조건이 고려되지 않은 제어기의 특성과 성능을 보존할 수 있고, MPC에 비해 낮은 연산량으로 제약조건을 고려하는 제어가 가능하다.²²⁾ 기존 연구에서는 RG를 이용하여 String stability와 제약조건을 모두 만족하는 Platoon 시스템 설계 방법이 제안되었고,²³⁾ 상태 변수의 제약조건을 고려한 Path planning 방법이 제안되었다.²⁴⁾ 본 연구에서는 제약 조건이 고려되지 않는 최적 제어 기법인 LQT(Linear Quadratic Tracker)를 기반으로 RG를 설계하여 LQT, MPC와 비교하였다. 시나리오 구성으로는 RG를 적용한 LQT 기반의 적응형 순항 제어 시스템의 급격한 가속도 시나리오에 대한 추적 성능을 확인하였고, 차량 추종 모델로서의 적합성을 확인하기 위해 실제 교통 흐름 시나리오인 Driving cycle에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

2. ACC 모델링

제안하는 차량 추종 모델은 적응형 순항 제어를 기반으로 한다. 적응형 순항 제어는 상위 제어기와 하위 제어기로 구분된다. 상위 제어기는 차량에 장착된 센서를 통해 계측된 선행 차량의 정보를 기반으로 안전거리를 유지하도록 요구 가속도를 결정한다. 하위 제어기는 상위 제어기의 요구 가속도에 따른 Engine throttle과 Brake input을 결정하므로 Actuator 지연이 존재한다. 본 논문에서는 식 (1)과 같이 1차 지연 함수를 사용하여 하위 제어기를 구성하였다.

$$a_f = \frac{K_L}{T_L s + 1} a_{f,des} \quad (1)$$

K_L 은 시스템 이득(System gain), T_L 은 시간상수(Time constant)로 정의한다.

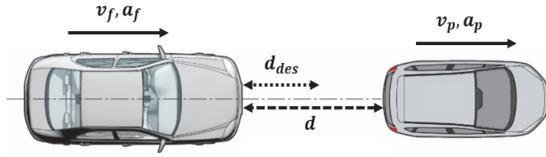


Fig. 2 Scheme of adaptive cruise control(ACC)

2.1 상태 공간 방정식 모델

본 논문에서 활용하는 상위 제어기 수식은 Fig. 2에 기재되어 있는 파라미터로 표현된다. 운전자의 차량의 속도와 가속도는 v_f, a_f , 선행 차량의 속도와 가속도는 v_p, a_p , 요구 상대거리와 상대거리는 d_{des}, d 로 정의한다.

$$d_{des} = \tau_h v_f + d_0 \quad (2)$$

$$\Delta d = d - d_{des} \quad (3)$$

$$\Delta v = v_p - v_f \quad (4)$$

본 논문에서는 식 (2)와 같이 상수 값의 차두 시간(τ_h : Time headway)을 가지는 CTG(Constant time gap)를 사용하여 목표 상대거리를 설계하였다. d_0 는 최소 안전거리를 나타내며, 거리오차, 속도오차는 식 (3), (4)로 정의한다. 식 (1)-(4)를 종합하면 $x=[\Delta d \ \Delta v \ a_f]^T$, $u=a_{f,des}$, $v=a_p$ 인 LTI(Linear Time Invariant) 상태 공간 방정식으로 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_c x + B_c u + G_c v \\ y &= C_c x \\ A_c &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -\tau_h \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1/T_L \end{bmatrix} \\ B_c &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_L/T_L \end{bmatrix} \\ G_c &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C_c &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

이때 $x \in R^3$ 는 시스템의 상태, $u \in R^1$ 는 제어 입력, $v \in R^1$ 는 계측 가능한 외란으로 선행 차량의 가속도를 나타낸다. 이 후 식 (5)에 대해 오일러 방법을 이용하여 A_d, B_d, C_d, G_d 로 구성된 이산 시간 상태 공간 방정식을 설계하였다.

2.2 가치함수 및 제약조건

2.1에서 설계한 상태공간 방정식을 이용한 LQT 제어

기를 설계하기 위해 식 (6)과 같은 가치함수를 설계하였다. 식 (6)에서 $w_{y\Delta v}, w_{y\Delta d}, w_{ya}$ 는 추적오차에 대한 가중치를 나타낸다. 가치함수를 구성하고 있는 상태변수인 거리오차와 속도오차의 목표값은 0으로 수렴해야 하며, 가속도의 경우 목표값 설정이 요구된다. 이를 위해 선형 DCF(Driver car-following) 모델에 의해 거리오차와 속도 오차를 이용한 PD 제어기의 형태로 식 (7)과 같이 목표 가속도를 산출하였다.²⁵⁾

$$\begin{aligned} L(y, u) &= \|\Omega y(k)\|_{w_y}^2 + \|u(k)\|_{w_u}^2 \\ \Omega &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ k_d & k_v & -1 \end{bmatrix} \\ w_y &= \begin{bmatrix} w_{y\Delta d} & 0 & 0 \\ 0 & w_{y\Delta v} & 0 \\ 0 & 0 & w_{ya} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} L_{DC} &= w_{ya}(a_{fR} - a_f)^2 \\ \text{where } a_{fR} &= k_v \cdot \Delta v + k_d \cdot \Delta d \end{aligned} \quad (7)$$

본 논문에서는 액츄에이터 한계, 승차감, 차량 안정성을 위해 식 (8)과 같이 시스템의 상태, 제어입력, 그리고 제어 입력의 변화량에 제약조건을 설정하여 전방 차량의 급격한 가속도 변화에 따른 추종 차량의 상태를 고려했다. 제약조건은 RG설계에 필요한 Robust maximal invariant set을 구하는데 사용된다.

$$\begin{aligned} \Delta d_{min} &\leq \Delta d \leq \Delta d_{max} \\ \Delta v_{min} &\leq \Delta v \leq \Delta v_{max} \\ a_{f,min} &\leq a_f \leq a_{f,max} \\ a_{f,des,min} &\leq a_{f,des} \leq a_{f,des,max} \\ \Delta a_{f,des,min} &\leq \Delta a_{f,des} \leq \Delta a_{f,des,max} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 LQT 제어기 설계

LQT 최적 제어기의 출력인 입력 u 는 식 (6)으로 구성된 가치함수를 최소화하는 것을 목표로 한다. 상태변수와 입력에 대한 가중치를 각각 Q, R 이라 가정했을 때, 이산시간에 대한 ARE(Algebraic riccati equation)는 식 (9)로 표현되고, 피드백 이득(Feedback gain)과 피드포워드 이득(Feedforward gain)은 Riccati equation의 해인 P 로 표현된다. 최종적으로 제어 입력이 될 u 는 식 (10)과 같이 정리된다.²⁶⁾

$$\begin{aligned} A_d^T P A_d - P - N^* + Q &= 0 \\ N^* &= (A_d^T P B_d)(B_d^T P B_d + R)^{-1}(B_d^T P A_d) \\ K_K &= (B_d^T P B_d + R)^{-1} B_d^T P A_d \\ K_r &= (B_d^T P B_d + R)^{-1} B_d^T M^* \\ M^* &= [I - (A_d - B_d K_K)]^T C_d^T Q \end{aligned} \quad (9)$$

$$u(k) = -K_K x(k) + K_r r(k) \quad (10)$$

3. Reference Governor

3.1 Invariant Set Theory

본 절에서는 RG를 설계하는데 있어 사용되는 Robust maximal invariant set에 대한 몇 가지 정의를 소개한다. 우선, A, B, E로 구성된 상태공간 방정식(식 (11))의 제약 집합 \mathcal{X} 와 W 를 고려한 Robust backward reachable set은 Definition 1과 같이 정의된다.²⁷⁾

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Ew(k) \\ \text{s.t. } \mathcal{X} &: H_x x \leq h_x, w(k) \in W \subseteq \mathbb{R}^d \end{aligned} \quad (11)$$

Robust backward reachable set을 이용하여 Robust maximal invariant set을 구하는 과정은 Algorithm 1과 같으며,²⁷⁾ Fig. 3은 Set를 구하는 과정을 도식화 한 결과를 나타낸다. 최종적으로 구해진 Robust maximal invariant set(\mathcal{O}_∞)안에 위치한 상태변수들을 $\Omega_0(=\mathcal{X})$ 안으로 수렴시키는 입력 u 는 항상 존재하게 된다.

Definition 1 (Robust Backward Reachable (Pre) Set)

식 (11)과 같은 시스템에 대한 Robust backward reachable set은 목표세트로 전개되는 $\mathcal{T} \subseteq \mathcal{X}$ 로 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} Pre(\mathcal{T}) &= \{x \in \mathbb{R}^n : \exists u \in \mathcal{U} \text{ s.t.} \\ Ax + Bu + Ew &\in \mathcal{T}, \forall w \in W\} \end{aligned}$$

Algorithm 1. Robust maximal invariant set

- 1: **Input:** admissible set \mathcal{X} , system dynamic (11), polytope constraint H_x, h_x , disturbance polytope W , and $k=0$;
- 2: **Output:** Robust maximal invariant set \mathcal{O}_∞ .
- 3: **Let** $\Omega_k = \mathcal{X}$
- 4: **Repeat**
- 5: $k=k+1$
- 6: **Let** $\Omega_{k+1} = Pre(\Omega_k) \cap \Omega_k$
- 7: **If** $\Omega_{k+1} = \Omega_k$ **Then**
- 8: $\mathcal{O}_\infty = \Omega_{k+1}$
- 9: **break**
- 10: **return** \mathcal{O}_∞
- 11: **until** $\Omega_{k+1} = \Omega_k$

3.2 Vector Reference Governor

RG는 Closed-loop system의 밖에 위치하여 제약조건을 만족하도록 Reference를 가변해주는 장치로 선형 시스템뿐만 아니라 비선형 시스템에도 적용되어왔다.^{28,29)} 선형 시스템에 적용되는 가장 기초적인 RG인 VRG (Vector reference governor)는 Reference가 하나인 시스템에 사용되는 SRG(Scalar reference governor)의 단점을 보

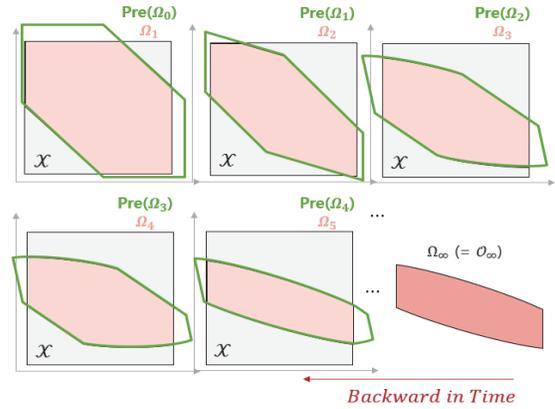


Fig. 3 Robust backward reachable set for multiple steps

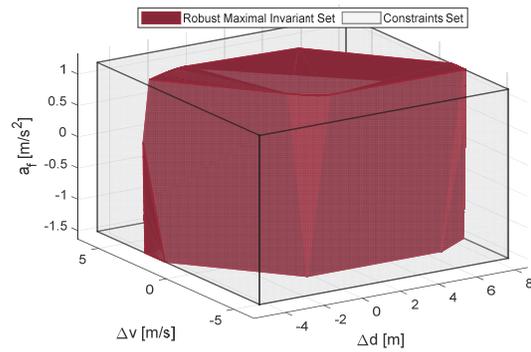


Fig. 4 Calculated robust maximal invariant set

완하고자 고안된 방법으로 식 (13)의 최적화 문제를 풀어 Reference를 가변 한다.³⁰⁾

$$x(k+1) = (A_d - B_d K_x)x(k) + B_d K_r v(k) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} v(k) &= \arg \min_v \|v - r(k)\|_Q^2 \\ \text{s.t. } (v, x(k)) &\in \mathcal{O}_\infty, Q^* > 0, v(k) \in \mathbb{R}^m, m \geq 2 \end{aligned} \quad (13)$$

식 (12)는 ACC의 상태공간 방정식에 대해 2.3절에서 설계한 LQT 제어기를 적용한 Closed-loop 식이며, 식 (13)의 최적화 문제에서 도출된 가변된 Reference인 v 가 입력으로 적용된다. 이때, v 는 식 (13)을 이용하여 Robust maximal invariant set인 \mathcal{O}_∞ 에 포함되도록 계산된다. 식 (5), (6), (11)을 종합한 적응형 순항 제어 시스템의 Robust maximal invariant set은 Fig. 4에 나타냈다. LTI 시스템의 경우 정해진 제약조건에 대한 Robust maximal invariant set은 불변하므로 오프라인으로 미리 계산하여 적용하였다.

4. 주행 시나리오 및 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안한 적응형 순항 제어 시스템 기반의 차량 추종 모델의 성능을 검증하기 위해 구성한 주행 시나리오와 시뮬레이션 결과에 대해 설명한다. 동일한 시나리오에 대해서 LQT와 RG를 적용한 LQT, 그리고 MPC의 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다. 각 제어기는 0.01초의 샘플링 시간을 갖는 이산 시간 모델을 사용하였으며, MPC 설계에는 RG에서 사용한 가치함수와 동일한 가중치, 제약조건 및 10의 Horizon을 갖도록 설계하였다. 시뮬레이션은 MATLAB과 IPG社의 Carmaker를 이용하였다.

4.1 주행 시나리오 구성

먼저 설계한 적응형 순항 제어 시스템의 성능을 검증하기 위해 고속도로 주행 상황에서 발생할 수 있는 공격적인 주행 성향의 차량에 대한 추종 시나리오를 구성하였다.³¹⁾ 이 후 해당 제어기가 차량의 동적 특성과 제약조건이 고려된 차량 추종 모델로서 임의의 전방 차량에

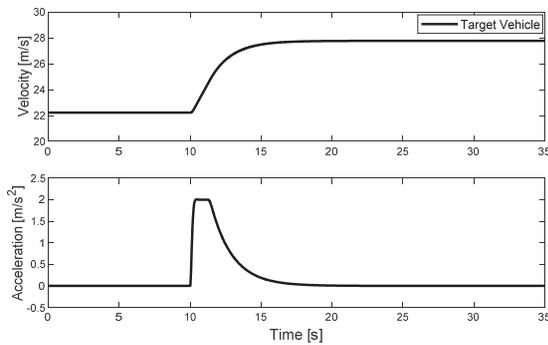


Fig. 5 Velocity and acceleration profile of preceding vehicle for Scenario A

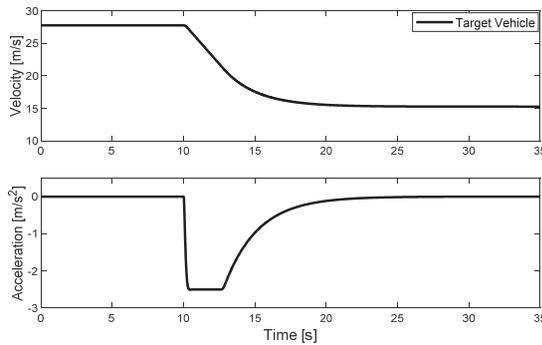


Fig. 6 Velocity and acceleration profile of preceding vehicle for Scenario B

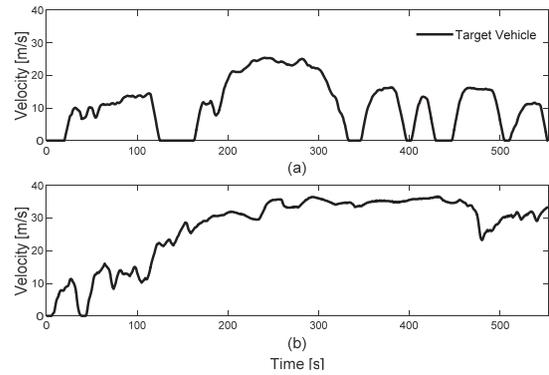


Fig. 7 Velocity profile of preceding vehicle for (a) FTP-75 and (b) ArtMW130

대한 추적 성능을 확인하기 위해 실제 도로 주행 데이터 기반의 Driving cycle인 FTP-75(Federal Test Procedure)와 Artemis project의 ArtMW130에 대해 시뮬레이션을 진행하였다.

제어기 검증을 위한 가감속 시나리오는 다음과 같다. 시나리오 A는 80 km/h(약 22.2 m/s)로 등속 주행하던 선행차량이 100 km/h(약 27.8 m/s)로 가속하는 상황을 고려하였다. 선행 차량의 속도, 가속도는 Fig. 5와 같으며 시나리오 B는 100 km/h(약 27.8 m/s)로 등속 주행하던 선행차량이 55 km/h(약 15.3 m/s)로 감속하는 상황을 고려하였다. 선행 차량의 속도, 가속도는 Fig. 6과 같다.

Fig. 7에는 평균 34.1 km/h(약 9.5 m/s)로 도심을 주행하는 FTP-75 테스트와 최대 130 km/h(약 36.1 m/s)로 고속도로를 주행하는 ArtMW130 테스트의 속도 프로파일을 나타냈다.

4.2 시뮬레이션 결과

시나리오 A에서 LQT의 경우 제약조건들이 고려되지 않은 제어기이므로 최대 2 m/s^2 로 가속하는 선행차량을 추종하기 위해 과도한 가속도 값이 제어차량의 입력으로 가해진다. 반면, RG를 적용한 제어기와 MPC의 경우 제약조건들이 고려되었기 때문에, 거리오차와 속도오차가 제약 조건을 벗어나지 않는 정도에서 제약 조건을 만족하는 가속도 값이 입력으로 가해진다. 시나리오 A에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 (d)는 RG를 적용한 LQT 제어기에 입력으로 가해지는 각 상태 변수에 대해 가변된 Reference를 나타낸다. 식 (13)을 통해 제약조건을 만족하는 v 가 계산되면 LQT 제어기는 가변된 Reference를 추종하고 결과적으로 Fig. 8의 (c)에서 보이듯 MPC 제어기와 마찬가지로 제약조건을 위반하지 않는 제어 입력을 낸다.

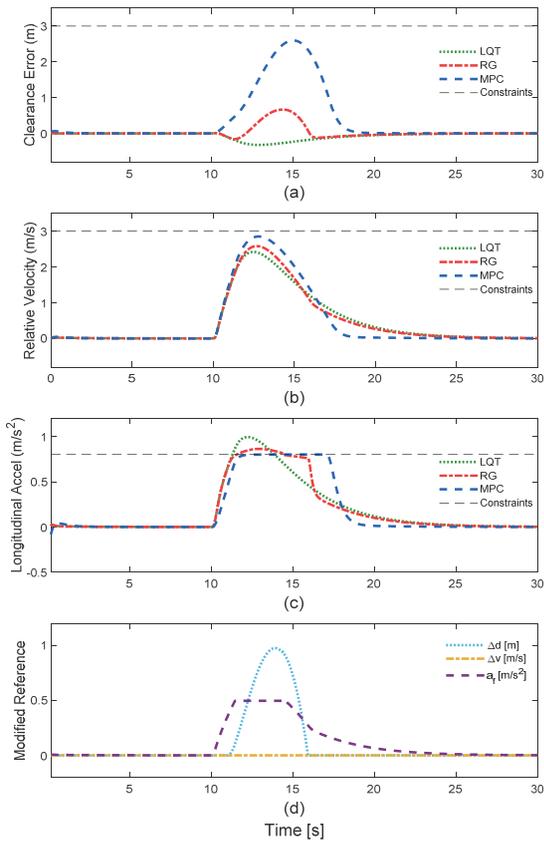


Fig. 8 Simulation result of Scenario A, (a) clearance error (Δd), (b) relative velocity (Δv), (c) longitudinal acceleration (a_f), (d) modified references by reference governor

시나리오 B도 시나리오 A와 유사한 결과를 보인다. 최대 -2.5 m/s^2 로 감속하는 선형차량에 대해 LQT의 경우 과도한 감속도 값이 입력으로 가해지는 반면 RG를 적용한 제어기, MPC는 제약 조건을 만족하는 입력 값을 도출된다. 시나리오 B에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 9와 같다. 가속 시나리오와 마찬가지로 감속 시나리오에 대해서도 RG를 적용한 LQT, MPC 제어기 모두 제약 조건을 만족하는 제어 입력 값을 도출되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

하지만, RG기반의 차량 추종 모델은 시나리오 A, B에서 가속도 제약조건을 일부 위배하였는데, 이는 RG 설계에 사용되는 Robust maximal invariant set의 오차로 인한 결과로 분석된다. 개선된 근사 방법을 이용하여 이러한 오차를 줄일 경우 제약 조건을 위배하지 않는 차량 추종 모델로 사용될 수 있다.

시나리오 A, B에서 RG를 적용하지 않은 LQT의 제어 입력이 실제 차량이 낼 수 없는 가속도 값은 아니지만,

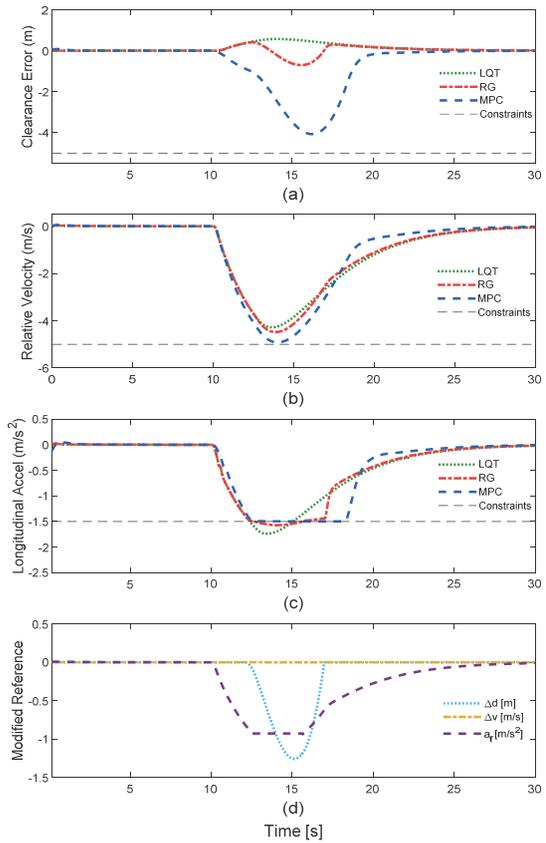


Fig. 9 Simulation result of Scenario B, (a) clearance error (Δd), (b) relative velocity (Δv), (c) longitudinal acceleration (a_f), (d) modified references by reference governor

선행 차량이 제어 차량의 차선을 이탈하거나 비정상적으로 가감속 하는 실제 도로 주행 상황을 고려했을 때, 제약 조건의 부재는 급격한 가감속으로 인하여 승차감과 연비 측면에서 부정적인 결과를 야기할 수 있으며 차량 추종 모델 관점에서는 실제 차량과 유사한 거동이라 할 수 없다.

앞서 서론에서 언급한바와 같이 RG가 MPC보다 우수한 측면은 기존의 제어기 특성을 유지할 수 있고, 연산 시간을 줄일 수 있다는 것이다. 시뮬레이션 결과를 통해 RG와 MPC의 연산시간을 Fig. 10에 비교하였다. 먼저 시나리오 A, B에서 RG를 적용한 LQT의 연산시간 RMS (Root mean square) 값은 Intel Core i7-10700F, 32 GB 사양을 기준으로 각각 0.090 ms , 0.087 ms 이며 MPC 제어기의 연산 시간 RMS 값은 각각 16.8 ms , 19.8 ms 으로 RG를 적용한 LQT의 연산 시간이 MPC에 비해 월등히 빠른 것을 알 수 있다.

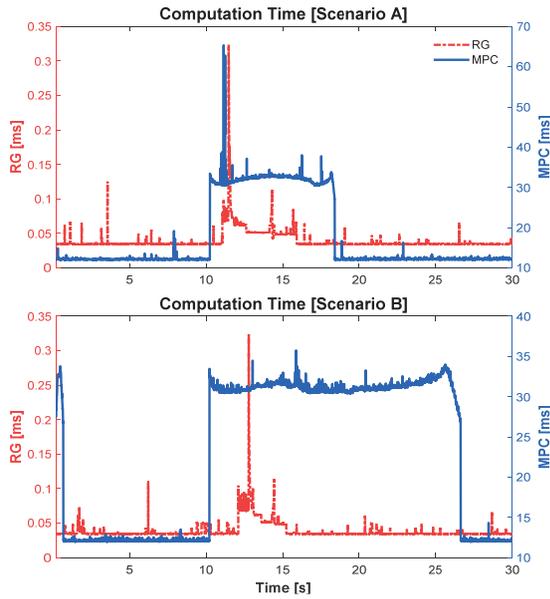


Fig. 10 Computation time(RG vs MPC)

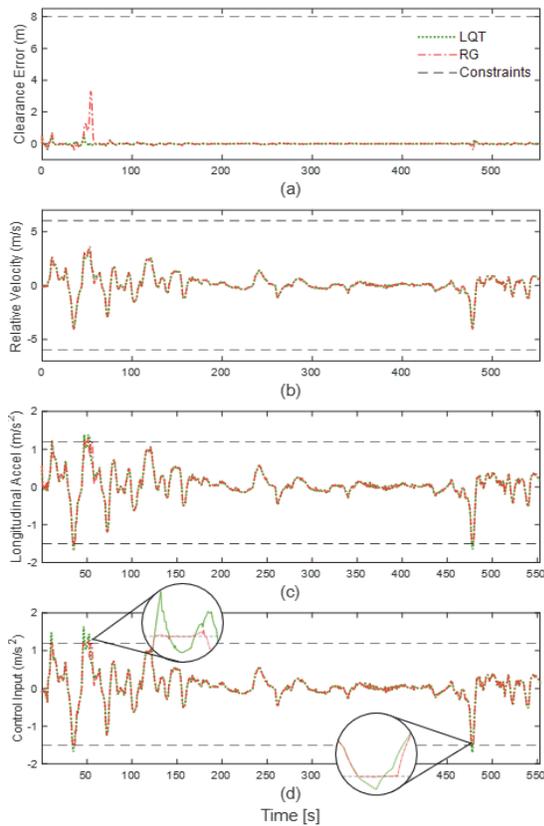


Fig. 11 Simulation result of FTP-75, (a) clearance error (Δd), (b) relative velocity (Δv), (c) longitudinal acceleration (a_f), (d) control input (u)

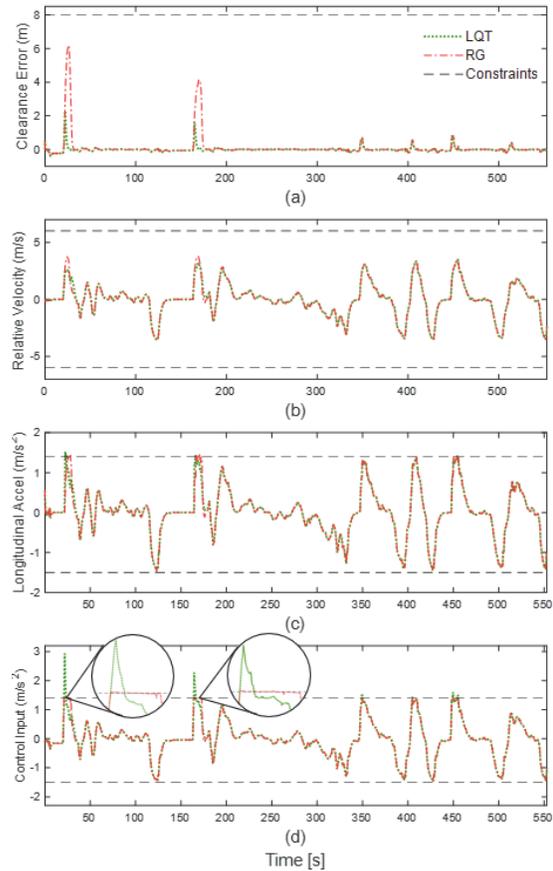


Fig. 12 Simulation result of ArtMW130, (a) clearance error (Δd), (b) relative velocity (Δv), (c) longitudinal acceleration (a_f), (d) control input (u)

Driving cycle 시나리오에서는 앞선 적응형 순항 제어 시스템 기반의 차량 추종 모델로서 임의의 전방 차량에 대한 추적 성능을 확인한다. 승차감이 고려된 적응형 순항 제어 시스템과는 달리 차량 추종 모델의 경우 실제 운전자와 유사한 거동을 보이는 것이 중요하므로 제약 조건을 일부 수정하여 적용하였다. FTP-75, ArtMW130에 대한 차량 추종 모델의 시뮬레이션 결과는 Fig. 11과 Fig. 12에 나타났다. Fig. 11과 Fig. 12(d)에서 알 수 있듯 LQT 제어기의 경우 제약조건이 고려되지 않아 과도한 가속도 값이 도출된다. 도출된 가속도 값은 Carmaker의 차량 동역학 모델의 입력으로 가해지지만 Fig. 11(c)와 Fig. 12(c)에서 보이듯 급격한 변화량, 과도한 가감속도 값으로 인해 차량 모델이 제어 입력을 추종하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 LQT와 같이 제약조건을 고려하지 않고 제어 알고리즘을 설계하여 적용할 경우, 제어가 의도한 대로 동작하지 않아 그 성능이 보장될 수 없으며 시스템 전체가 불안정해질 수 있다. 반면 RG

를 적용한 LQT의 경우 모든 상태변수에 대해 제약조건을 위배하지 않는 제어 입력 값이 도출된다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 차량 추종 모델의 한계를 극복하기 위해 RG를 적용하여 적응형 순항 제어 시스템 기반의 차량 추종 모델을 설계하였다. 이를 위해 적응형 순항 제어 시스템 상태방정식 모델과 제약조건이 고려되지 않은 LQT 제어를 설계하였고, Robust maximal invariant set을 기반으로 RG를 설계하여 LQT에 적용하였다. 설계한 적응형 순항 제어 시스템을 검증하기 위해 가감속 시나리오를 구성하여 RG를 적용하지 않은 LQT, MPC와 비교 분석하였다. RG는 LQT 제어가 제약조건을 만족하도록 Reference를 가변하였고 매우 낮은 연산량으로 MPC와 유사한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이 후 가감속 시나리오를 통해 검증된 적응형 순항 제어 시스템을 기반으로한 차량 추종 모델의 추적 성능을 검증하기 위해 대표적인 Driving cycle인 FTP-75와 ArtMW130를 이용하여 시나리오를 구성하였다. Driving cycle 시뮬레이션에서도 앞선 가감속 시나리오와 마찬가지로 RG로부터 Reference를 가변하여 제약조건을 만족하는 제어입력이 도출되었고 Cycle 동안 실제 운전자와 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있었다.

다만, 본 연구에서 Robust maximal invariant set을 구하는 과정에서 일부 오차가 발생하였다. 그 결과로 제어기에서 도출된 제어 입력이 제약조건을 미세하게 위배하는 것을 확인할 수 있었고 이를 해결하기 위해서는 다른 근사법을 이용하여 보다 정밀한 계산이 필요하다고 판단된다. 향후 연구에는 제안한 종방향 차량 추종 모델뿐만 아니라 차량의 횡적 거동 또한 모사할 수 있는 개선된 교통 모델을 구축하고, 이를 ADAS 및 ADS의 검증을 위해 사용할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업 “혼합현실 기반 자율주행 부품 및 시스템 평가 기술개발(20014476)”과제의 지원으로 수행되었음.

References

- 1) S. D. Pendleton, H. Andersen, X. Du, X. Shen, M. Meghjani, Y. H. Eng, D. Rus and M. H. Ang, “Perception, Planning, Control and Coordination for Autonomous Vehicles,” *Machines*, 2017.
- 2) D. Fényes, B. Németh and P. Gáspár, “A Novel Data-Driven Modeling and Control Design Method for Autonomous Vehicles,” *Energies*, Vol.14, No.2, 2021.
- 3) Z. Nie and H. Farzaneh, “Adaptive Cruise Control for Eco-Driving Based on Model Predictive Control Algorithm,” *Applied Sciences*, Vol.10, No.15, 2020.
- 4) P. Wang, S. Gao, L. Li, B. Sun and S. Cheng, “Obstacle Avoidance Path Planning Design for Autonomous Driving Vehicles Based on an Improved Artificial Potential Field Algorithm,” *Energies*, Vol.12, No.12, 2019.
- 5) S. Kuutti, R. Bowden, Y. Jin, P. Barber and S. Fallah, “A Survey of Deep Learning Applications to Autonomous Vehicle Control,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, Vol.22, No.2, pp.712-733, 2021.
- 6) V. Ratingen and R. Michiel, “The Euro NCAP Safety Rating,” *Karosseriebauteage Hamburg 2017*, Springer Vieweg, Wiesbaden, pp.11-20, 2017.
- 7) ISO Intelligent Transport Systems-Adaptive Cruise Control Systems-Performance Requirements and Test Procedures, 2018.
- 8) W. Hulshof, I. Knight, A. Edwards, M. Avery and C. Grover, “Autonomous Emergency Braking Test Results,” *Proceedings of the 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles(ESV)*. National Highway Traffic Safety Administration Washington, DC, pp.1-13, 2013.
- 9) D. Zhao, *Accelerated Evaluation of Automated Vehicles*, Ph. D. Dissertation, The University of Michigan, 2016.
- 10) H. Peng and D. Leblanc, *Evaluation of the Performance and Safety of Automated Vehicles*, White Pap. NSF Transp. CPS Work, 2012.
- 11) K. Lee, “Longitudinal Driver Model and Collision Warning and Avoidance Algorithms Based on Human Driving Databases,” *University of Michigan*, 2004.
- 12) M. Klischat and M. Althoff, “Generating Critical Test Scenarios for Automated Vehicles with Evolutionary Algorithms,” *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, pp.2352-2358, 2019.
- 13) P. Koopman and M. Wagner, “Challenges in Autonomous Vehicle Testing and Validation,” *SAE International Journal of Transportation Safety*, Vol.4, No.1, pp.15-24, 2016.
- 14) S. Riedmaier, T. Ponn, D. Ludwig, B. Schick and F. Diermeyer, “Survey on Scenario-Based Safety Assessment of Automated Vehicles,” *IEEE Access*, Vol.8, pp.87456-87477, 2020.

- 15) L. Pipes and A. Louis, "An Operational Analysis of Traffic Dynamics," *Journal of Applied Physics*, Vol.24, No.3, pp.274-281, 1953.
- 16) D. C. Gazis, R. Herman and R. W. Rothery, "Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow," *Operations Research*, Vol.9, No.4, pp.545-567, 1961.
- 17) G. F. Newell, "Nonlinear Effects in the Dynamics of Car Following," *Operations Research*, Vol.9, No.2, pp.209-229, 1961.
- 18) J. Tyler, "The Characteristics of Model-following Systems as Synthesized by Optimal Control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.9, No.4, pp.485-498, 1964.
- 19) P. G. Gipps, "A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation," *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.15, No.2, pp.105-111, 1981.
- 20) H. U. Ahmed, Y. Huang and P. Lu, "A Review of Car-Following Models and Modeling Tools for Human and Autonomous-Ready Driving Behaviors in Micro-simulation," *Smart Cities*, Vol.4, No.1, pp.314-335, 2021.
- 21) C. W. Park, A Study on the Virtual Test Environment with Adaptive Scenario for Autonomous Driving and ADAS, Ph. D. Dissertation, University of Hanyang, 2020.
- 22) M. M. Nicotra and E. Garone, "The Explicit Reference Governor: A General Framework for the Closed-Form Control of Constrained Nonlinear Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol.38, No.4, pp.89-107, 2018.
- 23) B. Sakhdari and N. L. Azad, "A Distributed Reference Governor Approach to Ecological Cooperative Adaptive Cruise Control," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.19, No.5, pp.1496-1507, 2017.
- 24) E. Joa, K. Yi, S. Woo and S. Im, "State/control Constraint Management in Autonomous Racing: A Reference Governor Approach," *The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, CRC Press, pp. 277-282, 2017.
- 25) S. Li, K. Li, R. Rajamani and J. Wang, "Model Predictive Multi-objective Vehicular Adaptive Cruise Control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.19, No.3, pp.556-566, 2011.
- 26) F. L. Lewis, D. Vrabie and V. L. Syrmos, *Optimal Control*, 3rd Edn., John Wiley & Sons Inc, 2012.
- 27) R. Kianfar, P. Falcone and J. Fredriksson, "Safety Verification of Automated Driving Systems," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Vol.5, No.4, pp.73-86, 2013.
- 28) E. G. Gilbert, I. V. Kolmanovsky and K. T. Tan, "Discrete-time Reference Governors and the Nonlinear Control of Systems with State and Control Constraints," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol.5, No.5, pp.487-504, 1995.
- 29) E. G. Gilbert and I. V. Kolmanovsky, "Nonlinear Tracking Control in the Presence of State and Control Constraints: A Generalized Reference Governor," *Automatica*, Vol.38, No.12, pp.2063-2073, 2002.
- 30) E. Garone, S. Di Cairano and I. Kolmanovsky, "Reference and Command Governors for Systems with Constraints: A Survey on Theory and Applications," *Automatica*, Vol.75, pp.306-328, 2017.
- 31) V. Milanés, S. E. Shladover, J. Spring, C. Nowakowski, H. Kawazoe, and M. Nakamura, "Cooperative Adaptive Cruise Control in Real Traffic Situations," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.15, No.1, pp.296-305, 2013.