주파수 형성 접근 방식을 통한 자동 차량의 모션 멀미 완화

다오페이 리(Daofei Li)와 젠칸 후(Jiankan Hu)

***Abstract*—자동 주행으로 인간 운전자는 운전 작업에서 부분적으로, 그리고 미래에는 완전히 해방될 것이며, 자율 주행 차량에서 차멀미를 완화하는 것이 더욱 중요해지고 있습니다. 이전에는 멀미를 줄이기 위한 연구가 주로 인간 요인 공학을 통해 조종석 환경을 개선하는 데 초점을 맞추었고, 특히 차량 종방향 및 횡방향 가속도 관점에서 차량 동작 최적화를 통한 노력은 거의 없었습니다. 이를 위해, 우리는 동작 제어가 아닌 동작 계획에서 차멀미 문제를 해결하기 위한 새로운 개념을 제안합니다. 즉, 먼저 차멀미를 일으킬 가능성이 적은 원하는 차량 동작을 계획한 다음 원하는 동작을 추적합니다. 우리는 차멀미의 필수 메커니즘을 통합하는 주파수 셰이핑 방식을 통해 새로운 동작 계획 알고리즘을 개발합니다. 시뮬레이션과 실험 결과에 따르면 제안된 방식은 가속도와 저크 크기를 최적화하는 다항식 기반 계획 알고리즘과 비교할 때 각각 21%와 37%까지 차멀미 복용량 값(MSDV)을 줄일 수 있습니다.

***Index Terms*—멀미, 동작 계획, 주파수 조정, 자동차, 승차감.

I. 서론

자율 주행의 급속한 발전은 차량의 승차감을 개선할 새로운 방법을 요구하는데, 특히 수동 주행 차량에서 인간 운전자의 역할이 미래의 고도로 자동화된 차량에서 "운전 외의 모든 것을 할 수 있는" 승객으로 바뀌는 것을 고려할 때 더욱 그렇습니다. 혼잡한 도시 교통에서 특히 바쁜 "운전 작업"에서 벗어나면 인간의 작업 부담이 크게 줄어들지만, "승객"으로 역할이 바뀌면 특히 멀미에 취약한 사람들에게 불필요한 승차감 문제가 발생할 수 있습니다.

멀미는 이동 자체만큼이나 오래된 문제일 수 있습니다. 자동차와 관련된 문헌만 고려한다면 승객 멀미를 완화하기 위한 여러 가지 방법이 제안되었습니다. 예를 들어, Salter *et al.*는 자동차에서 후방향 좌석이 제안되지 않는다는 것을 발견했습니다[1].

Manuscript received April 3, 2021; accepted July 25, 2021. Date of publication July 30, 2021; date of current version August 17, 2021. This letter was recommended for publication by Associate Editor A. Pierson and Editor S. J. Guy upon evaluation of the reviewers' comments. This work was supported in part by the Ningbo Science & Technology Bureau under Grants 2018B10063 and 2018B10064, and in part by the Department of Science and Technology of Zhejiang under Grant 2018C01058. *(Corresponding author: Daofei Li.)*

The authors are with the Institute of Power Machinery and Vehicular Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China (e-mail: dfli@zju.edu.cn; jiankanhu@zju.edu.cn).

Digital Object Identifier 10.1109/LRA.2021.3101050

그리고 Miksch *et al.*는 승객의 독서 자료의 화면 배경으로 전면 도로 시야를 사용하여 멀미에 대한 솔루션을 제안했습니다[2]. 이러한 방법은 조종석 환경을 최적화함으로써 멀미를 줄이는 데 유용하며 전통적인 인간 운전 차량에서도 구현할 수 있습니다. 그러나 자동화된 차량의 경우 이러한 방법은 특히 동작 계획 및 제어를 통한 운전 자동화의 이점을 충분히 활용하지 못했습니다.

Kuiper *et al.* [3]는 예측 가능한 동작 자극과 예측 불가능한 동작 자극이 멀미에 미치는 영향을 비교하고 예측 불가능한 동작이 더 자극적이라는 결론을 내렸습니다. 또한 오디오 신호는 다가올 동작을 알려주기 위해 설계되었으며, 이는 멀미를 완화할 수 있습니다[4]. 자동차에서 다가올 동작은 해당 자동화 알고리즘에서 쉽게 얻을 수 있으며, 오디오, 시각 또는 진동을 통한 이러한 종류의 정보적 신호를 편리하게 적용할 수 있다는 점에 유의해야 합니다. 실용적이지만 차량의 동작 자극이 심할 경우 이 방법은 유익한 효과의 한계에 도달할 수 있습니다.

멀미의 원인은 움직임 그 자체이며, 일부 승객의 멀미에 대한 감수성을 감안한다면 그렇습니다. 지상 교통에 대한 우리의 일상적인 경험은 일부 특정 운전 스타일이 승객을 멀미하게 하지만 다른 스타일은 멀미를 유발하지 않는다는 것을 보여줍니다. 같은 차를 같은 경로로 운전하더라도 말입니다. 자동 주행이 도입되면서 차량의 움직임을 거의 완벽하게 제어할 수 있습니다. 간단히 말해서 자동 주행에는 일반적으로 지각, 결정, 계획, 제어, 행동이라는 다섯 가지 기본 모듈이 있습니다. 지각 모듈은 차량이 환경을 "볼" 수 있도록 돕고, 결정 모듈은 속도와 이동 방향을 결정하며, 계획 모듈은 경로와 속도 프로파일을 예약합니다. 경로와 속도 프로파일을 따르기 위해 제어 모듈은 조향, 가속 및 제동을 포함한 적절한 작동 입력을 계산하여 최종적으로 행동 모듈의 액추에이터에 구현합니다. 도로 교통 상황과 차량 액추에이터 성능 한계를 고려할 때 차량의 움직임을 결정하는 것은 주로 계획 및 제어 모듈입니다.

차량의 움직임을 최적화하는 것이 핵심이라는 것을 알고, 움직임 계획 및 제어는 운전 안전 외에도 멀미를 고려하여 특별히 설계되어야 합니다. 한편, 쾌적한 차량 움직임을 위해 여러 가지 제어 방법이 제안되었습니다. 많은 중급에서 고급 차량에 능동 또는 반능동 서스펜션이 널리 채택되었지만, 대부분의 서스펜션 기술은 차량 승차감을 개선하기 위한 것입니다.

수직 방향으로. 여기서는 기본적으로 자동 주행과 더 관련이 있는 수평 모션 제어에만 초점을 맞춥니다. Ukita *et al.* [5]는 승객의 멀미 수준을 나타낼 수 있는 주관적 수직 충돌(SVC) 모델을 기반으로 하는 차량 모션 제어 알고리즘을 소개합니다. 감지된 수직 자극과 주관적 수직 자극 간의 오류는 일반적으로 사용되는 가속 또는 저크 대신 멀미의 평가 지표로 사용됩니다. 그러나 SVC 모델은 복잡하고 비선형적이어서 계산 복잡성이 증가하고 실제로 배포하기 어렵습니다. Saruchi *et al.* [6]는 승객 머리의 롤 각도를 최소화하는 측면 제어 전략을 제안하고 SVC 모델은 컨트롤러의 효과를 평가하는 데 사용됩니다. 이 두 연구에서는 시뮬레이션만 수행되었으며 효과는 잘 검증되지 않았습니다.

반면, 자동 주행 알고리즘에서의 주요 역할로 인해 제어 모듈은 계획된 경로와 속도를 따르도록 되어 있습니다. 즉, 더 나은 제어 전략은 계획된 동작을 보다 정확하게 실현합니다. 따라서 제어 알고리즘을 최적화하는 것보다 동작 계획 알고리즘을 개선하는 것이 더 매력적입니다. 여기서 우리는 자동 주행에서 멀미 완화에 대한 새로운 개념을 제안합니다. 즉, 먼저 멀미를 유발할 가능성이 적은 원하는 차량 동작을 계획한 다음 이를 정확하게 추적합니다.

이 작업의 기여는 두 가지입니다. (1) 멀미는 제어보다는 동작 계획에서 해결되어 실제로 더 나은 유연성과 호환성에 기여합니다. (2) 주파수 형성 기반 계획 알고리즘은 시간 영역보다는 주파수 영역에서 차량 동작을 최적화합니다. 이 접근 방식은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증됩니다.

II. 모션 플래닝 알고리즘

A. *Algorithm Structure*

멀미 선량 값(MSDV)은 ISO 2631-1:1997 표준 "기계적 진동 및 충격 - 전신 진동에 대한 인체 노출 평가 - 1부: 일반 요구 사항"에 도입되었습니다. O'Hanlon과 McCauley[7], [8]가 수행한 실험에 근거하여 ISO 2631은 가속 자극의 주파수가 가속의 진폭 및 노출 시간과 함께 멀미에 영향을 미친다고 주장합니다. 즉, 멀미는 기본적으로 주파수 영역의 문제입니다.

ISO 2631에 따르면 MSDV는 다음과 같이 정의됩니다.

$$MSDV = \sqrt{\int_0^T \left[\tilde{a}\left(t\right)\right]^2 dt} \tag{1}$$

여기서 $\tilde{a}$는 ISO 2631-1:1997에 정의된 대로 함수 W_f로 가중치를 둔 자극 가속도이고, T은 이러한 가속도 하의 총 노출 시간입니다.그림 1에서 볼 수 있듯이 주파수 가중치 함수 W_f는 대역 통과 필터로 작동하고 약 0.16Hz에서 피크를 이루며, 이는 약 0.16Hz의 저주파 자극이 멀미에 가장 큰 영향을 미치는 반면 1Hz보다 높은 주파수의 자극은 훨씬 덜 영향을 미친다는 것을 나타냅니다.[9]은 또한 0.0315~0.25Hz가 멀미에 민감한 측면 가속도 자극 범위라고 제안합니다.

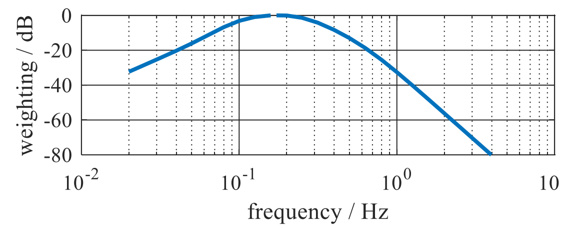

그림 1. ISO 2631-1:1997에 정의된 함수 W_f의 가중치 곡선.

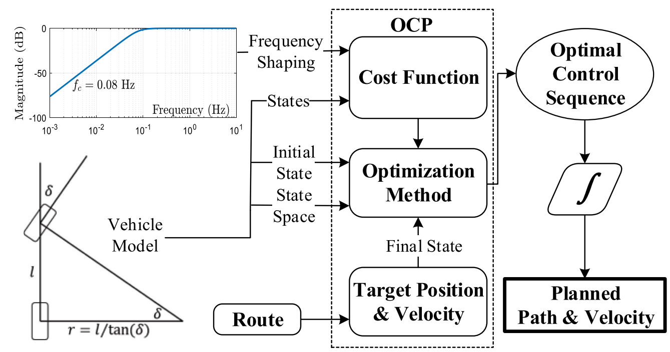

그림 2. 주파수 영역 이해를 통한 동작 계획 알고리즘의 구조.

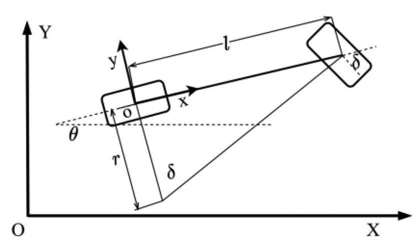

그림 3. 단일 트랙 차량 운동학 모델.

주파수 특정 질병 민감도에 대한 이러한 사실을 바탕으로, 그림 2에 표시된 것처럼 주파수 영역 이해가 있는 동작 계획 알고리즘이 제안됩니다. 동작 계획은 최적 제어 문제(OCP)로 공식화되며, 비용 함수는 주파수 성형 접근 방식을 사용하여 정의됩니다. 경로 계획자에서 목표 위치와 속도 프로파일이 주어지면, 비용을 최소화하여 OCP에서 제어 시퀀스를 얻고, 마지막으로 계획된 차량 궤적이 결정됩니다.

제안된 프레임워크에서 실제 완화는 동작 제어가 아닌 동작 계획에서 발생하므로 실제 배포에는 동작 제어 알고리즘을 개발할 때 동작 멀미에 대한 특별한 고려가 필요하지 않으며 경로 추적이나 속도 추적 제어도 필요하지 않습니다. 이는 자동 주행에서 동작 멀미 완화에 대한 이전 연구, 예를 들어 [5] 및 [6]에 제안된 동작 제어 알고리즘과도 다릅니다. 동작 계획 알고리즘에 필요한 차량 매개변수가 몇 개뿐이므로 제안된 솔루션은 다양한 차량에 배포하기가 더 쉽고 유연합니다.

B. *Vehicle Model*

그림 3에 표시된 것처럼 단일 트랙 차량 운동학 모델이 고려됩니다. 차량은 전역 데카르트 좌표계 XOY에서 이동하고 xoy 좌표는 다음에 연결됩니다.

x축이 앞을 가리키고 y축이 왼쪽을 가리키는 차량. 후방 차축의 중심점이 차량 좌표 프레임의 원점을 나타내는 경우,

$$\dot{X} = v\cos(\theta) \tag{2}$$

$$\dot{Y} = v\sin(\theta) \tag{3}$$

$$\dot{v} = a_x \tag{4}$$

여기서 (X, Y)는 차량 위치, θ는 방향 각도, v는 속도, a_x는 종방향 가속도입니다. 요율$\dot{\theta}$과 전륜 조향 각도 δ에 대해 다음과 같습니다.

$$\dot{\theta} = v\rho \tag{5}$$

$$\rho = 1/r = l/\tan(\delta) \tag{6}$$

여기서 r는 차량 회전 반경, l은 휠베이스, ρ은 경로 곡률입니다. 그러면 차량 측면 가속도를 다음과 같이 계산할 수 있습니다.

$$a_y = v^2\rho \tag{7}$$

종방향 가속도 a_x와 경로 곡률 ρ을 시스템 입력으로 사용하는 것이 매력적일 수 있습니다. 그러나 물리적 변수 a_x와 ρ의 연속성을 고려하여 시간에 대한 미분, 즉 $\dot{a}_x$과$\dot{\rho}$을 입력으로 설정합니다. 그러면 차량 모델을 최종적으로 다음과 같이 설명할 수 있습니다.

$$\dot{\boldsymbol{x}}_v = \boldsymbol{f}_v(\boldsymbol{x}_v, \boldsymbol{u}) \tag{8}$$

여기서 $\boldsymbol{x}_v = [X, Y, v, \theta, a_x, \rho]^T$는 차량 상태 벡터이고, $\boldsymbol{u} = [u_1, u_2]^T = [\dot{a}_x, \dot{\rho}]^T$은 차량 입력 벡터입니다.

C. Cost Function in OCP Formulation

동작 계획에서 일반적인 관행은 종방향 및 횡방향 차량 가속도를 최소화하여 승차감을 최적화하기 위해 다음과 같이 비용 함수를 정의하는 것입니다.

$$J_a = J_{ax} + J_{ay} = \int_0^{t_f}\left\{[a_x(t)]^2 + [a_y(t)]^2\right\}dt \tag{9}$$

여기서, 최종 시간 t_f은 계획 기간의 끝을 나타냅니다.

위에서 언급했듯이, 다른 주파수 대역의 가속도는 승객의 멀미를 다르게 자극합니다. 다시 말해, 승객의 경우 일부 주파수 대역의 가속도는 다른 주파수 대역보다 더 거칠기 때문에 차량의 기동성을 유지하면서 멀미에 대한 자극을 최소화하기 위해 주파수 영역에서 가속도를 재조정할 수 있습니다. (9)의 $[a_x(t)]^2$를 예로 들어, Parseval의 정리[10]를 사용하여 주파수 영역의 형태로 첫 번째 비용 항목을 다시 씁니다.

$$J_{ax} = \int_0^{t_f}[a_x(t)]^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} A_x^*(j\omega)A_x(j\omega)\,d\omega \tag{10}$$

여기서 A_x는 a_x의 푸리에 변환이고 A_x^*은 A_x의 복소수 켤레입니다. 분명히 이 공식화에서 a_x의 모든 주파수는 동등하게 고려됩니다. 그런 다음 주파수 종속 가중 함수 $w(j\omega)$를 추가합니다.

$$J_{ax,w} = \int_{-\infty}^{+\infty} A_x^*(j\omega)\,w_x(j\omega)\,A_x(j\omega)\,d\omega, \tag{11}$$

그리고 $w_x(j\omega)$을 다음과 같이 분해합니다.

$$w_x(j\omega) = p^*(j\omega)\,p(j\omega). \tag{12}$$

그러면 종방향 가속도에 해당하는 비용 a_x은 주파수 영역에서 다음과 같이 다시 쓸 수 있습니다.

$$J_{ax,w} = \int_{-\infty}^{+\infty}\left[A_{xw}^*(j\omega)\,A_{xw}(j\omega)\right]d\omega, \tag{13}$$

$$A_{xw}(j\omega) = p(j\omega)\,A_x(j\omega) \tag{14}$$

가장 민감한 주파수 대역인 0.0315~0.25Hz에서 자극을 최소화하기 위해 대역 통과 필터를 채택해야 합니다. 그러나 파워트레인, 제동 및 조향 액추에이터 한계로 인해 차량 제어 수준은 일반적으로 저역 통과 필터 시스템이고 주파수가 0.25Hz보다 높을 때 동작 계획에서 명령된 가속을 달성할 수 없습니다. 따라서 0.0315Hz 이상의 동작 자극 비용을 나타내기 위해 여기서 가중 필터 $p(j\omega)$를 2차 고역 통과 필터로 선택합니다. 즉,

$$p(j\omega) = (j\omega)^2/\left[(j\omega)^2 + j\xi\omega_c\omega + \omega_c^2\right], \tag{15}$$

여기서 $\xi = \sqrt{2}$는 감쇠 계수이고, $\omega_c = 2\pi f_c$이며, f_c은 미세 조정이 필요한 차단 주파수입니다.

새로운 변수 $z_1 \sim z_4$을 도입함으로써 주파수 가중 가속도 a_{xw}와 a_{yw}을 얻습니다.

$$\begin{cases} a_{xw} = \dot{z}_1 = -\xi\omega_c z_1 - \omega_c^2 z_2 + a_x \\ \quad\quad\ \dot{z}_2 = z_1 \\ a_{yw} = \dot{z}_3 = -\xi\omega_c z_3 - \omega_c^2 z_4 + v^2\rho \\ \quad\quad\ \dot{z}_4 = z_3 \end{cases} \tag{16}$$

a_{xw} 및 a_{yw}이 멀미에 미치는 영향을 최소화하기 위해 해당 비용 양식은 MSDV 정의에 맞춰야 합니다. ISO 2631-1: 1997과 유사하게 차량 평면 운동의 경우 종방향 및 횡방향 가속도 자극으로 인한 MSDV는 다음과 같이 계산됩니다.

$$MSDV = \sqrt{\int_0^T\left\{[\tilde{a}_x(t)]^2 + [\tilde{a}_y(t)]^2\right\}dt} \tag{17}$$

여기서 $\tilde{a}_x$ 및 $\tilde{a}_y$는 각각 ISO 2631-1:1997의 함수 W_f에 의해 가중된 종방향 및 횡방향 가속도이고, T은 동작 노출 시간입니다. 따라서 고려된 계획 수평선 $t \in [0, t_f]$ 동안 주파수 가중 가속도 a_{xw} 및 a_{yw}에 대한 해당 비용은 다음과 같이 선택됩니다.

$$J_{aw} = \int_0^{t_f}\left\{[a_{xw}(t)]^2 + [a_{yw}(t)]^2\right\}dt. \tag{18}$$

그러나 (16)의 고역통과필터 동역학으로 인해 a_{xw}과 a_{yw}은 종료시간 t_f 직후에 0으로 수렴하지 않으므로, t_f 이후의 미정산된 a_{xw}과 a_{yw}에 해당하는 추가비용 $J_{aw,tf}$이 추가된다.

$$J_{aw,tf} = \int_{t_f}^{+\infty}\left\{[a_{xw}(t)]^2 + [a_{yw}(t)]^2\right\}dt \tag{19}$$

일반성을 잃지 않고 이 추가 비용 $J_{aw,tf}$을 계산하기 위해 차량이 일정한 속도로 직진한다고 가정합니다.

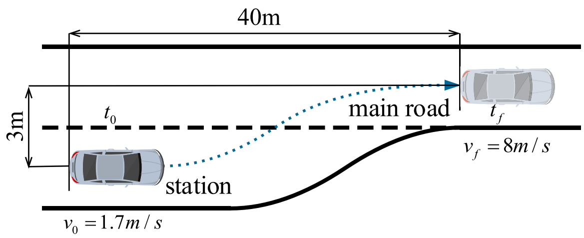

그림 4. 버스 정류장에서의 "출발" 시뮬레이션 시나리오.

i.e., $a_x = a_y = 0$, when $t > t_f$. Then we have

$$J_{aw,tf} = \frac{\omega_c z_1^2(t_f)}{\xi} + \frac{\omega_c^2 z_1(t_f)\, z_2(t_f)}{\xi^2} + \frac{\omega_c z_3^2(t_f)}{\xi} + \frac{\omega_c^2 z_3(t_f)\, z_4(t_f)}{\xi^2} \tag{20}$$

제어 입력을 최소화하기 위해 두 가지 비용 항목이 추가되었습니다. 즉,

$$J_{u_i} = \int_0^{t_f} [u_i(t)]^2 dt\ ,\ i = 1, 2 \tag{21}$$

마지막으로, 최상의 제어 입력을 찾기 위한 최적 제어 문제가 설정됩니다. 즉,

$$\min_{\boldsymbol{u}} J = w_1 J_{aw} + w_1 J_{aw,tf} + w_2 J_{u_1} + w_3 J_{u_2} \tag{22a}$$

$$\text{s.t. } \dot{\boldsymbol{x}} = f(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}),\ \boldsymbol{x}(0) = \boldsymbol{x}_0,\ \boldsymbol{g}(x(t_f)) = \boldsymbol{0} \tag{22b}$$

여기서 w_1, w_2, w_3은 가중치 인자이고, $\boldsymbol{x} = [\boldsymbol{x}_v^T\ z_1\ z_2\ z_3\ z_4]^T$는 (8)과 (16)을 결합한 시스템 상태이며, $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}(t_f)) = \boldsymbol{0}$은 목표 위치와 속도에 따른 최종 제약 조건입니다. 여기서 최적 제어 문제는 고전적 변분법으로 처리되고 유도된 경계값 문제는 MATLAB 함수 bvp5 c [11]를 통해 풀립니다.

동등성 제약 조건(22b)에는 이미 동적 제약 조건, 초기 및 종료 제약 조건이 포함되어 있습니다. 페널티 및 증강 라그랑지안 방법을 사용하면 비용 함수를 다른 고려 사항을 포함하도록 더욱 확장할 수 있습니다. 예를 들어, 부등식 형태의 충돌 제약 조건은 장애물까지의 차량 거리를 기반으로 하는 비용으로 페널티를 받을 수 있습니다. 더 복잡한 형태의 비용 및 제약 조건의 경우 Pontryagin의 최소 원리 또는 동적 프로그래밍 접근 방식을 사용하여 OCP를 풀 수 있습니다.

III. 시뮬레이션을 통한 예비 검증

A. Example Scenario for Validation

실제로 제안된 계획 알고리즘은 OCP 프레임워크에서 업데이트된 초기 및 최종 조건이 주어지면 실시간으로 실행됩니다. 자율 주행 차량(예: RoboBus)의 일반적인 운영 상황을 시뮬레이션하기 위해 버스 정류장에서 "출발"하는 것과 같은 승객 픽업 기동이 그림 4와 같이 검증 시나리오로 선택되었습니다.

승객이 탑승한 후 차량은 역에서 가속하여 주요 도로 교통 흐름에 합류합니다. 실험 차량을 포함하여 자동 변속기가 장착된 대부분의 엔진 구동 차량은 일반적으로 "크립" 모드가 있으므로 차량 가속을 정확하게 제어하기 어렵습니다.

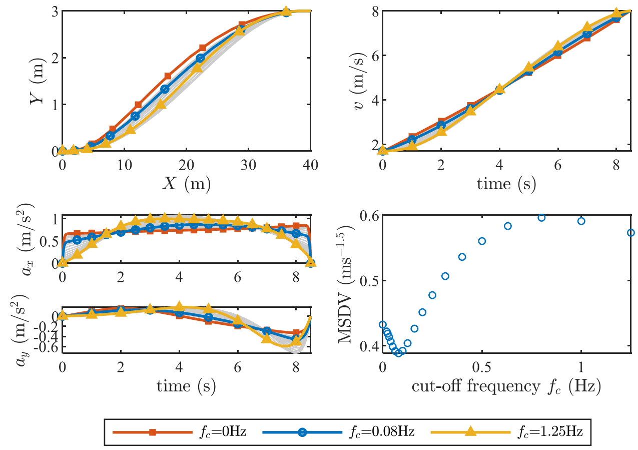

그림 5. 차단 주파수 $f_c \in [0, 1.25]$ Hz를 사용한 계획 결과.

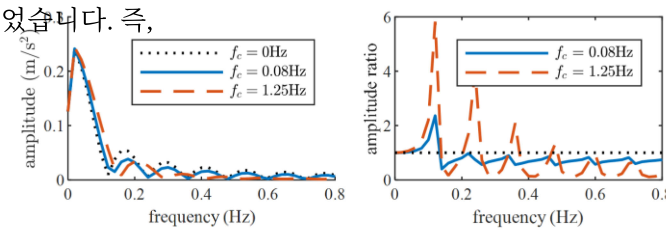

그림 6. 3개의 차단 주파수를 갖는 종방향 가속도의 FFT 결과(왼쪽), 주파수 성형 접근법과 비형성 접근법 사이의 다양한 주파수에서의 진폭 비율(오른쪽).

매우 낮은 속도에서. 따라서 시뮬레이션과 이후의 실제 차량 구현에서 초기 속도는 0이 아니라 1.7m/s이며, 이는 또한 실험 차량의 크립 속도입니다. 특히 멀미에 유리한 혼잡한 도시 주행 조건을 시뮬레이션하기 위해 주요 도로 교통 속도는 약 30km/h로 가정합니다. 이후 캠퍼스 내 실험을 더욱 용이하게 하기 위해 v_f은 8m/s로 결정되었습니다. 항저우시의 실제 설정 표준에 따라 버스 정류장의 기하학적 매개변수는 측면 오프셋 3m, 종방향 오프셋 40m로 선택되었습니다.

B. Cut-off Frequency Selection

초기 시간 t_0=을 0초, 종료 시간 t_f=를 8.5초로 설정하고 가중치를 w_1= 1, w_2= 0.001, w_3= 100으로 설정하면 $f_c \in$ [01.25]Hz 내에서 다른 차단 주파수를 사용한 경로 및 속도 계획 결과가 그림 5에서 비교됩니다. 다른 차단 주파수를 선택하면 종방향 및 횡방향 가속도의 모양이 다릅니다. (15)에 따르면 f_c= 0Hz일 때 $p(j\omega)$ =는 1이므로 (9)의 모양이 없는 비용 함수가 사용됩니다. 이 특수한 경우는 주파수 모양을 고려하지 않는 알고리즘 벤치마크로도 작동할 수 있습니다.

시뮬레이션을 위해 차량이 계획된 경로에서 계획된 속도로 오류 없이 차량을 유지하는 이상적인 제어 알고리즘을 갖추고 있다고 가정합니다. 그림 5는 다양한 차단 주파수를 사용한 차량 계획의 MSDV를 나타내고, 그림 6은 0, 0.08 및 1.25Hz의 다른 차단 주파수 f_c를 사용한 a_x의 FFT(고속 푸리에 변환) 결과를 나타냅니다.

그림 5에서 시간 소모 $t_f - t_0$, 초기 속도 및 최종 속도는 모든 경우에 동일하게 설정되어 시간 효율성이 동일함을 의미합니다. 계획에서 주파수 가중치 함수는 고역 통과 필터를 사용하므로 OCP의 비용 함수는 차단 주파수(일반적으로 0.0315Hz 이상) 위의 가속 에너지를 억제할 수 있습니다. 결과에 따르면 f_c가 증가함에 따라 MSDV는 0.08Hz에서 최소값을 갖습니다. 그림 1에 따르면 0.08Hz에서 0.315 Hz까지의 주파수 가속은 다른 것보다 가중치가 높습니다. 차단 주파수가 0.08Hz 미만인 경우 차단 주파수가 상승함에 따라 높은 가중치 주파수 대역의 가속 에너지가 점점 더 감소합니다. 그러나 차단 주파수가 0.08Hz보다 클 경우, 차단 주파수가 증가함에 따라 고가중 주파수 대역의 가속 에너지가 비용 함수에서 제외되기 시작하여 MSDV가 증가합니다.

이는 그림 6의 FFT 결과에 의해 더욱 뒷받침됩니다. 주파수 성형 접근 방식은 민감한 주파수 대역에서 가속도의 진폭을 억제하는 데 효과적입니다. f_c이 0.08Hz일 때, 0.12 Hz 미만의 가속도는 억제되지 않지만 MSDV에 더 많이 기여하는 주파수 대역의 가속도는 약해집니다. $f_c =$가 1.25Hz일 때, 0.5Hz 미만의 주파수 대역의 가속도는 상승하여 MSDV에 더 많이 기여하는 0.08Hz~0.315Hz의 주파수 대역을 포함하며, 이것이 MSDV가 비주파수 성형 접근 방식($f_c = 0$Hz)보다 더 높아지는 이유입니다. 예제 구현의 경우 $f_c = 0.08$Hz를 선택하고 해당 보드 플롯도 그림 2에 나와 있습니다.

C. Comparison With Benchmark Algorithm

다항식 곡선 피팅을 기반으로 한 모션 플래닝이 널리 사용되고 있으며, 여기서 차량의 경로와 속도는 시간에 대한 다항식 함수로 설명되고, 함수의 매개변수는 두 단계로 정의됩니다. 첫째, 초기 위치와 속도를 나타내는 초기 상태와 가속도를 나타내는 초기 상태에서의 첫 번째 도함수는 플래닝이 시작되는 시점의 차량 상태와 같습니다. 그런 다음 다른 매개변수는 목적지 제약 조건 및 편안함과 같은 기타 요구 사항을 포함하여 플래닝 목표를 충족하도록 최적화 방법으로 계산됩니다.

[12]의 다항식 곡선 기반 계획 접근법이 벤치마크 알고리즘으로 사용되었습니다. 차량은 덩어리 질량으로 설명되고 속도 v와 요 레이트 ω_r는 차량의 운동을 나타내는 데 사용됩니다. $v(t)$과 $\omega_r(t)$의 함수가 선택되는 한 차량의 운동 또는 궤적이 결정됩니다. 이 연구에서는 5차 다항식 함수를 사용하여 속도 $v(t)$를 설명하고 3차 다항식 함수를 사용하여 요 레이트 $\omega_r(t)$를 설명합니다.

$$v\left(t\right) = a_0\ + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \tag{23}$$

$$\omega_r\left(t\right) = b_0\ + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \tag{24}$$

(23) 및 (24)에 대한 최적 계획, 즉 $a_i^* \quad (i\ = 0, \ldots, 5)$ 및 $b_j^*\,(j\ = 0, \ldots, 3)$은 (22b)에 따라 다음 비용을 최소화하여 얻습니다. 여기서는 Newton 방법이 사용됩니다.

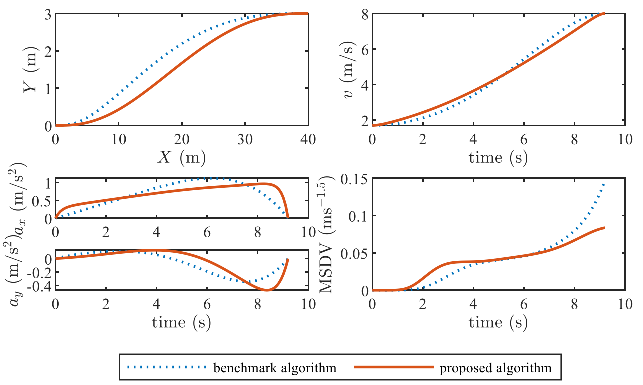

그림 7. 제안된 알고리즘과 벤치마크 알고리즘의 시뮬레이션 결과.

최적화 문제를 해결합니다.

$$\min_{a_i, b_j} \int_0^{t_f} \left\{ \left[a_x\left(t\right)\right]^2 + \left[a_y\left(t\right)\right]^2 + 5 * \left[\dot{a}_x\left(t\right)\right]^2 \right\} dt \tag{25}$$

그림 7은 각각 (22)와 (25)에 정의된 두 알고리즘의 결과를 보여준다. 제안된 알고리즘의 경로와 속도는 직선에 더 가까운데, 이는 제안된 알고리즘의 평균 가속도가 벤치마크보다 작다는 것을 의미한다. 제안된 알고리즘의 종방향 가속도의 RMS(root-mean-square)(0.7505 m/s^2)는 벤치마크 알고리즘(0.8021 m/s^2)보다 작고, 횡방향 가속도도 마찬가지다(0.1925 m/s^2 대 0.1933 m/s^2). 따라서 가속도 관점에서 볼 때, 제안된 알고리즘의 승차감은 벤치마크보다 약간 더 좋다.

그림 7에서 보듯이, 제안된 알고리즘의 가속도의 피크 기울기는 벤치마크보다 훨씬 크다. 따라서 모션 저크만 고려한다면 벤치마크 알고리즘이 비용 함수에 저크를 명시적으로 포함했기 때문에 실제로 더 낫다(27). 그러나 모션 멀미를 고려할 경우 벤치마크와 제안된 알고리즘의 MSDV 값은 각각 0.4974ms$^{-1.5}$와 0.38855ms$^{-1.5}$이다. 이는 계획된 경로와 속도를 오류 없이 실현할 수 있는 이상적인 제어가 있다고 가정할 때, 제안된 알고리즘이 모션 멀미를 상당히 완화(21.89%)할 수 있음을 의미한다.

IV. 실제 차량 실험을 통한 검증

실험은 그림 8에 나와 있는 소프트웨어 구조로 자동 주행 SUV에서 수행됩니다. 먼저, 실험 사이트의 포인트 클라우드 맵을 작성합니다. 둘째, GNSS 신호를 보정하여 라이더 신호와 포인트 클라우드 맵을 매핑하여 위치를 파악할 수 있습니다. 위치 파악의 업데이트 속도가 너무 낮기 때문에(10Hz) EKF 상태 추정기가 필요합니다. 마지막으로, Autoware.AI [13]의 MPC 경로 추종기를 선택하여 조향을 통한 경로 추종을 실현하도록 조정합니다. 피드포워드 및 피드백 제어를 사용하는 간단한 속도 추적 알고리즘을 개발합니다. 계획된 종방향 가속도는 먼저 종방향 차량 모델에 의해 피드포워드 목표 가속도에 매핑된 다음 피드백 부분의 비례 컨트롤러로 조절됩니다.

그림 7에 나타낸 궤적을 실험에서 추적하여 동작 제어 결과를 그림 9에 나타냈습니다. 추적

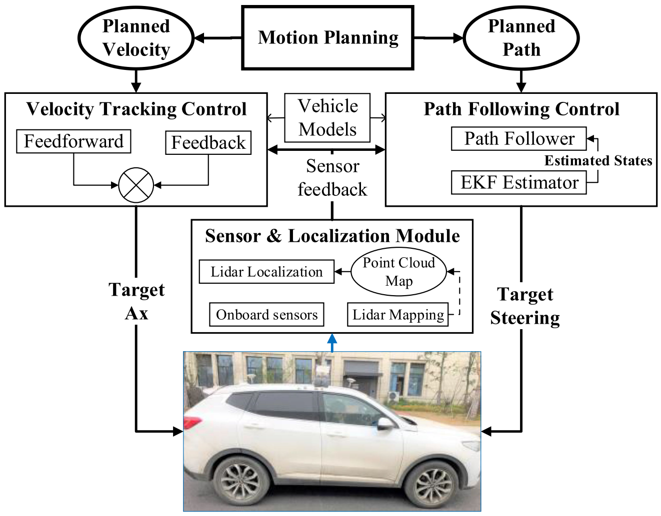

그림 8. 실험 차량과 소프트웨어 알고리즘 구조.

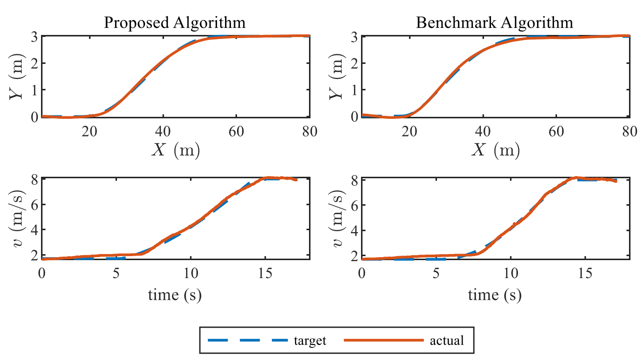

그림 9. 두 알고리즘의 경로 및 속도 추종 결과.

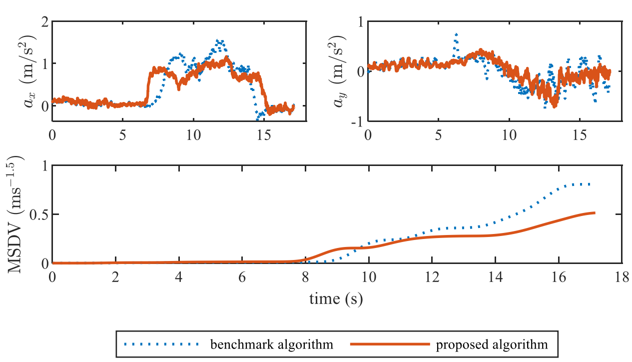

그림 10. 두 알고리즘의 가속 자극과 MSDV.

차량이 두 알고리즘의 두 궤적을 따를 때 오류도 비슷하게 작습니다. 차량 가속도 a_x와 a_y, 그리고 MSDV가 그림 10에 나와 있습니다. 벤치마크와 제안된 알고리즘을 사용한 MSDV 값은 각각 0.81ms$^{-1.5}$와 0.51ms$^{-1.5}$로 37% 감소를 나타냅니다.

정의에서 알 수 있듯이 MSDV는 메스꺼움을 축적하는 방식으로 작동하므로 RoboBus 여행이 예시적 인출 동작을 N번 반복하면 위의 MSDV 값이 $\sqrt{N}$번까지 축적됩니다. 승객마다 멀미를 겪는 방식이 다르다는 것은 의심의 여지가 없으며, 안타깝게도 아직 권장되는 임계값이 없습니다.

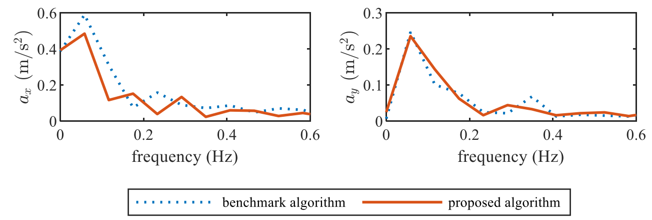

그림 11. 두 알고리즘의 가속 자극에 대한 FFT 분석.

승차감 평가를 위한 MSDV. 산업계의 일반적인 관행은 최종 검증을 위해 인간의 주관적인 동작 편의성 평가에 크게 의존하는 반면, MSDV는 객관적인 평가에 적합합니다. ISO 2631-1:1997에 따르면 MSDV는 이러한 동작 자극에 노출되었을 때 구토할 수 있는 승객의 백분율로 정의되는 동작 멀미 발생률(MSI)과 양의 상관 관계가 있습니다. 따라서 그림 10의 MSDV 감소는 제안된 알고리즘을 사용할 경우 잠재적으로 동작 멀미를 겪을 수 있는 승객의 백분율이 벤치마크 알고리즘을 사용할 경우보다 37% 적다는 것을 의미합니다.

그림 11에 표시된 것처럼 자극 분석을 위해 FFT가 추가로 수행됩니다. 측면 가속도의 다른 주파수 대역에서의 진폭 분포는 두 알고리즘에서 일반적으로 유사하지만, 종방향 가속도의 경우 0.2Hz 이하의 민감한 대역에서 큰 차이가 있습니다. FFT 결과는 MSDV 감소 성능과 일치하며, 주파수 셰이핑 방법이 예시 시나리오에서 작동한다는 것을 증명합니다.

V. 결론

도로 교통에서의 멀미는 기본적으로 주파수 영역의 문제입니다. 전통적으로, 그것은 운동 자극의 누적된 결과로 취급되고, 그런 다음 가속과 갑작스러운 움직임을 최소화함으로써 차량 운동 제어에서 해결됩니다. 우리는 주파수 형성 접근법을 통해 운동 계획에서 일찍 자동차 멀미 문제를 해결함으로써 자동 차량에서 멀미를 완화하는 새로운 방법론을 제안합니다. 실제 차량 실험은 멀미 완화 효과의 비율이 최대 37%에 달할 수 있음을 보여줍니다. 제안된 멀미 완화 방법론은 자동 주행 개발에서 유망한 방향으로 간주될 수 있습니다.

시연을 위해 우리는 승차감 개선에 초점을 맞추고, 변형 방법을 사용하여 예시 OCP를 풀었습니다. 제안된 접근 방식을 구현하려면 더 복잡한 제약 조건과 목표를 더 진보된 OCP 풀이 방법으로 처리해야 합니다. 향후 작업을 위해 시뮬레이터와 실제 차량 테스트를 포함한 승객 참여 실험이 제안된 알고리즘의 멀미 완화 효과를 더욱 검증하는 데 필요합니다.

참고문헌

[1] S. Salter, C. Diels, P. Herriotts, S. Kanarachos, 및 D. Thake, "앞을 향하거나 뒤를 향하는 좌석 방향을 가진 자동 차량의 멀미", *Appl. Ergon*, vol. 78, pp. 54 – 61, 2019년 7월, [온라인]. 이용 가능: https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.02.001 [2] M. Miksch, M. Steiner, M. Miksch, 및 A. Meschtscherjakov, "*Motion Sickness Prevention System (MSPS): Reading between the Lines*," 미국 미시간주 앤아버, 2016, pp. 147 – 152. [온라인]. 이용 가능: https://doi.org/ 10.1145/3004323.3004340

[3] O. X. Kuiper, J. E. Bos, E. A. Schmidt, C. Diels, and S. Wolter, "Knowing what's coming: Unpredictable motion causes more motion sickness," *Hum Factors*, pp. 001872081987613, 2019년 10월, [온라인]. 사용 가능: https://doi.org/10.1177/0018720819876139 [4] O. X. Kuiper, J. E. Bos, C. Diels, and E. A. Schmidt, "Knowing what's coming: Anticipatory audio cues can mitigate motion sickness," *Appl Ergon*, vol. 85, pp. 103068, 2020년 5월, [온라인]. 사용 가능: https://doi. org/10.1016/j.apergo.2020.103068 [5] R. Ukita, Y. Okafuji, 및 T. Wada, "계산 모드를 기반으로 한 멀미 감소를 위한 자동 차량의 차선 변경 제어에 대한 시뮬레이션 연구", *IEEE Int. Conf. Syst., Man, Cybern. (SMC)*, 2020년 10월, 1745-1750쪽. [온라인]. 사용 가능: https://doi.org/10.1109/ SMC42975.2020.9283021 [6] S.ʻ A. Saruchi *et al.*, "자율주행차에서 멀미 완화를 위한 머리 움직임 반응 기반 측면 제어 전략", *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 제42권, 제5호, 223쪽, 2020년 4월, [온라인]. 사용 가능: https://doi.org/10.1007/s40430-020-02305-6 [7] J. F. O'Hanlon 및 M. E. McCauley, "수직 사인파 운동의 주파수 및 가속도에 따른 멀미 발생률", *Aerosp Med.*, vol. 45, no. 4, pp. 366 – 369, 1974년 4월.

[8] M. McCauley, J. Royal, C. Wylie, J. O’Hanlon, 및 R. Mackie, “멀미 발생률: 습관화, 피치 및 롤에 대한 탐색적 연구와 수학적 모델의 개선,” *US NAVY, Santa Barbara Res. Park*, 캘리포니아주 골레타, 1976년 4월. [9] B. E. Donohew 및 M. J. Griffin, “멀미: 측면 진동 주파수의 영향,” *Aviat Space Envir Md*, 제75권, 제8호, 649-656쪽, 2004년. [10] N. K. Gupta, “주파수 형태의 비용 함수 - 선형-이차-가우스 설계 방법의 확장,” *J. Guid. Control*, 제3권, 제6호, 529-535쪽, 1980년, [온라인]. 사용 가능: https://doi.org/10.2514/3.19722 [11] J. Kierzenka 및 L. F. Shampine, "잔류 및 오류를 제어하는 BVP 솔버", *J. Numer. Anal. Ind. Appl. Math.*, vol. 3, no. 1/2, pp. 27 – 41, 2008. [12] T. M. Howard 및 A. Kelly, "바퀴 달린 모바일 로봇을 위한 최적의 거친 지형 궤적 생성", *Ind Robot*, vol. 26, no. 2, pp. 141 – 166, 2007년 2월, [온라인]. 사용 가능: https://doi.org/10.1177/ 0278364906075328 [13] S. Kato, E. Takeuchi, Y. Ishiguro, Y. Ninomiya, K. Takeda, T. Hamada, "자율주행차에 대한 개방적 접근 방식", *IEEE Micro*, vol. 35, no. 6, pp. 60 – 68, 2015년 11월, [온라인]. 사용 가능: https://doi.org/10.1109/MM. 2015.133