

6D-IMU 센서와 전륜 가속도 센서를 이용한 차량 서스펜션 상대속도 추정

김병준*¹⁾ · 최세범¹⁾
한국과학기술원 기계공학과¹⁾

Vehicle Suspension Relative Velocity Estimation using 6D-IMU sensors and Front Wheel Accelerometers

Byungjun Kim*¹⁾ · Seibum Choi^{*1)}

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

Abstract : 본 논문은 차량 서스펜션의 상대속도를 정확하게 추정하기 위해 6D-IMU 센서를 이용한다. 서스펜션의 상대속도는 차량의 승차감 개선을 위해 필요한 서스펜션 제어에 필수적인 정보이다. 차량 앞부분 서스펜션의 경우 전륜에 수직방향 가속도 센서가 존재하기 때문에 이전 연구를 이용하여도 상대속도를 추정할 수 있다. 그러나 전 차량 모델(Full car model)을 이용할 경우 시스템의 가관측성(observability)에 문제가 있어 오차가 크다. 기존의 1/4 차량 모델 혹은 1/2 차량 모델을 이용할 경우 제한적인 모델에서 생기는 오차가 발생한다. 이러한 오차는 차량의 피치, 롤 움직임이 심할 경우 커진다. 이를 6D-IMU 센서를 이용하여 모델을 보정하고 칼만필터를 이용하여 정확한 상대속도를 추정하는 방법을 제안한다. 이후 차량 시뮬레이션을 통해 향상된 추정 성능을 검증하였다.

Key words : Semi-Active suspension(세미 액티브 서스펜션), Relative Velocity(상대 속도), Kalman Filter(칼만 필터), Half car model(1/2 차량 모델), Model compensation(모델 보정), Disturbance decoupled observer(외란 분리 관측기)

Nomenclature

F : Suspension Force, N
x : Position, m
v: Velocity, m/s
a: Acceleration, m/s²
p: Roll rate, rad/s
q: Pitch rate, rad/s
tf: Distance from C.G to front wheel, m
tr: Distance from C.G to rear wheel, m
d: Half distance from left to right wheel, m

Subscripts

d: Relative distance
v: Relative velocity
s: Sprung mass
u: Unsprung mass
fl: Front, left
fr: Front, right
rl: Rear, left
rr, Rear, right

* 김병준, E-mail: asx9608@kaist.ac.kr

1. 서 론

차량의 서스펜션 성능은 다른 차량과의 차별성을 나타낼 수 있는 요소이다. 이에 차량의 서스펜션 시스템을 개선하고자 많은 개발과 연구가 진행되었고, 고급 차량을 중심으로 서스펜션을 제어하여 승차감을 향상시키는 세미 액티브 서스펜션 사용이 증가하고 있다.^{1),2),3)} 서스펜션 제어에 있어 상대속도는 필수적인 정보이며 속도 센서를 부착하면 좋지만, 고가의 가격과 붙이기 어려운 구조에 의해 차량에 부착된 다른 센서를 이용하여 상대속도를 추정하는 연구가 오랜 기간 다양하게 진행되었다.⁴⁾

기존에는 차량의 상질량에 수직 방향 3개의 가속도 센서와 전륜에 부착된 수직 방향 2개의 가속도 센서를 이용하여 상대속도를 추정하였다.^{5),6)} 최근에는 6D-IMU 센서의 가격이 낮아지면서 IMU 센서를 이용하여 상대속도를 추정하는 연구가 활발히 진행된다.^{4),6)} 이러한 센서 구성을 이용하면 이용하는 센서의 수가 줄어 들어 기존에 사용하던 센서를 정확하게 위치시키지 못할 경우 오차가 커지는 문제와 간편한 배선에서 오는 이점이 있다.

기존의 연구는 1/4 차량 모델과 1/2 차량 모델, 전 차량 모델을 이용하였는데 1/4, 1/2 차량 모델의 경우 모델의 한계에 의해 차량의 피치, 롤 움직임이 심해질 경우 모델링에서 오차가 발생한다. 이런 오차는 직접적으로 상대속도를 추정하는 데에 있어 영향을 준다. 전 차량 모델을 이용하여 상대속도를 추정하는 기존 연구의 경우 관측기의 가관측성(observability)에 문제가 있기 때문에 이로 인한 오차가 있다.

그렇기에 본 연구에서는 IMU 센서를 이용해 기존의 연구들이 가지고 있는 문제를 해결하여 여러 상황에서의 상대속도 추정 정확도를 높이려 한다. 기존 연구에서 사용하는 관측기의 모델과 가정들의 적합성을 판단하여 부족한 부분을 개선하고자 한다. 차량 앞쪽 서스펜션을 정확하게 추정한 이후 Wheelbase preview 가정을 이용하여 뒤쪽 서스펜션 상대속도를 추정하였다. 최종적으로 여러 상황에서의 높은 상대속도 추정 성능을 통해 차량의 승차감 및 조종 안정성을 제어하는데 있어서 도움을 줄 것으로 기대한다.

2. 상대속도 추정 관측기 설계

차량의 전륜에는 수직방향 가속도 센서가 존재하기 때문에 보다 정확한 상대속도 값을 추정할 수 있다. 그러나 후륜에는 수직방향 가속도 센서가 존재하지 않기 때문에 추정할 수 없다. 이를 Wheelbase preview 가정을 이용하여 존재하지 않는 센서를 이용해 대체하고자 한다.

2.1 앞쪽 서스펜션 상대속도 추정

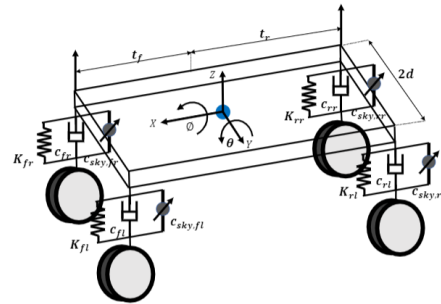


Fig 1 전 차량 모델링 형상

서스펜션의 상대속도를 추정하기에 앞서 IMU 센서를 이용하여 차량 상 질량 모서리의 수직 방향 속도를 알아낸다. IMU 센서의 수직방향 가속도를 적분하여 질량 중심에서의 수직방향 속도를 알아낸 후 아래의 식을 이용하여 상 질량 모서리의 수직방향 속도를 알아낸다.

$$\begin{aligned} v_{s,fl} &= V_z - tf \cdot q + d \cdot p \\ v_{s,fr} &= V_z - tf \cdot q - d \cdot p \\ v_{s,rl} &= V_z + tf \cdot q + d \cdot p \\ v_{s,rr} &= V_z + tf \cdot q - d \cdot p \end{aligned} \quad (1)$$

2.1.1 관측기 모델 선정

차량 앞쪽 서스펜션의 상대속도를 추정하기 위해 사용하는 모델을 선정하여야 한다. 1/4, 1/2 모델의 경우 모델에서부터 생기는 오차가 있으며, 전 차량 모델을 사용할 경우 가관측성에 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 1/2 차량 모델을 사용하여

가관측성을 해결한 이후, 모델에서부터 발생하는 오차는 IMU 센서를 통해 보정해줄 것이다.

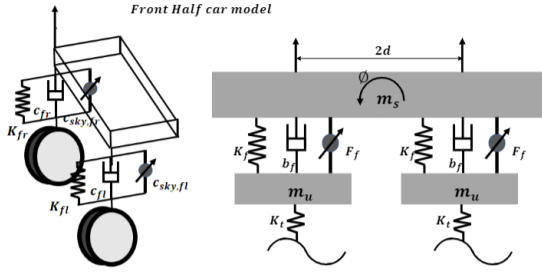


Fig 2 앞쪽 1/2 차량 모델

차량에 사용하는 모델의 경우 다음과 같은 1/2 차량 모델을 사용하였다. 기존의 연구들은 1/2 차량 모델을 사용할 경우 차량의 앞, 뒤로 구성된 모델을 사용하였는데, 이를 이용할 경우 후륜에 가속도 센서가 존재하지 않기 때문에 제안하는 방법보다 정확도가 떨어진다. 앞쪽 서스펜션 모델의 경우 전륜에 두 개의 가속도 센서가 존재하기 때문에 보다 정확한 상대속도 추정이 가능하다.

2.1.2 IMU센서를 이용한 모델 보정

1/2 차량 모델의 경우 피치(pitch), 롤(roll) 움직임이 심할 경우 차량의 상 질량 수직 방향 가속도 값에 오차가 커진다. 그렇기에 이를 6축 관성 센서(6D-IMU)를 이용하여 보정해주고자 한다. 선형 종속(Rank deficient)문제로 인하여 각각의 서스펜션의 힘을 알아낼 수는 없지만 센서 값을 이용하여 앞쪽 서스펜션의 힘의 합과 뒤쪽 서스펜션의 힘을 다음과 같이 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{fl} + F_{fr} &= \frac{1}{t_f + t_r} (\text{tr} \cdot M \cdot a_{z,cm} - I_y \cdot \dot{q}) \\ F_{rl} + F_{rr} &= \frac{1}{t_f + t_r} (t_f \cdot M \cdot a_{z,cm} + I_y \cdot \dot{q}) \end{aligned} \quad (2)$$

위에서 구한 힘의 합을 이용하면 위에서 선정한 1/2 차량 모델에서 고려하지 못하였던 뒤쪽 서스펜션 힘을 고려할 수 있게 된다. 이러한 결과 앞쪽 1/2 차량 모델을 이용하여 차량의 피치 움직임을 고려할 수 있게 되었다. 롤 움직임을 경우 정확하게 보상하지는 않았지만, 앞의 힘이 전체 차량의 롤 모멘트와 같다는 가정을 통해 해결했다.

2.1.3 칼만필터를 이용한 앞쪽 관측기 설계

자동차의 서스펜션 모델은 세미 액티브 서스펜션으로 쌍 일차 형식(Bilinear form)을 가지고 있기 때문에 모델이 제어 입력에 따라 변하게 된다. 따라서 칼만필터를 이용하여 실시간 모델 변화에 대응이 가능한 칼만 필터를 사용하였다.

$$\begin{aligned} x_k &= [v_{s,fl} \ z_{d,fl} \ v_{s,fr} \ z_{d,fr} \ v_{v,fr}]' \\ P_k^- &= F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + Q \\ K_k &= P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_k^- &= F_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ + B_{k-1} \\ \hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k (Y_k - H_k \hat{x}_k^-) \\ P_k^+ &= (I - K_k H_k) P_k^- \end{aligned} \quad (3)$$

위의 식에 사용한 F_{k-1} 은 상태변수 x_k 를 이용한 앞쪽 서스펜션 차량 모델링 과정을 통하여 얻을 수 있으며 B_{k-1} 는 2.12절에서 이용한 모델 보상 식과 IMU 센서 값을 이용해 계산할 수 있다. 위의 칼만필터는 백색 소음이라고 가정한 R 행렬과, 모델의 불확실성인 Q 행렬을 알 경우 최적의 추정 결과를 보여준다.⁷⁾ R의 경우 각각의 센서가 가지고 있는 크기에 비례하도록 설정하였으며 Q의 경우 연관 있는 상태변수에 대해 좀 더 큰 값을 지정해주었다.

2.2 뒤쪽 서스펜션 상대속도 추정

뒤쪽 서스펜션의 경우 앞쪽 서스펜션과 같은 모델을 사용한다. 그러나 센서가 존재하지 않기 때문에 후륜에 존재하지 않는 센서 값을 대체하여야 한다. 이는 기존 연구에서 다양한 방법으로 사용하고 있는 Wheelbase preview 가정을 이용하여 대체하였다.⁸⁾

2.2.1 Wheelbase preview 가정

상용차와 기존 연구에서는 원가 절감을 위해 후륜에 가속도 센서를 사용하지 않는 방법을 사용하였다. 이를 대체하기 위하여 Wheelbase preview 가정을 이용한다. Wheelbase preview 가정이란 차량의 앞쪽 하 질량 수직방향 위치가 일정 시간 이후 뒤쪽 하 질량 수직방향 위치와 같아진다는 가정이다.

이를 두 번 미분하면 아래와 같은 식을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} x_{u,\Pi} &= x_{u,rl}(t - \tau) \\ v_{u,\Pi} &= v_{u,rl}(t - \tau) \\ a_{u,\Pi} &= a_{u,rl}(t - \tau) \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식을 통하여 후륜에 존재하지 않는 가속도 센서를 전륜에 존재하는 가속도 센서 값으로 대체할 수 있으며, 미루는 시간 (τ)는 차량의 축간 거리 (L)을 종 방향 속도 (V_x)로 나눈 값을 사용한다.

2.2.2 칼만필터를 이용한 뒤쪽 관측기 설계

뒤쪽 관측기도 2.13과 같은 방식으로 관측기를 설계한다. 한 가지 다른 점은 앞쪽 관측기의 경우 B_{k-1} 를 존재하는 가속도 센서 값을 이용하였지만, 뒤쪽 관측기는 이를 2.21을 통해 대체한 후륜 수직방향 가속도 값을 이용한다. 앞쪽과 뒤쪽 서스펜션 상대속도의 추정 결과는 같은 방법을 사용하여도, 일반적인 노면에서 큰 영향을 주지 않지만 2.21의 가정에서 생기는 오차가 발생하기 때문에 뒤쪽보다 앞쪽의 정확도가 더욱 높다.

3. 시뮬레이션을 통한 관측기 성능 검증

본 절에서는 위에서 설계한 관측기를 카심(Carsim) 시뮬레이션과 매트랩(MATLAB), 시뮬링크(Simulink)를 이용하여 검증하였다. 사용한 검증 시뮬레이션 환경은 실제 차량의 거동이나 차량의 제어에 있어 높은 정확도를 가지고 시뮬레이션을 할 수 있기에 많이 사용하는 프로그램이다. 시뮬레이션에서 사용하는 제어 입력은 아래와 같은 Two-state skyhook 제어 알고리즘을 사용하였다.

$$\begin{aligned} c_{sky} &= c_{max} & \text{if } v_s \cdot (v_s - v_u) &\geq 0 \\ c_{sky} &= c_{min} & \text{if } v_s \cdot (v_s - v_u) < 0 \end{aligned} \quad (5)$$

3.1 모델 보상 검증

2.12절에서 IMU를 통한 모델 보상 효과를 시뮬레이션을 통해 확인해보았다. CARSIM을 통해 얻은

$a_{s,\Pi}$ 과 모델링 보상 전 가속도 값과 보상 후의 가속도 값을 비교하였다.

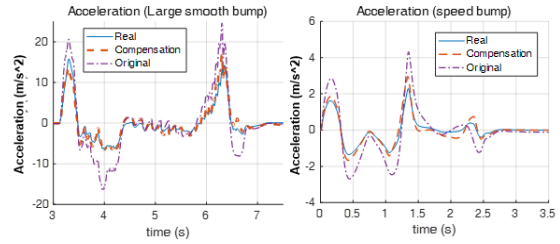


Fig 3 시뮬레이션을 통해 확인한 모델 보상 결과

모델 보상 결과 기존의 1/2 차량 모델에서는 언덕을 넘을 경우 실제 값과 모델의 가속도 값에 차이가 있었는데 이를 보상해 차이를 줄일 수 있었다. 이러한 가속도 모델링의 정확도는 상대속도 추정 성능 향상에 도움을 준다.

3.2 상대속도 추정 성능 검증

3.2.1 앞쪽 서스펜션 상대속도 추정

3.1절에서 검증한 모델 보정을 이용하여 2.13절의 관측기를 완성하였으며, 이는 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 추정 성능 향상을 검증하기 위해 기존의 연구 방법들과, 실제 값, 제안한 방법을 비교하였다.

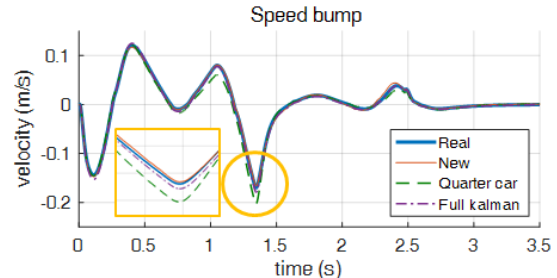


Fig 4 왼쪽, 앞 상대속도 추정 결과 (과속 방지턱)

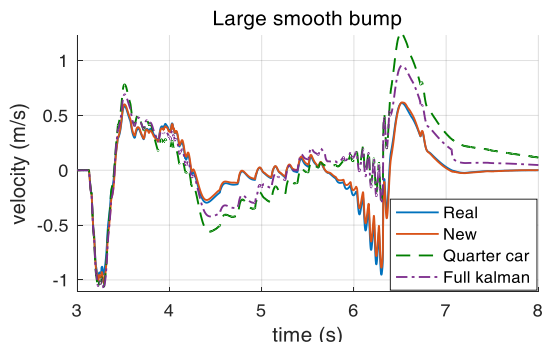


Fig 5 왼쪽, 앞 상대속도 추정 결과 (큰 언덕)

위와 같이 모델링 보상과 전륜에 존재하는 2개의 가속도 센서를 이용하여 보다 정확한 상대속도 추정 성능을 검증할 수 있었다. 이 외에도 보다 많은 주행상황에서 검증하고자 하였으며, 수치적인 값으로 표현하기 위하여 아래와 같은 NRMS(Normalized Root Mean Square)값을 이용하였다.

$$NRMS = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_{measured} - \hat{A}_{estimated})^2 / N}}{\max(|A_{measured}|)} \quad (6)$$

Table 1 Front, Left Relative velocity (NRMS)

Observer \ Road	Speed bump	Small bump	Sine sweep	Large bump	Off-road
New	0.026	0.014	0.019	0.040	0.052
1/4 car	0.060	0.027	0.049	0.345	0.134
Full car	0.036	0.010	0.019	0.313	0.152

3.2.1 뒤쪽 서스펜션 상대속도 추정

뒤쪽 서스펜션의 경우 기존의 연구들과 상용차에서 사용하는 Wheelbase preview 가정을 이용하였다. 상대속도 추정 결과를 확인하기 위해 앞서 Wheelbase preview를 이용하여 가속도 값을 대체할 경우 실제 가속도 값과의 차이를 시뮬레이션을 통해 확인했다.

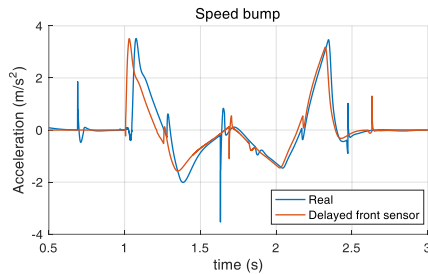


Fig 8 가정을 이용한 가속도 센서 값 (Speed bump)

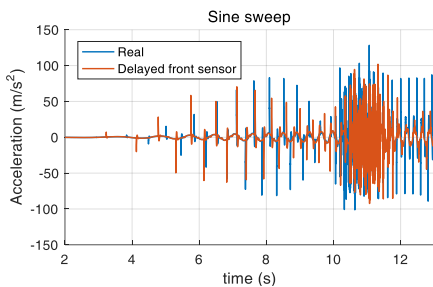


Fig 7 가정을 이용한 가속도 센서 값 (Sine sweep)

위의 센서 값을 통해 대략적인 경향과 크기는 비슷한 것을 확인할 수 있으나, 노면이 고주파이거나 기울기가 급격한 경우 Wheelbase preview 가정의 오차가 심해지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 앞쪽 보다 상대속도 추정 결과가 정확하지 못할 것을 예측할 수 있다. 아래는 Wheelbase preview 가정과 위에서 언급한 추정기를 통해 뒤쪽 서스펜션 상대속도를 추정한 결과이다.

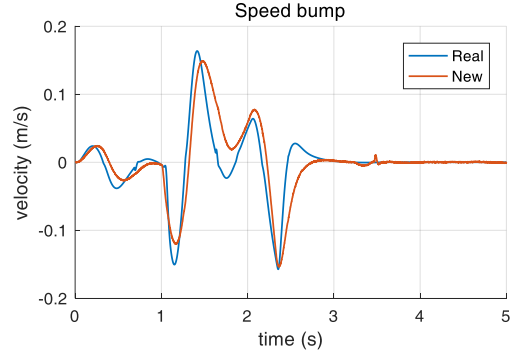


Fig 6 왼쪽, 뒤 상대속도 추정 결과 (과속 방지턱)

추정 결과 Fig 4 보다 오차가 커진 것을 확인할 수 있다. 큰 차이가 없으나 노면의 기울기가 커질 경우 오차가 커지기 때문에 추후에 연구가 필요할 것이다.

4. 결 론

차량의 승차감을 개선시키기 위해서는 서스펜션 제어가 필요하며, 제어 방법은 서스펜션의 상대속도를 필요로 한다. 따라서 서스펜션의 상대속도를 정확하게 추정하는 것은 승차감 개선에 큰 영향을 준다. 기존의 연구들은 모델의 한계와, 사용할 수 있는 센서로부터 생기는 가관측성 문제에 의해 차량의 피치, 롤 움직임이 심해질 경우 추정 오차가 커졌다. 이를 앞쪽 1/2 차량 모델을 이용하여 존재하는 센서를 모두 이용하고, IMU센서를 이용한 모델 보정을 통해 보다 많은 주행 상황에서 정확한 상대속도 추정을 할 수 있도록 하였다. 최종적으로 결론을 정리하면 아래와 같다.

- 1) 기존에 상용차에 사용하는 상질량에 부착된 3개의 수직방향 가속도 센서와 3D-IMU 센서를 6D-IMU 센서 하나로 대체하여 센서 마운트로부터

터 생기는 오차를 줄였으며, 배선작업을 간편하게 할 수 있도록 하였다. 이는 최근 6D-IMU의 가격이 점차 낮아지면서 기존의 센서들과 큰 차이가 없기 가까운 미래에 충분히 대처 가능할 것이다.

- 2) 1/4 차량 모델과 1/2 차량 모델을 상대속도 추정 관측기에 이용할 경우 모델이 전체 차량의 움직임을 표현하지 못하기 때문에 상대속도 추정 오차가 생긴다. 따라서 이를 IMU 센서를 이용하여 보정해 주었다.
- 3) 본 연구에서 사용한 1/2 차량 모델의 경우 차량의 앞, 뒤로 구성된 1/2 차량 모델이 아닌 전륜에 존재하는 센서를 모두 사용하기 위해 차량의 양 옆으로 이루어진 1/2 차량 모델을 사용하였다. 따라서 이를 이용해 앞쪽 서스펜션 상대속도 추정 성능이 향상되었다.
- 4) 뒤쪽 서스펜션 상대속도를 추정하기 위해서는 후륜에 존재하지 않는 가속도 값을 대체할 수 있어야 한다. 이는 기존의 연구에서 사용하고 있는 Wheelbase preview 가정을 사용하였으며, 일반적인 노면 상황에서는 거의 같으나 차량의 피치, 롤 움직임이 심해질 경우 오차가 커지게 되는 문제가 있다.
- 5) Wheelbase preview 가정을 이용하면 뒤쪽에 들어오는 센서를 미리 예측할 수 있어 뒤쪽 서스펜션을 preview 제어를 할 수 있다. 이는 기존의 많은 preview 연구를 이용하여 적용할 수 있다.⁹⁾

Acknowledgement

This research was partly supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP) (No. 2017R1A2B4004116); and the BK21+ program through the NRF funded by the Ministry of Education of Korea.

References

- 1) R. Rajamani, *Vehicle dynamics and control*. Springer Science & Business Media, 2011.
- 2) S. M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Senane, and L. Dugard, *Semi-active suspension control design for vehicles*. Elsevier, 2010.
- 3) G. Yao, F. Yap, G. Chen, W. Li, and S. Yeo, "Mr damper and its application for semi-active control of vehicle suspension system," *Mechatronics*, vol. 12, no. 7, pp. 963-973, 2002.
- 4) H. Bolandhemmat, "Distributed sensing and observer design for vehicles state estimation," 2009.
- 5) W. Kim, J. Lee, S. Yoon, and D. Kim, "Development of Mando's new continuously controlled semi-active suspension system," SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2005.
- 6) K. Jeong and S. Choi, "Vehicle suspension relative velocity estimation using a single 6-d imu sensor," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 6, pp. 2651-2662, 2008.
- 7) D. Simon, *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*. John Wiley & Sons, 2006.
- 8) B. Kwon, "Wheelbase Preview Active Suspension Control to Improve Vehicle Ride Comfort based on Front-Wheel Acceleration Sensing," Ph.D. dissertation, Seoul National University, 2018.
- 9) M. Soh, H. Jang, "Development of Preview Active Suspension Control System And Performance Limit Analysis By Trajectory Optimization," *Int J Automot Technol*, vol. 19, no. 6, 2018