

Effect of Vibration Suppression Device for GNSS/INS Integrated Navigation System Mounted on Self-Driving Vehicle

Dong-Hyuk Park¹, Sang-Hoon Ahn¹, Jong-Hoon Won^{2†}

¹Autonomous Navigation Lab, Inha University, Incheon 22212, Korea

²Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

ABSTRACT

This paper presents a method to reduce the vibration-induced noise effect of an inertial measurement device mounted on a self-driving vehicle. The inertial sensor used in the GNSS/INS integrated navigation system of a self-driving vehicle is fixed directly on the chassis of vehicle body so that its navigation output is affected by the vibration of the vehicle's engine, resulting in the degradation of the navigational performance. Therefore, these effects must be considered when mounting the inertial sensor. In order to solve this problem, this paper proposes to use an in-house manufactured vibration suppression device and analyzes its impact on reducing the vibration effect. Experimental test results in a static scenario show that the vibration-induced noise effect is more clearly observed in the lateral direction of the vehicle, but can be effectively suppressed by using the proposed vibration suppression device compared to the case without it. In addition, the dynamic positioning test scenario shows the position, speed, and posture errors are reduced to 74%, 67%, and 14% levels, respectively.

Keywords: vibration suppression device, GNSS/INS integrated navigation system

1. INTRODUCTION

자율주행 기술개발에 있어, 차량의 위치, 속도, 자세각 등 정확한 항법 정보를 아는 것은 필수적이다. 차량의 항법 정보를 구하는 방법으로 Global Navigation Satellite System (GNSS)를 이용하면 시간 경과에 상관없이 일정 수준 이내로 위치 오차가 유지되며 비교적 안정적인 위치 해 추정이 가능하다. 하지만 전파 항법 기술에 기반한 GNSS만을 이용한 방법은 도심지, 터널 등 신호 수신 환경에 따라 정확한 위치 해 계산이 제한되며, 출력 주기가 상대적으로 느려 차량 제어에 한계가 있다 (Misra & Enge 2006). 반면에 Inertial Measurement Unit (IMU)를 이용한 Inertial Navigation System (INS)는 출력 주기가 빠르고 GNSS 신호 환경이 안 좋은 곳에서도 연속적인 위치 해 추정이 가능하나, 누적 오차로 인하여 위치 해가 발산한다는 단점이 있다 (Siouris

1993). 특히, 시장에 널리 판매되어 사용되고 있는 저가형 Micro Electrical Mechanical System (MEMS) IMU 센서들은 이러한 특징이 두드러진다. 따라서 GNSS와 INS를 통합하여 상호간 단점을 보완하기 위한 통합 항법 알고리즘이 광범위하게 이용되고 있다.

GNSS/INS 통합 항법 시스템에 가장 널리 이용되는 방법은 칼만필터를 이용한 방법이다. 칼만필터는 노이즈가 포함된 선형 시스템에 측정치와 시스템 모델을 이용하여 상태를 추정하는 필터로, 측정된 상태 값과 예측된 상태 값의 오차 공분산을 최소화하는 방식으로 동작하며, 컴퓨터 비전, 항법, 제어 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 비선형 시스템에 대해서는 확장형 칼만필터가 이용되고 있다 (Mendel 1995). 칼만필터는 크게 예측과 추정의 단계로 이루어진다. 예측 단계에서는 시스템 모델을 통해 상태와 오차 공분산을 예측하며, 추정 단계에서는 앞서 예측한 예측 값과 측정 값의 차이를 보정하여 추정 값을 새로 계산한다. 칼만필터는 필터의 상태 변수를 직접 사용하는 직접 방식과 오차를 사용하는 간접 방식으로 분류되며, 간접 방식은 오차를 상태 변수에 되먹임 여부에 따라 되먹임 방식과 앞먹임 방식으로 구분된다 (Brown & Hwang 1997). 간접 되먹임 방식은 추정된 오차를 INS의 계산 과정에 직접 반영하여 오차를 보정하기 때문에 안정적인 항법 해를 예측할 수 있으므로, MEMS IMU에 적합한 방식이다

Received Apr 15, 2022 Revised May 02, 2022 Accepted May 08, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: jh.won@inha.ac.kr

Tel: +82-32-860-7406

Dong-Hyuk Park <https://orcid.org/0000-0002-8690-7249>

Sang-Hoon Ahn <https://orcid.org/0000-0002-9308-7349>

Jong-Hoon Won <https://orcid.org/0000-0001-5258-574X>

(Titterton & Weston 2004).

GNSS와 INS를 통합하는 방식은 크게 강결합 (tightly coupled) 방식과 약결합 (loosely coupled) 방식으로 나뉜다. 강결합 방식은 GNSS 시스템에서 수신기가 수신한 의사거리와 의사거리 변화율 정보를 사용하는 방법이며, 약결합 방식은 GNSS 시스템의 위치와 속도 정보를 사용하는 방법이다 (Falco et al. 2017). 강결합 방식은 약결합 방식에 비해 신호 환경에 대해 강인하다는 장점이 있고, 약결합 방식은 강결합 방식에 비해 모델이 간단하고 시스템 구성이 용이하다는 장점이 존재한다. 통합 항법 알고리즘에 대한 연구로, Schütz et al. (2020)은 GNSS와 INS에 라이다를 결합하여 GNSS 신호가 차단되는 공간에서도 약결합 방식의 통합 항법 알고리즘의 성능을 높였으며, Wang et al. (2007)은 적응형 칼만필터를 기반으로 신경망을 보조로 사용하여 칼만필터의 성능을 높였다. Gao et al. (2020)과 Han et al. (2021)은 약결합 방식의 통합항법 알고리즘의 칼만필터 튜닝에 강화학습을 이용하기도 하였다. Wang et al. (2020)은 MEMS형 센서를 이용하여 강결합 방식의 차량용 통합 항법 시스템을 구성하였다. Hao et al. (2018)은 확장형 칼만필터를 통한 듀얼 안테나 기반의 통합 항법 시스템을 제안하였다. Wang et al. (2017)은 앞서 설명한 약결합 방식과 강결합 방식의 성능을 비교하였다.

그러나 기존의 연구는 통합 항법 시스템 구성에 집중되어 있으며, 항체에 센서 장착 시 발생하는 진동 노이즈에 의한 통합 항법 시스템에서의 영향은 상대적으로 덜 연구되었다. 특히, IMU 센서를 차량에 장착 시, 차량의 엔진에 의한 진동 때문에 노이즈가 증가하게 된다. IMU 센서의 진동을 줄이기 위한 연구로, Kedadouche et al. (2018)은 드론의 비행 시스템 설계에 있어, MEMS IMU 센서의 진동에 의한 영향을 줄이기 위해 진동 감쇄기를 설계하여 시스템의 안정성을 높였다. Cheng et al. (2021)은 진동 흡수기를 설계하여 레이저형 자이로로부터 측정되는 커플링 노이즈를 감소시켰다. Dönmez (2018)은 6 자유도 감쇄 모델을 이용하여 IMU 센서의 비선형 진동 감쇄 시스템을 설계하였다. 자율주행 시스템이 개발됨에 따라 차량에 자율주행용 센서를 장착하게 되는 일이 많아지고 있지만 (Van Brummelen et al. 2018), 거의 대부분의 국내 실험용 엔진 기반의 자율주행 차량들은 차량에 IMU 센서를 장착할 때 진동에 의한 영향을 고려하지 않고 차량의 샤시 또는 콘솔 박스 등에 그대로 직접 부착하여 사용하고 있다. 이러한 경우 IMU 출력의 노이즈가 증가하여 항법 성능이 떨어질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 IMU 센서 장착 시 발생하는 진동에 의한 노이즈 영향을 분석하고, 이를 줄이기 위한 진동 감쇄 장치에 대해 소개하며, 이러한 노이즈가 통합 항법 시스템에 미치는 영향을 분석한다. 본 논문에서 소개하는 진동 감쇄 장치의 설계 및 제작 방법은 구조가 간단하고 제작이 간편하기 때문에, 큰 노력을 들이지 않고 항법 오차를 줄일 수 있다는 점에서 이점이 있다.

논문 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IMU 센서의 오차와 진동 감쇄 장치에 대해 설명하고, 약결합 방식의 GNSS/INS 통합 항법 시스템에 대해 기술한다. 3장에서는 진동 감쇄 장치의 성능 실험 결과를 제시하고, 이를 이용한 GNSS/INS 통합 항법 시스템에 미치는 영향을 실제 차량의 주행 궤적을 통해 분석하며, 결론으로 마무리 짓는다.

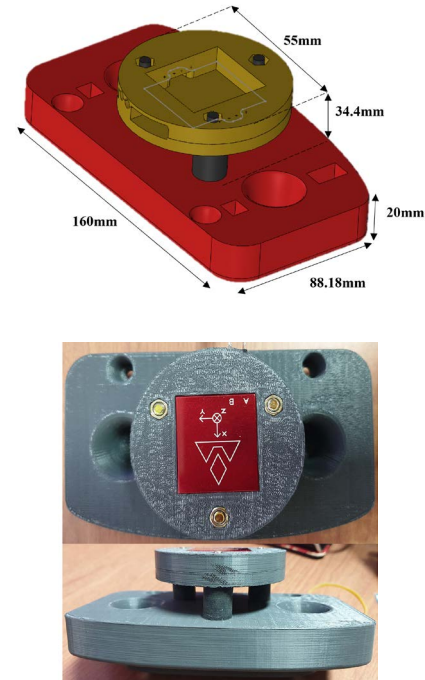


Fig. 1. Schematic view (top) on vibration suppression device (VSD) and IMU-installed view (bottom).

2. METHODS

2.1 Vibration Suppression Device (VSD)

IMU 센서는 다양한 요인에 의해 오차가 발생한다. IMU 센서의 오차는 크게 deterministic error와 stochastic error로 구분된다 (Yang et al. 2007). Deterministic error에는 bias, scale factor, misalignment 등이 있다. Bias는 실제 값과 출력 값의 일정한 차이를 의미하며, scale factor는 실제 값과 출력 값의 비율을 의미한다. Misalignment는 센서를 차량에 장착할 때, 센서와 차량의 축이 일치하지 않는 것에서 발생하는 오차이다. Stochastic error에는 bias instability, scale factor instability, random walk 등이 있다. Bias instability는 bias가 온도 및 시간에 따라 변화하는 것을 나타내며, 장비를 켜 때마다 달라질 수 있다. Scale factor instability는 scale factor가 온도에 따라서 달라지는 것을 의미하며, 비선형성 오차 또한 발생할 수 있다. Random walk는 흔히 노이즈라고 부르는 오차이며, 일반적으로 표준편차 값으로 특정지어진다 (Titterton & Weston 2004).

차량 엔진에 의한 진동은 앞서 언급한 IMU 센서의 오차 중 노이즈를 증가시키게 된다. 이러한 진동은 주파수가 낮기 때문에 칼만 필터의 공분산에 직접 적용하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 엔진 차량의 진동에 의한 IMU 센서의 노이즈를 줄이기 위해 진동 감쇄 장치를 직접 설계 및 제작하였다. Fig. 1은 진동에 의한 노이즈를 감소시키기 위해 자체 설계 제작한 진동 감쇄 장치의 도면과 진동 감쇄 장치에 IMU 센서를 장착한 모습을 나타낸다. 3개의 진동 방지용 볼트를 이용하여 진동에 의한 영향을 줄이

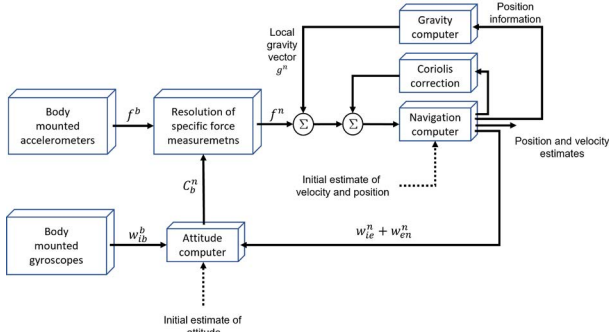


Fig. 2. Block diagram for inertial navigation system equations.

Table 1. Parameter descriptions.

Parameter	Description
L, l, h	Latitude, Longitude, Height
v_n, v_e, v_d	NED frame velocity
f^b	Body frame acceleration
C_b^n	Body frame to NED frame DCM
$w_{ie}^n = [\rho_n, \rho_e, \rho_d]$	Earth rate
$w_{en}^n = [\Omega_n, \Omega_e, \Omega_d]$	Transport rate
w_{ib}^b	Angular rate
g^n	NED frame gravity
Ω_{ib}^b	Skew matrix of w_{ib}^b
Ω_{in}^n	Skew of w_{in}^n
R_m	Meridian radius
R_{mm}	R_m derivative with respect to L
R_t	Transverse radius
R_{tt}	R_t derivative with respect to L
ϕ^n	Attitude error
B_A^b	Accelerometer bias
B_G^b	Gyroscope bias

는 방식이다. 장착하려는 센서를 감싸기 위한 원형 판을 설계하고, 센서가 장착되는 원형판을 3개의 진동 방지용 볼트가 정삼각형의 형태로 지탱하는 구조로 설계하였다. 이러한 방법은 간단한 설계와 최소 개수의 진동 방지용 볼트로 각 3축에 대한 감쇄 효과를 모두 만들 수 있기 때문에, 적은 부품으로 최대의 효과를 얻을 수 있다. 설계한 진동 감쇄 장치는 3D 프린터를 이용하여 제작하였다. 3D 프린터를 이용하게 되면 도면 설계만으로 간편하게 장치를 제작할 수 있다는 장점이 있기 때문에, 장치 제작에 대한 추가적인 시간과 비용을 줄일 수 있다. 따라서 본 논문에서 소개하는 진동 감쇄 장치 설계 및 제작 방법은 큰 노력을 들이지 않고 간단한 작업만으로 항법 오차를 줄일 수 있기 때문에 비용과 시간적인 측면에서 효율적인 방법이다.

2.2 Inertial Navigation System Equation

관성 항법 시스템은 가속도계와 자이로계를 이용하여 위치,

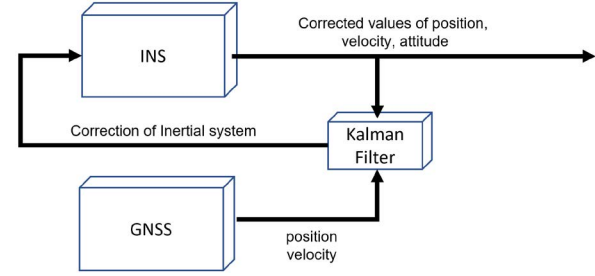


Fig. 3. Block diagram for GNSS/INS integrated navigation system.

속도, 자세를 구하는 것을 의미한다. Fig. 2는 관성 항법 시스템의 블록도를 나타낸다 (Titterton & Weston 2004). 각속도계 측정치를 이용하여 자세를 구하고, 계산된 자세를 통해 회전 변환 행렬을 계산한다. 이 회전 변환 행렬과 각속도계 측정치를 이용하여 속도와 위치를 계산하게 되며, 코리올리 효과와 중력을 보상한다. 본 논문에서는 항법 좌표계인 NED 좌표계를 사용하였다. 항법 좌표계란, 관성 항법 시스템의 위치를 원점으로 하며 북쪽 방향 (North), 동쪽 방향 (East), 지면 방향 (Down)을 축으로 가지는 좌표계이다. 식 (1-3)은 관성 항법 시스템의 미분 방정식을 나타낸다. 본 논문에서 사용되는 변수들의 의미는 Table 1에 설명되어 있다.

$$\text{(위치방정식)} \quad \dot{L} = \frac{v_n}{R_m + h}, \dot{l} = \frac{v_e}{(R_t + h)\cos L}, \dot{h} = -v_d \quad (1)$$

$$\text{(속도방정식)} \quad \dot{v}^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^n + g^n \quad (2)$$

$$\text{(자세방정식)} \quad \dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b - \Omega_{in}^n C_b^n \quad (3)$$

2.3 Loosely Coupled GNSS/INS Integration Using Kalman Filter

본 논문에서 구성한 칼만필터는 Fig. 3과 같다. 칼만필터를 이용하여 약결합 방식의 GNSS/INS 통합 항법 시스템을 구성하였다. 상태변수는 위치 오차, 속도 오차, 자세 오차, 가속도계 bias, 각속도계 bias 각 3축에 대해서 총 15개의 상태변수를 이용하였으며, 간접 되먹임 방식으로 구현하였다. 칼만필터 구성 시 측정치 변수를 무엇으로 설정하느냐에 따라 측정 행렬이 달라지게 되는데, 본 논문에서는 측정치로 위치와 속도를 사용하여 측정 행렬을 구성하였다. 자세한 선형화된 INS의 오차모델과 본 논문에서 구성한 칼만필터는 APPENDIX를 참고한다.

3. RESULTS

3.1 진동 감쇄 장치 성능 실험

진동 감쇄 장치의 성능 실험을 위한 구성은 다음과 같다. 측정에 사용한 IMU 센서는 VectorNav사의 VN 300 모델을 사용하였으며, 차량 진동의 주요 요인인 엔진에 의한 진동의 영향을 알아



Fig. 4. Mounted IMU sensor with VSD (left) and self-driving car (right).

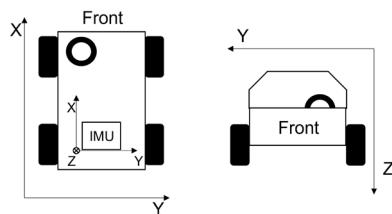


Fig. 5. Vehicle's body frame and the aligned IMU sensor frame.

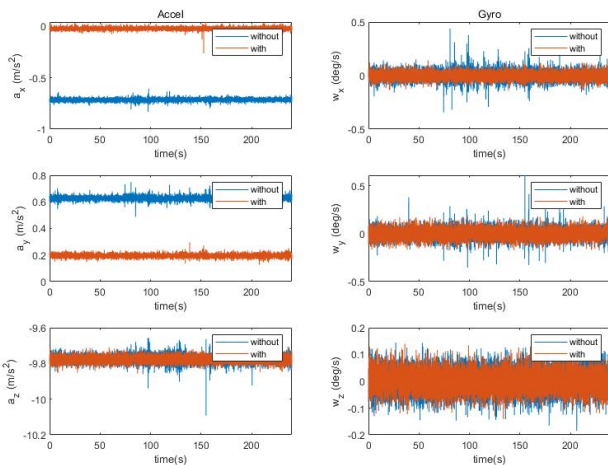


Fig. 6. Acceleration and angular rate in time-domain (engine OFF).

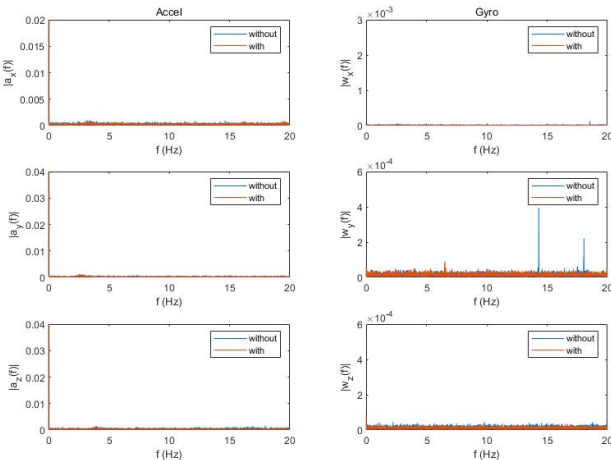


Fig. 7. Acceleration and angular rate in frequency-domain (engine OFF).

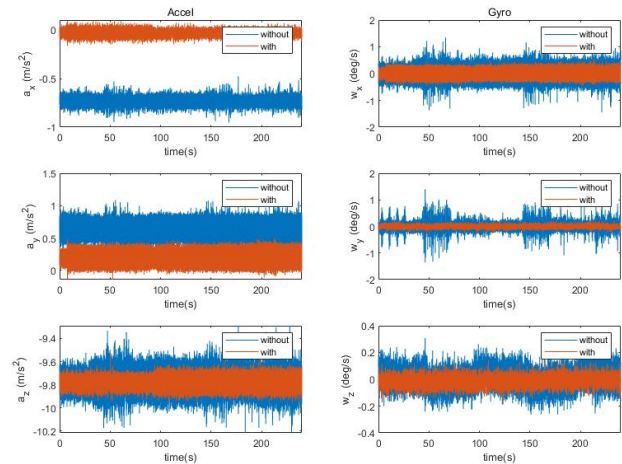


Fig. 8. Acceleration and angular rate in time-domain (engine ON).

보기 위해 차량을 정지한 상태로 실험을 진행하였다. 이때, 주행 중에는 진동에 의한 노이즈를 완벽히 분리할 수 없기 때문에 정지 실험을 통해서 진동에 의한 노이즈를 분석하였다. Fig. 4는 실험에 사용한 자율주행용 차량과 콘솔 박스 내부에 IMU 센서를 장착한 모습을 나타낸다. 차량의 진동은 엔진, 차량 종류 등 다양한 요소에 따라 다를 수 있지만, 일반적으로 낮은 주파수를 가진다 (Jeon et al. 2010). 본 논문에서는 대표적인 엔진 차량 중 하나인 현대자동차의 아반떼 차량을 이용하여 실험을 진행하였다. 차량과 장착한 IMU 센서의 축은 SAE 표준에 따라 Fig. 5와 같이 전진 방향을 x축, x축에 대한 오른쪽 수직 방향을 y축, 지면을 향하는 방향을 z축으로 동일하게 설정하였다 (Bevy & Cobb 2009). 이때, x축 방향 회전각을 roll, y축 방향 회전각을 pitch, z축 방향 회전각을 yaw로 정의한다. 엔진을 켰을 때 (ON)와 껐을 때 (OFF)로 나누어 진동 감쇄 장치가 있는 경우 (with)와 없는 경우 (without)에 대해 가속도계와 각속도계의 데이터를 비교하였다. Figs. 6과 7은 엔진 OFF 시, 가속도와 각속도의 출력을 시간 영역과 주파수 영역에서 나타낸 것이며, Figs. 8과 9는 엔진 ON 시, 가속도와 각속도의 출력을 시간 영역과 주파수 영역에서 나타낸 것이다.

Figs. 6과 8을 보면 x축과 y축 가속도의 평균 값이 달라진 것을 확인할 수 있는데, 이는 진동 감쇄 장치 장착에 의한 센서 부착 시 발생하는 정렬 오차에 의한 것이다. 엔진 OFF 시에는 외부 진동 원인이 없기 때문에 진동 감쇄 장치를 장착하기 전과 후에 큰 차이가 발생하지 않았지만, 엔진 ON 시에는 노이즈의 크기가 감소한 것을 확인할 수 있다. 특히, Figs. 7과 9를 비교해보면 엔진 진동에 의해 15 Hz ~ 20 Hz 부근에서 노이즈가 발생한 것을 확인할 수 있

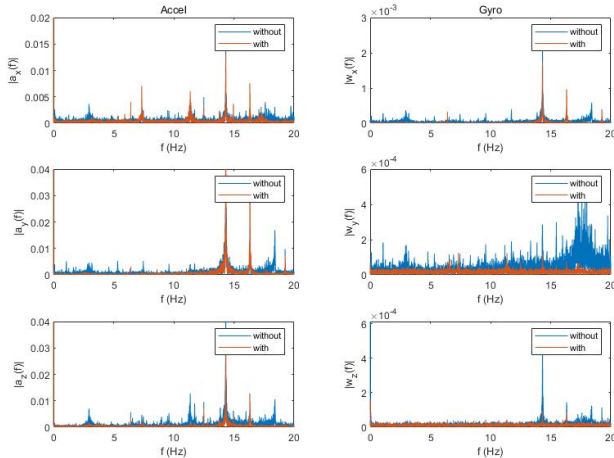


Fig. 9. Acceleration and angular rate in frequency-domain (engine ON).

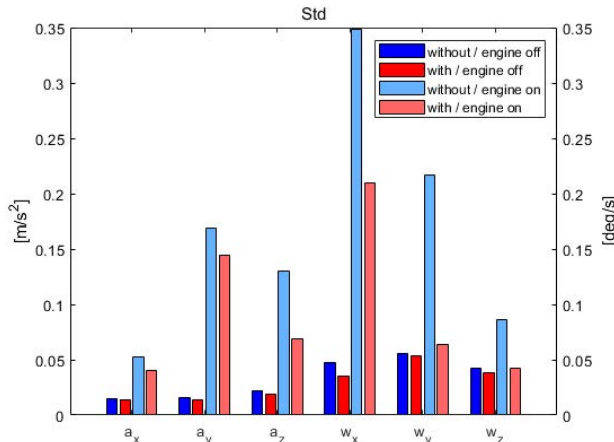


Fig. 10. Standard deviation of IMU measurements with/without VSD.

으며, 그 크기가 진동 감쇄 장치를 장착한 후에 줄어든 것을 확인할 수 있다. 다만, 특정 주파수에서는 노이즈의 크기가 크게 감소하지 않는 것처럼 보이는데, 이는 진동 감쇄 장치 설계만으로 완전히 제거할 수 없는 노이즈로 판단된다. 이러한 부분은 간단한 필터 설계 등으로 보완할 수 있으며, 본 논문에서는 진동 감쇄 장치의 영향을 분석하는 것이 목적이기 때문에 추가적인 필터 설계는 고려하지 않았다.

Table 2와 Fig. 10은 진동 감쇄 장치 유무에 따른 IMU 출력치의 표준편차를 정리한 것이다. 진동 감쇄 장치를 장착한 후에 표준편차의 크기가 적게는 15%에서 많게는 70% 정도 줄어든 것을 확인할 수 있다. 엔진 ON 시, 엔진 OFF 시 보다 엔진의 진동에 의해 표준편차가 증가한 것을 확인할 수 있다. 특히 진동 감쇄 장치를 장착하기 전에 표준편차의 크기가 컸던 각속도에서 그 효과가 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 또한, 각속도 출력의 경우 엔진 ON 시 x 축보다 y 축과 z 축에서 표준편차가 더 증가한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 차량의 엔진에 의한 진동은 y 축과 z 축 방향의 영향이 큰 것을 알 수 있으며, 이러한 현상은 각속도 출력에서도 확인할 수 있다. y 축과 z 축 방향으로의 진동이 크기 때문에, z 축 각

Table 2. Standard deviation of IMU measurements with/without VSD.

Engine	Data	Device	Standard deviation		
			x	y	z
OFF	Accel	without	0.0152	0.0157	0.0223
		with	0.0143	0.0137	0.0185
	Gyro	without	0.0472	0.0560	0.0421
		with	0.0356	0.0533	0.0379
ON	Accel	without	0.0522	0.1692	0.1301
		with	0.0404	0.1448	0.0684
	Gyro	without	0.3484	0.2165	0.0857
		with	0.2098	0.0636	0.0424

Table 3. Specification of TDR 3000 and CPT 7.

GNSS sensor	TDR 3000	CPT 7
Signal tracking	GPS: L1, L2, L5	GPS: L1, L2, L5
	GLONASS: L1, L2	GLONASS: L1, L2, L3, L5
	BeiDou: B1, B2	BeiDou: B1, B2
	Galileo: E1, E5	Galileo: E1, E5
	QZSS: L1, L2	QZSS: L1, L2, L5
	SBAS: L1, L5	SBAS: L1, L5
		NavIC: L5
RTK service	Possible (not used)	Possible
RTK Position accuracy [m]	0.01 + 1 ppm	0.01 + 1 ppm
Heading accuracy [deg]	0.3	0.08
Convergence time [s]	≤ 30	≤ 10
Operating temperature [°C]	-40 ~ 85	-40 ~ 71

속도가 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있다. 설계한 진동 감쇄 장치는 정삼각형 형태의 진동 방지용 볼트가 있기 때문에 진동에 의한 영향을 효과적으로 줄인 것으로 판단된다.

3.2 통합 항법 시스템 성능 실험

통합 항법 시스템에서의 성능 실험을 위한 구성은 다음과 같다. 통합 항법에 사용한 GNSS 센서는 SYNEREX사의 TDR 3000 모델을 이용하였으며, 기준 경로로 사용한 장비로는 NOVATEL사의 CPT 7 모델을 사용하였다. CPT 7 모델은 기준 경로로 사용하기 위하여 Real Time Kinematic (RTK)를 사용하였고, TDR 3000 모델은 RTK가 지원되지만, 단독 측위를 이용하였다. Table 3은 사용한 GNSS 센서의 스펙을 나타낸다.

이동 측위 실험은 한국 자동차 안전 연구원의 자율주행 실험 도시인 K-city에서 진행하였으며, 곡선구간과 커브구간을 적절히 혼합하여 주행하였다. 이동 측위 실험에서는 정적 측위 실험에서 발생한 오차를 사전에 보정하여 TDR 3000 위치 측정치의 정확도를 올리는 작업을 진행하였다. 실험에 사용한 경로는 Fig. 11과 같다. 빨간색 경로는 CPT 7으로 기록한 기준 경로를 나타내며, 파란색 경로는 진동 감쇄 장치를 장착하기 전의 통합 항법 시스템의 경로를 나타내고, 초록색 경로는 진동 감쇄 장치를 장착한 후의 경로를 나타낸다. 곡선 및 직선 경로에 대하여 진동 감쇄 장치를 장착한 후에 위치 오차가 줄어든 모습을 확인할 수 있다. Table 4와 Fig. 12는 진동 감쇄 장치 유무에 따른 통합 항법 시스템의 RMS 오차를 나타낸다. 진동 감쇄 장치를 장착하기 전보다 후에 위치 오차가 약 74%로 줄었으며, 속도 오차는 약 67% 수준으로 줄어들었다. 특히 자세 오차에서는 약 14%로 다른 항목에

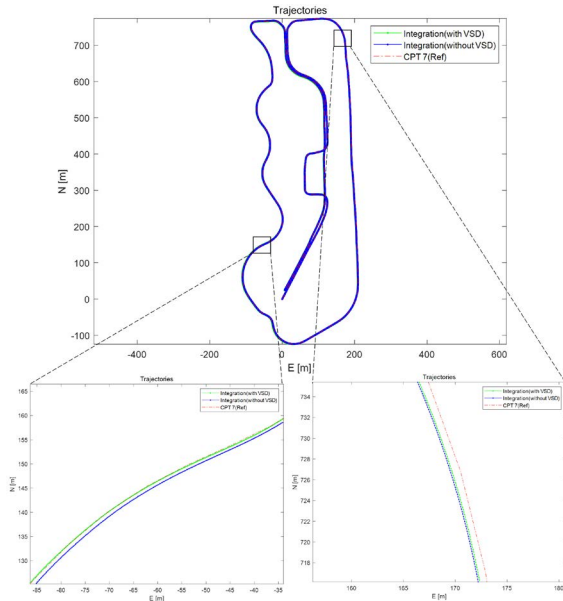


Fig. 11. Results of the GNSS/INS integrated navigation system.

Table 4. RMS error of the GNSS/INS integrated navigation system with/without VSD.

RMS error	axis	without	with
Position [m]	North	1.3980	0.6646
	East	0.6924	0.6654
	Down	0.9970	0.9882
Velocity [m/s]	North	0.2053	0.1041
	East	0.1778	0.1329
	Down	0.0703	0.0827
Attitude [deg]	Roll	6.3291	0.7321
	Pitch	5.2024	0.5428
	Yaw	9.9782	1.6033

비해 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 진동 감쇄 장치 성능 실험에서, 진동 감쇄 장치의 효과는 각속도계에서 효과가 뛰어난 것을 확인할 수 있으며, 이는 통합 항법 시스템 성능에서 자세 오차가 크게 줄어든 것을 통해서도 연결지어 확인할 수 있다. 이를 통해, 설계한 진동 감쇄 장치의 효과는 차량의 자세 결정에 큰 역할을 하는 것을 알 수 있으며, 자세의 변화가 큰 곡선 구간에서 직선 구간보다 큰 효과를 거두는 것을 알 수 있다.

4. CONCLUSION

본 논문에서는 약결합 방식의 GNSS/INS 통합 항법 시스템 구성에 있어서, IMU 측정치의 노이즈가 통합 항법 시스템의 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 특히, 엔진 자동차의 진동에 의한 영향을 알아보고 이를 줄이기 위하여 직접 설계한 진동 감쇄 장치를 소개하였다. IMU 센서의 측정치를 통해 진동 감쇄 장치의 성능을 실험하였으며, 차량의 엔진에 의한 진동이 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이렇게 줄어든 노이즈가 통합 항법 시스템의 미치는 영향을 분석하기 위하여 실제 차량과 센서를 이용하여 경로를 기록하고, 통합 항법 시스템을 구성하여 진동 감쇄 장

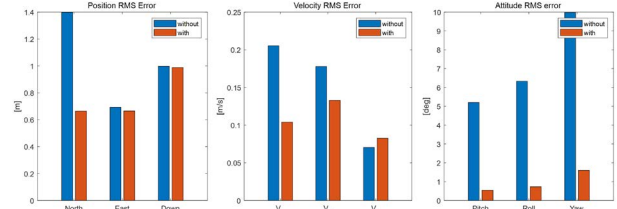


Fig. 12. RMS error of the GNSS/INS integrated navigation system with/without VSD.

치를 장착하기 전과 후를 비교하였다. 진동 감쇄 장치를 장착한 결과 위치, 속도, 자세 오차를 줄일 수 있었으며, 특히, 속도와 자세 부분에서 오차가 크게 감소하였다. 따라서 엔진 자동차 기반 자율주행 시스템용 통합 항법 시스템 구성 시 진동을 고려한 센서 장착은 필수적이다. 이와 같은 현상은 엔진 시동에 의한 진동 영향이 없는 전기차에서는 없을 것으로 판단된다.

APPENDIX

선형화된 INS의 오차모델은 식 (4-9)와 같다 (Titterton & Weston 2004).

$$\delta \dot{L} = \frac{R_{mm} \rho_e}{R_m + h} \delta L + \frac{\rho_e}{R_m + h} \delta h + \frac{1}{R_m + h} \delta v_n \quad (4)$$

$$\delta \dot{l} = \frac{\rho_n}{\cos L} \left(\tan L - \frac{R_{tt}}{R_t + h} \right) \delta L + \frac{\rho_n \sec L}{R_t + h} \delta h + \frac{\sec L}{R_t + h} \delta v_e \quad (5)$$

$$\delta \dot{h} = -\delta v_d \quad (6)$$

$$\delta \dot{v}^n = (C_b^n f^b) \times \phi^n + C_b^n \delta f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v^n - \delta g^n \quad (7)$$

$$\dot{\phi}^n = -\omega_{in}^n \times \phi^n + \delta \omega_{in}^n - C_b^n \delta \omega_{ib}^b \quad (8)$$

$$\delta f^b = B_A^b, \dot{B}_A^b = 0, \delta \omega_{ib}^b = B_G^b, \dot{B}_G^b = 0 \quad (9)$$

식 (4-9)를 이용하여 본 논문에서 구성한 칼만필터는 식 (10-21)과 같다. 여기서 x 는 15개의 오차 상태변수를 나타내고, F 는 시스템 행렬, H 는 측정 행렬을 나타내며, w 는 상태 잡음, v 는 측정 잡음이다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Fx + w \\ z &= Hx + v \end{aligned} \quad (10)$$

where

$$x = [\delta P \ \delta V^n \ \phi^n \ B_A^b \ B_G^b] \quad (11)$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & 0_{3 \times 3} & -C_b^n \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

with

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{R_{mm}\rho_e}{R_m + h} & 0 & \frac{\rho_e}{R_m + h} \\ \frac{\rho_n}{\cos L} \left(\tan L - \frac{R_{tt}}{R_t + h} \right) & 0 & -\frac{\rho_n}{\cos L(R_t + h)} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_m + h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos L(R_t + h)} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$F_{21} = \begin{bmatrix} \frac{R_{mm}\rho_e}{R_m + h} v_d - (\rho_n \sec^2 L + 2\Omega_n) v_e - \rho_n \rho_d R_{tt} & 0 & \frac{\rho_e}{R_m + h} v_d - \rho_n \rho_d \\ \left(2\Omega_n + \rho_n \sec^2 L + \frac{\rho_d R_{tt}}{R_t + h} \right) v_n - \left(\frac{\rho_n R_{tt}}{R_t + h} - 2\Omega_d \right) v_d & 0 & \frac{\rho_d}{R_t + h} v_n - \frac{\rho_n}{R_t + h} v_d \\ \rho_n^2 R_{tt} + \rho_e^2 R_{mm} - 2\Omega_d v_e & 0 & \rho_n^2 + \rho_e^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} \frac{v_d}{R_m + h} & 2\rho_d + 2\Omega_d & -\rho_e \\ -2\Omega_d - \rho_d & \frac{v_n \tan L + v_d}{R_t + h} & 2\Omega_n + \rho_n \\ 2\rho_e & -2\Omega_n - 2\rho_n & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$F_{23} = \begin{bmatrix} 0 & -f_d & f_e \\ f_d & 0 & -f_n \\ -f_e & f_n & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$F_{31} = \begin{bmatrix} \Omega_d - \frac{\rho_n R_{tt}}{R_t + h} & 0 & -\frac{\rho_n}{R_t + h} \\ -\frac{\rho_e R_{mm}}{R_m + h} & 0 & -\frac{\rho_e}{R_m + h} \\ -\Omega_n - \rho_n \sec^2 L - \frac{\rho_d R_{tt}}{R_t + h} & 0 & -\frac{\rho_d}{R_t + h} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$F_{32} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_t + h} & 0 \\ -\frac{1}{R_m + h} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\tan L}{R_t + h} & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$F_{33} = \begin{bmatrix} 0 & \Omega_d + \rho_d & -\rho_e \\ -\Omega_d - \rho_d & 0 & \Omega_n + \rho_n \\ \rho_e & -\Omega_n - \rho_n & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

and

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (21)$$

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2022년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021-0-01414, 현실-가상정보 융합형 엣지 기반 자율주행 시뮬레이션 SW 기술개발).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Park D. H. & Won, J. H. contributed to the design and implementation of the research, to the analysis of the results and to the writing of the manuscript. Conceptualization, Park D. H. and Won J. H.; methodology, Park D. H. and Won J. H.; software, Park D. H.; hardware, Ahn S. H.; validation, Park D. H. and Won J. H.; formal analysis, Park D. H. and Won J. H.; investigation, Park D. H.; resources, Park D. H. and Won J. H.; data curation, Park D. H.; writing—original draft preparation, Park D. H.; writing—review and editing, Park D. H. and Won J. H.; visualization, Park D. H.; supervision, Won J. H.; project administration, Won J. H.; funding acquisition, Won J. H.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

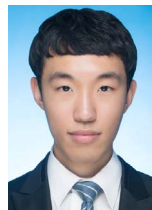
REFERENCES

- Bevly, D. M. & Cobb, S. 2009, GNSS for Vehicle Control (Boston, London: Artech House).
- Brown, R. G. & Hwang, P. Y. 1997, Introduction to random signals and applied Kalman filtering: with MATLAB exercises and solutions (Newyork: John Wiley & Sons, Inc.).
- Cheng, G., Zhang, Y., Lei, H., Zhang, P., Wang, S., et al. 2021, The Application of the Vibration Absorber in Laser Inertial Navigation Products, Journal of Sensors, 2021, Article ID 5539310. <https://doi.org/10.1155/2021/5539310>
- Dönmez, A. 2018, Nonlinear vibration isolation of inertial measurement unit, Master's thesis, Middle East Technical University.
- Falco, G., Pini, M., & Maruccio, G. 2017, Loose and tight GNSS/INS integrations: Comparison of performance assessed in real urban scenarios, Sensors, 17, 255. <https://doi.org/10.3390/s17020255>
- Gao, X., Luo, H., Ning, B., Zhao, F., Bao, L., et al. 2020, RL-AKF: An adaptive Kalman filter navigation algorithm based on reinforcement learning for ground vehicles, Remote Sensing, 12, 1704. <https://doi.org/10.3390/rs12111704>
- Han, K., Lee, S., Song, Y. J., Lee, H. B., Park, D. H., et al. 2021, Precise Positioning with Machine Learning based Kalman Filter using GNSS/IMU Measurements from Android Smartphone, In Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021), St.

- Louis, Missouri, Sep 20-24, 2021, pp.3094-3102.
- Hao, Y., Xu, A., Sui, X., & Wang, Y. 2018, A modified extended Kalman filter for a two-antenna GPS/INS vehicular navigation system, *Sensors*, 18, 3809. <https://doi.org/10.3390/s18113809>
- Jeon, G. J., Kim, M. S., Ahn, S. J., Jeong, W. B. & Yoo, W. S. 2010, Human Response to Idle Vibration of Passenger Vehicle Related to Seating Posture, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 20, 1121-1127. <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2010.20.10.1121>
- Kedadouche, M., Yulan, S., Liu, Z., Thomas, M., Charland-Arcand, G., et al. 2018, Design of a vibration isolator for the inertial navigation system of an autopilot dedicated to the operation of light drones, In 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), Budapest, Hungary, 10-13 July 2018, pp.73-78. <https://doi.org/10.1109/ICMAE.2018.8467662>
- Mendel, J. M. 1995, *Lessons in Estimation Theory for Signal Processing, Communications, and Control* (Hoboken, New Jersey: Prentice-Hall International).
- Misra, P. & Enge, P. 2006, *Global positioning system: Signals, Measurements, and Performance* (Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press)
- Schütz, A., Sánchez-Morales, D. E., & Pany, T. 2020, Precise positioning through a loosely-coupled sensor fusion of GNSS-RTK, INS and LiDAR for autonomous driving, In 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Portland, OR, USA, 20-23 April 2020, pp.219-225. <https://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9109934>
- Siouris, G. 1993, *Aerospace avionics systems: a modern synthesis* (Cambridge, MA: Academic Press)
- Titterton, D. H. & Weston, J. L. 2004, *Strapdown inertial navigation technology*, 2nd ed. (London: Institution of Electrical Engineers).
- Van Brummelen, J., O'Brien, M., Gruyer, D., & Najjaran, H. 2018, Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow, *Transportation research part C: emerging technologies*, 89, 384-406. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.012>
- Wang, D., Dong, Y., Li, Z., Li, Q., & Wu, J. 2020, Constrained MEMS-based GNSS/INS tightly coupled system with robust Kalman filter for accurate land vehicular navigation, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69, 5138-5148. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2955798>
- Wang, J., Liu, D., Jiang, W., & Lu, D. 2017, Evaluation on loosely and tightly coupled GNSS/INS vehicle navigation system, In 2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Verona, Italy, 11-15 Sept. 2017, pp.892-895. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2017.8065396>
- Wang, J. J., Ding, W., & Wang, J. 2007, Improving adaptive Kalman Filter in GPS/SDINS integration with neural network, in *Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007)*, Fort Worth Convention Center, Fort Worth, TX, September 25-28, 2007, pp.571-578.
- Yang, Y., El-Sheimy, N., Goodall, C., & Niu, X. 2007, IMU signal software simulator, In *Proceedings of the 2007 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, CA, Jan 22-24 2007, pp.532-538.



Dong-Hyuk Park is a M.S. student of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, Korea. He received B.S. degree from the same university in 2021. His research interests are autonomous driving, vehicle dynamics, GNSS/INS integration.



Sang-Hoon Ahn is M.S., Ph.D., Combined M.S./Ph.D. of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, Korea. He received B.S. degree from the same university in 2017. His research interests are autonomous driving.



Jong-Hoon Won received the Ph.D. degree in the Department of Control Engineering from Ajou University, Korea, in 2005. After then, he had worked with the Institute of Space Application at University Federal Armed Forces (UFAF) Munich, Germany. He was nominated as Head of GNSS Laboratory in 2011 at the same institute, and involved in lectures on advanced receiver technology at Technical University of Munich (TUM) since 2009. He is currently an associate professor of the Department of Electrical Engineering at Inha University. His research interests include GNSS signal design, receiver, navigation, target tracking systems and self-driving cars.