

A Survey on LEO-PNT Systems

Hong-Woo Seok, Sangjae Cho, Seung-Hyun Kong[†], Jung-Min Joo, Jongwon Lim



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A Survey on LEO-PNT Systems

Hong-Woo Seok¹, Sangjae Cho¹, Seung-Hyun Kong^{1†}, Jung-Min Joo², Jongwon Lim²

¹CCS Graduate School of Mobility, Korea Advanced Institute of Science & Technology, Daejeon 34051, South Korea

²KPS R&D Directorate, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, South Korea

ABSTRACT

Today, services using Positioning, Navigation, and Timing (PNT) technology are provided in various fields, such as smartphone Location-Based Service (LBS) and autonomous driving. Generally, outdoor positioning techniques depend on the Global Navigation Satellite System (GNSS), and the need for positioning techniques that guarantee positioning accuracy, availability, and continuity is emerging with advances in service. In particular, continuity is not guaranteed in urban canyons where it is challenging to secure visible satellites with standalone GNSS, and even if more than four satellites are visible, the positioning accuracy and stability are reduced due to multipath channels. Research using Low Earth Orbit (LEO) satellites is already underway to overcome these limitations. In this study, we conducted a trend analysis of LEO-PNT research, an LEO satellite-based navigation and augmentation system. Through comparison with GNSS, the differentiation of LEO-PNT was confirmed, and the system design and receiver processing were analyzed according to LEO-PNT classification. Lastly, the current status of LEO-PNT development by country and institution was confirmed.

Keywords: LEO, PNT, alternative-PNT, GNSS

1. 서론

오늘날 Location-Based Service (LBS), 자율주행, 통신 등 다양한 분야에서 Positioning, Navigation, Timing (PNT) 기술이 활용되고 있다. LBS와 자율주행 분야에서는 정확한 측위 정확도, 통신 분야에서는 정확한 시각동기를 필요로 하며, 공통적으로는 안정성과 연속성의 확보가 요구되고 있다. 일반적으로 활용되는 PNT 기술은 Global Navigation Satellite System (GNSS)에 의존적이며, GNSS는 도심 환경에서의 가용 위성 수 감소와 다중경로 오차로 인한 측위 정확도, 가용성, 그리고 연속성 확보에 어려움이 있다. 또한, GNSS는 전파 교란이 발생할 시 저가형 수신기에 서의 신호 탐지가 어렵다는 한계가 있다. 이러한 이유로 GNSS의 한계를 극복하기 위한 연구들이 진행되어 왔다.

GNSS 측위 정확도의 향상을 위하여 Real-time kinematic (RTK)를 시작으로, Precise Point Positioning (PPP), PPP-RTK와 같은 기술들이 개발됨에 따라 보정정보의 구성이 관측치에서 오차소별로 바뀌었다. 그 결과, 보정정보의 데이터 전송량 감소, 가용범위의 확대, 그리고 보정정보 생성에 필요한 기준국이 감소하였고, 현재 실시간성이 확보되어 QZSS Centimeter Level Augmentation Service (CLAS), Galileo High Accuracy Service (HAS)와 같은 공개 서비스 이용도 가능하다.

GNSS 공통 오차 보정 외에도 사용자 환경에 의하여 발생하는 오차 보정이 필요하다. 도심 환경에서의 인근 건물들에 의해 차폐되어 적은 가용 위성 수와 다중경로오차로 인하여 측위 정확도 및 안정성 확보에 어려움이 있다. 최신 GNSS 신호는 데이터와 파일럿 채널로 분리하여 송출하도록 설계되어 파일럿 신호의 획득 및 추적 시 상관 시간에 제약을 받지 않고, Signal-to-Noise Ratio (SNR)이 향상된다는 이점이 있다. 이러한 최신 GNSS 신호의 기술적 발전에도 불구하고, 도심 환경에서는 다수의 다중경로 채널에 의해 발생하는 다중경로오차를 완화하기 위하여 수신 기반과 인공지능 기반 연구들이 진행 중에 있다 (Miura et al. 2013, Hsu 2017, Cho et al. 2019, 2023). 또한, GNSS의 안정성을 위협하는 요인으로 스푸핑과 같은 전파 교란이 있으며, 이를 방지하기 위한 방식으로 GPS LIC의 Chips Message Robust Authentication (CHIMERA)와 Galileo EIB의 Open Service Navigation Message

Received Aug 19, 2023 Revised Aug 27, 2023 Accepted Sep 02, 2023

†Corresponding Author

E-mail: skong@kaist.ac.kr

Tel: +82-42-350-1265 Fax: +82-42-350-1250

Hong-Woo Seok <https://orcid.org/0000-0001-6265-8471>

Sangjae Cho <https://orcid.org/0000-0002-4836-9873>

Seung-Hyun Kong <https://orcid.org/0000-0002-4753-1998>

Jung-Min Joo <https://orcid.org/0000-0002-8256-7005>

Jongwon Lim <https://orcid.org/0009-0006-7115-6469>

Authentication (OSNMA)와 같은 Timed Efficient Stream Loss-tolerant Authentication (TESLA) 기반 신호 인증 기법이 적용되었으나, 특정 신호에 한하여 인증 기법이 적용되어 기존 신호들은 전파 교란 위협으로 독립하지 못하였다는 한계가 있다.

최근 GNSS의 한계를 극복하기 위하여, Low Earth Orbit (LEO) 위성을 활용한 GNSS 보강 및 대체 항법시스템인 LEO-PNT 개념 고안 및 동향 분석에 관한 연구들이 진행중에 있다 (Ferre et al. 2022). Reid et al. (2018)은 가용 위성 수, Dilution of Precision (DOP)와 같은 LEO 항법위성군 구성 제안 및 분석하였다. Iannucci & Humphreys (2020, 2022)은 LEO-PNT의 경제성 확보를 위하여 통신위성의 개조를 제안하였으며, Prol et al. (2022, 2023)은 PNT 목적 LEO 위성 개조 및 설계를 중점적으로 동향을 분석하였다. 본 연구에서는 우리는 기존 GNSS 단점을 보완하며, LEO 위성 활용 가능성을 확대하기 위한 LEO 위성 기반 항법 및 보강 시스템인 LEO-PNT의 동향 분석을 수행하였으며, LEO-PNT에 대한 주요 장점은 다음과 같다.

- LEO-PNT는 GNSS 대비 적은 제작 및 발사 비용으로 경제적이다.
- Ku/Ka 대역을 활용하여 L 대역 대비 넓은 대역폭 할당을 통한 다양한 변조기법을 적용하여 신호 성능을 개선할 수 있다.
- LEO 위성을 통하여 고위도 지역을 포함한 범지구적으로 이용이 가능하며, 통신 위성과 같이 양방향 통신 기반 신호 인증을 통해 안정성 확보가 가능하다.
- LEO 위성의 강한 동적 환경에 의한 도플러 효과 활용 및 빠른 위성 가시 환경 변화에 의한 다중경로오차 완화 등을 통하여 측위 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 GNSS와의 비교를 통해 LEO-PNT의 차별성을 확인하였고, 설계 및 기능 관점에서의 LEO-PNT를 분류하여 3장과 4장에서 각 설계 요소와 수신기 처리 과정에 대해 분석하였다. 5장에서는 국가 및 기관별 개발 현황에 대하여 기술하였다.

2. GNSS와 LEO-PNT 비교

항법 목적으로 설계된 GNSS는 대부분 Medium Earth Orbit (MEO) 위성을 기반으로 하며, Regional Navigation Satellite System 설계 시 Geostationary Orbit (GEO)/Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) 위성이 활용되고 있다. 하지만, 경제성 측면에서는 LEO 위성의 초기 설계 비용을 제외한 제작 및 발사 비용이 GNSS 대비 적어 (Liddle et al. 2020, EUSPA 2022), 동일 비용으로 100배 이상의 위성 수 발사가 가능하다는 이점이 있다 (Reid 2020).

설계 측면에서의 GNSS는 위성들의 높은 고도에서의 Free Space Path Loss (FSPL)로 인하여 사용자의 수신 최소 전력은 낮다는 한계가 있다. 또한, GNSS에서 주로 사용하는 주파수 대역인 L 대역의 포화 상태임에 따라 넓은 대역폭 할당이 어려우며, S 대역은 Wi-Fi와 같은 지상 장비와의 간섭이 발생하여 이용이 어렵다. 한정된 주파수 대역에서의 할당과 신호 간 간섭을 최소화

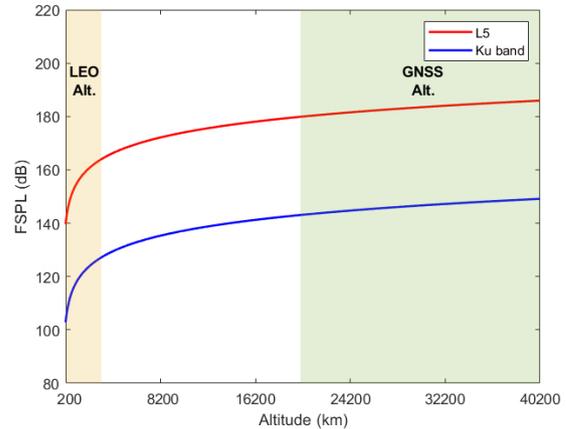


Fig. 1. FSPL by satellite orbiting at different altitudes.

Table 1. Classification of LEO-PNT by functional perspective.

	SoO	GNSS augmentation	Multi-tier LEO-PNT	Alternative LEO-PNT
Classification by design	SoO	Purposed built	Fused	Purposed built
LEO standalone	△	△	△	O
GNSS complementary	O	O	O	△

Table 2. Status of development of LEO-PNT by country and institution.

Country	Constellation	No. Sat	Altitude	Purpose
USA	Pulsar	< 300	1000 km	Alternative LEO-PNT
USA	Blackjack	-	-	Alternative LEO-PNT
EU	ESA LEO-PNT	-	-	Multi-tier LEO-PNT
Germany	Kepler	30	-	Alternative LEO-PNT
China	CentiSpace	132	975 km	GNSS augmentation
China	Geespace	240	-	Multi-tier LEO-PNT
China	SatNet	12,992	-	Multi-tier LEO-PNT

하기 위하여 Binary Offset Carrier (BOC), Stepped-Frequency BOC와 같은 변조기법들이 연구되고 있다. 하지만, LEO 위성을 활용한다면 GNSS와 동일 신호를 송출하여도 Fig. 1과 같이 FSPL의 감소에 따라 사용자의 최소 수신 전력은 20 dB 이상 개선된다 (Prol et al. 2022). 또한, L/S 대역이 아닌 Ku/Ka와 같은 새로운 대역에서 적은 간섭과 함께 넓은 대역폭을 할당하여 다양한 변조기법 적용이 가능하다는 이점이 있다.

LEO 위성을 활용한 변조기법의 다양화 및 수신 최소 전력 증가만으로 GNSS에서 주로 사용하는 Direct Sequence Spread Spectrum을 활용한 Code-Division Multiple Access에서 일부 협대역 재밍에는 강건성이 개선된다. 그러나, 군 신호와 달리 신호의 변조기법과 항법신호의 구조가 모두 공개되어 있는 민간 신호는 스푸핑에 취약하다는 한계가 있다. 최신 GNSS 신호는 항법 메시지를 이용한 신호 인증 기법이 적용되었음에도 단방향 통신 기반의 지연 인증 방식을 사용하기 때문에 서명 생성 및 검증 시간까지 시간이 소요되어 근본적인 해결책이라고 보기 어려우며, 이는 LEO 위성의 양방향 통신을 통해서 해결이 가능하다.

또한, 사용자 측면에서의 LEO 위성은 GNSS 대비 낮은 고도로 인한 특징인, 강한 동적 환경임에 따른 이점들이 존재한다. 도플러 효과가 크게 발생함에 따라 도플러 측위 시 빠른 수렴이 가능하며, 도심 환경에서 수분 이내의 관측이 끝나는 빠른 가시 환

Table 3. Comparison of LEO constellations (Kassas et al. 2023).

Parameter	Iridium NEXT	OneWeb	Orbcomm	Starlink
Bandwidth	31.5 kHz	230 MHz	4.8 kHz	240 MHz
Beacon length	90 ms	10 ms	1 s	4/3 ms
No. Sat	66	542	36	3,660
Modulation	QPSK	OFDM	QPSK	OFDM
Downlink frequency	1.616-1.626 GHz	10.7-12.7 GHz	137 MHz	10.7-12.7 GHz
No. Ch	240	8	2	8
No. beam	48	16	-	≈48
Altitude (km)	780	1,200	750	550

경 변화에 따라 다중경로오차는 균일 분포에 가까워진다 (Reid 2017). 또한, 관측치 간의 비상관성으로 인하여 모호정수와 대류권 기율기 추정 시 빠른 수렴이 가능하다 (Lawrence et al. 2017, Zhang et al. 2023).

위와 같은 특징으로 GNSS와 차별화된 LEO-PNT는 설계 관점에서, 기존 통신 위성을 활용하는 기회신호 항법 (Signal of Opportunity), 통신 위성 일부를 개조하는 융합 LEO-PNT (Fused LEO-PNT), PNT 목적으로 탑재체를 설계하는 목적 기반 LEO-PNT (Purposed built LEO-PNT)로 분류된다. 기능 관점에서 분류 시에는 Table 1과 같으며, ‘O’는 가능함을, ‘△’은 상황에 따라 가변적임을 의미한다. 기회신호 항법, LEO 위성 기반 GNSS 보강항법 (GNSS Augmentation), 다계층 LEO-PNT (Multi-tier LEO-PNT)은 단독항법이 가능하지 않은 시점들이 존재하므로 LEO 위성 기반 보강시스템에 해당하며, LEO 위성 기반 대체항법은 LEO 위성 기반 시스템에 해당한다. 본 논문에서는 설계 관점에 구분하여 기회신호 항법, 융합 및 목적 기반 LEO-PNT로 나누어 구성하였다. LEO-PNT 종류에 따른 국가 및 기관별 LEO-PNT 개발 현황은 Table 2와 같으며, 자세한 내용은 3-4장에서 설계 관점에서 분류한 LEO-PNT를 서술한 뒤 5장에서 다룬다.

3. SIGNAL OF OPPORTUNITY

LEO-PNT에서 가장 경제성이 있는 기법은 기존 LEO 통신위성의 신호를 활용하는 방식인 기회신호 항법이다. 기회신호 항법은 도심 환경이나 GNSS 이용이 불가한 일부 환경에서 일시적으로 대체 목적으로 이용이 가능하지만, GNSS와 같이 Time of Arrival (TOA)/Time Difference of Arrival (TDOA) 측위 기법이 이용이 불가하다. 또한, 제공되는 궤도 및 시계 정보와 위성 시각 동기 낮은 정확도로 인하여 (Prol et al. 2022), 항법 정확도, 안정성 및 연속성이 중요한 분야에서는 사용이 어렵다는 한계가 있다. 즉, 서비스의 주체인 위성통신 서비스 제공하는 측에서 공식적으로 PNT 서비스 및 신호 개조를 해야 해결이 가능한 문제이다. 현재 다양한 LEO 기반 통신 위성들이 있으나 기회신호 항법 활용 연구에서 주로 활용되는 위성군은 Iridium NEXT, OneWeb, Orbcomm, Starlink가 있다. 해당 위성군들은 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)이나 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) 변조기법을 사용하며, Starlink가 가장 낮은 고도에서 많은 위성 수로 운용되고 있다. 또한, Iridium NEXT만 GNSS와 동일한 L 대역을 사용하고 있으며, 위성군별 고도 및 신호에 대한 설명은 Table 3과 같다. 현재 운용중인 해당 위성군들

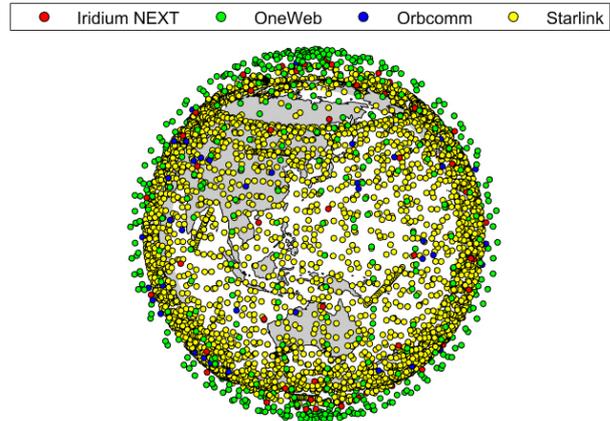


Fig. 2. Visualization of LEO satellites.

의 모든 위성 분포는 Fig. 2와 같으며, 범지구적으로 분포하여 극지방과 같은 고위도에서도 관측이 가능함을 확인하였다. 본 장에서는 기회신호 항법의 설계 요소와 수신기 처리 기법에 대해 살펴본다.

3.1 설계 요소

기회신호 항법은 기존 통신위성의 신호를 활용하기 때문에 항법을 위한 탑재체에 대한 설계가 필요하지 않으나, 정확한 위성 궤도 및 시계 정보 제공이 필요하다. GNSS는 위성 방송궤도력을 통해 궤도 및 시계 정보를 제공하지만, 기회신호 항법은 낮은 정확도의 Two-line Element Set (TLE)만 이용이 가능하다. 이에 따라, Li et al. (2019)과 Ge et al. (2022)은 지상에서 GNSS와 LEO 위성 신호 수신하여 진행되는 정밀 궤도 및 시계 모델링 기술을 고안하였고, 시뮬레이션 환경에서 검증하였다. Su et al. (2023)은 OFDM 사용 신호에서 항법 관측치를 계산하기 위한 기법 설계 및 성능을 분석하였다. 이외의 방식으로는 Satellite Laser Ranging (SLR)이 있지만, 장비 수량의 한계로 모든 LEO 위성에 대하여 SLR 기반 정밀궤도결정 시스템 구축 및 운용에는 어려움이 있다.

3.2 수신기 처리

기회신호 항법은 신호의 구조가 제공되지 않은 상태에서 신호 획득 및 추적을 통한 관측치 획득이 필요하다. 따라서, LEO 통신위성의 채널 특성과 같은 시변 변수가 알려지지 않은 상태로 진

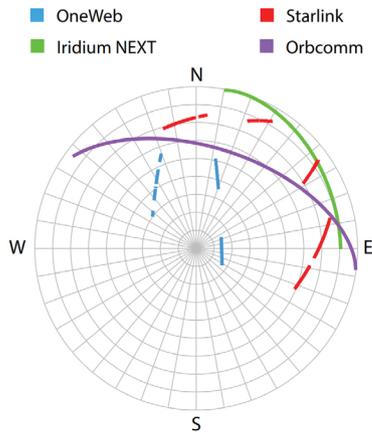


Fig. 3. Skyplot of LEO satellites during the experiment (Kassas et al. 2023).

행되기 때문에, 'Blind approach' 라고도 명명된다. Kozhaya et al. (2023)은 코드의사거리 및 반송파 위상의 변화, 도플러를 추적하는 프레임워크를 제안하였으며, 수신된 초기 신호의 스펙트럼 기준으로 수신 신호를 누적한 후 교차 상관을 통해 도플러를 추정하는 식으로 구성되어 있다. Khalife et al. (2021)은 TLE로부터 계산된 위성의 위치와 사용자의 속도를 이용해서 상대적으로 발생 가능한 추정되는 도플러와 수집 데이터에서의 신호 획득 및 추적 수행 결과와의 비교 및 검증하였다. Humphreys et al. (2023)은 Starlink 신호의 역추정을 통해 신호의 구조를 파악하여 항법에서의 가용성을 확인하였다.

또한, 통신 목적의 LEO 위성은 좁은 면적의 신호 도달 범위로 인하여, 사용자 인근에서 주로 1-2기만 관측되고, Starlink의 경우에도 빔포밍 특성과 40도 이상의 고도각일 시에만 가용하다는 점에서 실제 사용자 위치에서 4기 이상의 위성 관측이 보장되지 않는다. Fig. 3은 Kassas et al. (2023)에서 취득한 데이터에서 관측된 LEO 위성들의 스카이 플롯으로, 하나의 위성군만으로는 활용하는 단독 항법은 어려우며, 여러 위성군들을 활용해야 가용 위성 수가 항법이 가능하다. 즉, 통신위성을 활용 시에는 PNT의 연속성이 보장되지 않는다는 한계가 존재한다.

기회신호 항법에서는 주로 도플러 기반 항법 기술이 활용된다. 도플러 기반 항법은 의사거리 변화율의 축적치를 기반으로 진행되며, 초기 고안된 항법위성인 Transit와 GNSS에서도 활용되었으나, 위성의 높은 고도로 인하여 도플러 편이가 크지 않아 이용에 어려움이 있다. Khalife & Kassas (2019), Farhangian & Landry, Jr. (2020), Shi et al. (2023)과 Van Graas (2023)은 기회신호 항법을 활용한 Doppler 관측치만을 이용한 항법 알고리즘 고안 및 성능 평가를 진행하였다. 대부분의 연구들은 시뮬레이션 기반 연구들로 진행되었고, Jardak & Adam (2023)과 Kozhaya et al. (2023)은 실제 데이터를 취득해서 진행되었다. Kozhaya et al. (2023)은 여러 통신위성을 활용함에 따라 위성군별 수신 안테나를 사용하여 데이터 수집 및 처리한 결과, 최종 추정 좌표의 수평 정확도 6.5 m를 보였다. Benzerrouk et al. (2019), Kassas et al. (2019), Kozhaya et al. (2023)과 Kozhaya & Kassas (2022)은 도플러 기반 항법만으로는 측위 정확도 개선이 어려움이 있어 GNSS, 고도계, Inertial Measurement Unit 등의 센서와 융합하여 정확도

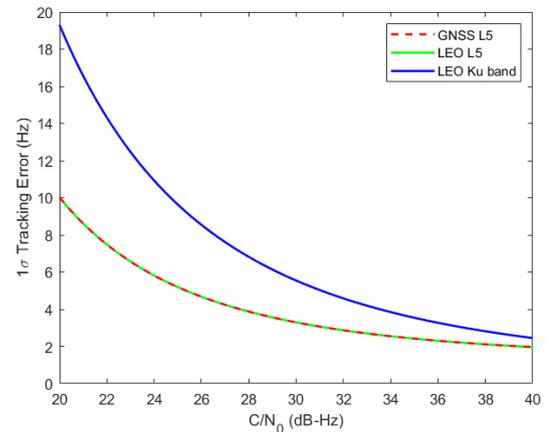


Fig. 4. Tracking error comparison.

를 개선하는 식으로 구성하고 있다. 측위 성능 평가 시 기존 연구들에서 2D, 3D Root Mean Square 오차 등 통일되지 않은 성능 지표를 사용하였으며, 데이터 수집 환경 및 장비도 제각기 다르기 때문에 정량적 성능 평가가 어렵다는 한계가 있다. 따라서 기회신호 항법은 대부분 초기 연구 단계로 GNSS 가용이 불가한 상황이나 보강항법 목적에 적합하다.

4. FUSED/PURPOSED BUILT LEO-PNT

Reid et al. (2018)과 ESA (2023)은 LEO-PNT 초기 개념을 고안하였으며, 위성의 가용성 확보와 수신신호의 품질 개선 측면에서 주로 분석을 진행하였다. 이후, Iannucci & Humphreys (2020, 2022)은 경제성을 개선한 기존 통신 위성과의 융합 LEO-PNT를 제안하였으며, 두 기법은 GNSS와의 독립성 측면에서 차이가 있다. 본 장에서는 현재까지 연구된 융합 및 목적 기반 LEO-PNT의 구성요소와 사용자 수신기에서의 처리과정에 대하여 다룬다.

4.1 설계 요소

융합 LEO-PNT는 위성용 GNSS 수신기를 사용하여 장비들이 충분히 발전해서 정확한 궤도 및 시계 추정이 가능하다 (Menzione & Paonni 2023). 단, 소형 원자 시계 등의 일부 하드웨어에 대해서는 개발이 필요하다는 단점이 있으며, 해당 장비들을 탑재하여도 융합 LEO-PNT는 GNSS 가용 불가 시 상대적으로 낮은 안정성으로 인하여 특정 시간 경과 이후 이용이 불가하다는 한계가 있다.

목적 기반 LEO-PNT는 융합 LEO-PNT와 달리 GNSS와 독립적으로 LEO-PNT만으로도 PNT가 가능하며, GNSS와의 상호운용성은 위성의 좌표 및 시간계를 설계하기에 따라 달라 상호운용이 불가할 수도 있다. GNSS와의 독립적인 운용을 위하여 GEO/MEO와 LEO로 구성된 다계층 LEO-PNT로 구성 후, 위성들 간의 Inter Satellite Link (ISL)로 통한 시각 동기 및 안정성 확보도 가능하다. 또한 두 기법 모두 공통적으로, GNSS 유사 신호 송출 시 해당 대역 신호 수신 및 송출에 의한 간섭에 대한 연구도 필요하다.

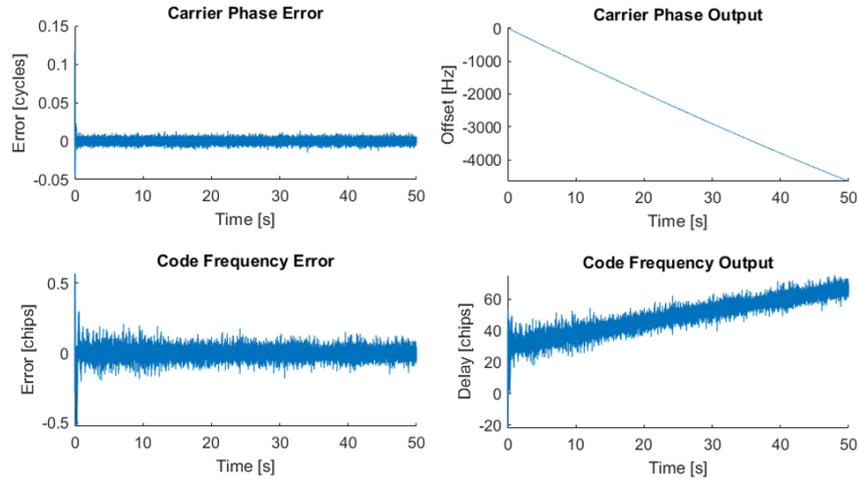


Fig. 5. Tracking result of simulated Pulsar (Miller et al. 2023).

4.2 수신기 처리

LEO-PNT에서 GNSS 유사 신호 활용할 시, 수신기의 펌웨어 업데이트만으로도 LEO 위성 이용이 가능하며, 수신 신호의 2차 반송파 추적에서 GNSS와의 차이가 미미하여 육안으로 확인되지 않는다. 반면, LEO 위성에서 주파수 대역이 증가한 다른 대역을 활용한다면, 8 GHz 이상의 대역 활용 기준으로 Fig. 4와 같이 추적 오차가 커진다는 문제가 있어 3차 반송파 추적을 고려하여야 한다 (Ries et al. 2023).

Miller et al. (2023)은 Xona Space Systems의 Pulsar와 GPS L1 신호처리가 가능한 Software Defined Receiver (SDR)을 개발하였다. 3차 반송파 추적을 고려하여 개발하였으며, Fig. 5는 3차 추적에서의 코드 주파수 오차로 대부분 0.2 chip 내의 오차를 보여 0.1 chip 이내의 정확도를 보이는 GNSS 대비 낮은 성능을 보였다. 또한, 시뮬레이션을 통한 검증은 수행하였으나, 신호 획득 및 추적에 대해서만 다루었고, 실제 측위 성능과 시뮬레이션을 통한 측위 성능에 대해서는 분석하지 않았다는 한계가 있다. 이외에도 Prol et al. (2023)은 LEO-PNT의 주파수 대역과 기존 시스템과의 상호운용에 따른 측위 성능을 확인하였으며, 도심 환경에서 높은 SNR과 다중경로오차에 상대적으로 강한 LEO 위성의 이점을 확인하였다. Ke et al. (2015)과 Prol et al. (2023)은 PPP 시 빠른 수렴이 가능하며, cm-급 측위 성능 확보도 가능함을 확인하였다.

5. 국가 및 기관별 개발 현황

융합 및 목적 기반 LEO-PNT는 기회신호 항법과 달리 주로 미국, 유럽, 중국에서 주도하여 연구가 되고 있다. 대부분 초기 단계에서는 목적 기반 LEO-PNT를 위하여 LEO 위성 기반 GNSS 보강항법을 시작으로, 이후 융합/목적 기반 LEO-PNT를 목표로 하고 있으며, 공통적으로 ISL과 양방향 통신의 활용을 고려하고 있다. 융합 LEO-PNT는 일반적으로 통신 신호와 GNSS 유사 신호 모두 송출하는 것을 목표로 설계한다.

LEO 위성 기반 GNSS 보강항법과 LEO 위성 기반 대체항법

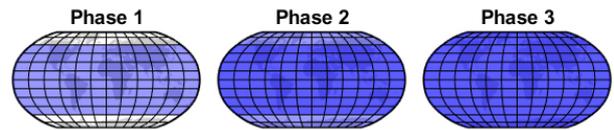


Fig. 6. Roadmap of Pulsar.

으로 구성되는 목적 기반 LEO-PNT는 MEO/GEO 위성을 통해 LEO 위성을 제어하거나 궤도 및 시각 결정에 활용하며, GNSS로부터의 독립 운용을 고려하는 경우에 한하여 MEO/GEO 위성도 설계 요소에 해당한다.

5.1 Pulsar

미국의 Xona Space Systems에서는 Pulsar라는 목적 기반 LEO-PNT를 개발을 목표로 하고 있다. GNSS와 달리 고위도를 모두 포함하는 범지구적인 커버리지를 목표로 하며, 단독 항법 시 cm-급 측위 정확도를 목표로 하고 있다 (Chan 2022). 1단계는 GNSS 유사 신호를 송출하는 식인 재방사 방식으로 구성하지만, 최종 목표는 LEO 위성들의 정밀궤도 및 시계 결정 시 GNSS 가용성과 무관하게 운영되는 것을 목표로 한다. Fig. 6은 개발 단계별 가용범위를 나타내며, 1단계 (Phase 1)에서는 GNSS와 유사하게 중위도 위주로 이용이 가능하며, 2-3단계 (Phase 2-3)에서는 고위도를 포함한 전지구적인 가용범위 확보할 것으로 설계되어 있다. 또한, 1단계에서는 정적 환경 사용자만 항법이 가능하며, 모바일 환경 사용자는 보정정보 수신만 가능하지만, 2-3단계에서는 저가의 소형 수신기를 사용하는 모바일 환경 사용자도 이용이 가능하다 (Reid et al. 2022). 현 개발 단계는 1단계 진행 중으로, 테스트 위성 발사 및 검증과 시뮬레이터 및 SDR을 개발중에 있다 (Miller et al. 2023, Xona Space Systems 2023).

5.2 Blackjack

미국의 Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)에서는 2018년 Blackjack 프로젝트를 시작하였으며,

Table 4. ESA mission classification (Secchi 2023).

Class type	I	II	III	IV	V
Criticality	Extremely high	High	Medium	Low	-
Mission objectives	Extremely high	High	Medium	Low	-
Cost	> 700 M€	200-700 M€	50-200 M€	1-50 M€	< 1 M€
Mission lifetime	> 10 years	5-10 years	2-5 years	1-2 years	1 year
Mission complexity	High	High to medium	Medium	Medium to low	Low

LEO 위성은 GEO 위성 단일 사용 시보다 탄력적이고 지속적인 신호 도달 범위 관리가 가능할 것을 기대하고 있다 (DARPA 2018). 또한, 잦은 교체 주기와 기술 업그레이드를 통해 저비용 고성능 탑재체를 확보하고, 군사적 유용성 입증 중에 있다.

최종적으로는 PNT 목적의 성능은 측위 정확도 0.01 m, 시각 정확도 0.1 ns를, PNT 신호의 data rate은 1 Mbps를 시작으로 1 Gbps를 목표로 기존의 광대역 위성통신의 위성군 설계까지 통합하여 LEO의 상업 부문 발전을 통한 경제성 확보를 목표로 한다 (DARPA 2018). Blackjack 프로젝트에서의 LEO 위성들은 위성간 광통신을 통해 연결이 되며, 유사 시 지상국이 파괴되는 등의 문제가 발생 시에도, 위성간 통신과 분산 의사결정을 통한 1일 이상 이용가능한 자율화와, 현존하는 GEO 위성들과 동일하거나 그 이상의 성능이 요구된다. 그리고 위성간 광통신에서의 메시 네트워크의 전송 계층에 대한 연구가 진행되고 있으며, 2023년 6월에 초기 위성 4기가 발사되어 약 500 km 궤도에서 테스트 중에 있다 (SpaceNews 2023a).

5.3 ESA LEO-PNT

ESA는 2016년 GNSS의 단점을 보완하기 위한 LEO 위성 활용 체계로 다계층 LEO-PNT를 고안하였다 (ESA 2023). 다계층 LEO-PNT는 ESA 임무 분류인 Table 4에서 분류 III-IV인 초기 개발 단계에 해당한다. 해당 분류에서는 2025년까지 위험성을 감안하여 적은 비용 및 작은 규모의 플랫폼을 구축한 뒤, 2026-2027년에 분류 III의 여러 탑재체 간 차이를 분석하고 대규모의 플랫폼을 운영하는 등 신뢰성 및 성능을 개선하고 실제 운용 중인 위성에 가깝게 진행할 계획으로 확인되었다 (Secchi 2023).

초기 임무는 위성 6-12기를 활용하여 위성 궤도 및 신호에 대한 성능 평가 및 검증 과정이 진행될 예정으로, (Ries et al. 2023)는 시뮬레이션을 통해 예상되는 측위 정확도를 확인하였다. 분류 III-IV에서는 L, S 대역 신호를 송출하고 양방향 통신을 지원하는 유형 1 위성, 즉 Radio Determination Satellite Service/Radio Navigation Satellite Service 항법 신호로 이용할 수 있도록 되어 있는 위성을 개발한다. 이후 단계인 분류 III에서는 UHF/C/Ka 대역 신호 송출 및 ISL를 지원하는 유형 2 위성, 즉, 광대역 통신 위성 혹은 IoT 목적으로 이용되는 대역의 신호에 대하여 진행한다. Fig. 7은 ESA LEO-PNT의 개념도로, GNSS 보강시스템 목적으로 LEO 위성을 활용하며, LEO 위성의 양방향 통신을 통한 GNSS 신호인증까지 설계되었음을 나타낸다.

5.4 Kepler

German Aerospace Center (DLR)과 German Research

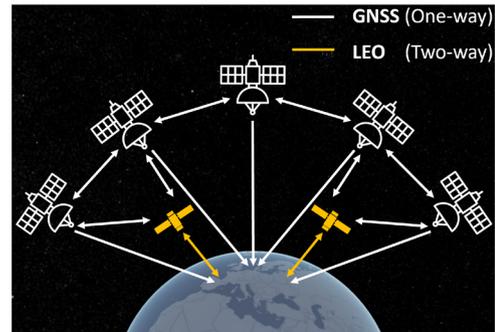


Fig. 7. ESA LEO-PNT concept.

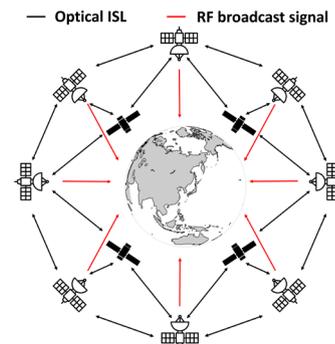


Fig. 8. Kepler concept.

Centre for Geosciences (GFZ Potsdam)에서는 ESA LEO-PNT와 달리 MEO와 LEO 위성 모두 설계하는 식으로 Purposed built LEO-PNT에 해당하는 Kepler 개발 중에 있다. Kepler는 장기안정시계로 구성된 GNSS와 달리 중기안정시계 사용을 가정하고 설계되었으며, 광학 시계 기반의 시각 동기화를 통한 시각 오프셋 제거와 Galileo의 궤도 슬롯을 재사용하는 식으로 구성되어 최종적으로 Kepler로 변경을 목표로 한다 (Günther 2020). Kepler는 MEO 위성, LEO 위성, 1개의 지상국으로 구성이 되며, 개념도는 Fig. 8과 같다. MEO 위성은 3개의 궤도면에 24개의 위성으로 구성하였으며, LEO 위성은 MEO 위성으로부터의 Radio Frequency (RF) 신호를 수신하여 코드의사거리 및 반송파위상 관측치의 계산하기 이전에 양방향 레이저 기반 광통신의 시각 동기화를 우선적으로 진행한다. 지상국은 위성 감시 목적이 아닌 Earth Orientation Parameters (EOP) 모니터링과 Coordinated Universal Time (UTC) 동기화 목적으로 활용된다.

5.5 CentiSpace

중국의 Beijing Future Navigation Technology에서 GNSS

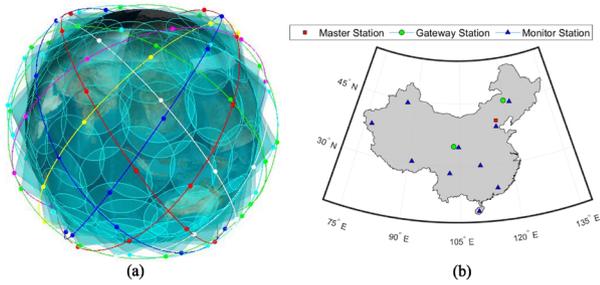


Fig. 9. Description of CentiSpace. (a) Constellation (Yang 2019), (b) Distribution of ground station.

Table 5. Signal description of CentiSpace.

Service name	Downlink frequency (MHz)	Bandwidth (MHz)	Modulation
L1D	1575.42	12.276	BPSK(2)
L5D	1176.45	12.276	BPSK(2)

Augmentation 목적으로 개발한 CentiSpace는 Fig. 9와 같이 12개의 궤도면과 고도 700 km의 120개 위성으로의 위커-델타 위성군 설계하였으며, 1개의 중앙처리국, 2개의 지상송신국, 10개의 지상감시국으로 구성되어 있다 (Yang 2019). 위성의 무게는 약 100 kg로 수명은 10년으로 설계하였으며, ISL이 탑재되어 있어, 중국 내 위치한 지상감시국에서 관측되지 않더라도 제어 가능하도록 설계하였다. 2016년 개발 착수하여 2018–2022년까지 총 6기의 실험 위성을 발사하여 실 궤도에서의 검증에 마쳤으며 (Chen et al. 2023), 2023년까지 110기까지 발사 및 위성군 최종 테스트를 목표로 하고 있다. 현재는 GNSS L1, L5 대역의 Binary Phase Shift Keying (BPSK) 변조기법을 사용한 재방사 방식을 채택하였으며, 송출 신호에 대한 요약은 Table 5와 같다.

5.6 Geespace

중국의 Geely 사에서 개발한 Geespace는 Fused LEO-PNT 기법으로 서비스를 하며, 센티미터급 보정정보 제공과 차량 관제 및 도시 관리 등의 연결성 확보를 목표로 한다. 위성은 전체 240기로 구성을 계획중에 있으며, Phase 1은 2025년까지 72기의 위성 발사, 나머지 위성은 Phase 2에서 진행 예정으로, 2026년 이후 중국 및 아시아 태평양 지역에서 우선 서비스를 진행할 계획이다.

5.7 SatNet

SatNet의 초기 중국의 기관이자 대형 프로젝트이며, 초기에는 Hongyan과 Hongyun로 구성하였다. Hongyan은 BeiDou의 GEO 위성 대비 1/10 신호 도달 범위를 가지도록 설계되어 있고, 경사각의 경우 BeiDou의 MEO와 GEO/IGSO가 각각 13.212°, 8.691°인 반면, 58°로 설계되었다. 이때, 임계고도각 10° 기준에서 전세계를 커버하기 위해서는 54개 이상의 위성이 필요하며, 4개 이상이 관측되기 위해서는 200개 이상의 위성 수가 필요하다. Hongyun의 경우, 10 Gbps 통신을 기반으로 하는 Fused LEO-PNT 목적으로 개발 단계이다. (Dongfang Hour 2023) 현재는 2개의 프로젝트를 ‘Guowang’이라는 프로젝트에 합하여 12,992개의 위성으로

구성하여 International Telecommunication Union (ITU)에 요청한 상황으로, China SatNet이라는 기관에 통합되어 진행중이다 (Dongfang Hour 2023, SpaceNews 2023b).

본 장에서는 항법위성체계를 보유하고 있는 국가 및 기관에서 LEO-PNT 개발 및 기술을 선도하고 있음을 확인하였다. 또한, 국가 및 기관별 LEO-PNT의 개발 목표 및 현황을 파악하였고, 개발을 시작하거나 실험 위성을 통한 재방사 방식 검증 및 성능 평가 등으로 확인되었다.

6. 결론

본 논문에서는 최근 대두되고 있는 LEO-PNT를 GNSS와의 비교, LEO-PNT 분류, 그리고 국가 및 기관별 LEO-PNT 개발 현황을 분석하였다. 이를 통해 LEO 위성 기반 PNT는 개념 정립 이후, SoO 기법 위주로 연구되었으며, 기관별 진행중인 LEO-PNT의 개발 요소는 공개되지 않아 개별적인 동향 분석을 수행하였다. 목적 기반 LEO-PNT는 GNSS 보강항법을 시작으로, LEO 위성 기반 대체항법으로의 발전 가능성을 확인하였고, 미국, 유럽, 중국에서 선도하며 개발 중에 있음을 확인하였다. Fused LEO-PNT에서도 초기 모델은 GNSS 보강항법을 채택하고 있으며, CentiSpace를 제외한 모든 경우에는 목적 기반 LEO-PNT를 목표로 한다는 점에서 아직까지 개발이 완료되지 않은 것으로 확인되며, 향후 LEO 기반 PNT 분야는 앞으로도 지속적으로 발전할 전망이다. 우리는 LEO-PNT의 설계 및 기능 관점에서의 분류, 기법별 설계 요소 및 수신기 처리과정에 관련하여 진행된 연구들에 대해 논의하였으며, 국가 및 기관별 개발 현황도 분석하여 대한민국의 LEO-PNT 기술 개발에 대한 필요성을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2021R1A2C3008370).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H.S. and S.C.; formal analysis, H.S. and S.C.; investigation, H.S.; writing—original draft preparation, H.S. and S.C.; writing—review and editing, H.S., S.C., J.J., and J.L.; supervision, S.K.; project administration, S.K.; funding acquisition, S.K.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Benzerrouk, H., Nguyen, Q., Xiaoxing, F., Amrhar, A., Nebylov, A. V., et al. 2019, Alternative PNT based on Iridium Next LEO satellites Doppler/INS integrated navigation system, In 2019 26th Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems (ICINS), Saint Petersburg, Russia, 27-29 May 2019, pp.1-10. <https://doi.org/10.23919/ICINS.2019.8769440>
- Chan, B. 2022, LEO PNT Constellation Progress & Technology Roadmap, In 2022 27th Space-Based Positioning, Navigation, and Timing National Advisory Board, 16-17 November 2022, Redondo Beach, California.
- Chen, L., Lv, F., Yang, Q., Xiong, T., Liu, Y., et al. 2023, Performance Evaluation of CentiSpace Navigation Augmentation Experiment Satellites, *Sensors*, 23, 5704. <https://doi.org/10.3390/s23125704>
- Cho, S., Seok, H. W., & Kong, S. H. 2023, MPCNet: GNSS Multipath Error Compensation Network via Multi-task learning, In 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Anchorage, Alaska, 4-7 June 2023, pp.1-6. <https://doi.org/10.1109/IV55152.2023.10186566>
- Cho, S. J., Kim, B. S., Kim, T. S., & Kong, S. H. 2019, Enhancing GNSS performance and detection of road crossing in urban area using deep learning, In 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), Auckland, New Zealand, 27-30 October 2019, pp.2115-2120. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2019.8917224>
- DARPA 2018, Broad Agency Announcement: Blackjack, Tactical Technology Office HR001118S0032
- Dongfang Hour, China's Ambitious Satellite Constellation Plan: Merging Hongyan and Hongyun into One Super-Constellation [Internet], cited 2023 Aug 26. available from: <https://dongfanghour.com/chinas-ambitious-satellite-constellation-plan-merging-hongyan-and-hongyun-into-one-super-constellation/>
- Ge, H., Li, B., Jia, S., Nie, L., Wu, T., et al. 2022, LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS): Progress, opportunities, and challenges, *Geo-spatial Information Science*, 25, 1-13. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1978277>
- ESA, LEO-PNT [Internet], cited 2023 Aug 17, available from: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2022/07/LEO_PNT
- EUSPA 2022, EO & GNSS Market Report
- Farhangian, F. & Landry, Jr, R. 2020, Multi-constellation software-defined receiver for Doppler positioning with LEO satellites, *Sensors*, 20, 5866. <https://doi.org/10.3390/s20205866>
- Ferre, R. M., Lohan, E. S., Kuusniemi, H., Praks, J., Kaasalainen, S., et al. 2022, Is LEO-based positioning with mega-constellations the answer for future equal access localization?, *IEEE Communications Magazine*, 60, 40-46. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2100841>
- Günther, C. 2020, The Kepler Satellite Navigation System, Stanford PNT-Symposium 2020, Stanford, California, 28 October 2020
- Hsu, L. T. 2017, GNSS multipath detection using a machine learning approach, In 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Yokohama, Japan, 16-19 October 2017, pp.1-6. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317700>
- Humphreys, T. E., Iannucci, P. A., Komodromos, Z. M., & Graff, A. M. 2023, Signal Structure of the Starlink Ku-Band Downlink, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (Early Access), pp.1-16. <https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3268610>
- Iannucci, P. A. & Humphreys, T. E. 2020, Economical Fused LEO GNSS, In 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Portland, Oregon, 20-23 April 2020, pp.426-443. <https://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9110140>
- Iannucci, P. A. & Humphreys, T. E. 2022, Fused low-Earth-orbit GNSS, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (Early Access), p.1. <https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3180000>
- Jardak, N. & Adam, R. 2023, Practical use of Starlink downlink tones for positioning, *Sensors*, 23, 3234. <https://doi.org/10.3390/s23063234>
- Kassas, Z., Morales, J., & Khalife, J. 2019, New-age satellite-based navigation STAN: simultaneous tracking and navigation with LEO satellite signals, *Inside GNSS Magazine*, 14, 56-65. <https://escholarship.org/uc/item/7c403919>
- Kassas, Z. M., Kozhaya, S., Kanj, H., Saroufim, J., Hayek, S. W., et al. 2023, Navigation with Multi-Constellation LEO Satellite Signals of Opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium, In 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 24-27 April 2023, pp.338-343. <https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10140066>
- Ke, M., Lv, J., Chang, J., Dai, W., Tong, K., et al. 2015, Integrating GPS and LEO to accelerate convergence time of precise point positioning, In 2015 international conference on wireless communications & signal processing (WCSP), Nanjing, China, 15-17 October 2015, pp.1-5. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2015.7341230>
- Khalife, J., Neinavaie, M., & Kassas, Z. M. 2021, The first carrier phase tracking and positioning results with Starlink LEO satellite signals, *IEEE Transactions on*

- Aerospace and Electronic Systems, 58, 1487-1491. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3113880>
- Khalife, J. J. & Kassas, Z. M. 2019, Receiver design for Doppler positioning with LEO satellites, In ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton, UK, 12-17 May 2019, pp.5506-5510. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8682554>
- Kozhaya, S., Kanj, H., & Kassas, Z. M. 2023, Multi-constellation blind beacon estimation, Doppler tracking, and opportunistic positioning with OneWeb, Starlink, Iridium NEXT, and Orbcomm LEO satellites, In 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 24-27 April 2023, pp.1184-1195. <https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10139969>
- Kozhaya, S. E. & Kassas, Z. M. 2022, Blind receiver for LEO beacon estimation with application to UAV carrier phase differential navigation, In Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022), Denver, Colorado, 19-23 September 2022, pp.2385-2397. <https://doi.org/10.33012/2022.18582>
- Lawrence, D., Cobb, H. S., Gutt, G., O'Connor, M., Reid, T. G., et al. 2017, Navigation from LEO, GPS World, pp.42-48. https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/papers/Lawrence_GPSWorld_July2017.pdf
- Li, B., Ge, H., Ge, M., Nie, L., Shen, Y., et al. 2019, LEO enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS) for real-time precise positioning services, Advances in Space Research, 63, 73-93. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.017>
- Liddle, J. D., Holt, A. P., Jason, S. J., O'Donnell, K. A., & Stevens, E. J. 2020, Space science with CubeSats and nanosatellites, Nature Astronomy, 4, 1026-1030. <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01247-2>
- Menzione, F. & Paonni, M. 2023, LEO-PNT Mega-Constellations: a New Design Driver for the Next Generation MEO GNSS Space Service Volume and Spaceborne Receivers, In 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 24-27 April 2023, pp.1196-1207. <https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10140052>
- Miller, N. S., Koza, J. T., Morgan, S. C., Martin, S. M., Neish, A., et al. 2023, SNAP: A Xona Space Systems and GPS Software-Defined Receiver, In 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 24-27 April 2023, pp.897-904. <https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10139956>
- Miura, S., Hisaka, S., & Kamijo, S. 2013, GPS multipath detection and rectification using 3D maps, In 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), The Hague, Netherlands, 6-9 October 2013, pp.1528-1534. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728447>
- Prol, F. S., Ferre, R. M., Saleem, Z., Välisuo, P., Pinell, C., et al. 2022, Position, navigation, and timing (PNT) through low earth orbit (LEO) satellites: A survey on current status, challenges, and opportunities, IEEE Access, 10, 83971-84002. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3194050>
- Prol, F. S., Kaasalainen, S., Lohan, E. S., Bhuiyan, M. Z. H., Praks, J., et al. 2023, Simulations using LEO-PNT Systems: A Brief Survey, In 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 24-27 April 2023, pp.381-387. <https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10140118>
- Reid, T. 2017, Orbital Diversity for Global Navigation Satellite Systems, PhD Dissertation, Stanford University.
- Reid, T. 2020, Commercial LEO PNT for Autonomy, 14th Annual SCPNT Symposium, Stanford, California, 27-28 October 2020.
- Reid, T., Banville, S., Chan, B., Gunning, K., Manning, B., et al. 2022, PULSAR: A New Generation of Commercial Satellite Navigation, In Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022), Denver, Colorado, 19-23 September 2022.
- Reid, T. G., Neish, A. M., Walter, T., & Enge, P. K. 2018, Broad-band LEO constellations for navigation, NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 65, 205-220. <https://doi.org/10.1002/navi.234>
- Ries, L., Limon, M. C., Grec, F. C., Anghileri, M., Prieto-Cerdeira, R., et al. 2023, LEO-PNT for Augmenting Europe's Space-based PNT Capabilities, In 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 24-27 April 2023, pp. 329-337. <https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10139999>
- Secchi, P. 2023, I nuovi Programmi della Navigazione Europea e l'approccio New Space nella Qualità, La QUALITÀ nell'AEROSPACE, Turin, Italy, 4-5 May 2023.
- Shi, C., Zhang, Y., & Li, Z. 2023, Revisiting Doppler positioning performance with LEO satellites, GPS Solutions, 27, 126. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01466-w>
- SpaceNews, DARPA downsizes Blackjack space experiment [Internet], cited 2023a Aug 26. available from: <https://spacenews.com/darpa-downsizes-blackjack-space-experiment/>
- SpaceNews, The coming Chinese megaconstellation revolution [Internet], cited 2023b Aug 28. available from: <https://spacenews.com/the-coming-chinese-megaconstellation-revolution/>
- Su, J., Su, J., Yi, Q., Wu, C., & Hou, W. 2023, Design and performance evaluation of a novel ranging signal based on an LEO satellite communication constellation, Geo-

spatial Information Science, 26, 107-124. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2121229>

Van Graas, F. 2023, Doppler Processing for Satellite Navigation, In 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 24-27 April 2023, pp.365-371. <https://doi.org/10.1109/PLANS53410.2023.10140011>

Xona Space Systems, Xona Broadcasts Demo PNT Signals from Low Earth Orbit [Internet], cited 2023 Aug 26. available from: <https://www.xonaspace.com/xonademospntsignals>

Yang, L. 2019, The Centispace-1: A leo satellite-based augmentation system, In 14th Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems, Bengaluru, India, 8-13 December 2019. https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2019/icg14/WGB/icg14_wgb_S5_4.pdf

Zhang, P., Ding, W., Qu, X., & Yuan, Y. 2023, Simulation analysis of LEO constellation augmented GNSS (LeGNSS) zenith troposphere delay and gradients estimation, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 61, 1-12. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3241956>



Hong-Woo Seok is a M.S. Student in the Autonomous Vehicles and Robotics Laboratory at Korea Advanced Institute of Science & Technology. He received a B.S. in Geoinformatic Engineering from Inha University, Incheon, South Korea. His research interests currently include GNSS signal processing, GNSS precise positioning, and multi-sensor navigation.



Sangjae Cho received the B.S. degree in Department of Energy and Electrical Engineering from Korea Polytechnic University, Korea, in 2018 and M.S. degree in CCS Graduate School of Mobility from KAIST where he is currently pursuing the Ph.D. degree. His research interests include GNSS, Signal processing, Deep learning, Autonomous vehicle, and Wireless communication.



Seung-Hyun Kong is an Associate Professor in the CCS Graduate School of Green Transportation of Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), where he has been a faculty member since 2010. He received a B.S. degree in Electronics Engineering from Sogang University, Seoul, Korea, in 1992, an M.S. degree in Electrical and Computer

Engineering from Polytechnic University (merged to NYU), New York, in 1994, a Ph.D. degree in Aeronautics and Astronautics from Stanford University, Palo Alto, in 2005. From 1997 to 2004 and from 2006 to 2010, he was with companies including Samsung Electronics (Telecommunication Research Center), Korea, and Qualcomm (Corporate R&D Department), San Diego, USA for advanced technology R&D in mobile communication systems, wireless positioning, and assisted GNSS. Since he joined KAIST as a faculty member in 2010, he has been working on various R&D projects in advanced intelligent transportation systems, such as robust GNSS-based navigation for urban environment, deep learning and reinforcement learning algorithms for autonomous vehicles, sensor fusion, and vehicular communication systems (V2X). He has authored more than 100 papers in peer-reviewed journals and conference proceedings and 12 patents, and his research group won the President Award (of Korea) in the 2018 international student autonomous driving competition host by the Korean government. He has served as an associate editor of IEEE T-ITS and IEEE Access, an editor of IET-RSN and the lead guest editor of the IEEE T-ITS special issue on "ITS empowered by AI technologies" and the IEEE Access special section on "GNSS, Localization, and Navigation Technologies". He has served as the program chair of IPNT from 2017 to 2019 in Korea, as a program co-chair of IEEE ITSC2019, New Zealand, and general chair of IEEE IV 2024, Korea.



Jung-Min Joo received Ph.D. degree in Aerospace Engineering from Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 2015. He has been working at the Korea Aerospace Research Institute since 2004. His research interests include GNSS, SBAS, GBAS, and Ionosphere monitoring.



Jongwon Lim received the M.S. in Industrial & Systems Engineering from Korea Advanced Institute of Science & Technology in 2012, and the Ph.D. in Industrial Engineering from Hannam University in 2021. From 2017 to 2021, he was with Agency for Defense Development, and he joined Korea Aerospace Research Institute in 2022.