

중계 기반 항법시스템에서 위치정확도 향상을 위한 가상 기준점 활용 측위 알고리즘

이 규 만*, 임 재 성^o

A Positioning Algorithm Using Virtual Reference for Accuracy Improvement in Relay-Based Navigation System

Kyuman Lee*, Jaesung Lim^o

요 약

본 논문은 통신 중계를 활용한 항법시스템에서 위치정확도 향상을 위한 측위 알고리즘을 제안한다. 중계 기반 항법시스템은 측위의 기준점이 되는 구성요소들이 한쪽 방향으로 분포하며 삼각측량법에 의해 위치가 계산되므로 시스템의 구조적 특성에 의한 수직오차가 수평오차에 비해 상대적으로 크게 발생한다. 제안하는 가상 기준점을 활용한 측위 알고리즘에서는 항법메시지로부터 송신한 기준국의 위치와 기 추정된 사용자의 위치를 기준으로 새로운 가상의 기준점을 생성하고 이를 활용해 사용자의 위치를 재추정한다. 가상의 기준점은 기 추정된 사용자의 위치로부터 거리가 가장 인접한 기준국을 선택함으로써 기하학적 요인에 의한 영향을 최소화하도록 하였다. 이를 통해 기준점들의 방향을 공중 및 지상으로 다원화함으로써 기하학적 요인에 의한 수직오차를 감소시켰으며, 기존 중계 기반의 항법시스템보다 정확한 위치추정이 가능하다. 본 논문에서는 모의실험을 통해 사용자의 위치정확도가 향상됨을 확인하였다.

Key Words : Virtual Reference, Relay-based, Positioning scheme, Pseudolite, Alternative GNSS

ABSTRACT

In this paper, we propose a new positioning scheme for accuracy improvement of Relay-based Navigation System. The conventional relay-based system occurs larger vertical error than horizontal one due to structural characteristics that positioning references are located toward same direction and a location of user is estimated by triangulation technique. In the proposed positioning scheme, the user position is reestimated using an additional virtual reference which is generated based on position information of reference stations in navigation signals and estimated initial user position. The nearest reference station from the estimated user position is selected as a virtual reference to minimize the effect of geometrical factor. The vertical error decreases by using reference points on multi planes, therefore, accurate positioning is possible than the conventional scheme. We demonstrated that the accuracy of a user is improved through simulation results.

* This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. 2013R1A2A1A01016423).

• First Author : Department of Computer Engineering, Ajou University, mool717@ajou.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Department of Computer Engineering, Ajou University, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2015-06-008, Received June 30, 2015; Revised October 8, 2015; Accepted October 8, 2015

I. 서 론

GPS(Global Positioning System)로 대표되는 GNSS(Global Navigation Satellite System)는 수십 개의 위성을 이용하여 전 세계의 모든 지역에 언제든지 위치정보 뿐만 아니라 속도와 시각동기(PNT: Positioning, Navigation and Timing)를 제공하는 위성항법시스템이다. GNSS는 소수의 위성으로 넓은 지역의 대규모 사용자에게 동일한 정보를 제공할 수 있는 광역성을 지니며, 위성이 대기권 밖의 우주상에 위치하고 있어 재난이나 기상 영향의 영향을 받지 않고 연속적으로 서비스가 가능하다. 또한 단말과 위성 간의 가시성(LOS: Line of Sight)을 보장하기 쉽다. 이러한 장점은 GNSS가 교통, 물류, 측지측량, 농업, 레저, 국방 등의 산업에 폭넓게 이용될 뿐만 아니라 이동통신망, 전력망, 금융망 등 국가 기간망에서도 활용되는 계기가 되었다. 최근 GPS를 내장한 스마트폰의 보급 확대에 따라 위치기반서비스 산업이 성장하면서 GNSS의 활용도는 더욱더 확대되고 있다^[1,2].

하지만 GNSS는 약 2만 km 고도의 위성에서 낮은 출력(GPS의 경우 25W)으로 항법신호를 송출하므로 지상에서 수신된 신호 크기는 매우 작다^[3]. 따라서 실내, 지하, 도심지역 등에서 신호를 수신하기 어려우며 주변 간섭 또는 전파교란에 의한 영향을 받기 쉽다. 유럽연합에서는 GNSS를 사용할 수 없을 경우 이를 동안 약 10억 유로의 경제적 손실이 발생할 것으로 예상했다. 이에 따라 사회의 각 분야에서 중추적인 인프라로써 자리매김하고 있는 GNSS를 대체 또는 백업하기 위한 항법시스템의 개발이 중요한 이슈로 제기되었으며 많은 연구들이 진행되어 왔다^[4].

GNSS 위성과 유사한 항법신호를 송신할 수 있는 의사위성을 활용한 항법시스템은 대표적인 GNSS의 대안으로 제안되었다. GNSS는 시스템을 구축하는데 높은 기술력이 필요할 뿐만 아니라 상당한 비용 및 시간이 소요되기 때문에 비교적 저렴하고 활용성 면에서 뛰어난 의사위성을 활용한 독립 항법시스템들이 주목받아왔다. 하지만 의사위성이 지상에 위치할 경우 기하학적 제약이 발생하며 이를 해결하기 위해 제안된 공중기반 의사위성 시스템은 정확한 측위를 위해 의사위성 위치의 실시간적 모니터링이 필요하다^[4-10]. 최근에는 공중 중계국의 통신 능력을 활용한 중계 기반의 항법시스템이 제안되었다. 중계 기반의 항법시스템은 지상에서 송신된 항법신호를 공중 중계국을 통해 사용자에게 전달하고 중계된 신호를 활용해 중계국과 사용자의 위치를 동시에 결정하는 방안을 사용함

으로써 기존 의사위성 시스템에서 발생하는 다중경로, 모니터링 지연에 의한 오차 등을 해결하였다^[11]. 하지만 사용자의 위치가 공중 중계국을 기준으로 결정됨에 따라 기존 항법시스템과 마찬가지로 수직오차가 수평오차에 비해 크게 발생된다.

본 논문에서는 중계 기반 항법시스템의 정확도 향상을 위한 새로운 측위 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 측위 알고리즘은 항법메시지에 포함된 기준국의 정보와 기 추정된 사용자의 위치를 활용하여 가상의 측위 기준점을 추가적으로 생성하고 이를 활용해 사용자의 위치를 재추정하도록 하였다. 이를 통해 기존 중계 기반 항법시스템의 사용자 위치 추정 시 항법시스템의 구조 및 측위 기법으로 인해 오차가 수직 방향으로 커지는 문제점을 보완하였다. 제안된 측위 알고리즘의 성능 검증을 위해 항법시스템의 오차 요소를 식별하고 실제 환경을 고려한 모의실험을 수행하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 II장에서는 현재까지 연구된 GNSS 대체 연구들에 대해 살펴보고, III장에서는 중계 기반 항법시스템의 정확도 향상을 위해 제안된 측위 알고리즘의 절차를 기술하였다. IV장에서는 제안하는 알고리즘의 성능 평가를 위한 모의실험 환경 및 오차 모델에 대해 기술하고 모의실험 결과를 분석하였으며, 마지막으로 V장에서 결론을 맺었다.

II. GNSS 대체 항법시스템

본 장에서는 기존에 연구된 GNSS 대체 항법시스템들에 대해서 기술한다. 의사위성은 GNSS 위성과 같이 유사 GNSS 신호를 생성 및 송신할 수 있어 가장 강력한 GNSS의 대안으로 주목받았으며, 최근에는 의사위성 시스템의 단점을 보완한 통신 중계를 활용한 지역항법시스템이 연구되었다.

2.1 의사위성 기반 항법시스템

의사위성은 본래 항공기 정밀 접안, 실내 측위 등에 위치 정확도 향상을 위한 여분의 신호를 제공하는 목적으로 사용되었으나, GNSS 위협의 증가 및 서비스 제한 등의 문제로 인해 대안 시스템 개발 요구가 증가함에 따라 독립 항법시스템 개발을 위해 이용되었다. 지상 기반의 의사위성 항법시스템은 타워, 산 정상, 실내 등에 다수의 의사위성을 배치하고 이로부터 항법신호를 제공하는 독립 항법시스템이다. 설계자가 의사위성을 원하는 위치에 탑재하기 쉬운 뿐만 아니라 유지보수가 편리하고 크기에도 제약이 심하지 않아

많은 연구가 지상기반으로 진행되었다^[4-6]. Locata는 이러한 지상기반 시스템의 대표적인 예로 지상에 localite라는 양방향 통신이 가능한 의사위성을 탑재하여 GNSS 신호가 수신되지 않는 음영지역에서 대체 또는 백업 시스템으로 사용하도록 개발되었다^[7]. 하지만 이러한 지상기반의 시스템들은 모든 의사위성이 지상에 위치하는 기하학적 특성에 의해 수신기의 고도를 정확히 추정하기 어려우며 신호의 다중경로 전파에 의한 영향을 받는다. 또한 의사위성 신호 간의 간섭을 피하기 위해 신호의 송신 전력이 제한되므로 넓은 지역에 서비스를 제공하기 어렵다.

지상 기반의 시스템과 더불어 다른 축으로 공중 기반의 의사위성 항법시스템도 연구되었다. 공중 기반 시스템은 항공기, 헬리콥터, 무인기, 성층권 비행선과 같은 공중 플랫폼에 의사위성을 탑재하여 항법신호를 제공하는 항법시스템이다. 의사위성이 공중에 위치하므로 지상 기반 시스템보다 서비스를 제공할 수 있는 지역이 넓으며 수신기와 의사위성 간 가시성이 보장되기 쉬워 다중경로 전파에 의한 영향이 적다^[8-10]. [8-9]에서는 위성보다 상대적으로 낮은 고도인 20~30 km에 위치하고 있어 신호 전송 지연 및 소실이 적고 자유롭게 이동할 수 있는 유연성과 고장 시 수리하여 재사용할 수 있는 장점을 가진 성층권 비행선을 이용한 대체 시스템 연구가 진행되었다. 하지만 공중 기반의 항법시스템은 지상 기반 시스템과 달리 의사위성을 탑재한 플랫폼이 이동성을 가지기 때문에 정확한

항법서비스를 위해서는 의사위성의 위치를 실시간적으로 모니터링 해야 한다^[10].

의사위성을 탑재한 공중 플랫폼의 위치 모니터링 방법에는 IGPS (Inverted Global Positioning System) 방법과 트랜시버 방법이 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 IGPS 방법은 위치가 알려진 지상 수신기를 이용하는 방법으로, 지상 수신기는 지상의 조정국에 자신의 위치와 의사위성으로부터 측정한 정보를 전송한다. 조정국은 수집된 의사위성과 지상 수신기 사이의 의사거리 정보를 이용하여 의사위성의 위치를 추정한다. 반면 GNSS 수신기와 의사위성의 기능을 결합한 트랜시버를 활용하는 방법은 의사위성 간 신호 교환을 통해 시각 동기 및 거리 정보를 획득하여 의사위성 간의 상대적 위치를 결정한다. 따라서 의사위성 위치추정을 위한 모니터링 시간이 소요되므로 공중 플랫폼이 빠르게 움직이는 환경에서는 모니터링 동안의 의사위성 위치 변화에 따른 오차가 발생하게 된다^[10].

2.2 우주항공노드 중계기반 항법시스템

최근에는 의사위성 항법시스템의 문제를 해결하기 위해 통신 중계를 활용한 항법시스템이 제안되었다. 중계 기반의 항법시스템은 지상 기반 의사위성 항법시스템과 같이 지상에 기준국을 위치시키는 지상 기반의 지역항법시스템으로 그림 2와 같이 중심국, 기준국, 중계국, 수신기로 구성된다^[11].

중심국은 전체 시스템을 관리하는 중앙 센터로 원자시계를 탑재하고 있어 시스템 시간의 절대적인 기준이 되며, 각 기준국과 지속적으로 메시지를 교환하여 시각동기를 유지시킨다. 또한 중심국은 중계국으로부터 수신된 신호를 이용하여 보정 정보를 생성한다.

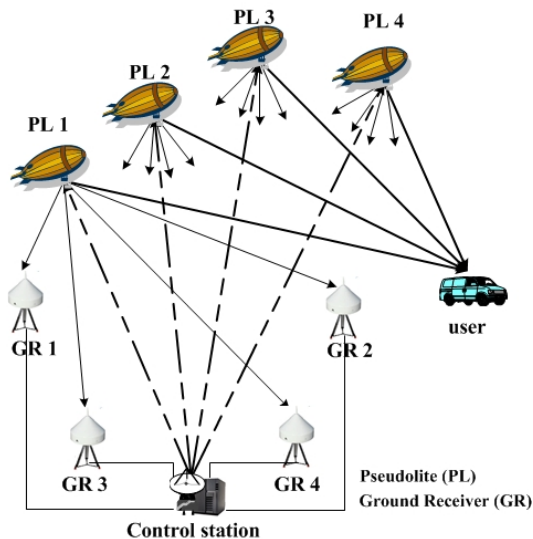


그림 1. IGPS 기법 기반의 공중 의사위성 항법시스템
Fig. 1. Airborne-based pseudolite positioning system based on the IGPS method

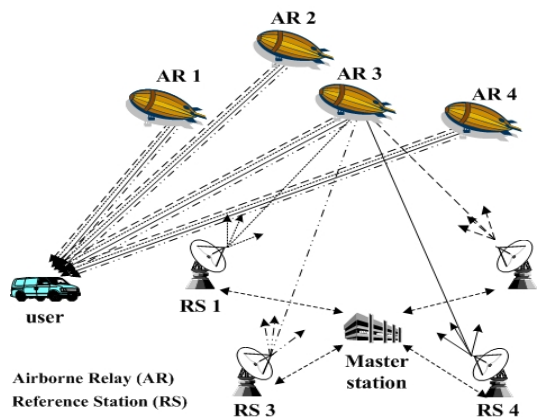


그림 2. 중계 기반 항법시스템의 구성도
Fig. 2. Configuration of the relay-based positioning system

기준국은 의사위성 및 GNSS 위성과 같이 정확하게 알려진 위치와 시간정보를 바탕으로 항법신호를 생성한다. 모든 기준국은 중심국을 기준으로 서로 동기화되며 주기적으로 항법신호를 방송한다. 중계국은 기존 지상 기반의 시스템에서는 볼 수 없었던 구성요소로 bent-pipe 위성처럼 기준국으로부터 수신한 항법신호를 다른 주파수를 통해 즉시 중계하는 역할을 한다¹²⁾. 마지막으로 수신기는 공중 의사위성 항법시스템과는 달리 2단계의 측위 알고리즘을 사용하여 중계국의 위치와 수신기 자신의 위치를 동시에 추정한다.

중계 기반 항법시스템은 중심국에 의해 시차동기화된 기준국으로부터 항법신호가 송신되며 중계국은 이를 사용자에게 중계한다. 사용자는 중계된 항법신호를 이용해 위치를 추정하게 되는데 1단계에서는 중계신호의 수신시간차를 이용하는 TDOA(Time Difference of Arrival) 기법을 통해 중계국의 위치를 추정하며, 2단계에서는 추정된 중계국의 위치와 타임스탬프를 이용하여 TOA(Time of Arrival) 기법을 통해 자신의 위치를 결정한다. 중계 기반 항법시스템은 공중에 위치한 중계국을 활용하므로 다중경로 및 기하학적 요인에 의한 영향을 적게 받는다. 또한 2단계의 측위 알고리즘을 통해 연속적으로 중계국과 수신기의 위치를 결정하기 때문에 공중기반 의사위성 시스템에서 발생하는 모니터링 지연에 의한 오차가 발생되지 않는다. 하지만 기존 항법시스템과 마찬가지로 사용자의 위치가 공중의 중계국을 기준으로 결정되는 시스템의 구조 및 측위 기법의 특성상 수직오차가 수평오차보다 크게 발생된다.

III. 중계 기반 항법시스템의 정확도 향상을 위한 측위 알고리즘 제안

3.1 제안하는 위치정확도 향상 측위 알고리즘

본 장에서는 중계 기반 항법시스템의 위치 정확도 향상을 위해 제안된 측위 알고리즘에 대해서 기술한다. 기존 중계기반 측위 알고리즘에서 사용자의 위치는 한 방향으로 배치된 공중 중계국을 기준으로 위치가 결정되므로 오차의 주요축이 수직 방향으로 위치하게 되어 수직오차가 더 크게 발생한다. 본 논문에서는 이러한 수직오차 요인의 영향을 감소시키고 정확도를 향상시키기 위해 항법신호에서 전달된 지상 기준국의 위치 정보를 활용하여 가상의 측위 기준점을 추가로 생성하고 이를 토대로 사용자의 위치를 재결정하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 측위 알고리즘은 기존 2단계의 측위 알고리즘에 가상 측위 기준점의 추가 생성 및 위치 재결정의 단계를 추가한 총 3단계의 절차로 구성된다.

1단계는 중계국의 위치를 추정하는 단계로 그림 3과 같이 각 기준국으로부터 수신한 위치정보와 항법신호의 수신시간차를 이용하는 TDOA 기법을 사용한다. 각 기준국 사이의 시간은 매우 정확하게 동기화되어 있으며 동시에 항법신호를 전송하므로 중계국을 통해 중계된 신호의 수신시간차에 빛의 속도(c)를 곱하여 각 기준국과 중계국 사이의 의사거리 차를 구할 수 있다. 시스템이 I 개의 중계국과 J 개의 기준국으로 구성될 경우, i 번째 중계국과 첫 번째 기준국 및 j 번째 기준국 사이의 의사거리 차는 수식 (1)과 같이 표현된다.

수식 (1)에서 t_{r_j, a_i} 은 j 번째 기준국에서 송신되어 i 번째 중계국에 의해 중계된 신호가 사용자에게 수신된

$$c(t_{r_j, a_i} - t_{r_1, a_i}) = \rho_{r_j}^{a_i} - \rho_{r_1}^{a_i} = r_j \nabla^{r_1} \rho_{a_i}, \quad 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J \quad (1)$$

$$\begin{aligned} r_j \nabla^{r_1} \rho_{a_i} &= e_{a_i}^{r_j} \cdot (R_{r_j} - R^{a_i}) - e_{a_i}^{r_1} \cdot (R_{r_1} - R^{a_i}) + r_j \nabla^{r_1} \tau_{a_i} + r_j \nabla^{r_1} m_{a_i} + r_j \nabla^{r_1} n_{a_i} \\ &\equiv e_{a_i}^{r_j} \cdot (R_{r_j} - R^{a_i}) - e_{a_i}^{r_1} \cdot (R_{r_1} - R^{a_i}) + r_j \nabla^{r_1} \varepsilon_{a_i} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} e_{a_i}^{r_1} - e_{a_i}^{r_2} \\ e_{a_i}^{r_1} - e_{a_i}^{r_3} \\ \vdots \\ e_{a_i}^{r_1} - e_{a_i}^{r_J} \end{bmatrix} \cdot R^{a_i} = \begin{bmatrix} r_2 \nabla^{r_1} \rho_{a_i} - e_{a_i}^{r_2} \cdot R_{r_2} + e_{a_i}^{r_1} \cdot R_{r_1} - r_2 \nabla^{r_1} \varepsilon_{a_i} \\ r_3 \nabla^{r_1} \rho_{a_i} - e_{a_i}^{r_3} \cdot R_{r_3} + e_{a_i}^{r_1} \cdot R_{r_1} - r_3 \nabla^{r_1} \varepsilon_{a_i} \\ \vdots \\ r_J \nabla^{r_1} \rho_{a_i} - e_{a_i}^{r_J} \cdot R_{r_J} + e_{a_i}^{r_1} \cdot R_{r_1} - r_J \nabla^{r_1} \varepsilon_{a_i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

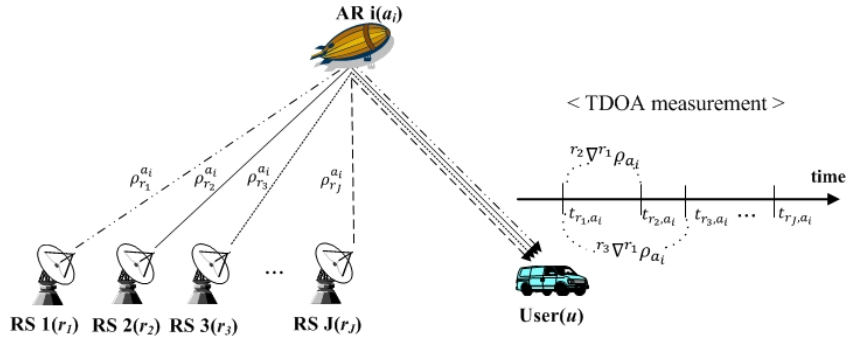


그림 3. 1단계에서의 TDOA 측정
Fig. 3. TDOA measurement in the first step

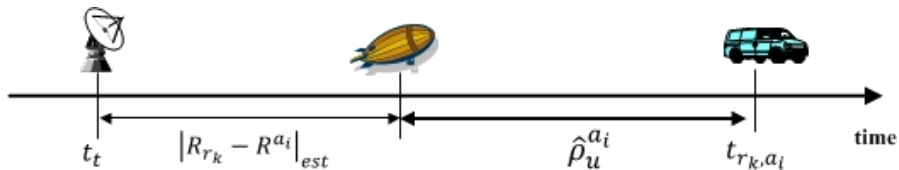


그림 4. 2단계에서의 중계국과 사용자 사이의 의사거리 측정
Fig. 4. Pseudorange measurements between relays and user in the second step

시간을 의미하며, $\rho_{r_j}^{a_i}$ 는 i 번째 중계국과 j 번째 기준국 사이의 의사거리를 나타낸다. 수식 (1)의 의사거리 차를 벡터와 항법신호 송수신 시 발생하는 오차 요인들로 다시 표현하면 수식 (2)와 같다.

수식 (2)에서 $e_{a_i}^{r_j}$ 는 i 번째 중계국으로부터 j 번째 기준국까지의 단위 벡터이며, R^{a_i} 과 R_{r_j} 는 각각 i 번째 중계국과 j 번째 기준국의 위치 벡터를 나타낸다. τ , m , n 은 각각 성층권 지연, 다중경로 지연, 수신기 잡음에 의한 오차를 나타낸다. 수식 (2)를 이용해 중계국의 위치를 결정하는 항법 방정식을 구하면 수식 (3)과 같다.

수식 (3)은 비선형 과결정 방정식으로 중계국의 위치는 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 사용하는 비선형 최소자승법에 의해 결정된다^[13]. 사용자는 위 과정을 모든 중계국의 위치가 결정될 때까지 반복한다.

중계국의 위치 결정 후 2단계에서는 사용자의 초기 위치를 결정한다. 항법신호에는 신호가 기준국으로부터 언제 송신되었는지를 알려주는 타임스탬프가 포함된다. 사용자는 그림 4와 같이 1단계에서 추정된 중계국의 위치와 타임스탬프를 이용해 자신과 중계국 사이의 의사거리를 계산할 수 있다.

중계기반 항법시스템에서는 중계국이 각 기준국으로부터 수신한 모든 항법신호를 사용자에게 전달하

로 각 기준국에 대한 다수의 의사거리를 계산할 수 있게 된다. 하지만 각각의 항법신호는 기준국의 위치에 따라 서로 다른 오차를 포함하기 때문에 추정된 의사거리는 어떤 기준국을 기준으로 계산하느냐에 따라 다르다. 따라서 이러한 기하학적인 요인에 의한 영향을 최소화하기 위해 모든 기준국에 대한 의사거리를 구한 후 평균하여 중계국과 사용자 간의 거리를 추정하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\rho}_u^{a_i} = \frac{1}{J} \sum_{k=1}^J (c(t_{r_k, a_i} - t_t) - |R_{r_k} - R^{a_i}|_{est}) \quad (4)$$

수식 (4)에서 $\hat{\rho}_u^{a_i}$ 는 i 번째 중계국과 사용자 사이의 평균 의사거리이며, t_t 는 기준국에서 항법신호를 송신한 시간을 나타낸다. $|R_{r_k} - R^{a_i}|_{est}$ 는 추정된 k 번째 기준국과 i 번째 중계국 사이의 거리이며, 의사거리를 벡터와 오차 요인 및 시간 오프셋으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{\rho}_u^{a_i} = e_u^{a_i} \cdot (R^{a_i} - R_u) + \hat{\tau}_u + \hat{m}_u + \hat{n}_u + ct_u \quad (5)$$

$\hat{\tau}$, \hat{m} , \hat{n} 는 각각 성층권 지연, 다중경로 지연, 수신기 잡음에 의한 평균 오차를 의미하고, R_u 와 t_u 는 각각

사용자의 초기 추정위치와 시간 오프셋을 나타낸다.

수식 (6)은 사용자의 초기 위치(x_u, y_u, z_u)와 시간 오프셋을 구하는 항법 방정식으로 중계국의 수가 I 일 때 중계국과 사용자 간의 의사거리 수식인 (5)를 연립하여 표현한 것이다. 수식 (6)에서 $a_x^{a_i}, a_y^{a_i}, a_z^{a_i}$ 는 사용자로부터 중계국으로의 x, y, z 축 방향 LOS 요소를 의미한다. 1단계와 마찬가지로 비선형 최소자승법을 통해 해를 구하였다.

마지막으로 3단계는 항법시스템의 정확도 향상을 위해 중계국과 더불어 가상의 측위 기준점을 추가로 설정하고 사용자의 위치를 재추정하는 단계이다. 본 단계에서는 먼저 2단계에서 추정된 사용자의 위치와 항법 메시지에 포함된 기준국의 위치정보를 이용하여 각 기준국과 사용자 간의 의사거리를 계산한다. 사용자는 계산된 의사거리 중 최소거리에 해당하는 기준국을 가상의 기준점으로 추가하여 2단계와 동일한 방법으로 위치를 재추정한다. 본 제안 측위 알고리즘에서는 초기 추정한 사용자의 위치로부터 가장 근접한 기준국을 가상의 측위기준으로 활용한다. 이를 통해 추가되는 가상 기준점이 사용자로부터 한쪽 방향으로 치우쳐 위치할 경우 기하학적 요인에 의해 발생하는 정확도 저하를 최소화하도록 하였다. 또한 사용자의 위치 결정 시 기준이 되는 기준점들을 공중의 중계국 뿐만 아니라 지상의 기준국을 활용하여 다원화함으로써 수평오차에 비해 크게 발생하는 수직오차의 정확도를 개선하였다. 위 절차에 따라 가상 기준점의 요소를 추가하여 사용자의 최종 위치(x'_u, y'_u, z'_u)를 재추정하는 항법 방정식을 구하면 수식 (7)과 같다.

수식 (7)의 $a_x^{v_j}, a_y^{v_j}, a_z^{v_j}$ 은 가상 기준점과 사용자 사이의 x, y, z 축 방향 LOS 요소를 나타내며, $e_u^{v_j}$ 는 j

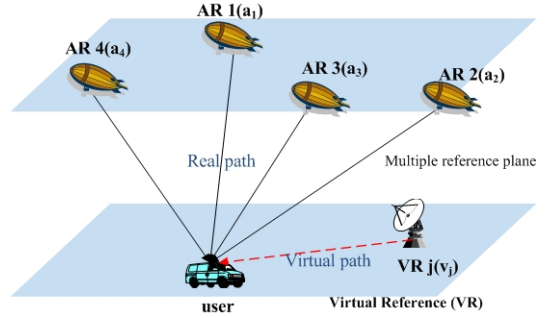


그림 5. 제안하는 측위 알고리즘의 3단계
Fig. 5. Third step of proposed positioning algorithm

번째 가상 기준점과 사용자의 위치벡터이다. $\rho_u^{v_j}$ 는 항법 메시지에서부터 알려진 가상 기준점과 2단계에서 추정된 사용자 초기 위치 사이의 의사거리를 나타내며, $w_u^{v_j}$ 는 2단계에서 추정된 사용자의 위치에 포함된 오차를 의미한다.

IV. 제안 측위 알고리즘 성능 평가

본 장에서는 제안하는 측위 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 모의실험 환경 및 오차모델에 대해서 기술하며 모의실험 결과의 비교, 분석을 통해 성능을 평가하였다.

4.1 모의실험 환경

4.1.1 모의실험 가정 사항

제안하는 측위 알고리즘의 환경인 중계 기반 항법 시스템에서는 정확한 측위를 위해 기준국 사이의 시각동기가 획득되어야 한다. 기준국 사이의 동기는 유선 및 무선 통신을 통한 다양한 시각동기 기법을 이용해 매

$$\begin{bmatrix} a_x^{a_1} & a_y^{a_1} & a_z^{a_1} & -c \\ a_x^{a_2} & a_y^{a_2} & a_z^{a_2} & -c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_x^{a_I} & a_y^{a_I} & a_z^{a_I} & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \\ t_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_u^{a_1} \cdot R^{a_1} - \hat{\rho}_u^{a_1} + \hat{\tau}_u^{a_1} + \hat{m}_u^{a_1} + \hat{n}_u^{a_1} \\ e_u^{a_2} \cdot R^{a_2} - \hat{\rho}_u^{a_2} + \hat{\tau}_u^{a_2} + \hat{m}_u^{a_2} + \hat{n}_u^{a_2} \\ \vdots \\ e_u^{a_I} \cdot R^{a_I} - \hat{\rho}_u^{a_I} + \hat{\tau}_u^{a_I} + \hat{m}_u^{a_I} + \hat{n}_u^{a_I} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} a_x^{a_1} & a_y^{a_1} & a_z^{a_1} & -c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_x^{a_I} & a_y^{a_I} & a_z^{a_I} & -c \\ a_x^{v_j} & a_y^{v_j} & a_z^{v_j} & -c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_u \\ y'_u \\ z'_u \\ t'_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_u^{a_1} \cdot R^{a_1} - \hat{\rho}_u^{a_1} + \hat{\tau}_u^{a_1} + \hat{m}_u^{a_1} + \hat{n}_u^{a_1} \\ \vdots \\ e_u^{a_I} \cdot R^{a_I} - \hat{\rho}_u^{a_I} + \hat{\tau}_u^{a_I} + \hat{m}_u^{a_I} + \hat{n}_u^{a_I} \\ e_u^{v_j} \cdot R^{v_j} - \hat{\rho}_u^{v_j} + w_u^{v_j} \end{bmatrix} \quad (7)$$

우 정확하게 유지할 수 있기 때문에 본 논문에서는 기준국 사이의 시각동기에 의한 영향은 없는 것으로 가정하였다^[14]. 중계기반 항법시스템에서 중계국의 고도는 20km이고 중계국과 기준국의 반경은 각각 90km와 100km로 설정하였으므로 기준국과 중계국 간의 거리는 최대 150km 보다 작다. 신호의 전파 속도인 빛의 속도를 고려했을 때 각 기준국으로부터 송신된 항법신호의 중계 시간차는 수 ms이므로 중계국이 신호를 중계하는 동안 이동에 의해 발생하는 오차는 수 cm로 매우 작기 때문에 무시할 수 있다고 가정하였다.

4.1.2 모의실험 구성

구성요소의 기하학적 위치는 항법시스템의 정확도를 결정하므로 모의실험 구성 시 반드시 고려해야 하는 사항이다. 먼저 중계국의 고도는 성층권 비행선을 고려하여 20km로 설정하였으며, 한 기의 중계국으로부터 수신되는 항법신호의 각도인 양각 5°를 보장하는 커버리지 반경은 195km이다. 위치 결정 과정 시 사용자는 자신의 3차원 위치를 추정하기 위해 적어도 4개 이상의 항법신호를 수신해야하므로 중계국은 커버리지 영역이 겹치도록 반경 90km 원둘레에 고르게 분포하는 것으로 설정하였다. 이때 좋은 DOP (Dilution of Precision) 확보를 위해 원의 중앙에 한 기의 중계국이 위치하도록 하였다. 마지막으로 지상의 기준국은 중계국의 정확한 위치 추정을 위해 널리 고르게 분포되어야 한다. 이를 고려하여 기준국의 배치 반경은 100km로 설정하였으며, 중계국과 동일한 배치 방법으로 배치하였다. 중심국의 위치는 항법 성능에 영향을 미치지 않으므로 모의실험에서는 고려되지 않았다. 그림 6은 위와 같이 구성된 모의실험 환경을 보여준다.

4.2 오차모델

본 논문에서의 항법시스템들은 코드 위상 기반의 의사거리 측정치를 사용한다. 의사거리 측정치는 대류권 및 전리층 지연과 같은 대기권 영향, 다중경로, 수신기 잡음, 시간 오프셋 등의 많은 요인에 의해 오차가 발생한다. 모의실험에서는 중계국과 사용자 측위에

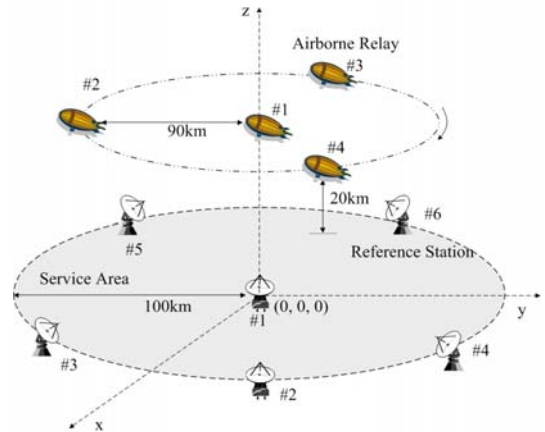


그림 6. 모의실험 구성도
Fig. 6. Configuration for simulations

영향을 미치는 요소로 대류권 지연, 다중경로 지연 및 수신기 잡음의 3가지 요인을 고려하였다.

대류권 지연에 의한 오차는 전 양각 범위에서 안정적인 Hopfield 모델을 사용하였다^[15]. 건조 지연과 습윤 지연으로 구성되는 대류권 오차는 $m = d_{dry} + d_{wet}$ 으로 정의되며, 수식 (8)과 같이 표현된다. 수식 (8)에서 굴절률 N_* 은 수식 (9)에 의해 정의되며, D 는 항법신호 송신기와 수신기 사이의 경사거리를 의미한다. h_{tx} 와 h_{rx} 는 각각 송신기와 수신기의 높이, h_* 는 건조와 습윤 요소의 고정 높이 ($h_{dry} = 42.7\text{km}$, $h_{wet} = 12\text{km}$)를 나타낸다. P , T , f 는 각각 기압, 온도, 상대 습도를 의미한다($P = 1010.25\text{mbar}$, $T = 291.15\text{K}$, $f = 50\%$).

다중경로 오차는 동적인 환경에서 예측하기 어려운 형태로 발생하기 때문에 모델링하여 표현하기 쉽지 않다. 본 논문에서는 양각 0°에서의 다중경로 오차를 발생시키는 SatNav toolbox를 이용하였다. SatNav toolbox에 의해 생성된 오차는 의사거리 측정치에 적용하기 전 $M(=1 - \frac{\tan^{-1}E}{\tan^{-1}(\pi/2)})$ 에 의해 크기가 조정되며, E 는 항법신호 송신기와 수신기 사이의 양각

$$d_s = \frac{10^{-6}}{5} \times N_* \times D \times \left(\left(1 - \frac{h_{rx}}{h_*} \right)^5 - \left(1 - \frac{h_{tx}}{h_*} \right)^5 \right) \times \frac{h_*}{h_{rx} - h_{tx}}, \quad * \in [dry, wet] \tag{8}$$

$$N_{dry} = 77.6 \times \frac{P}{T}, \quad N_{wet} = 22770 \times \frac{f}{T^2} \times 10^{\frac{7.4475 \times (T - 273)}{T - 38.3}} \tag{9}$$

이다. 또한 수신기 잡음은 정규 분포를 따르는 임의의 수($n \sim N(0,1)$)에 신호의 형태에 따른 표준편차를 곱하여 생성하였다¹⁶⁾.

4.3 모의실험 결과

제안하는 정확도 향상 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 MATLAB을 통한 모의실험을 진행하였다. 첫 번째 모의실험에서는 가상 기준점의 위치와 수에 따른 정확도 분석을 통해 적절한 가상 기준점의 수와 조건을 찾았다. 두 번째 모의실험은 앞선 모의실험에서 선정된 가상 기준점을 바탕으로 기존 중계기반 항법 시스템의 측위 알고리즘과 제안하는 측위 알고리즘의 정확도를 비교하였다. 마지막으로 서비스 지역에서 사용자의 위치에 따른 오차를 비교하는 모의실험을 진행하였다.

4.3.1 가상 기준점 위치 및 수에 따른 정확도 분석

항법시스템의 위치 정확도는 위치 결정 시 기준이 되는 기준점들의 위치와 수에 따라 달라진다. 본 모의 실험에서는 제안하는 알고리즘에서 추가되는 가상 기준점들의 조건에 따라 정확도를 분석하여 적절한 기준점의 조건을 찾고자하였다. 모의실험은 [11]에서와 마찬가지로 6개의 기준국과 4개의 중계국으로 구성되어 진행하였으며, 지역항법시스템의 특성상 사용자의 위치에 따라 정확도가 다르게 나타나므로 기하학적으로 우수한 위치(good geometry)와 우수하지 않은 위치(poor geometry)에서의 결과를 비교하였다. 가상의 기준점들은 2단계에서 추정된 사용자의 초기 위치로부터 거리를 기준으로 정렬하여 적용하였다.

표 1은 추가되는 가상 기준점에 따라 사용자와 중계국 및 가상 기준점 사이의 PDOP(Position of Dilution of Precision) 값을 나타낸 것이다. PDOP는 사용자와 선택된 기준점들 간의 기하학적인 배열로 인해 발생하는 측위 정확도의 열화를 나타내는 계수로 3차원 측위 결과의 정확성을 표시한다¹⁶⁾. PDOP 값은 작을수록 높은 정확성을 가지는 것을 의미하며 GPS에서는 2 이하의 값을 매우 우수한 성능을 가진

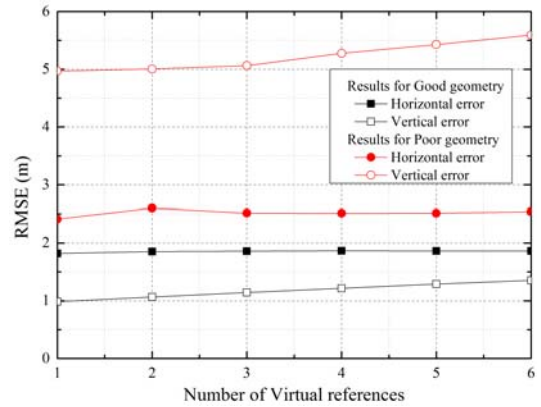


그림 7. 가상 기준점의 수에 따른 RMS 오차
Fig. 7. RMS error of the user according to the number of virtual references

다고 보고 있다. 결과에서 확인할 수 있듯이 사용자의 초기 위치로부터 인접한 가상 기준점을 활용할수록 정확도가 높은 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 사용자로부터 멀리 위치한 가상 기준점일수록 사용자로부터 한쪽 방향으로 치우쳐 분포하게 되어 기하학적 배치의 악화를 가져오기 때문이다. 하지만 사용자가 기하학적으로 우수한 위치에서는 중계국이 이미 사용자를 기준으로 고르게 분포하기 때문에 그 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다.

항법시스템의 정확도는 위치 결정 시 참조하는 기준점들의 수에 따라서도 바뀔 수 있다. 그림 7은 추가되는 가상 기준점들의 수에 따라 사용자의 수평 및 수직 RMS(Root Mean Square) 오차를 비교한 결과이다. 사용자의 위치가 기하학적으로 우수하지 않은 위치에서는 더 많은 가상 기준점들을 활용할수록 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 이미 사용자가 구성요소들의 가장 자리에 위치한 상황에서 고정된 가상 기준점을 추가할수록 기준점들의 기하학적 배치가 열화되기 때문이다. 첫 번째 모의실험 결과를 바탕으로 이후의 모의실험에서는 사용자의 초기 위치로부터 가장 인접한 하나의 기준국을 가상의 기준점

표 1. 가상 기준점 위치에 따른 DOP 비교
Table 1. Comparison of DOP according to the position of a user

Distance from user	PDOP(Position Dilution of Precision)					
	near <-----> far					
Good geometry (10,10,10)	1.737	1.737	1.736	1.736	1.736	1.737
Poor geometry (50000,50000,10)	2.885	4.132	4.452	4.470	4.707	4.868

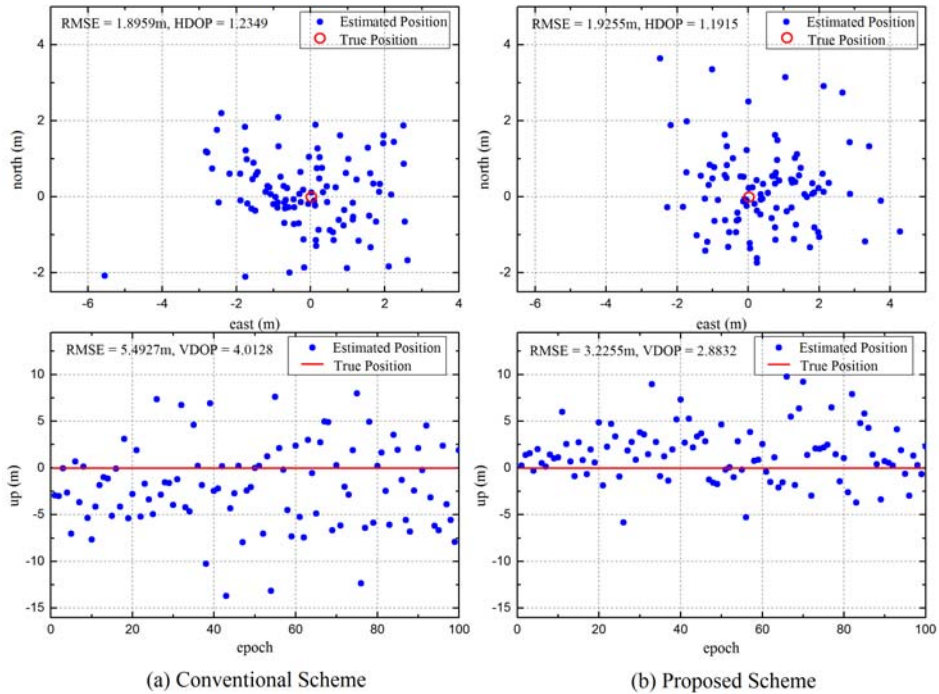


그림 8. ENU 오차 비교
Fig. 8. Comparison of ENU errors

으로 활용하여 위치를 재추정하도록 하였다.

4.3.2 정확도 비교

본 모의실험에서는 제안하는 측위 알고리즘과 기존 알고리즘의 정확도를 비교하였다. 모의실험 환경은 첫 번째 모의실험과 동일하게 설정하였다.

그림 8은 사용자의 위치가 (30000, 20000, 10)일 때 ENU(East, North, Up) 오차를 비교한 것이다. 그

림에서 확인할 수 있듯이 가상의 기준점을 추가로 활용하여 사용자의 위치를 재추정하는 제안 측위 알고리즘은 기존 측위 알고리즘에 비해 up 오차가 2.2672m 감소하였다. 이는 사용자를 기준으로 중계국이 한쪽 방향에 위치하도록 구성되는 구조적 특성에 의해 수직오차가 크게 발생하는 기하학적 영향을 지상 기준국을 가상의 기준점으로 활용함으로써 감소시켰기 때문이다.

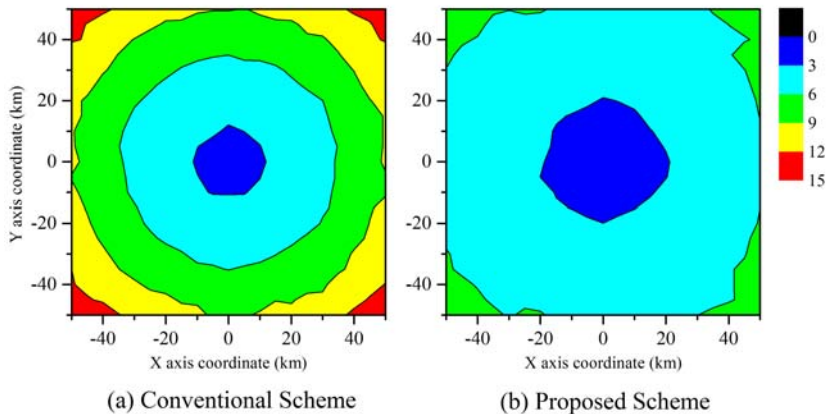


그림 9. 서비스 지역에서의 사용자 3차원 정확도
Fig. 9. Three dimensional accuracies of the user in a service area

중계기반의 항법시스템은 지상의 기준국과 위성에 비해 상대적으로 낮은 고도에 위치하는 중계국으로 이루어진 지역항법시스템으로 사용자의 위치에 따라서 정확도가 상이하다. 그림 9는 100 km × 100 km의 범위에서 사용자의 위치에 따른 3차원 RMS 오차를 비교한 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 제안하는 측위 알고리즘이 조금 더 넓은 범위에서 정확하게 위치를 추정할 수 있다. 또한 중앙에서 오차가 작은 것을 확인할 수 있는데 이는 사용자가 중앙에 위치할 경우 고르게 분포된 기준국과 중계국을 통해 신호를 수신하여 위치 결정을 할 수 있어 기하학적인 영향을 적게 받기 때문이다.

V. 결 론

본 논문은 기 제안된 중계 기반 항법시스템에서 위치 정확도 향상을 위해 가상 기준점을 활용하여 위치를 재추정하는 측위 알고리즘을 제안하였다. 중계 기반 항법시스템은 공중의 중계국을 통해 항법신호를 전달하고 이를 기준으로 사용자의 위치를 결정하므로 시스템의 구조적 특성 및 측위 기법에 의해 수직오차가 수평오차보다 크게 발생한다. 제안하는 측위 알고리즘은 항법신호에 포함된 기준국의 위치 정보와 기 추정된 사용자의 위치를 이용하여 기준국과 사용자 간의 거리를 추정한다. 추정된 거리를 통해 사용자에게 가장 인접한 기준국을 가상의 기준점으로 생성하여 사용자의 위치 재추정에 활용함으로써 기준점들의 배치를 다원화하고 위치 정확도를 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 모의실험을 통하여 제안하는 가상 기준점 활용 알고리즘이 기존 측위 알고리즘에 비해 높은 정확도를 보임을 확인하였다. 주목할 점은 기준국으로부터 항법신호를 직접 수신하지 않고 메시지로부터 전달된 정보들을 활용하여 생성한 소수의 가상 기준점을 통해 높은 위치정확도를 보장할 수 있다는 것이다. 이러한 장점은 다수의 항법신호를 수신할 수 없는 환경에서 고정밀 측위를 위해 활용될 수 있을 것이다.

References

[1] Y. K. Lee, C. B. Lee, S. H. Yang, J. K. Lee, and H. D. Kong, "Diurnal effect compensation algorithm for a backup and substitute navigation system of GPS," *J. KICS*, vol. 33, no. 12, pp. 1225-1232, Dec. 2008.

[2] J. J. Choi, H. Y. Choi, S. B. Do, and H. S.

Kim, "Absolute altitude determination for 3-D indoor and outdoor positioning using reference station," *J. KICS*, vol. 40, no. 1, pp. 165-170, Jan. 2015.

[3] "GNSS Vulnerability and Alternative PNT," *GPS World*, vol. 21, pp. 38-39, 2010.

[4] J. Wang, "Pseudolite applications in positioning and navigation: Progress and problems," *J. Glob. Position Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 48-56, 2002.

[5] L. Dai, J. Wang, T. Tsujii, and C. Rizos, "Inverted pseudolite positioning and some applications," *Surv. Rev.*, vol. 36, pp. 602-611, 2002.

[6] J. Amt and J. Raquet, "Positioning for range-based land navigation systems using surface topography," in *Proc. ION GNSS 2006*, pp. 1494-1505, Fort Worth, USA, Sept. 2006.

[7] J. Barnes, C. Rizos, J. Wang, D. Small, G. Voigt, and N. Gambale, "Locata: A new positioning technology for high precision indoor and outdoor positioning," in *Proc. ION GPS/GNSS 2003*, pp. 1119-1128, Portland, USA, Sept. 2003.

[8] T. Tsujii, C. Rizos, J. Wang, L. Dai, C. Roberts, and M. Harigae, "A navigation/positioning service based on pseudolites installed on stratospheric airships," in *Proc. 5th Int. Symp. Sat. Nav. Tech. & Appl.*, pp. 24-27, Canberra, Australia, Jul. 2001.

[9] K. Tiwary, S. Behera, G. Sharada, and A. Singh, "Modelling and simulation of pseudolite-based navigation: A GPS-independent radio navigation system," *Def. Sci. J.*, vol. 60, pp. 541-550, Sept. 2010.

[10] B. Chandu, R. Pant, and K. Moudgalya, "Modeling and simulation of a precision navigation system using pseudolites mounted on airships," in *Proc. 7th ATIO Conf.*, Belfast, Sept. 2007.

[11] K. M. Lee, H. J. Noh, and J. S. Lim, "Airborne relay-based regional positioning system," *Sensors*, vol. 15, pp. 12686-12699, May 2015.

- [12] M. R. Chartrand, *Satellite Communications for the nonspecialist*, vol. 128, Spie Press, 2004.
- [13] D. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, vol. 11, pp. 431-441, Jun. 1963.
- [14] J. W. Kim and D. S. Eom, "TDoA-based practical localization using precision time-synchronization," *J. KICS*, vol. 38C, no. 2, pp. 141-154, Feb. 2013.
- [15] J. J. Wang, J. Wang, D. Sinclair, and H. K. Lee, "Tropospheric delay estimation for pseudolite positioning," *J. Glob. Position Syst.*, vol. 4, pp. 106-112, 2005.
- [16] E. Kaplan and C. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2nd Ed., Artech House, 2005.

이 규 만 (Kyuman Lee)



2011년 2월 : 아주대학교 전자공학 학사
2011년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석박사통합과정 <관심분야> 위치인식, 신호원 추적, 전송데이터링크

임 재 성 (Jaesung Lim)



1983년 2월 : 아주대학교 전자공학 학사
1985년 2월 : KAIST 영상통신 석사
1994년 2월 : KAIST 디지털통신 박사
1998년 3월~현재 : 아주대학교 소프트웨어융합학과 정교수
2004년 3월~현재 : 아주대학교 국방전술네트워크 연구센터장
<관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방전술통신