

보정량 추정 및 가시위성 선정 기법을 이용한 위성항법 성능개선 연구

봉재환* · 정성균**

A Study of GNSS Performance Enhancement using Correction Estimation and Visible Satellites Selection

Jae Hwan Bong* · Seong-Kyun Jeong**

요 약

위성항법시스템은 전지구에서 어디에서나 위성신호만 수신하면 수신기의 위치와 시간 정보를 획득할 수 있는 편리한 시스템이다. 하지만 항법신호는 오차를 포함하고 있고 신호의 수신 상태에 따라 수신기의 위치 오차가 발생한다. 또한, 위성들의 기하학적 배치에도 위치 오차는 영향을 받는다. 그러므로 가시위성의 개수와 상태에 따라 수신기의 위치 성능은 변화한다. 특히, 위성이 뜨거나 지는 시각에는 해당 위성의 신호 상태가 좋지 않으며 도심지에서 건물 등의 장애물로 인해 신호가 차단되는 경우에는 수신기의 위치가 변화하여 나타난다. 본 논문에서는 보정량을 추정하여 수신기가 측정한 의사거리에 반영하는 기법과 가시위성을 조정하는 기법을 이용하여 위성항법 성능을 향상하는 방법을 제안하였다. 제안된 기법을 가시위성의 개수가 빈번하게 변화하는 환경에 적용하여 위성항법 시스템의 성능향상을 검증하였다.

ABSTRACT

Global Navigation Satellite System(GNSS) is a convenient system that acquires position and time information of a receiver if only satellite signals can be received anywhere in the world. However navigation signals include errors and a position error occurs according to the reception state of the signal. Also, a position error is affected by the geometric arrangement of the satellites. Therefore a receiver position performance varies by the number and status of visible satellites. The condition of satellite signals is not good when the satellite rises or sets and the position change of receiver occurs when the signal is blocked by an obstacle such as a building in the urban area. In this paper, we proposed methods to improve the GNSS performance by using pseudorange correction method estimating the correction amount and the visible satellites selection method. By applying the proposed methods to an environment in which the number of visible satellites changes variously, the performance enhancement was verified.

키워드

Correction, Estimation GNSS, Selection, Visible Satellites
보정, 추정, 위성항법시스템, 선정, 가시위성

* 상명대학교 휴먼지능로봇공학과(drbong@smu.ac.kr)

• Received : Jul. 15, 2022, Revised : Aug. 28, 2022, Accepted : Oct. 17, 2022

** 교신저자 : 상명대학교 휴먼지능로봇공학과

• Corresponding Author : Seong-Kyun Jeong

• 접수일 : 2022. 07. 15

Dept. of Human Intelligent Robot Engineering, Sangmyung University

• 수정완료일 : 2022. 08. 28

Email : skjeong@smu.ac.kr

• 게재확정일 : 2022. 10. 17

I. 서 론

위성항법시스템은 항법위성이 송신한 신호를 수신기가 수신하여 위치와 시각을 계산하는 시스템이다. 전지구 어디에서나 위성신호를 수신할 수 있으면 위치와 시각을 측정할 수 있는 편리한 시스템이지만 수신된 신호의 특성에 따라 오차가 발생하게 된다. 여러 개의 항법위성으로부터 받은 신호를 처리하여 항법해(위치와 시각)를 계산하는 위성항법시스템의 특성상 어느 한 신호에만 오차가 많이 포함되어 있다고 하더라도 전체의 항법해 성능에 영향을 준다. 항법신호의 오차에는 이온층 오차, 대류층 오차 등 지구의 대기를 통과하며 발생하는 오차가 있으며 위성시계 오차, 위성궤도 오차 등 시스템 자체에서 발생하는 오차도 있다. 또한, 장애물에 의한 신호차단이나 멀티패스와 같이 수신환경에 의해 오차가 발생할 수도 있다[1]. 각 위성의 위치도 다르고 신호의 수신 경로도 다르므로 위성신호의 측정치마다 오차의 성분은 다르게 포함하고 있다.

항법해는 모든 가시위성의 측정치를 이용하여 계산되므로 각 측정치의 오차는 결국 항법해에 반영된다. 위성이 뜨고 지는 시기의 측정치는 신호가 수신기에 수신되는 경로상에 대기층을 통과하는 영역이 길어지고 수신 신호 세기가 낮아 오차를 많이 포함하게 되며 해당 위성을 포함하여 계산되는 항법해는 오차가 많이 발생하게 된다. 따라서 가시위성이 증가하거나 감소하는 시기에는 항법해의 변화가 크고 오차성분이 많은 측정치가 추가될 경우에는 항법해 성능이 저하된다[2, 3]. 도심지에서 위성항법시스템을 이용하는 경우에는 빌딩과 같은 장애물에 의해 신호 차단이 자주 발생하게 되고 항법 성능에 좋지 않은 영향을 미친다. 가시위성의 변화에 의해 항법해의 연속성이 깨지고 항법성능이 저하되는 것이다. 이는 여러 개의 항법신호를 수신하여 항법해를 계산하는 위성항법 수신기의 특성상 불가피하게 발생하는 현상이다[4, 5].

본 연구에서는 가시위성의 변화로 인해 발생하는 항법성능의 저하를 개선하기 위하여 위성의 측정치 오차를 추정하고 가시위성을 선택적으로 이용하여 항법성능 저하 구간에서 성능을 개선하는 방법을 제안하였다. 제2장에서는 기존의 성능개선 알고리즘의 문제점과 본 논문에서 제안하는 방법과의 차이점을 설

명하였다. 제3장에서는 제안한 방법을 알고리즘을 구체적으로 도출하고 제4장에서는 제안한 기법을 실측 데이터를 통해 검증하였다. 마지막으로 제5장에서는 제안한 기법의 활용방향과 향후 연구내용에 관하여 기술하였다.

II. 기존 위성항법 성능개선 기법 및 문제점

항법위성의 배치에 따른 항법해의 오차 성능은 DOP(Dilution of Precision)를 통해 나타낼 수 있다. DOP는 위치와 시각 오차를 모두 포함하는 기하학적 DOP(GDOP), 위치 오차를 나타내는 PDOP, 수평 오차를 나타내는 HDOP, 수직 오차를 나타내는 VDOP, 시각 오차를 나타내는 TDOP 등 다양하게 표현할 수 있는데 식 (1)은 GDOP의 계산식을 보여주고 있다[6, 7].

$$GDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2} \quad (1)$$

여기서 σ 는 의사거리의 제곱평균제곱근(RMS, Root Mean Square) 오차, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 는 수신기 위치의 x, y, z 방향 RMS 오차, σ_b 는 수신기 시각의 RMS 오차를 나타낸다.

위성항법시스템은 가시위성의 측정치를 이용하여 삼각측량법과 최소자승법으로 항법해를 계산하게 되는데 오차를 포함할 수밖에 없는 측정치의 특성상 가시위성의 기하학적 분포는 같은 양의 오차를 포함하고 있더라도 배치에 따라 항법해의 오차가 달리 나타난다. 일반적으로 위성의 배치가 한곳에 치우쳐 있는 경우에는 측정치에 같은 양의 오차가 포함되어 크게 분포하는 경우와 비교할 때 상대적으로 오차가 크게 발생한다. 도심지에서 빌딩과 같은 장애물이 존재하는 경우에도 가시위성의 변화는 자주 발생하며 가시위성이 변화하면 DOP 및 항법해의 값도 변화하게 된다. 도심지에서는 장애물에 의해 신호가 차단되면 천정 근처에 배치된 위성들만으로 항법해를 계산하게 되고 DOP 성능이 나빠져 올바른 위치를 계산하기 어렵다. 측정치 자체에 대한 오차와 기하학적인 위성 배

치, 가시위성의 개수 변화는 항법해의 정확도와 연속성에 영향을 미치게 된다.

기존의 연구에서는 신호에 포함된 오차를 줄이고 DOP를 개선하는 방향으로 위성항법의 성능을 개선하는 방법이 제안되었다. 위성의 양각이 낮을 경우 신호에 오차성분이 많이 포함되어 있으므로 높은 양각의 위성에 가중치를 주는 방법[8]이 있으며 위성의 신호세기를 직접 검사하여 신호세기가 낮은 위성의 측정치를 항법해 계산에서 배제하는 방법[9, 10]이 있다. 또한, DOP를 개선하는 방향으로 위성의 선정하여 항법해를 계산하는 기법[11, 12]도 제안되었다. 기존의 방법들은 오차가 크게 발생하는 경우를 선별하여 이를 감쇄시키는 방향으로 가중치를 부여하거나 제외시켜 항법해를 계산한다는 관점에서 성능개선에 효과가 있다. 하지만 가시위성의 개수가 변할 경우에 위성의 기하학적 배치가 달라져 오차가 항법해에 작용하는 영향이 변화하여 항법해 값이 크게 변화하는 것을 방지하지 못한다. 항법신호에 포함되어 있는 오차는 정확하게 측정하기 어려우며 단순히 위성의 배치와 양각을 검사하여 항법성능을 향상하기에는 한계가 존재한다. 특히, 도심지의 빌딩숲과 같이 가시위성의 개수가 급속하게 변화하는 경우에는 양각의 크기가 높은 위성도 항법해 계산에서 배제되는 경우가 발생하며 급격한 가시위성의 개수 변화는 기존의 방법들을 이용한다고 하더라도 성능저하가 발생한다. 따라서 오차성분을 정확하게 추정하고 가시위성의 변화에 따른 영향을 줄이는 방법은 항법성능을 개선하는 데에 도움이 될 것이며 가시위성의 변화가 발생하더라도 항법해의 연속성이 유지되는 기법이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 급격한 가시위성의 변화가 발생하더라도 각 측정치의 오차를 예측하고 가시위성을 상황에 따라 변경하여 적용함으로써 항법성능을 개선하는 방법을 제안하였다. 항법위성의 측정치가 포함된 오차는 수신환경을 반영하고 있어 이온 폭풍과 같은 급격한 환경변화가 없으면 짧은 시간에 크게 변화하지 않는다. 따라서 수신기의 측정치인 의사거리에 포함된 오차를 추정하여 보정한다면 항법해 성능이 향상될 것이다. 가시위성의 개수가 변하는 경우에는 추가되는 위성을 즉각적으로 항법해에 반영하지 않고 기존에 위성들만 이용하여 오차를 반영해 항법해를 계산한다면 항법성능을 저하시키지 않

을 것이다. 새롭게 추가되는 위성은 신호가 안정되어 항법해의 오차에 영향이 줄어드는 단계에서 항법해 계산에 포함함으로써 신호의 불안정으로 발생하는 항법해 오차를 줄일 수 있다. 본 연구에서는 이러한 기법을 적용하여 항법 성능을 향상시키고 항법해의 연속성을 유지하였다.

III. 위성항법 성능개선 기법

3.1 측정치 오차 추정에 의한 보정 항법해 계산

위성항법수신기가 측정한 수신기와 항법위성 사이의 거리를 의사거리라고 하는데 의사거리는 다음 식 (2)와 같이 쓰여진다.

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + b_u + e_i \quad (2)$$

여기서 ρ_i 는 i 번째 위성의 의사거리, (x_i, y_i, z_i) 은 i 번째 위성의 좌표, (x_u, y_u, z_u) 는 수신기의 좌표, b_u 는 수신기 시각 오차, e_i 는 i 번째 위성의 의사거리 오차함을 나타낸다.

수신기와 항법위성 사이의 거리는 정확하게 측정할 수 없으므로 의사거리라고 표현되는데 각 의사거리와 항법해는 식 (3)과 같이 관계식이 성립한다. 이 식을 이용하여 수신기는 위치와 시간을 계산한다.

$$\begin{bmatrix} \delta\rho_1 \\ \delta\rho_2 \\ \vdots \\ \delta\rho_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 1 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_u \\ \delta y_u \\ \delta z_u \\ \delta b_u \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\alpha_{11} = \frac{x_i - x_u}{\rho_i - b_u}, \alpha_{12} = \frac{y_i - y_u}{\rho_i - b_u}, \alpha_{13} = \frac{z_i - z_u}{\rho_i - b_u} \quad (4)$$

측정치 오차를 추정하기 위해 계산된 항법해로부터 수신기와 항법위성의 거리를 역으로 계산하였다. 이 거리는 수신기가 계산한 항법해를 기반으로 위성과의 거리를 추정한 거리로 추정거리라 할 수 있으며, 식 (5)는 추정거리를 계산하는 식을 나타낸다[13].

$$\rho_i^e = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2} \quad (5)$$

여기서 ρ_i^e 는 i번째 위성의 추정거리, (x_r, y_r, z_r) 는 수신기가 계산한 위치를 나타낸다. 추정거리와 수신기가 실제로 측정한 의사거리의 차를 식 (6)과 같이 계산하면 수신기의 측정치에 포함된 오차를 추정할 수 있다.

$$e_i^e = \rho_i^e - \rho_i \quad (6)$$

여기서 e_i^e 는 i번째 위성의 추정된 측정치 오차를 나타낸다. 이렇게 계산된 측정치의 오차를 식 (7)과 같이 수신기의 측정치에 반영하고 오차를 반영한 측정치를 항법해 계산식에 적용하면 오차 추정을 반영한 항법해를 계산할 수 있다. 식 (8)은 측정치의 오차 성분을 반영한 의사거리를 이용하여 항법해를 계산하는 식을 보여주고 있다.

$$\rho_i^m = \rho_i + e_i^e \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \delta\rho_1^m \\ \delta\rho_2^m \\ \vdots \\ \delta\rho_n^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{11} & \alpha_{11} & 1 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_u \\ \delta y_u \\ \delta z_u \\ \delta b_u \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 ρ_i^m 는 i번째 위성의 추정된 측정치 오차를 이용하여 보정한 의사거리를 나타낸다. 식 (6)에 의해 추정된 오차는 갑작스러운 이온층 폭풍과 같은 예외적인 상황을 제외하고 가시위성이 변화하지 않는 단기간의 경우에는 크게 변화하지 않는다. 식 (8)을 통해 계산된 항법해는 측정치 오차 추정을 적용한 보정된 항법해이다. 추정된 오차를 적용하면 가시위성의 개수를 줄여 계산하더라도 식 (8)에 의해 계산된 항법해의 성능에는 크게 영향을 미치지 않는다.

3.2 가시위성 선정 알고리즘

측정치 오차 추정을 적용한 항법해를 계산할 때 가시위성을 선정하는 기법을 적용하였다. 위성이 뜨는 경우에는 새로운 위성이 가시위성으로 추가된다. 이러

한 위성의 측정치에는 오차가 많이 포함되어 있어 가시위성으로 포함하여 항법해를 계산하면 오차가 많이 발생한다. 하지만 시간이 지나 해당 위성의 양각이 상승하면 항법해 오차는 점차 감소한다. 따라서 새로운 위성이 추가되는 경우에 기존의 위성들만으로 보정된 항법해를 계산하고 전체 위성으로부터 계산된 항법해가 보정된 항법해와 비교하여 임계치 이하의 오차를 보일 때, 항법해 계산에 포함하여 최종적인 수신기의 위치를 계산하면 항법해의 연속성을 유지할 수 있다. 그림 1은 제안한 기법의 순서도를 나타낸 그림이다.

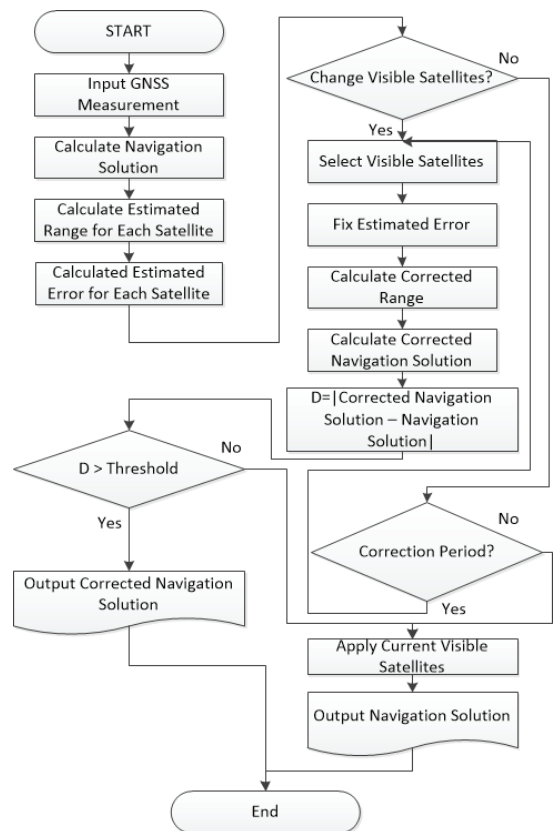


그림 1. 측정치 오차 추정 및 위성선정 기법 흐름도
Fig. 1 Flowchart of measurement estimation and satellite selection method

위성항법 수신기는 계속적으로 모든 가시위성의 측정치를 사용하여 항법해를 계산한다. 계산된 항법해를 바탕으로 식 (5)를 통해 추정거리를 계산하고 식 (6)과 같이 측정치의 오차를 추정한다. 마지막으로 추정

된 오차를 반영하여 식 (8)을 통해 항법해를 최종 계산한다. 만약 가시 위성의 변화가 생기면 기존 항법해의 계산에 사용된 측정치만을 선별하며 해당 위성들의 추정 오차를 반영하여 보정된 항법해를 계산하고 수신기의 항법해는 보정된 항법해 값으로 표시한다. 모든 가시위성의 측정치를 이용하는 계산은 이후에도 계속 동작하게 되며 보정된 항법해와 측정치를 이용한 항법해가 임계값을 넘지 않을 때, 모든 측정치를 이용하여 계산된 항법해를 수신기의 항법해 값으로 표시한다. 수신기를 운용하는 중에 가시위성의 변화가 나타나면 해당 기법을 지속적으로 적용하여 항법해의 연속성을 유지한다. 이러한 알고리즘은 빌딩 등의 장애물로 가시위성의 개수가 급속하게 변하는 도심지에서 빈번하게 적용할 수 있으며 DOP 특성이 좋지 않아 오차가 크게 발생하는 환경에서도 항법성능을 유지할 수 있다.

IV. 알고리즘 성능 검증

제안한 기법을 검증하기 위해 2시간 동안 가시위성이 변화하는 GPS(Global Positioning System) 실측 데이터를 사용하였다. 그림 2와 그림 3은 GPS 실측 데이터를 사용하여 제안한 기법의 적용 전과 적용 후의 항법해를 계산한 결과와 적용한 가시위성의 변화를 보여주고 있다. 그림 2는 수평오차, 그림 3(a)는 가시위성의 개수, 그림 3(b)는 동서 방향 오차, 그림 3(c)는 남북 방향 오차, 그림 3(d)는 수직 오차를 각각 나타내고 있다.

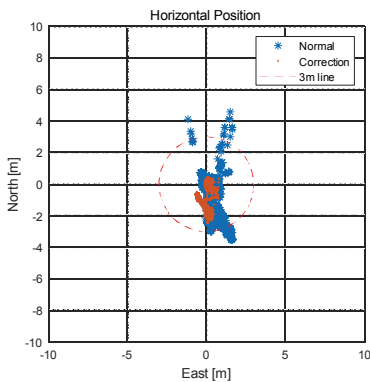
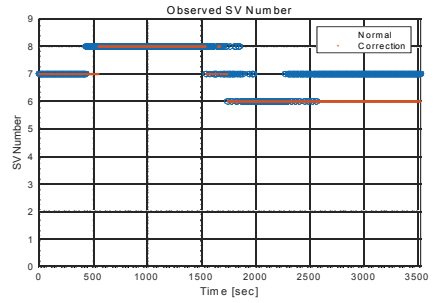
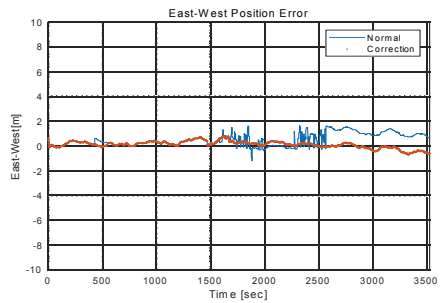


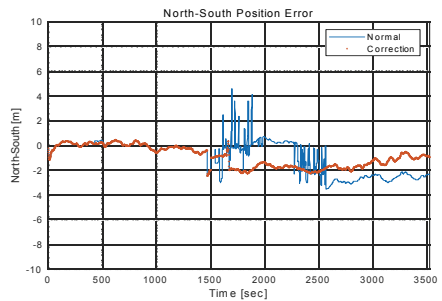
그림 2. 수신기의 수평오차
Fig. 2 Horizontal error of receiver



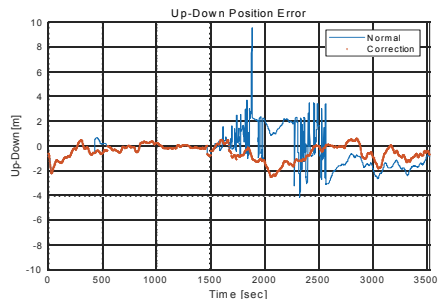
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 가시위성의 개수 및 위치 오차
Fig. 3 Visible satellite number and position error

V. 결론

그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 데이터처리 기간 동안 가시위성의 개수는 6~8개 사이에서 변화하였으며 위성이 변화하는 과정에서 그림 3(b), (c), (d)와 같이 항법해의 오차가 증가하고 연속성이 유지되지 않음을 확인할 수 있다. 그림 3(a)에서 제안한 기법을 적용하였을 때 가시위성의 변화를 살펴보면 실제 가시위성의 개수가 변하더라도 적용된 기법을 통해 즉각적으로 항법해 계산에 포함되지 않았음을 보여주고 있다. 그림 2와 그림 3에서 제안기법의 적용 후 항법해 결과를 보면 항법해의 오차가 줄어들고 연속성이 유지되는 것을 확인할 수 있다.

제안한 기법을 적용하기 전의 항법해 결과값은 가시위성의 개수가 변화하는 순간에 항법해의 값이 크게 변화하였으나 제안기법을 적용하여 항법해를 계산하면 오차가 크게 증가하지 않았으며 신호의 안정성이 확보된 이후에 가시위성을 조정하여 항법해의 연속성이 유지되는 것을 확인하였다.

표 1. 위성항법시스템 성능개선
Table 1. GNSS performance enhancement

Position RMS	Conventional Method	Proposed Method	Performance Enhancement
East-West	0.7071m	0.3034m	57.09%
North-South	1.5959m	1.2431m	22.11%
Vertical	1.3702m	0.8300m	39.42%
Horizontal	1.7455m	1.2795m	26.70%
Total	2.2191m	1.5251m	31.27%

표 1에서는 오차의 제곱평균제곱근을 통해서 성능을 정량적으로 비교하였다. 알고리즘을 검증하기 위한 실측데이터를 기준으로 알고리즘 적용 전과 후에서 수평오차는 1.7455m에서 1.2795m로 26.70% 성능향상이 이루어졌으며 수직오차는 1.3702m에서 0.8300m로 39.42% 향상되었다. 전체 위치오차에 대해서는 2.2191m에서 1.5251m로 31.29% 향상되었음을 확인할 수 있다. 위성항법 신호는 위성신호를 수신하는 다양한 환경변화에 따라 오차성분이 다르게 나타나며 성능향상 결과도 이에 따라 달라질 수 있다. 이상의 검증 결과로 제안한 기법은 가시위성의 개수가 변화하는 환경에서도 항법 성능이 개선됨을 확인하였다.

위성항법시스템은 항법위성의 측정치를 바탕으로 항법해를 계산하므로 항법신호에 오차가 많이 포함되거나 가시위성이 변화할 때 항법해의 오차가 증가하고 항법성능의 연속성이 저하된다. 위성항법 수신기를 운용하는 동안 위성이 뜨고 지는 경우가 발생하고 장애물에 의해 신호가 차단되는 경우에는 가시위성의 개수가 변하여 성능저하가 빈번하게 발생하게 된다. 본 논문에서는 수신기의 측정치에 포함되어 있는 오차를 추정하여 항법해의 계산에 반영하고 가시위성의 변화가 발생할 경우 추가되는 위성은 신호가 안정화될 때까지 항법해 계산에서 배제하는 가시위성 선정 방법을 사용하여 위성항법 성능을 향상하였다. 제안한 기법을 적용할 경우 그동안 가시위성의 변화로 인하여 발생하는 항법성능을 저하를 개선할 수 있다. 특히 도심지에서는 가시위성의 변화가 빈번하게 발생하므로 도심지에서의 항법성능 안정화에 크게 기여할 것이다.

제안한 기법에서 가시위성이 변화할 때 제외된 항법신호는 기존의 보정된 항법해와의 오차가 줄어드는 시기에 항법해 계산에 포함하는 방법을 사용하였는데 시간이 장시간 경과할 경우 기존 위성의 오차 성분이 변화할 수 있고 추가되는 위성의 신호 안정화가 지연되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 향후 제외한 항법위성을 효과적으로 항법해에 적용하는 방법에 관한 연구를 추가적으로 수행할 경우 제안한 기법의 효용성을 더욱 높일 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] V. Uaratanawong and C. Satirapod, "OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR PSEUDORANGE MULTIPATH MITIGATION USING DIFFERENT SIGNAL SELECTION METHODS," *ARTIFICIAL SATELLITES*, vol. 55, no 2, 2020, pp. 77-86.
- [2] F. Meng, S. Wang, and B. Zhu, "GNSS Reliability and Positioning Accuracy Enhancement Based on Fast Satellite Selection Algorithm and RAIM in Multiconstellation,"

- IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 30, no. 10, 2015, pp. 14-27.
- [3] K. Kim and J. Jung, "A Study on Design Optimization for Anti-jamming GPS Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 2, 2022, pp. 245~254.
- [4] A. Tian, C. Fu, S. Jhang, and M. Zhou, "A New Satellite Selection Algorithm in GNSS," *2013 6th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, Xi'an, China, 2013, pp. 81-84.
- [5] M. Chae, S. Cho, and K. Shin, "Development of a Real Trajectory-based Simulator to Verify the Reliability of the Integrated Navigation System for Trains," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 1, 2021, pp. 135~144.
- [6] C. Rajasekhara, V. Dutta, and G. Rao, "Weighted GDOP for improved position accuracy using NavIC and GPS hybrid constellation over Indian sub-continent," *International Journal of Intelligent Networks*, vol. 2, 2021, pp. 42-45.
- [7] Y. Teng, J. Wang, and Q. Huang, "Minimum of Geometric Dilution of Precision (GDOP) for five satellites with dual-GNSS constellations," *Advances in Space Research*, vol. 56, no. 2, 2015, pp. 229-236.
- [8] G. Wang and J. Jiang, "Fast Satellite Selection Algorithm Based on Satellite Elevation Angle and Satellite Contribution for Geometry Dilution of Precision in GPS/BEIDOU," *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference*, Wuhan, China, 2018, pp. 4859-4863.
- [9] Y. Fang, Y. Hong, O. Zhou, W. Liang, and L. Wen, "A GNSS Satellite Selection Method Based on SNR Fluctuation in Multipath Environments," *International Journal of Control and Automation*, vol. 8, no. 11, 2015, pp. 313-324.
- [10] M. Zhang and J. Zhang, "Fast Satellite Selection Algorithm: Beyond Four Satellites," *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING*, vol. 3, no. 5, 2009, pp. 740-747.
- [11] Y. Teng, J. Wang, Q. Huang, and B. Liu, "New characteristics of weighted GDOP in multi-GNSS positioning," *GPS Solutions*, vol. 22, 2018, pp. 74:1-9.
- [12] D. Won, J. Ahn, S. Lee, J. Lee, S. Sung, H. Park, J. Park, and Y. Lee, "Weighted DOP With Consideration on Elevation-Dependent Range Errors of GNSS Satellites," *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, vol. 61, no. 12, 2012, pp. 3241-3250.
- [13] S. Jeong, M. Kim, J. Lee, "CUSUM-based GNSS Spoofing Detection Method for Users of GNSS Augmentation System," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 21, no. 2, 2020, pp. 513-523.

저자 소개

봉재환(Jae-Hwan Bong)



2012년 고려대학교 기계공학과 졸업(공학사)
2014년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)

2020년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사)

2020년 3월 ~ 2020년 8월 RA, MMMI, University of Southern Denmark

2020년 9월 ~ 현재 상명대학교 조교수

※ 관심분야 : Robotics, Human-Robot Interface, Bio-signal, Data-Driven Control, Deep Learning

정성균(Song-Kyun Jeong)



2003년 서울대학교 기계항공공학부 졸업(공학사)

2005년 서울대학교 대학원 기계항공공학부 졸업(공학석사)

2020년 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과 졸업(공학박사)

2005년 ~ 2016년 한국전자통신연구원 선임연구원

2016년 ~ 2020년 과학기술정보통신부 사무관

2020년 ~ 현재 상명대학교 부교수

※ 관심분야 : 위성항법, 비행동역학, 제어

