

저급 센서를 고려한 GPS/INS 결합기법 연구

A Study on GPS/INS Integration Considering Low-Grade Sensors

박 제 두, 김 민 우, 이 제 영, 김 희 성, 이 형 근*

(Je Doo Park¹, Minwoo Kim², Je Young Lee³, Hee Sung Kim³, and Hyung Keun Lee³)

¹Korea Aerospace Industries

²Hyundai-Rotem

³Korea Aerospace University

Abstract: This paper proposes an efficient integration method for GPS (Global Positioning System) and INS (Inertial Navigation System). To obtain accuracy and computational convenience at the same time with low cost global positioning system receivers and micro mechanical inertial sensors, a new mechanization method and a new filter architecture are proposed. The proposed mechanization method simplifies velocity and attitude computation by eliminating the need to compute complex transport rate related to the locally-level frame which continuously changes due to unpredictable vehicle motions. The proposed filter architecture adopts two heterogeneous filters, i.e. position-domain Hatch filter and velocity-aided Kalman filter. Due to distinct characteristics of the two filters and the distribution of computation into the two heterogeneous filters, it eliminates the cascaded filter problem of the conventional loosely-coupled integration method and mitigates the computational burden of the conventional tightly-coupled integration method. An experiment result with field-collected measurements verifies the feasibility of the proposed method.

Keywords: GPS, INS, mechanization, integration, Hatch filter, Kalman filter

I. 서론

항법(navigation)은 위치, 속도 및 자세를 구하기 위해 얻어진 모든 이론과 기술을 통칭한다. 오늘날, 특히 차량의 항법 수요는 급격히 증가하고 있으며 스마트폰의 보급으로 증강현실 및 개인 위치서비스에 대한 관심과 중요성도 날이 증대되고 있어 앞으로 항법은 다양한 분야에서 더욱 중요성을 가지는 기술이 될 것이다.

위성항법시스템(GPS: Global Positioning System)은 지구 주위를 선회하는 다수의 위성을 이용하여 사용자의 위치를 정밀하게 계산하는 측위 시스템이다. 위성항법시스템은 사용시간에 따른 오차의 발산이 없으므로 장시간 사용이 가능하며, 지구 전역에서 정밀한 측위가 가능하다는 장점이 있다. 반면, 위성에서 송신하는 신호의 크기가 매우 작아 외부 요인에 의해 위치 측정치의 신뢰도가 변할 수 있고, 비연속적인 측정치를 제공한다는 단점을 가지고 있다[1-3].

관성항법시스템(INS: Inertial Navigation System) 자이로와 가속도계로부터의 측정된 관성정보를 활용하여 위치, 속도, 자세를 제공하여 주는 시스템으로 외부의 영향을 받지

않는 자립형 시스템이다[4-6]. INS는 샘플링 주파수가 높아 필요한 정보를 연속적으로 제공하고 짧은 시간 동안은 매우 정확하다는 장점이 있다. 반면, 시간이 지남에 따라 각 센서들의 오차가 항법 해에 누적되어 오차가 급격히 증가하는 단점을 내포하고 있어 일반적으로 누적되는 오차를 보상하기 위해 항체의 절대 위치/속도 정보를 제공하는 센서와 결합하여 사용한다.

다양한 항법/측위 센서를 결합하는 다중센서 융합에 있어서 GPS와 INS는 다른 센서들이 제공하지 못하는 고유한 장점을 지니므로 다중센서 융합의 중심 센서로서의 역할을 수행한다. 따라서 그 역할과 넓은 응용분야로 인하여 GPS와 INS의 효율적인 결합은 다중센서 융합분야에 있어서 중요한 주제로서 오랜 기간에 걸쳐서 다양한 방식으로 연구되고 분석되었다.

근래에 들어 GPS/INS 결합항법의 응용분야를 더욱 넓히기 위하여 저가의 위성항법 수신기와 MEMS (Micro Electro-Mechanical System) 센서를 결합하여 높은 정확도의 위치, 속도, 그리고 자세 정보를 취득하는 기법들에 대한 연구가 다양한 분야에서 활발하게 진행되고 있다. 이와 관련하여, 스위스 EPSL 에서는 저급 L1 수신기, MEMS IMU (Inertial Measurement Unit), 그리고 지자기 센서를 약결합하여 skier들의 활강 궤적을 정밀하게 분석하는 연구가 진행되었다 [7]. 개발된 시스템의 성능은 위치오차 50 cm 그리고 속도 오차 20 cm/sec 이내에서 활강 궤적을 추정할 수 있으며 자세오차는 3도 정도의 평균오차를 나타내는 것으로 보고되고 있다. 일본 오사카 대학에서는 L1 저가 수신기의 측정치를 원격으로 수집하여 MATLAB 기반의 후처리 프로세싱

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 12. 3., 수정: 2012. 12. 26., 택확정: 2012. 12. 31.

박제두: 항공우주산업 KHP MEP팀(jdpark1014@koreaero.com)

김민우: 현대 로템 통신제어개발팀(minwookim@hyundai-rotem.co.kr)

이제영, 김희성: 한국항공대학교 항공전자공학과

(jeylee@kau.ac.kr/hskim07@kau.ac.kr)

이형근: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신 공학부

(hyklee@kau.ac.kr)

※ 본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과물임.

엔진을 개발하고 있다[8]. 호주 UNSW 대학은 세계적인 수신기 제조사인 Leica와 공동연구로 위성항법 수신기와 저급 MEMS 센서를 조합하여 정밀 농업에 활용을 위한 초기 시스템을 완성하여 실험을 수행하였다[9].

본 연구에서는 GPS/INS 결합과 관련하여 특히 저급 센서를 활용할 경우 효과적으로 항법정보를 얻을 수 있는 방안에 대하여 연구하였다. 제안된 방법은 GPS와 INS의 연계성을 고려한 지구좌표계 기준 관성항법 속도방정식과 자세방정식 그리고 이중 필터를 활용한 새로운 형태의 GPS/INS 결합필터로 구성된다.

지구좌표계 기반 속도방정식과 자세방정식에 관련해서는 기존의 지역수평 항법좌표계를 기반으로 발표되었던 문헌들을 참고하되 GPS 측정치와의 연계 편의성을 고려하여 항법 연산의 간략화와 정확도 유지를 동시에 만족할 수 있는 방향으로 알고리즘을 설계하였다.

효율적인 GPS/MEMS IMU의 결합을 위하여 본 연구에서는 기존에 널리 활용되고 있는 약결합 방식과 강결합 방식의 장단점을 비교 분석하였으며 이를 기반으로 두 종류의 필터를 동시에 활용하는 새로운 결합방식을 설계하고 구현하였다. 제안된 이중필터 결합방식은 GPS 측정치에 대해서는 위치영역 위상평활화를 적용하고 MEMS IMU 출력에 대해서는 속도보정형 갈만필터를 적용하는 개형으로 구성된다.

II. 지구좌표계 기반 속도방정식과 자세방정식

기존의 관성항법 속도방정식은 항법좌표계를 기반으로 활용된다. 반면 보조센서로 빈도높게 활용되는 GPS는 지구좌표계 기반으로 한 위치 및 속도 측정 정보를 제공해 준다. 따라서, 두 센서의 효율적인 결합을 위해서는 기존의 항법좌표계 기반 속도방정식을 대치하여 지구좌표계 기반으로 활용하는 것이 연산량 관점에서 유리하다. 이를 위하여 다음과 같이 지구좌표계 기반 속도방정식을 유도한다.

먼저 기존의 항법좌표계 기반 속도 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{V}^n = C_b^n f^b - [2\omega_{ie}^e + \omega_{en}^n] \times V^n + g^n \quad (1)$$

여기서

- V : 지표대비속도
- f : 가속도계가 측정하는 비력
- g : 중력
- C_A^B : A-좌표계에서 B-좌표계로의 변환 행렬
- ω_{AB} : A-좌표계에 대한 B-좌표계의 회전각속도
- i : 관성좌표계
- b : 동체좌표계
- n : 지역수평 항법좌표계
- e : 지구좌표계

항법좌표계 기반 속도와 지구좌표계 기반 속도와의 관계를 정립하면 다음과 같다.

$$V^n = C_e^n V^e \quad (2)$$

위 관계식을 미분하면 코리올리 효과에 의하여 다음의 관

계를 만족한다,

$$\dot{V}^n = \dot{C}_e^n V^e + C_e^n \dot{V}^e = C_e^n \omega_{ne}^e \times V^e + C_e^n \dot{V}^e \quad (3)$$

기존의 속도 방정식에 속도 미분치의 관계식을 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$C_e^n \dot{V}^e = C_b^n f^b - 2\omega_{ie}^e \times V^n + g^n \quad (4)$$

따라서 지구좌표계 기반 속도 방정식은 다음과 같이 새로이 정리된다.

$$\dot{V}^e = C_b^e f^b - 2\omega_{ie}^e \times V^e + C_e^n g^n \quad (5)$$

여기서

$$C_e^n = \begin{bmatrix} -\sin(L)\cos(l) & -\sin(l) & -\cos(L)\cos(l) \\ -\sin(L)\sin(l) & \cos(l) & -\cos(L)\sin(l) \\ \cos(L) & 0 & -\sin(L) \end{bmatrix}$$

$$g^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_0 \end{bmatrix}, \quad \omega_{ie}^e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

f^b : 가속도계가 제공하는 비력(specific force)

L : 위도(latitude)

l : 경도(longitude)

Ω : 지구자전 각속도의 크기

식 (3)-(6)에 나타난 바와 같이 지구좌표계를 기반으로 속도방정식을 활용하게 되면 기존의 지역수평좌표계를 기반으로 한 속도방정식에 비하여 복잡한 transport rate을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다. 참고로, transport rate은 항체의 이동에 의한 지역수평의 변화를 고려하기 위한 회전율에 해당된다. 이는 속도 변화율에 기여하는 바가 속도방정식 내의 다른 항들에 비하여 미비하므로 높은 등급의 관성센서를 활용하지 않는 한 정확도의 향상에 크게 기여하지 않는 특성을 가진다.

다음으로 GPS/INS 복합항법에 있어서 자세계산은 속도방정식의 계산에 필요한 좌표변환행렬을 제공하고 동시에 자세 및 자세오차를 롤(roll), 피치(pitch), 기수각(heading) 형태로의 변환이 편리해야 한다. 먼저 식 (5)에 나타난 주요 좌표변환행렬 C_b^e 는 다음의 쿼터니언 미분방정식을 활용하여 얻을 수 있다.

$$\dot{Q}_b^e = \frac{1}{2} U_b^e \omega_{ib}^b - \frac{1}{2} Y_b^e \omega_{ie}^e \quad (7)$$

여기서

$$Q_b^e = \begin{bmatrix} q_0 \\ \dots \\ q_3 \end{bmatrix}, \quad Q_s = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

$$U_b^e = \begin{bmatrix} -Q_s^T \\ \dots \\ q_0 I + (Q_s \times) \end{bmatrix}, \quad Y_b^e = \begin{bmatrix} -Q_s^T \\ \dots \\ q_0 I - (Q_s \times) \end{bmatrix}$$

ω_{ib}^b : 자이로스코프가 제공하는 회전각속도

$$\omega_{ie}^e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

따라서 식 (8)에 의하여 쿼터니언 Q_b^e 를 구하고 식 (8)에 의하여 쿼터니언 행렬 U_b^e 와 Y_b^e 를 구하면 다음과 같이 좌표변환행렬 C_b^e 를 구할 수 있다.

$$C_b^e = (Y_b^e)^T U_b^e \quad (9)$$

또한, 항체의 롤, 피치, 기수각을 계산하기 위하여 필요한 좌표변환행렬 C_b^n 은 다음과 같이 구한다.

$$C_b^n = C_c^n C_b^c \quad (10)$$

좌표변환행렬에 C_b^n 을 다음과 같이 가정하면

$$C_b^n = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

이에 의하여 항체의 롤(roll), 피치(pitch), 그리고 기수각(heading)은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} (\text{roll}) &= \tan^{-1} \left(\frac{c_{32}}{c_{33}} \right) \\ (\text{pitch}) &= \tan^{-1} \left(\frac{-c_{31}}{\sqrt{1 - c_{31}^2}} \right) \\ (\text{heading}) &= \tan^{-1} \left(\frac{c_{21}}{c_{11}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (7)에 나타난 바와 같이 지구좌표계 기준 자세방정식은 지역수평 항법좌표계 기준 자세방정식의 경우와 마찬가지로 두 종류의 각속도를 고려하여야 한다. 기준 좌표변환행렬의 한쪽 끝에 해당되는 동체좌표계의 변화율은 기존의 경우와 마찬가지로 자이로의 출력만을 활용하여 빠른 속도로 처리하게 된다. 반면, 기준 좌표변환행렬의 다른 쪽 끝에 해당되는 지구좌표계의 변화율은 정확하게 알려져 있으며 또한 식 (8)과 같이 간단한 형태를 가지므로 기존의 지역수평 항법좌표계의 변화율에 비하여 활용이 편리한 장점을 가진다. 또한, 항체의 자세를 나타내기 위한 롤, 피치, 그리고 기수각을 추출하기 위해서는 항체의 위도와 경도 정보만이 추가적으로 요구되므로 이와 관련된 추가적인 연산을 크게 요구하지 않는다.

III. 이중 필터를 활용한 분산형 GPS/INS 결합

오랜 기간에 걸친 연구의 결과로 INS와 GPS의 결합에 있어서 약결합 방식(loosely coupled integration)과 강결합 방식(tightly coupled integration)이 가장 널리 활용되어 오고 있다[10,11]. 이들 중 약결합 방식은 GPS 수신기가 제공하는 위치해를 칼만 필터의 입력으로 사용하는 방식이며 강결합 방식은 GPS 수신기가 제공하는 의사거리와 의사거리 변화율 측정치를 칼만필터의 입력으로 사용하는 방식이다.

약결합 방식은 INS와 GPS의 시스템 레벨에서 결합을 수

행하므로 계산시간이 감소하고 측정모델이 간단해지는 장점이 있다. 반면 가시위성의 수가 부족하거나 큰 동적 특성을 가지고 운동을 할 경우 정확한 항법해를 제공하지 못하는 단점이 있다.

또한, 약결합 방식은 필터가 연속으로 배치되는 형태를 갖기 때문에 선행필터를 통과한 필터의 잔차는 유색잡음의 형태를 띄게 된다. 따라서 오차간의 상관성을 가지지 않도록 ‘칼만 필터의 측정오차는 백색잡음의 형태를 갖는다’라는 칼만 필터의 기본가정을 위배하게 되어 직렬필터 문제(filter-driven-filter problem)를 내포하게 된다.

강결합 방식은 INS와 GPS 시스템 레벨에서 이루어졌던 약결합 기법의 문제점을 해결하기 위하여 개발되었다. 약결합 방식과 다르게 INS와 GPS 수신기의 센서 레벨에서 결합하므로 INS의 현재 위치 정보나 속도 정보를 GPS 수신기에서 제공하는 위성 정보와 함께 이용하여 시스템을 구성한다. 따라서 약결합 방식에 비해 구조가 복잡하고 구현이 어려우며 가시위성의 개수가 증가할수록 계산량이 증가하고 측정 모델이 복잡해지게 된다. 참고로 한반도 지역에서 전반적으로 항시 7-9개 내외의 가시위성이 전일 관측된다.

반면, 측정치로 사용하는 의사거리와 의사거리 변화율의 선형화 과정에서 동적 특성이 좋은 INS의 정보를 이용하므로 약결합 방식과 비교하여 동적 환경에서 오차가 작으며 가시위성의 개수가 4개 이하로 존재할 경우에도 위성에 대한 측정치를 사용하여 항법계산이 가능하다는 장점이 있어 정보의 이용 면에서 효율적인 구조라 할 수 있다.

본 논문에서는 앞서 설명된 약결합 방식과 강결합 방식의 장단점을 비교 분석하여 두 개의 필터를 활용하여 기존의 대표적 결합 방식의 장점만을 취하는 새로운 형태의 GPS/INS 결합방식을 제안하였다.

제안된 이중필터 결합방식은 그림 1에 도시된 바와 같이 GPS 측정치에 대해서는 위치영역 위상평화화[12]를 적용하고 관성센서 출력에 대해서는 속도보정형 칼만필터[13]를 적용하는 개형을 가진다. 제안된 결합방식을 활용할 경우 두 필터로 상태변수를 분배함으로 인하여 전체적인 연산량의 감소를 꾀할 수 있다.

GPS 측정치만을 활용하여 수신기의 위치를 추정할 경우

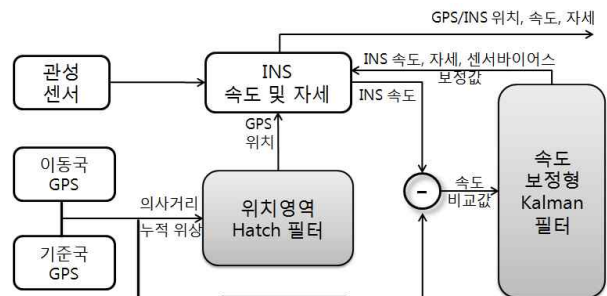


그림 1. 이중 필터를 활용한 위성항법/관성항법 결합 구조.
Fig. 1. Integration architecture for GPS/INS based on two heterogeneous filters.

보완이 필요한 점은 위치 추정치의 출력 속도가 통상적으로 1 Hz 내외인 GPS 측정치의 출력 속도에 종속되어 세밀한 위치 변화를 추적하기 어렵다는 점이다. 이와 같은 난점은 해결하기 위하여 제안된 이중필터 결합방식은 위치영역 위상평활화 필터[36]를 통해 위치 추정치를 전달받으며 전달받은 위치 추정치를 기준으로 다음 위치 추정치를 전달받기까지 MEMS INS의 속도추정치로 빠른 출력 주기의 위치 추정치를 생성하게 된다. 따라서, 제안된 결합방식은 효율적인 이중필터의 활용으로 인하여 직렬필터 문제를 배제하고 총 연산량을 감소시키며 정확한 GPS/INS 위치해를 빠른 출력 주기로 제공할 수 있다는 장점을 가진다.

저가의 MEMS 센서 활용하는 INS에 대하여 그림 1에 도시된 속도보정형 칼만필터는 기존의 약결합 방식에 비하여 위치정보를 상태변수에서 제거하고 속도오차, 자세오차, 가속도계 바이어스, 그리고 자이로 드리프트 만을 상태변수로 고려하므로 연산량의 간소화 효과를 얻을 수 있다.

GPS 측정치에 대해서는 정확도면에서 칼만필터보다 더 효율적인 위치영역 위상평활화필터를 채용함으로써 GPS 측정치가 제공되는 매 시점 칼만필터에 의존하지 않고 정확한 위치 추정치를 얻을 수 있다.

또한, 위상평활화 원리에 의하여 정확한 위치 추정치를 얻을 수 있으며 칼만필터가 제공하는 속도 추정치와 결합되어 고속으로 위치, 속도, 자세 정보를 출력할 수 있게 된다. 따라서, 제안된 결합방식은 기존의 강결합 방식의 장점을 취하며 동시에 연산량의 감소와 직렬필터(cascaded filter) 문제를 회피할 수 있는 바람직한 특성을 내포하게 된다.

IV. 실험

효율적인 GPS/MEMS IMU의 활용을 위하여 제안된 방법의 성능 특성 분석을 위하여 실험을 수행하였다. 제안된 방법은 Ublox사의 AEK-4T 수신기와 Xsens사의 관성항법장치(IMU)를 사용하여 구현하였으며 성능분석을 위한 기준 궤적은 Septentrio사의 PolaRX2e 이중주파수 수신기를 활용하여 1Hz 출력 주기의 측정치를 수집한 다음 한국항공대에서 개발된 RTK (Real-Time Kinematic) 소프트웨어로 후처리하여 확보하였다. 누적위상 측정치에 포함된 미지정수를 결정하여 추출된 기준궤적은 cm급의 정확도를 가진다.

그림 2는 차량 주행에 의한 실험 궤적과 실험 환경을 도시한 그림이다. 실험 지역의 사진은 네이버(NAVER)에서 제공하는 위성 사진을 이용하였다. 실험은 가시 위성을 충분히 확보 할 수 있는 환경에서 약 40분 동안 수행하였다. 이동국과 기준국과의 기저선은 약 300 m 이다.

그림에는 이중주파수 측정치에 포함된 미지정수를 결정하여 추출한 1 Hz의 RTK 기준 궤적과 제안된 방법을 사용하여 추출한 10 Hz의 GPS/INS 궤적이 도시되어 있다.

그림 3은 전체 주행궤적 중 한 쪽 회전구간만을 확대하여 도시한 것이며 수치비교가 용이하도록 출력 값은 지역 수평 좌표계로 변환하여 수평면 성분만을 도시하였다. 그림에서 기준궤적의 위치해가 생성된 시점을 전후해서 위치영역 해치필터에 의한 위치 추정치가 계산되며 GPS/INS 칼만필터가 속도추정치에 의하여 갱신된다.

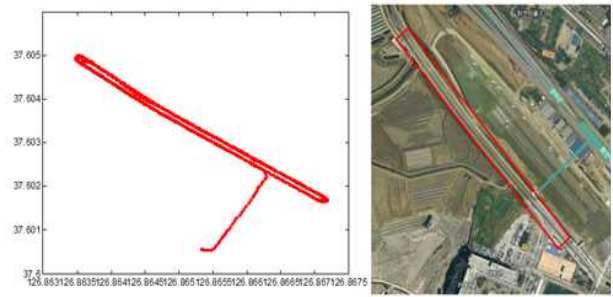


그림 2. 실험 궤적 및 환경.

Fig. 2. Experiment trajectory and environment.

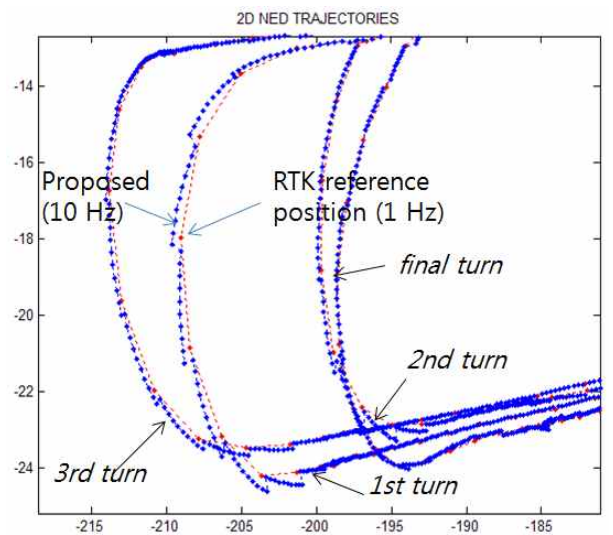


그림 3. 회전 구간에서의 1 Hz RTK 기준 위치와 제안된 방법에 의한 10 Hz 위치 추정치의 비교.

Fig. 3. Comparison of 1 Hz RTK refence positions and 10 Hz GPS/INS position estimates on turning trajectory segment.

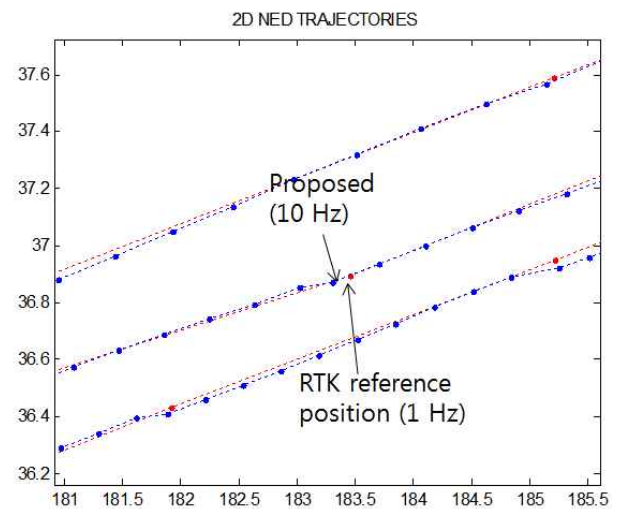


그림 4. 직선 구간에서의 1 Hz RTK 기준 위치와 제안된 방법에 의한 10 Hz 위치 추정치의 비교.

Fig. 4. Comparison of 1 Hz RTK refence positions and 10 Hz GPS/INS position estimates on straight trajectory segment.

만약 INS의 속도 추정치가 정확하다면 GPS/INS 결합 시스템의 궤적은 끊김 없이 나타나겠지만 INS의 속도 추정치가 정확하지 않다면 위치영역 해치필터가 제공하는 GPS 위치해가 1 Hz 간격으로 갱신되는 시점을 전후하여 점프 현상이 발생하게 될 것이다. 따라서 위치영역 해치필터의 갱신주기와 기준궤적의 미지정수 기반 정밀 위치해 산출 시점은 동일하므로 기준궤적 위치해를 전후해서 GPS/INS 위치추정치가 불연속한 정도를 살펴보면 GPS/INS의 정확도를 가늠할 수 있게 된다.

회전 구간은 관성항법의 오차특성으로 인하여 칼만필터 상태변수들이 정확하게 추정되지 않는 경우 위치 및 속도 오차가 크게 증폭되는 특성을 가진다. 따라서 회전 구간의 오차를 살펴보면 전체 항법시스템의 적절성을 가늠해 볼 수 있다.

초기화 후 실험차량은 동일한 회전 구간을 4회 반복 수행하였는데 제안된 방법에 의하여 산출된 위치 추정치의 오차를 보다 명확하게 살펴보기 위하여 각 궤적이 몇 번째 회전구간을 통과하는 궤적인지를 표시하였다. 그림 3에 나타난 바와 같이 각 회전 구간에서 측정갱신 시점을 전후하여 RTK 기준 위치해를 기준으로 제안된 GPS/INS 위치 추정치가 점프 현상을 발생시킴을 확인할 수 있다. 이와 같은 점프 현상은 위치영역 해치필터와 속도보정 칼만필터의 추정오차에 기인하는 것으로 분석되었다. 또한, 점프현상의 크기가 최초로 회전 구간을 진입한 경우 50 cm 내외에서 최종적으로 회전 구간에 진입한 경우에는 20 cm 내외로 점차 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 4는 직선 구간에서의 기준 RTK 위치해와 제안된 GPS/INS 결합방식에 의한 위치추정치들 비교 도시한 것이다. 직선 구간에서는 앞선 회전 구간과 대비하여 필터의 정상상태 도달 여부에 관계없이 속도 추정치에 측정갱신 전후에 위치 추정치의 점프 현상이 발생하지 않고 연속적인 궤적을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 제안된 GPS/INS 결합방식이 정상 상태에 도달한 후 주행 실험의 마지막 부분에서 얻어진 RTK 기준 궤적과 제안된 GPS/INS 추정 궤적을 확대하여 도시하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이 제안된 방식의 속도보정 칼만필터가 측정 갱신하는 시점 전후에도 앞선 회전구간에서 나타난 위치 추정치들의 급격한 점프현상이 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 또한, 제안된 결합방식에 의하여 산출된 10 Hz 위치 추정치들의 근사적인 곡선 궤적 위에 위치영역 해치필터에 의한 1 Hz 위치 추정치가 거의 정확하게 놓여 있음을 확인할 수 있다.

그림 5의 x축과 y축의 단위를 고려할 때 제안된 방법에 의한 10 Hz GPS/INS 위치 추정치는 정상상태에서 미지정수 결정에 의한 1 Hz RTK 기준 위치해에 대하여 10 cm 이내의 오차 정확도를 무난하게 만족함을 알 수 있다. 따라서, 제안된 결합방식은 위치영역 해치필터에 의하여 높은 정확도를 확보하며 속도보정 칼만필터에 의하여 오차의 증가를 안정적으로 제한한 위치 추정치를 10 Hz의 출력속도로 제공하여 줄 수 있음을 확인할 수 있다.

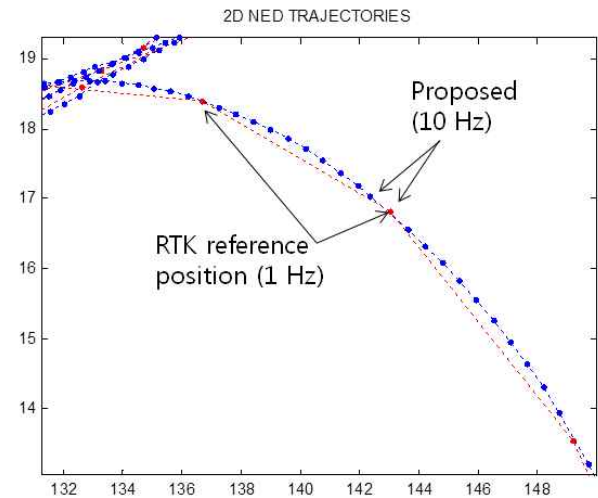


그림 5. 정상상태에서의 1 Hz RTK 기준 위치와 제안된 방법에 의한 10 Hz 위치 추정치의 비교.

Fig. 5. Comparison of 1 Hz RTK reference positions and 10 Hz GPS/INS position estimates after steady state.

V. 결론

본 논문에서는 저가의 GPS 수신기와 MEMS 관성센서의 활용을 고려하여 효율적인 GPS/INS 결합 방식을 제안하였다. 제안된 결합 방식은 GPS와의 연계성을 고려하여 관성항법 속도 및 자세 방정식을 지구좌표계 기준으로 활용하고 연산량의 분산과 정확성 확보를 위하여 특성이 다른 위치영역 해치필터와 속도보정 칼만필터를 동시에 활용하는 특성을 가진다. 제안된 방식의 성능을 분석하기 위하여 실험을 수행하였으며 실험 결과 두 필터가 정상상태에 진입한 이후 10 cm 내외의 정확도를 유지할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] E. Akim and D. Tuchin, "GPS errors statistical analysis for ground receiver measurements," *Proc. of 17th International Symposium on Space Flight Dynamics*, Preprint no. 32, Moscow, 2003.
- [2] O. L. Colombo, "Ephemeris errors of GPS satellite," *Bulletin Geodesique*, vol. 60, no. 1, Paris, 1986.
- [3] D. Jefferson and Y. Bar-Sever, "Accuracy and consistency of broadcast GPS ephemeris data," *Proc. of ION GPS2000*, Salt Lake City, 2000.
- [4] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertia Navigation Technology*, Peter Peregrinus Ltd, 1997.
- [5] J. A. Farrell and M. Barth, *The Global Positioning System & Inertial Navigation*, McGraw-Hill, New York, 1999.
- [6] S. Hong, M. H. Lee, S. K. Kwon, and H. H. Chun, "Car test for the estimation of GPS/INS alignment errors," *IEEE Tr. Intell. Transport. System.*, vol. 5, no. 3, pp. 208-218. Sep. 2004.
- [7] H. Fournier, *Automated Processing of GPS/MEMS-IMU Data for Position, Velocity and Attitude Determination*,

Thesis, EPSL, 2009.

- [8] E. Realini, D. Yoshida, M. Reguzzoni, and V. Raghavan, "Testing goGPS low-cost rtk positioning with a web-based track log management system," *Proc. International Workshop on Pervasive Web Mapping, Geoprocessing and Services*, 2010.
- [9] Y. Li, M. Efatmaneshnik, and A. G. Dempster, "Attitude determination by integration of MEMS inertial sensors and GPS for autonomous agriculture applications," *GPS Solutions*, On-line Publication, 2010.
- [10] K. J. Kim, C. G. Park, and Y. B. Park, "INS/GPS Tightly Coupled Algorithm based on Unscented Transform," *Proc. GNSS Workshop (in Korean)*, 2005.
- [11] A. K. Stimac, *Precision Navigation for Aerospace Applications*, Thesis, MIT, 2004.
- [12] H. K. Lee and C. Rizos, "Position-domain Hatch Filter for Kinematic differential GPS/GNSS," *IEEE Tr. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 30-40, 2008.
- [13] J. G. Park, *A Study on INS/GPS integration method using GPS carrier phase rate*, Thesis (in Korean), Seoul National University, 2001.



박 제 두

2010년 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업. 2012년 동 대학원 석사. 2012년~현재 한국항공우주산업(KAI) 연구원. 관심분야는 INS, GPS, Embedded programing.



김 민 우

2010년 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업. 2012년 동 대학원 석사. 2012년~현재 현대로템 주식회사 통신제어 개발팀 연구원. 관심분야는 GPS, Vision sensor, Navigation, Image processing.



이 제 영

2009년 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업. 2011년 동 대학원 석사. 2011년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 GPS, INS, 이상 검출.



김 희 성

2007년 한국항공대학교 항공전자공학과 졸업. 2009년 동 대학원 석사. 2009년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 L1 RTK, 분산형 GNSS 마스터스 테이션, 장기저선 미지정수 결정.



이 형 근

1990년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1994년 동 대학원 석사. 2002년 동 대학원 박사. 2002년~현재 한국항공대 항공전자및정보통신공학부 부교수. 관심분야는 항법/측위, 교통, 추정이론.