

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(6), 481-487(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.6.481>

## 속도 측정치를 활용한 GPS/INS 통합 항법의 Lever arm 오차 보상

박제두\*, 김민우\*\*, 김희성\*\*\*, 이제영\*\*\*, 이형근\*\*\*\*

Lever Arm Error Compensation of GPS/INS Integrated Navigation  
by Velocity Measurements

Je Doo Park\*, Minwoo Kim\*\*, Hee Sung Kim\*\*\*, Je Young Lee\*\*\* and Hyung Keun Lee\*\*\*\*

Korea aerospace industries\*, Hyundai-Rotem\*\*, Korea Aerospace University\*\*\*,\*\*\*\*

## ABSTRACT

In GPS(Global Positioning System)/INS(Inertial Navigation System) integrated navigation systems, GPS antennas and an inertial measurement units are usually installed outside and inside of the vehicle, respectively. By the difference of installed locations, performance of GPS/INS integrated navigation systems is affected by lever arm errors. For more accurate navigation, lever arm errors need to be compensated correctly since it directly affects the accuracy of navigation states. This paper proposes an effective lever arm error compensation method that utilizes velocity measurements of GPS and INS. By an experiment, feasibility of the proposed algorithm is verified. It is also shown that lever arm compensation is especially important when vehicles are experiencing rotational movements.

## 초 록

GPS/INS 항법시스템의 설치에 있어서 대다수의 경우 GPS 수신기 안테나는 차량의 외부에 설치하게 되고 IMU는 내부에 설치하게 된다. Lever Arm 오차는 이와 같이 센서의 장착 위치 차이로 인하여 발생하는 구조적인 오차에 해당한다. Lever Arm 오차는 항법 성능에 직접적으로 영향을 주기 때문에 적절한 보상이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 GPS와 INS의 속도 측정치를 활용하여 임의의 위치에 장착된 두 센서의 Lever Arm 오차를 효과적으로 추정하고 보상하는 방식을 제안하였다. 실험을 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하였으며, 항체의 회전운동 구간에서 Lever Arm 오차 보상이 특히 중요함을 보였다.

**Key Words** : GPS/INS, Lever Arm, Velocity(속도), Compensation(보상)

## 1. 서 론

항법 기술의 대표적인 예에 해당하는 GPS (Global Positioning System; 위성항법시스템)는 다수의 위성을 이용하여 사용자의 위치를 정밀하게 계산하는 측위 시스템으로 사용시간에 따른

오차의 발산이 없다는 장점을 가진다. 반면, 위성에서 송신하는 신호의 크기가 매우 작아 외부 요인에 의해 위치 측정치의 신뢰도가 변할 수 있고, 비연속적인 측정치를 제공한다는 단점을 가지고 있다[1~2].

INS (Inertial Navigation System; 관성항법시

† Received: September 4, 2012 Accepted: May 28, 2013  
\*\*\*\* Corresponding author, E-mail : [hyknlee@kau.ac.kr](mailto:hyknlee@kau.ac.kr)

시스템)는 외부의 도움을 받지 않고 자이로와 가속도계로부터의 측정된 관성정보를 활용하여 위치, 속도, 자세를 제공하여 주는 대표적 자립형 항법 시스템이다[3~5]. INS는 항체 운동에 대한 샘플링 주파수가 높아 짧은 시간 동안 높은 정확도를 유지하는 장점을 가진다. 반면, 시간이 지남에 따라 각 센서들의 오차가 항법 해에 누적되어 오차가 급격히 증가하므로 누적되는 오차의 보상을 위하여 보조센서의 활용이 불가피한 취약점을 가지고 있다.

GPS와 INS는 상호 보완적인 특성을 가지므로 항체의 빠른 운동에 의한 항법 변수의 변화를 효율적으로 추정하고 항법 변수 추정치의 정확도를 장기간 유지하기 위하여 INS와 GPS를 결합한 복합 항법시스템이 일반적으로 활용되고 있다. GPS/INS의 설치 및 운용에 있어서 일반적으로 발생하는 문제점은 GPS 수신기 안테나는 일반적으로 항체의 외부에 설치되고 IMU (Inertial Measurement Unit; 관성측정장치)는 항체의 내부에 설치되므로 두 센서의 측정 기준위치가 일치하지 않게 된다는 점이다. Lever Arm 오차를 고려하지 않을 경우 직접적으로 INS의 측정 기준과 GPS의 측정 기준위치의 차이로 인하여 Lever Arm 오차에 비례하는 위치 및 속도 오차가 발생하게 되며 간접적으로 항체의 자세 및 관성센서 바이어스의 추정에 영향을 주어 올바른 항법 해를 구할 수 없게 된다[4~7].

본 논문에서는 GPS/INS 복합 항법시스템의 구현에 있어서 대다수의 경우 불가피하게 수반되는 Lever Arm 오차를 효율적으로 대처하기 위한 보상 알고리즘을 새롭게 제안하고 실험을 통하여 그 타당성을 검증하고자 한다. Lever Arm 오차를 보상을 위하여 위치 정보를 활용한 연구가 기존에 있었으나[8~11] 기존 연구에 비하여 제안된 방법은 속도 정보를 활용하며 특히 센서가 임의의 위치에 장착되어 Lever Arm 오차가 알려지지 않은 경우에도 적용할 수 있는 특징을 가진다.

GPS에서 제공하는 속도 정보는 도플러 혹은 위상 측정치를 활용하게 되므로 측정치의 고유한 특성상 다중경로 오차에 강건하다고 알려져 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 방법은 속도 측정치를 통해 Lever Arm 오차를 추정하므로 다중경로 오차에 강건하다는 장점을 가진다.

## II. 본 론

### 1. Lever Arm 오차 보상

Lever Arm 오차를 보상하기 위하여 위치 측

정치를 활용하는 기존의 방법은 시스템모델과 측정모델을 위치(3), 속도(3), 자세(3), 자이로 및 가속도계의 편차(bias) (6) 그리고 Lever Arm 오차(3) 성분을 포함하여 18차 모델로 구성하는 특징을 가진다[8~9]. 반면, 본 논문에서 제안하는 방식은 기존 방식에 대비하여 다중경로 오차에 취약한 위치오차를 배제하고 Lever Arm 및 시각 동기오차를 추가하여 식 (1)과 같이 16차 모델을 활용하게 된다.

$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} F_{INS} & 0_{12 \times 3} & 0 \\ 0_{3 \times 12} & F_{LA} & 0 \\ 0 & 0 & F_{\Delta t} \end{bmatrix} X_k + W_k \quad (1)$$

$$W_k \sim N(0, Q)$$

여기서,  $W$  는 시스템 잡음을 의미하며,  $Q$  는 시스템 잡음의 공분산 행렬을 나타낸다. 칼만 필터의 상태변수는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$X_k = [X_{INS}(t_k)^T \quad X_{LA}(t_k)^T \quad \Delta t]^T \quad (2)$$

$$X_{INS} = [\delta V_N \delta V_E \delta V_D \phi_N \phi_E \phi_D \nabla_x \nabla_y \nabla_z \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z]^T$$

$$X_{LA} = [D_x^b \quad D_y^b \quad D_z^b]^T$$

식 (2)에서  $\delta V$  와  $\phi$  는 각각 속도오차 벡터와 자세오차 벡터,  $\nabla$  와  $\varepsilon$  는 가속도계 바이어스와 자이로 드리프트를 나타낸다. 또한 아래첨자 N, E, D는 항법 좌표계에서의 북쪽, 동쪽, 수직하강 방향을 의미하며, x, y, z는 동체 좌표계에서의 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)축을 나타낸다.  $D$  는 Lever Arm 오차를 의미하며  $\Delta t$  는 GPS와 INS 사이의 시각동기오차를 나타낸다.

시스템 행렬  $F_{INS}$ ,  $F_{LA}$ ,  $F_{\Delta t}$  는 식 (3)과 (4)로 정의한다.

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

$$F_{LA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F_{\Delta t} = 1 - (1 - 1/\tau) \quad (4)$$

식 (4)에서 Lever Arm 오차의 시간전달을 표현하는 행렬  $F_{LA}$  가 단위행렬(identity matrix)의 형태를 가지는 이유는 실제로 Lever Arm 오차 값은 센서의 장착 위치가 시간에 따라 변하지 않는 특성을 반영한 것이다. 시각동기오차의 시간

전달을 나타내는  $F_{\Delta t}$ 에서  $\tau$ 는 상관시간 (correlation time)을 의미한다.

INS 오차의 시간전달을 표현하는  $F_{11}$ ,  $F_{12}$ ,  $F_{21}$ ,  $F_{22}$ 는 식 (5)와 같이 구성된다[12].

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{V_D}{R_L+h} & 2\rho_D+2\Omega_D & -\rho_E \\ -\rho_D-2\Omega_D & \frac{V_N \tan L + V_D}{R_l+h} & \rho_N+2\Omega_N \\ 2\rho_E & -2\rho_N-2\Omega_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{12} = \langle C_b^n f^b \rangle, \quad F_{21} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_l+h} & 0 \\ \frac{-1}{R_L+h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\tan L}{R_l+h} & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} 0 & \Omega_D+\rho_D & -\rho_E \\ -\Omega_D-\rho_D & 0 & \Omega_N+\rho_N \\ \rho_E & -\Omega_N-\rho_N & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$C_b^n$  : 동체좌표계에서 항법좌표계로의 좌표변환행렬

$f^b$  : 비력 (specific force)

$\langle x \rangle$  : 벡터  $x$ 로 구성된 왜대칭행렬

$$w_{ie}^n = [\Omega_N \ 0 \ \Omega_D]^T = [\Omega \cos L \ 0 \ -\Omega \sin L]^T \quad (6)$$

$\Omega$  : 지구 자전 각속도

$$w_{en}^n = [\rho_N \ \rho_E \ \rho_D]^T$$

$$= \left[ \frac{V_E}{R_l+h} - \frac{V_N}{R_L+h} \frac{-V_E \tan L}{R_l+h} \right]^T \quad (7)$$

$$V^m = [V_N \ V_E \ V_D]^T : \text{항체 속도} \quad (8)$$

$R_L$  : 지구 자오반지름(Meridian Radius)

$R_l$  : 지구 접선반지름(Tangential Radius)

$L, l, h$  : 항체의 위도, 경도, 고도

INS의 위치  $R_{ins}^n$ 로부터 Lever Arm 오차  $D^b$ 를 고려하여 GPS 안테나로 이동된 위치  $R_{shift}^n$ 에서의 변형된 INS 속도  $V_{shift}^n$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$R_{shift}^n = R_{ins}^n + C_b^m D^b \quad (9)$$

$$V_{shift}^n = V_{ins}^n + \dot{C}_b^m D^b = V_{ins}^n + C_b^m \langle \omega_{eb}^b \rangle D^b \quad (10)$$

$$V_{shift}^n = V_{ins}^n + (\omega_{eb} \times D)^n \quad (11)$$

여기서, 식 (10)는 식 (9)를 미분하면 얻을 수 있다. 또한, 왜대칭행렬(Skew-Symmetric Matrix)의 특성을 식 (10)에 적용하면 식(11)을 얻을 수 있게 된다. 식 (11)에 나타난 각속도  $\omega_{eb}$ 는 다음과 같이 근사화된다.

$$\omega_{eb} = \omega_{ib} - \omega_{ie}, \quad \omega_{ie} \cong 0 \quad (12)$$

식(12)의 근사화를 식(11)에 적용하면 다음과 같이 근사화된 속도벡터의 관계식을 얻을 수 있다

$$V_{shift}^n = V_{ins}^n + (\omega_{ib} \times D)^n \quad (13)$$

식(13)은 참값에 대한 관계식이므로 실제적인 활용이 불가능하다. 다음의 관계식은 식 (13)를 참고로 하여 도출한 추정값 사이의 관계식에 해당된다.

$$\hat{V}_{gps}^n = \hat{V}_{ins}^n + \hat{C}_b^m (\hat{\omega}_{ib}^b \times \hat{D}^b) \quad (14)$$

식(13)과 식(14)에 나타난 참값과 추정값 사이에는 추정오차에 의하여 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\hat{V}_{shift} = V_{shift} + \delta V_{shift}, \quad \hat{D} = D + \delta D$$

$$\hat{V}_{ins} = V_{ins} + \delta V_{ins}, \quad \hat{\omega}_{ib} = \omega_{ib} + \delta \omega_{ib},$$

$$\hat{C}_b^m = (I_{3 \times 3} - \langle \phi^n \rangle) C_b^m \quad (15)$$

식(13)~(15)에 대하여 섭동 방법을 적용하면 식 (16)과 같은 오차식을 얻게 된다.

$$\delta V_{shift} = \delta V_{ins} - \langle \phi^n \rangle C_b^m (\hat{\omega}_{ib}^b \times \hat{D}^b) + C_b^m (\delta \omega_{ib}^b \times \hat{D}^b) + C_b^m (\hat{\omega}_{ib}^b \times \delta D^b) \quad (16)$$

GPS에 제공하는 속도 측정치를 INS 속도 추정치와 비교하여 칼만필터에 반영하기 위한 간접 측정치  $Z$ 는 다음과 같이 생성한다.

$$Z = \hat{V}_{shift} - \tilde{V}_{gps} \quad (17)$$

여기서

$$\tilde{V}_{gps} = V_{gps} + v \quad (18)$$

식(15)~(18)에 의하여 간접 측정치  $Z$ 는 칼만필터의 상태변수와 다음의 관계를 만족하게 된다.

$$Z = H \delta \hat{X} - v \quad (19)$$

여기서

$$H = [I \langle C_b^n(\hat{\omega}_{ib}^b \times \hat{D}^b) \rangle \ 0 \ -C_b^n \langle \hat{D}^b \rangle \ C_b^n \langle \hat{\omega}_{ib}^b \rangle - \dot{V}_{INS}^n] \quad (20)$$

INS와 같은 비선형 시스템은 칼만필터의 추정 값을 되먹임 함으로써 시스템의 오차전파 특성을 선형적으로 유지 시켜주는 되먹임 방식을 사용하므로[13], 본 논문도 마찬가지로 간접 되먹임 방식의 칼만 필터를 사용하여 시스템을 구성하였다.

새롭게 구성된 상태변수와 관측행렬을 활용하여 식(21)부터 식(24)까지의 칼만 필터의 시간 전달과정과 측정치 갱신과정을 수행하고 오차보정 통해 위치 추정치를 산출하게 된다.

시간전달 :

$$\bar{P}_{K+1} = F_k \bar{P}_K F_k^T + Q_K \quad (21)$$

측정갱신 :

$$K_K = \bar{P}_K H_K^T (H_K \bar{P}_K H_K^T + R_K)^{-1} \quad (22)$$

$$\hat{P}_K = (1 - K_K H_K) \bar{P}_K (1 - K_K H_K)^T + K_K R_K K_K^T \quad (23)$$

$$\hat{X}_K^+ = \hat{X}_K^- - K_K Z_K \quad (24)$$

여기서 아래 첨자  $K$ 는 시점을,  $\bar{P}_K$ 는 전추정오차의 공분산 행렬을,  $\hat{P}_K$ 는 후추정오차의 공분산 행렬을,  $Q_K$ 는 전달잡음을, 그리고  $K_K$ 는 칼만이득을 각각 나타낸다. 상태변수  $\hat{X}_K^+$ 로부터  $\hat{X}_{K+1}^-$ 로의 시간전달은 식에 별도로 나타내지 않았다. 이는 비선형 관성항법 알고리즘이 상태변수에 해당하는 위치, 속도, 그리고 자세의 갱신을 빠른 속도로 수행하기 때문이다.

위치 추정치는 별도의 위치영역 위상평활화필터를 활용하여 1Hz의 주기로 생성하게 된다. 위치영역 위상평활화필터는 항체의 운동에 영향을 받지 않으며 별도의 속도, 자세, 그리고 관성센서 바이어스를 추정하지 않아도 정상상태에서는 cm급의 정확도를 가지는 것으로 알려져 있다[14]. 위상평활화필터가 위치 추정치를 산출하는 1Hz 시점들 사이에서는 Lever Arm 오차가 보상된 GPS/INS 속도 정보를 활용하여 10~100 Hz의 출력 주기로 위치 추정치를 보간(interpolation)하여 활용한다.

## 2. 실험 및 결과

제안된 Lever Arm 오차 보상 알고리즘에 대한 성능을 평가하기 위해 실험을 수행하였다. 실

험에는 저가의 단일 주파수 GPS 수신기인 Ublox-AEK-4T 모델을 저급 패치안테나(patch antenna)에 연결하여 이동국 수신기로 사용하였으며 Xsens사의 MT-i모델을 차량의 IMU로 사용하였다. 널리 알려진 바와 같이 저가의 패치안테나는 특히 다중경로오차에 크게 영향을 받는 단점을 가지고 있다. 기준국은 한국항공대학교 전자관에 위치하고 있으며, 이중 주파수 수신기인 Septentrio사의 PolaRX2e을 고사양 측지용 안테나에 연결하여 사용하였다.

Figure 1은 실험이 진행된 장소와 이중차분 RTK(real-time kinematic) 위치해를 활용하여 차량의 궤적을 도시한 것이며, Fig. 2는 실험 궤적에 대한 차량의 기수각(yaw angle)을 도시한 것이다. 실험은 가시 위성을 충분히 확보 할 수 있는 항공대 길에서 약 40분 동안 수행했으며, GPS수신기 안테나는 차량외부에 IMU는 차량 내부에 설치하였다. 이동국과 기준국과의 기저선은 약 300m 이다. 실험을 통하여 획득된 측정 데이터는 후처리 과정을 통해 결과를 확인하였다.

RTK 위치해의 경우 수신기의 출력 주기인 1Hz 간격으로 항법 해를 출력해 주는데 반해 GPS/INS 복합항법시스템의 경우 IMU의 빠른 출력 특성으로 인하여 10 ~100Hz의 항법 해를 제공할 수 있다. 본 실험에서는 100Hz의 주기로 항법 해를 도출하였다.

Lever Arm 오차의 참값과 칼만필터에 설정된 초기 값은 표 1과 같이 설정되었으며 각축의 값은 동체 좌표계를 기준으로 GPS 수신기 안테나와 IMU 사이의 거리를 나타낸다. 단, Lever

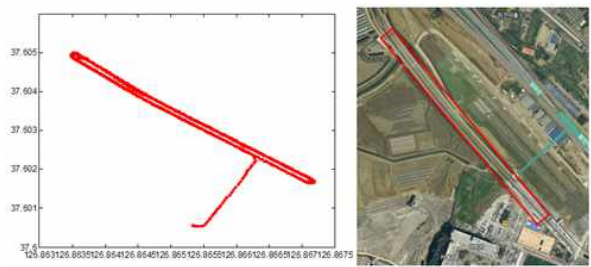


Fig. 1. Configuration of experiment trajectory

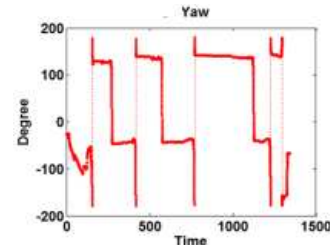


Fig. 2. Heading (yaw angle) profile during experiment

Table 1. lever arm error setting

구분	x축	y축	z축
Lever Arm 오차 참값	30cm	118cm	216cm
Lever Arm 오차 초기값	20cm	50cm	150cm

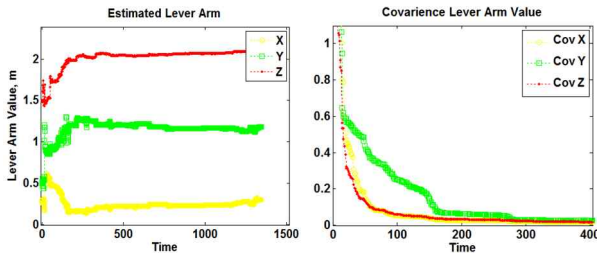


Fig. 3. Estimated Lever Arm value (left plot) and covariance of Lever Arm (right plot)

Arm 오차의 참값은 센서가 설치된 개형상 난점으로 인하여 20 cm 내외의 측정오차를 포함하고 있는 것으로 추정된다.

Figure 3의 좌측은 동체좌표계에 대한 Lever Arm 오차 추정값을 시간에 따라 도시한 것이며 우측은 칼만필터가 산출한 Lever Arm 오차의 추정오차 공분산값을 각각 나타낸 것이다. Fig. 3에 도시된 바와 같이 Lever Arm 오차의 추정치와 오차공분산 값이 초기화 후 200초 이내에 정상상태에 적절하게 수렴함을 확인할 수 있다.

Figure 4와 5는 전체 주행궤적 중 회전구간만을 뽑아 Lever Arm 보상 전(Fig.4)과 Lever Arm

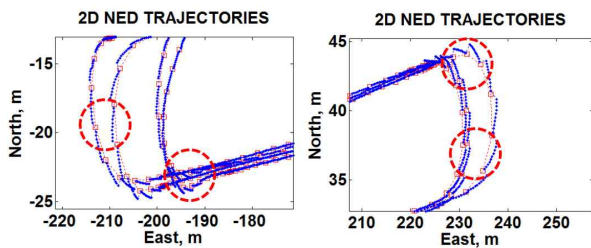


Fig. 4. Estimated trajectory without lever arm error compensation

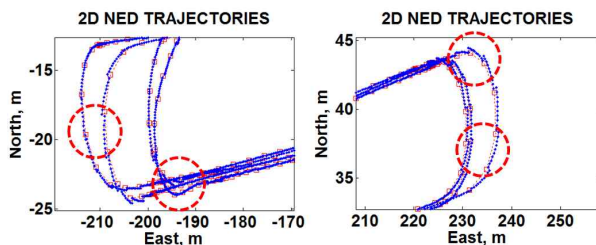


Fig. 5. Estimated trajectory with lever arm error compensation

보상 후(Fig.5)의 결과를 도시한 것이다. 항체가 회전하는 경우 Lever Arm 오차에 비례하여 자세오차가 생기게 되므로 제안한 알고리즘의 효과를 정확히 인지하기 위해서 회전구간에서의 비교가 필수적이다. 수치비교가 용이하도록 출력 값은 NED좌표계로 도시하였다. '□' 기호로 표시된 선은 이중차분 RTK 위치해를 나타내며 '.' 기호로 표시된 선은 GPS/INS 복합항법시스템을 사용하여 항법 해를 나타낸 것이다.

Figure 6은 Fig. 4와 5의 특정부분을 확대하여 보상 전(좌측)과 보상 후(우측)를 비교한 Fig.이다. Lever Arm 오차가 정확하게 추정 및 보상되지 않는다면 INS의 속도 추정치가 정확하지 않게 되고 이의 결과로 전체적인 궤적에서는 톱니모양의 점프현상이 간헐적으로 발생하게 된다. 반면, Lever Arm 오차가 효과적으로 추정되고

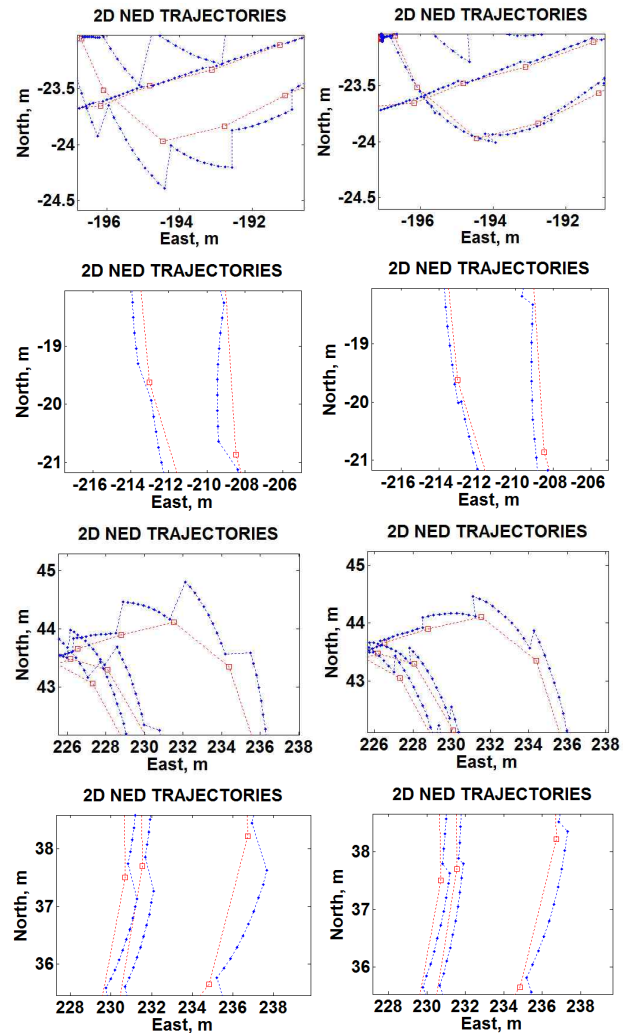


Fig. 6. Enlarged trajectory segments without (left plots) and with (right plots) lever arm error compensation

보상이 되었다면 INS의 속도 추정치에 의하여 보간된 위치 추정치의 궤적에 점프현상은 나타나지 않아야 한다. 따라서, 두 종류의 궤적에 대한 필터 측정갱신 전후의 연속성 비교를 통하여 정확도 향상을 가시적으로 확인 가능하다.

Figure 6에 의하면 제안된 방법에 의하여 곡선 구간의 오차가 보상 전보다 참 값에 가까운 위치 해를 추정하고 있음을 알 수 있다. 또한, 궤적에 나타난 점프의 크기로 가늠해 볼 수 있는 정확도 향상이 완전한 회전 구간보다 급격한 회전 구간에서 현저하게 나타남을 알 수 있다. 이는 잘못 추정된 Lever Arm 오차의 효과가 회전 구간이 급격할수록 더욱 크게 나타남을 의미한다.

반면, Fig. 6 좌측의 첫 번째와 세 번째 Fig.들과 우측의 첫 번째와 세 번째 Fig.들을 비교해보면 제안된 방법에 의하여 Lever Arm 오차로 인한 영향이 상당부분 감소되었지만 궤적의 점프현상이 전부 제거되지 않았음을 확인할 수 있다. 이는 제안된 칼만필터가 Fig. 6에 해당하는 시구간에서 아직 정상상태에 도달하지 못하여 Lever Arm 오차의 추정이 부정확하기 때문에 발생하는 것으로 분석된다.

Figure 7은 직선구간에서 오차보상 전과 후의 결과를 도시한 것이며 Lever Arm 오차 보상 전후의 차이가 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 직선구간이 제공하는 낮은 가관측성에 기인하는 것

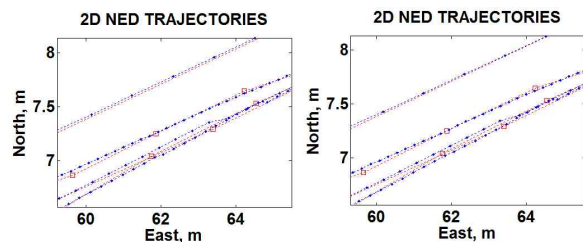


Fig. 7. Straight-line trajectory segments without(left plot) and with(right plot) lever arm error compensation

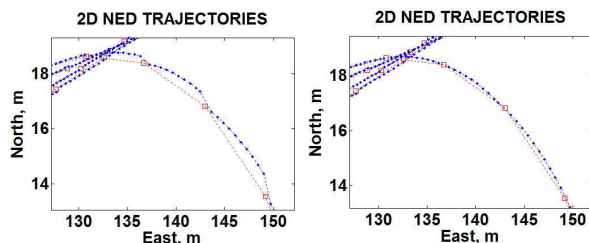


Fig. 8. Trajectory segments corresponding to the last part of the experiment without (left plot) and with (right plot) lever arm error compensation

으로 분석된다. 일반적으로 회전구간과 같이 가관측성이 높은 구간에서 칼만필터의 추정오차는 크게 감소하며 이때 추정오차의 감소 정도는 활용된 모델의 적절성에 비례하게 된다. 반면, 직선구간과 같이 가관측성이 낮은 구간에서는 활용된 모델의 적절성이 크게 나타나지 않는 특성을 가진다.

Figure 8은 실험의 후반부 회전 구간의 Lever Arm 오차 보상 전후의 궤적을 도시한 것이다. 실험의 후반부 회전 구간에서는 칼만필터에 의한 Lever Arm 오차의 추정이 정상상태에 진입하였다. Fig. 8의 좌측 그림에 나타난 바와 같이 Lever Arm 오차를 보상하지 않은 경우 회전구간에서의 Lever Arm 오차의 대표적 징후인 간헐적 점프 현상이 발생함을 확인할 수 있다. 반면, Lever Arm 오차를 보상한 결과에 해당되는 우측 그림의 경우 간헐적 점프 현상은 식별하기 어려운 정도로 감소되었음을 확인할 수 있다. 이는 실험의 전반부 시구간에서 몇 번의 회전 궤적을 거치면서 가관측성 향상을 통하여 제안된 칼만필터가 정상상태에 돌입하여 설계된 칼만필터 알고리즘이 Lever Arm 오차를 효과적으로 추정하였음을 의미한다.

### III. 결 론

본 논문에서는 저가의 단일 주파수 GPS수신기와 IMU에서 출력되는 속도 추정치를 차분하여 Lever Arm 오차를 효과적으로 추정하고 보상하는 방법을 제안하였으며 실험을 통하여 제안된 방법의 성능을 분석하였다.

실험에 의하면 Lever Arm 오차의 영향은 직선 구간에서 미비하게 나타나는 반면, 회전 구간에서는 영향이 큰 것으로 확인되었다. 오차의 영향으로 측정갱신 전후에 항체의 궤적은 점프 현상이 크게 발생 하는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 제안한 방법에 의하여 Lever Arm 오차가 효과적으로 보상되어 실험 후반부의 회전 구간에서 Lever Arm 오차의 대표적 징후인 궤적의 점프현상이 실질적으로 제거됨을 확인할 수 있었다. 이는 초기의 회전 구간에서 제안된 칼만필터 알고리즘이 가관측성 향상을 통하여 Lever Arm 효과를 효과적으로 추정하는데 기인하는 것으로 분석된다.

### 후 기

본 연구는 기초기술연구회 NAP(National Agenda Project) "재난 예방 및 국민 안전 제고로

위한 위성기반 위치 추적 기술 연구" 사업과 국토 해양부의 「하늘 프로젝트」로 지원 되었습니다.

## References

- 1) EL Akim, DA Tuchin, "GPS errors statistical analysis for ground receiver measurements", *Proc. of 17th International Symposium on Space Flight Dynamics*; Preprint no.32, Keldysh IAM, RAS, Moscow, 2003.
- 2) D. Jefferson, Y. Bar-Sever, "Accuracy and Consistency of Broadcast GPS Ephemeris Data", *Proceedings of ION GPS2000*, Salt Lake City, UT, pp. 391-395, Sept. 19-22, 2000.
- 3) D. H. Trttertton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Peter Peregrinus Ltd, 1997.
- 4) J. A. Farrell and M. Barth, *The Global Positioning System & Inertial Navigation*, McGraw-Hill, New York, 1999.
- 5) S. Hong, M. H. Lee, S. K. Kwon and H. H. Chun, "Car Test for the Estimation of GPS/INS Alignment Errors," *IEEE Trans Intell, Transport. System*, Vol. 5, no. 3, pp. 208-218. Sep. 2004.
- 6) T. Bell, "Analysis of attitude measurement in robotic ground vehicle positon determination," *Navigation*, vol.47, no.4, pp.289-296, 2000-2001.
- 7) J. F. Wagner and G. Kasties, "Improving the GPS/INS integrated system performance by increasing the distance between GPS antenna and inertial sensors," *Proc. Nat. Technical Meeting, Institute Navigation*, San Diego, CA, pp.103-115, 2002.
- 8) S. Hong, M. H. Lee, S. H. Chun, J. L. Speyer, "Experimental Study on the Estimation of Lever Arm in GPS/INS", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.55, no.2, pp. 431-448, 2006.
- 9) J. W. Seo, H. K. Lee, J. G. Lee, C. G. Park, "Lever Arm Compensation for GPS/INS/Odometer Integrated System", *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 247-254, 2006.
- 10) J. H. Park, S. W. Lee, D. B. Park and D. H. Shin, "Lever Arm Compensation of Reference Trajectory for Flight Performance Evaluation of DGPS/INS installed on Aircraft," *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 40, no. 12, pp. 1086-1092, 2006.
- 11) J. Wendel, G.F. Trommer, "Tightly coupled GPS/INS integration for missile applications", *Aerospace Science and Technology*, pp. 627-634, Aug. 2004.
- 12) H. K. Lee, J. G. Lee, Y. K. Roh, C. G. Park, "Modeling Quaternion Errors in SDINS : Computer Frame Approach", *IEEE Tr. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 34, No. 1, pp. 289-299, 1998.
- 13) S. M. Seong and K. H. Kang, "Kalman Filter Design For Aided INS Considering Gyroscope Mixed Random Errors," *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 34, no. 4, pp. 47-52, 2012.
- 14) H. K. Lee, C. Rizos and G. I. Jee, "Analyzing Position-Domain Hatch Filter for Real-Time Kinematic Differential GNSS," *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 34, no. 2, pp. 48-55, 2006.