이중 Moving Window 버퍼 기반 전달정렬 측정치 시간지연 보상기법

Compensation Technique of Measurement Time Delay in Transfer Alignment Using the Double Moving Window Buffer

김 천 중*

Cheon-Joong Kim

유 준**

Joon Lyou

Abstract

Measurement time delay in the transfer alignment is very important. It has been well known that the time delay degrades the alignment performance and makes some navigation errors on the transfer alignment of slave INS(SINS). Therefore there are many schemes to eliminate that time delay but the compensation technique through the estimation by Kalman filter through modeling the time delay as a random constant is generally used. In the case of change over measurement time delay or the large measurement time delay, estimation performance in the existing compensation technique is degraded because model of time delay is not correct any more. In this paper, we propose the method to keep the time delay almost constant even though in the abnormal communication state and very small through feedback compensation using double buffer. Double buffer consists of two moving window to temporarily store measurements from master INS and slave INS in real time.

Keywords : Double Buffer(이중버퍼), Measurement Time Delay(측정치 시간지연), Transfer Alignment(전달정렬)

1. 서 론

관성항법장치는 관성센서인 자이로스코프와 가속도계에서 측정된 각속도 및 가속도 정보를 입력으로 하는 항법 방정식을 적분하여 항법정보를 계산하기 때문에 외부의 도움 없이도 자신의 항법정보 계산이 가능

하다. 항법 정보를 계산하기 위한 관성항법장치의 항법 방정식은 위치, 속도, 자세의 3종류 1차 미분방정식으로 구성되기 때문에 이 방정식을 연속적으로 계산하기 위해서는 초기 위치, 속도, 자세정보가 요구되며 이를 구하는 것을 정렬(alignment)이라 한다^[1]. 정렬은 일반적으로 정지상태에서 관성센서 출력과 정지상태에서의 기준 항법정보를 이용하여 정렬을 수행하는 자가정렬(self-alignment)과 비행중 외부에서 제공되는 항법정보를 이용하여 정렬을 수행하는 비행중 정렬(in-flight alignment)로 구분할 수 있다. 비행중 정렬에서 기준 항법정보를 관성항법장치에서 전달(transfer) 받

† 2011년 4월 11일 접수~2011년 6월 24일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 충남대학교(Chungnam National University) 전자공학과
책임저자 : 유 준(jlyou@cnu.ac.kr)

아 정렬을 수행하는 것을 전달정렬(transfer alignment)이라한다^[1]. 일반적으로 기준항법정보를 제공하는 관성항법장치는 비관성 보조센서 등을 이용하여 정밀도를 일정하게 유지하며 비교적 정확한 항법정보를 정렬대상 관성항법장치에 제공한다. 기준항법정보를 제공하는 관성항법장치는 일반적으로 비행기, 배, 차량 등에 장착되어 사용되며 MINS(Master INS)라 하며 정렬대상 관성항법장치는 비행기, 배, 차량 등과 같은 모항체에 탑재되어 운용되는 부 시스템(예로 유도탄, 레이다 등) 등에 장착되어 사용되며 SINS(Slave INS)라 한다. MINS는 SINS에 정렬에 필요한 여러 종류의 항법정보를 제공하며 SINS는 이를 선택적으로 사용하여 정렬을 수행한다. 일반적으로 가장 많이 전달정렬에 사용되는 항법정보로는 속도정보이며 이러한 경우 두 관성항법장치의 속도를 비교하여 정렬을 수행한다는 의미로 속도정합(velocity matching) 전달정렬이라 한다^[1]. 이외에도 SINS의 전달정렬을 위하여 속도이외에 자세, 가속도, 각속도 등이 추가로 사용되며 대부분의 적용체계에서 두 종류이상의 항법정보를 이용하여 전달정렬을 수행한다^[1].

전달정렬에서는 MINS와 SINS의 항법정보의 차를 측정치로 하여 SINS의 항법 오차를 추정하기 때문에 시간동기된 MINS와 SINS의 항법정보가 요구된다. 그러나 MINS에서 SINS로 전송되는 과정에서 시간지연이 필연적으로 발생되며 전달정렬 성능저하의 주요원인이 된다^[2]. 그러므로 모델링 기반으로 이를 추정하여 보상하는 방법을 일반적으로 많이 사용한다^[4]. 그러나 이 방법은 시간지연 오차가 상수라 가정하여 필터를 구성하기 때문에 통신지연 등의 여러 원인에 의하여 시간지연 오차가 변경되는 경우 시간지연 오차 추정성능이 저하되는 상황이 발생된다. 또한 필터 구성상 시간지연 오차를 물리적으로 보상하기 어렵기 때문에 시간지연 오차가 큰 경우 시간지연 오차 모델이 부정확하게 되어 시간지연 오차 추정성능이 저하되게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 빠른 주기의 항법정보가 가용한 SINS의 항법정보를 일정한 크기의 Moving Window 버퍼에 저장하고 전달정렬 필터에서 추정된 시간지연 오차만큼 Moving Window 버퍼에 저장된 SINS 항법정보의 샘플링 시점을 변화시켜 물리적으로 시간지연 오차를 보상하는 방법을 제시하였다. 또한 이중 버퍼를 이용하여 MINS 항법정보가 SINS에 전달되는 동안 발생 가능한 비정상적 통신 상황에서도 시간지연 오차를 일정하게 유

지하는 방법도 제시하였다. 제시된 시간지연 오차 보상방법은 시뮬레이션 및 시험을 통하여 검증하였으며 그 결과도 함께 제시하였다.

본 논문의 구성을 살펴보면 2장에서는 시간지연 오차를 수학적으로 모델링한 결과를 기술하며 3장에서 본 논문에서 제시한 이중 Moving Window 기반 시간지연 보상방법에 대하여 기술한다. 4장에서는 제시된 시간지연 오차 보상방법의 성능을 검증하기 위하여 수행한 시뮬레이션 및 실측치를 이용한 시험결과를 제시하고 5장에서 본 논문의 결론을 맺도록 한다.

2. 시간지연 오차 모델링

일반적으로 전달정렬에서 시간지연 오차는 MINS와 SINS의 항법정보 간의 측정시점 불일치를 의미한다. 시간지연 오차는 MINS의 항법정보가 SINS로 전송되는 과정에서 주로 발생된다. 일반적으로 MINS의 항법정보는 Fig. 1에서와 같이 사격통제장치(FCS), 인터페이스 컴퓨터(ICU)와 같은 여러 장치를 거쳐서 SINS에 전달되기 때문에 각각의 장비간에 발생하는 통신지연 등이 모두 더해져서 식 (1)과 같이 측정치 시간지연 오차가 발생한다.

$$\delta T = \delta T_1 + \delta T_2 + \delta T_3 \quad (1)$$

위와 같이 발생하는 시간지연 오차 δT 는 관성항법장치 시스템 및 측정치 모델을 식 (2)와 같이 구성하고 전달정렬 필터를 이용하여 추정하여 보상하는 방법을 일반적으로 이용한다^[5]. 식 (2)에서 상태변수 x 는 관성항법장치의 항법오차인 위치, 속도, 자세오차 및 관성항법장치를 구성하는 관성센서인 자이로/가속도계의 오차요소, 장착 비정렬 오차 등으로 구성된다. 또한 식 (2)의 측정치 y 에서 모델링된 시간지연 오차도 상태변수에 포함된다. 추가적으로 식 (2)에서 A 는 시스템 행렬, w 는 공정잡음, H 는 측정치 행렬, v 는 측정잡음을 의미하며 G 는 공정잡음 행렬이다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Gw \\ y &= Hx + v \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)가 모델링 되면 ΔT_M 의 느린 주기로 MINS에서 출력되는 항법정보(위치, 속도, 자세, 가속도, 각속

도 등)가 FCS, ICU를 통하여 SINS에 시간지연 되어 전달되며 SINS는 MINS정보가 수신되면 ΔT_s 의 빠른 주기로 SINS에서 계산되는 항법정보와 MINS에서 수신한 항법정보의 차를 구하여 전달정렬 필터의 측정치를 생성한다. 전달정렬 필터는 일반적으로 칼만필터가 적용되며 적용 체계에 따라 다른 필터도 적용되는 경우도 있다. 전달정렬 필터에서 추정된 항법오차는 SINS의 항법 정확도를 높이기 위하여 보상되며 시간지연 오차 추정치는 모델기반 보상방법을 통하여 측정치 생성시 보상된다. 예를 들어 속도/자세 측정치를 이용하여 전달정렬 수행시 시간지연 오차 모델링을 위한 측정치를 식으로 나타내면 식 (3), (4)와 같다. 식 (3)에서 $\hat{V}_s^m$ 은 SINS에서 계산된 항법 좌표계에서의 속도이고 $\hat{V}_m^m$ 은 MINS에서 시간지연 되어 전송된 항법좌표계에서의 속도이다. 식 (4)에서 $\hat{C}_m^m = (I - R)C_m^m$ 은 오차가 포함된 MINS의 동체 좌표계에서 항법 좌표계로의 좌표변환행렬이며 $\hat{C}_s^m = (I + E)C_s^m$ 은 오차가 포함된 SINS의 동체 좌표계에서 항법 좌표계로의 좌표변환행렬이다. $\hat{C}_s^m = (I - M)C_s^m$ 은 MINS와 SINS간의 장착 비정렬 좌표변환행렬이다. 앞 수식에서 E 는 SINS 항법 좌표계에서 본 비정렬 오차이고 M 는 MINS와 SINS간의 장착 비정렬 오차이며 R 은 MINS 항법 좌표계에서 본 비정렬 오차이다. Fig. 2와 비교하여 정리하면 $\hat{V}_s^m$ 및 $\hat{C}_s^m$ 은 $Z_s(K_s)$ 이며 $\hat{V}_m^m$ 및 $\hat{C}_m^m$ 는 $Z_M(K_M)$ 이다

$$Y^V = \hat{V}_s^m(t) - \hat{V}_m^m(t - \delta T) \quad (3)$$

$$Y^C = \hat{C}_m^m(t - \delta T) \hat{C}_s^m(t) \hat{C}_n^s(t) - I \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 시간지연된 속도정보 및 좌표변환행렬을 테일러 급수전개 하여 정리하면 식 (5), (6)과 같다.

$$\hat{V}_m^m(t - \delta T) = \hat{V}_m^m(t) - \dot{\hat{V}}_m^m(t) \times \delta T + \frac{\ddot{\hat{V}}_m^m(t) \times \delta T^2}{2!} + \dots \quad (5)$$

$$\hat{C}_m^m(t - \delta T) = \hat{C}_m^m(t) - \dot{\hat{C}}_m^m(t) \times \delta T + \frac{\ddot{\hat{C}}_m^m(t) \times \delta T^2}{2!} + \dots \quad (6)$$

식 (5), (6)을 시간지연이 포함된 측정방정식 (3), (4)

에 대입하여 정리하면 식 (7), (8)과 같은 방정식이 유도된다. 식 (5)에서 δV 는 속도오차, $\hat{V}_m^m(t)$ 는 항법좌표계에서 계산된 가속도, $\hat{V}_m^m(t)$ 는 항법좌표계에서 계산된 저크(jerk), δT 는 시간지연 오차, v 는 측정잡음이다. 식 (6)에서 Ω_{nm}^m 은 각속도로 항법 좌표계와 MINS의 동체 좌표계사이의 각속도를 MINS의 동체 좌표계에서 측정한 값이며 이 값은 식 (9), (10)에 의하여 계산된다. (7), (8)에서 δV , δT 를 상태변수 x 에 포함시켜 유도하면 식 (2)의 측정 방정식의 형태로 유도된다. 식 (7), (8)에서 $\wedge$ 로 표시된 항들은 오차가 포함된 항들로 섭동법(perturbation method)을 적용하여 수식을 전개하는 과정에서 오차와 시간지연 오차간의 곱을 모두 영으로 가정하여 유도하였기 때문에 식 (7), (8)의 최종 유도된 측정 방정식은 모두 정확한 값(true value)으로 구성된 수식으로 유도되었다.

$$\begin{aligned} Y^V &= \hat{V}_s^m(t) - \hat{V}_m^m(t - \delta T) \\ &= \hat{V}_s^m(t) - \hat{V}_m^m(t) + \hat{V}_m^m(t) \delta T - \hat{V}_m^m(t) \frac{\delta T^2}{2} + \dots \\ &= \delta V + \hat{V}_m^m(t) \delta T - \hat{V}_m^m(t) \frac{\delta T^2}{2} + \dots + v \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Y^C &= \hat{C}_m^m(t - \delta T) \hat{C}_s^m(t) \hat{C}_n^s(t) - I \\ &= -E - C_m^m M C_n^m - \hat{C}_m^m(t) \hat{C}_s^m(t) \hat{C}_n^s(t) \delta T \\ &\quad + \hat{C}_m^m(t) \hat{C}_s^m(t) \hat{C}_n^s(t) \frac{\delta T^2}{2} - \dots \\ &= -E - C_m^m M C_n^m - C_m^m \Omega_{nm}^m C_n^m \delta T \\ &\quad + C_m^m [(\Omega_{nm}^m)^2 + \dot{\Omega}_{nm}^m] C_n^m \frac{\delta T^2}{2} + \dots + v \end{aligned} \quad (8)$$

$$\hat{C}_m^m(t) \hat{C}_s^m(t) \hat{C}_n^s(t) = \hat{C}_m^m(t) \Omega_{nm}^m \hat{C}_n^m(t) \quad (9)$$

$$\hat{C}_m^m(t) \hat{C}_s^m(t) \hat{C}_n^s(t) = \hat{C}_m^m(t) [(\Omega_{nm}^m)^2 + \dot{\Omega}_{nm}^m] \hat{C}_s^m(t) \hat{C}_n^s(t) \quad (10)$$

식 (7), (8)은 시간지연 오차를 정확하게 모델링하기 위하여 유도된 식으로 실제적으로는 1차항의 시간지연 오차만을 가정하여 유도하여 사용하며 이를 유도하면 식 (11), (12)과 같다. 식 (12)는 행렬 형태의 자세 측정 방정식을 $Skew(\vec{a}) = DCM \cdot Skew(\vec{b}) \cdot DCM^T$ 는 $\vec{a} = DCM \cdot \vec{b}$ 와 같은 관계식을 이용하여 벡터 형태로 변환한 측정 방정식이다^[6].

$$y^V = \delta V + \widehat{V}_m^m(t) \delta T + v \quad (11)$$

$$y^C = -\epsilon - C_m^m m - C_m^m \omega_{nm}^m \delta T + v \quad (12)$$

식 (11), (12)는 속도/자세 측정치를 전달정렬에 사용하는 경우 시간지연 오차를 모델링한 결과로 전달정렬 필터에서 추정된 시간지연 오차를 식 (11), (12)를 기반으로 보상하게 된다. 이와 같은 모델기반 시간지연 오차 보상방법은 전달정렬 필터에서 추정된 시간지연 오차를 이용하여 보상하는 방법으로 시간지연 오차가 새로이 추정될 때까지 외부 운동이 변하지 않고 시간지연이 작다는 가정하에서 모델링이 이루어진다. 그러므로 시간지연 오차가 크거나 혹은 시간지연 오차가 상수가 아니고 변하는 경우, 외부 인가되는 운동이 큰 경우에는 모델의 부정확성 때문에 시간지연 오차의 추정오차가 커져 시간지연 오차의 보상이 정상적으로 이루어지지 않아 전달정렬의 전체성능이 저하되게 된다. 특히 기존 방법이 시간지연 오차를 상수로 가정하여 모델링하기 때문에 Fig. 1과 같이 여러 부 시스템을 거쳐 MINS 정보가 전달되는 방법을 사용하는 기존의 전달정렬 방법에서는 시간지연 오차가 필연적으로 가변될 수 밖에 없다. 심지어 MINS 항법정보가 누락되는 경우도 발생할 가능성이 있기 때문에 이러한 상황에서 Fig. 2와 같이 MINS 항법정보의 수신주기에 맞추어 전달정렬을 수행하는 경우 시간지연 오차의 추정성능이 저하되고 이를 모델기반으로 보상하면 전달정렬의 성능이 저하되게 된다.

Fig. 1. 전달정렬 시간지연 오차

3. 시간지연 오차 보상방법

본 장에서는 전달정렬에서의 시간지연 오차를 정밀하게 보상하는 새로운 방법에 대하여 기술한다. 먼저 Fig. 2와 같은 기존의 전달정렬 방법에서는 시간지연

되어 MINS에서 전송된 항법 데이터의 수신시점에 맞추어 측정치 생성 및 전달정렬 필터가 수행되었다. 그러나 MINS 및 SINS 항법정보를 일정 크기의 Moving Window 버퍼에 저장하고 버퍼에서 샘플링된 데이터를 이용하여 전달정렬 필터의 측정치를 생성하도록 하는 방법을 본 논문에서 제시하였다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 MINS의 Moving Window 버퍼는 ΔT_M 의 느린 주기로 MINS에서 전송되는 데이터가 FCS, ICU를 거쳐 시간지연되어 SINS에 수신되면 수신되는 순서대로 스케일되어 전송된 데이터를 실제 사용가능하도록 처리 및 변환하여 M 크기의 Moving Window 버퍼에 MINS의 항법정보가 저장되도록 구성되며 SINS의 Moving Window 버퍼에 ΔT_S 주기로 빠르게 계산되는 항법정보를 순서대로 획득하여 N개의 크기를 가지는 Moving Window 버퍼에 순차적으로 저장한다. 이와 같이 Moving Window 버퍼에 저장된 항법 데이터를 적용하는 사유는 MINS의 항법/시간 데이터가 부 시스템간의 통신지연 및 통신이상 등으로 인하여 데이터 전달 중에 누락되거나 시간지연이 크게 발생할 수 있다. 이러한 상황에서 사전점검 없이 MINS 데이터를 전달정렬에 바로 적용하면 시간지연 오차가 순간적으로 크게 발생하여 전달정렬 성능을 저하시키는 주요원인이 되므로 Moving Window 버퍼에 저장된 데이터를 전달정렬에 사용하기 전에 데이터의 정상여부를 판단하여 적용하기 위함이며 SINS에 적용된 Moving Window 버퍼는 전달정렬 필터에서 추정된 시간지연 오차를 보상하기 위함이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 Moving Window 버퍼에 모든 데이터가 저장된 상태에서 전달정렬을 위한 측정치를 버퍼 크기 중간지점의 데이터를 샘플링하여 적용한다. 버퍼의 중간지점을 샘플링하는 사유는 시간지연 오차가 일반적으로 한쪽 방향으로 발생하나 보상과정에서 발생하는 과응답 특성 혹은 비정상 상황에서 시간지연 오차의 발생방향이 반전되는 상황에 대비하기 위함이다. 이 경우 시간지연 오차 보상을 위한 샘플링 위치가 버퍼의 중간지점에서 앞·뒤로 가변되게 된다. SINS 데이터의 경우 전달정렬 알고리즘이 SINS의 내부에서 수행되며 항법데이터도 빠른주기로 생성되기 때문에 항법데이터가 지연되거나 누락되는 상황이 발생되지 않는다. 그러나 MINS의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 통신지연 및 통신이상에 의한 항법정보의 지연 및 누락이 가능하기 때문에 이를 방지하기 위하여 항법데이터 전송시 시간정보도 같이

전송된다. 큰 시간지연이 발생한 MINS 항법데이터는 Moving Window 버퍼를 적용하기 때문에 근본적으로 문제가 없으나 데이터가 중간에 누락된 경우에는 MINS에서 전송된 시간정보를 확인하여 현재 사용중인 $\frac{M}{2}$ 시점의 시간정보와 $\frac{M}{2}-1$ 시점의 시간정보의 차를 구하고 이를 MINS의 전송주기 ΔT_M 과 비교하여 데이터의 연속성을 확인한다. 이를 확인하여 데이터의 누락이 없으면 다음단계를 수행하고 데이터의 누락이 확인되면 전달정렬 필터의 측정치 갱신(update)을 하지 않고 모델에 대한 전파(propagation)만 수행하도록 한다. 버퍼에서 정상적인 MINS/SINS의 항법정보가 샘플링되면 두 정보의 차를 구하여 전달정렬 필터의 측정치를 생성한다.

Fig. 2. 기존 시간지연 오차 보상방법

전달정렬을 위한 측정치가 생성되면 식 (2)와 같이 유도된 시스템 및 측정 방정식을 칼만필터등과 같은 전달정렬 필터를 이용하여 상태변수를 추정한다. 전달정렬 필터에서 추정된 상태변수에는 항법오차(위치/속도/자세오차 및 관성센서 오차)와 시간지연 오차가 포함되며 항법오차는 SINS의 항법계산시 정밀도 향상을 위하여 보상되며 보상 후의 항법오차는 MINS에 준하는 항법성능을 유지하게 된다. 그러나 시간지연 오차는 항법오차와 같이 궤환 방식으로 보상이 어렵기 때문에 기존에는 식 (11), (12)와 같은 모델을 기반으로 하는 보상방법이 이용된다. 이러한 사유는 기존의 방법이 물리적으로 시간지연 오차 보상을 위하여 데이터의 샘플링 시점을 가변 할 수 없기 때문이다. 그러므로 시간지연이 크거나 외부 동적운동이 큰 상황에서는 근사화된 모델이 부정확하게 되어 시간지연 오차에 의하여 전달정렬 성능이 저하되게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 시간지연 오차를 궤환방식으로 보상하여 항법오차와 같이 시간지연 오차를 항상 작게 유지되도록 하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 전달정렬 필터에서 추정된 시간지연 오차를 이용하여 SINS의 Moving Window 버퍼의 샘플링 시점 변경값을 식 (13)과 같이 계산하고 이 값을 다음 단계의 측정치 생성시 샘플링 시점을 변경하여 시간오차를 보상한다. 식 (13)은 ΔT_S 주기로 SINS의 Moving Window 버퍼에 SINS 항법데이터가 계산되는 순서대로 N개가 저장되며 추정된 시간지연 오차를 ΔT_S 주기로 나누어 정수부분만을 취하면 시간지연 오차 보상을 위한 SINS의 Moving Window 버퍼내의 샘플링 시점 변경치 C 가 계산된다. 이 값은 다음단계에 수행되는 전달정렬 측정치 생성시 SINS의 Moving Window 버퍼내의 샘플링 시점 변경시에 적용한다. 일반적으로 SINS의 항법계산 주기는 매우 빠르기 때문에 ΔT_S 는 매우 작으나 식 (13)으로는 ΔT_S 보다 큰 시간지연 오차는 보상이 가능하나 작은 경우에는 보상이 불가능하다. 그러므로 식 (13) 계산시 실수부분에 대한 시간지연 오차를 식 (14)와 같이 계산하여 ΔT_S 보다 작은 시간지연 오차에 대한 성분은 ΔC 에 대해서 식 (11), (12)와 같이 모델기반 시간지연 보상방법을 이용하여 보상한다. 이와 같은 시간지연 오차 보상방법을 이용하면 시간지연 오차를 전달정렬 전 구간에서 ΔT_S 보다 작은 범위내에서 유지가 가능하기 때문에 시간지연 오차에 의한 전달정렬 성능저하 문제의 해결이 가능하다.

Fig. 3. 제시된 시간지연 오차 보상방법

$$C = \int \left(\frac{\delta \hat{T}}{\Delta T_S} \right) \quad (13)$$

$$\Delta C = \delta \hat{T} - C \times \Delta T_S \quad (14)$$

4. 시뮬레이션 및 시험결과

본 장에서는 시간지연 오차 보상방법의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 시험을 수행한 결과를 제시한다. 시뮬레이션은 함상 전달정렬을 가정하여 북쪽 방향으로 모함이 10knots의 속도로 정속 진행하는 상태에서 Pitch 및 Yaw 운동을 한다고 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 궤적을 표로 정리하면 Table 2와 같다. Table 2의 배 운동은 참고문헌 3에서 제시한 배의 전형적인 운동을 참고하여 설정하였다.

시뮬레이션은 4가지 경우를 가정하여 수행하였다. 시간지연 오차가 통신 지연에 의하여 펄스형태로 변하는 Case1 경우와 톱니파 형태로 변하는 Case2 경우를 가정하였으며 시간지연 오차가 고정된 Case3 경우를 가정하였으며 Case1/Case2 상황에서 본 논문에서 제시한 이중 Moving Window를 적용하여 시간지연 오차를 물리적으로 보상하는 Case4 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 종류를 표로 정리하면 Table 2와 같다. 시뮬레이션에서 사용한 시간지연 오차를 그림으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 시뮬레이션에 사용된 전달정렬 필터는 식 (2)의 상태 방정식을 기반으로 하는 칼만필터로 구성하였으며 시간지연 오차는 랜덤상수로 가정하여 상태변수에 포함시켰다. 전달정렬 측정치는 속도 및 자세를 사용하며 전달정렬 필터 수행주기는 10Hz로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 몬테카를로 시뮬레이션을 50번 수행하여 RMS 값을 구하여 성능을 비교하였다.

Table 1. 시뮬레이션 궤적

시간(sec)	Pitch 운동 (진폭(A)/주파수(ω))	Yaw 운동 (진폭(A)/주파수(ω))	진행 방향 속도 (knots)
0~100	10°/0.14Hz	-	10
100~300		15°/0.05Hz	10

Table 2. 시뮬레이션 종류

시뮬레이션 종류	시간지연 모델	시간지연 보상방법
Case1	펄스형태 가변	모델기반 보상
Case2	톱니파 형태 가변	모델기반 보상
Case3	고정	모델기반 보상
Case4	펄스/톱니파 형태 가변	이중버퍼 기반 보상

시뮬레이션 결과 Fig. 4에서 주어진 측정치 시간지연 오차 모델을 가정하였을 때 전달정렬 필터에서 추정된 시간지연 오차를 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 필터 모델에서 가정한 시간지연 오차 모델이 랜덤상수이므로 Case1/Case2와 같이 펄스 및 톱니파 형태로 시간지연이 가변되어도 전달정렬 필터는 이를 상수로 추정하는 것을 확인하였다. 이러한 사실은 추정되지 않은 시간지연 오차가 추가적인 오차를 발생시킬 수 있음을 확인하는 것이다. 반면에 시간지연 오차 모델과 전달정렬 필터의 시간지연 오차 모델이 동일한 Case3은 정확하게 시간지연 오차가 추정되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 시간지연 오차에 대한 모델이 정확한 경우에는 시간지연 오차에 대한 보상이 정확하게 이루어질 수 있음을 의미하는 결과이다.

Fig. 4. 측정치 시간지연 오차 모델

Case1~2의 시뮬레이션 결과를 통하여 시간지연 오차가 가변되는 상황에서 전달정렬 필터의 시간지연 오차를 랜덤상수로 모델링하는 경우에는 전달정렬 성능이 크게 저하되는 것을 확인하였다. 그러므로 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 MINS/SINS 정보를 Moving Window 버퍼에 저장한 후 이를 샘플링하여 전달정렬 추정치로 사용하면 Case3과 같이 시간지연 오차를 거의 상수로 유지가 가능하다. Fig. 5의 Case4는 본 논문에서 제시한 방법을 적용하여 시간지연 오차가 가변되는 상황에서 시간지연 오차를 추정된 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보여주고 있듯이 시간지연 오차가 가변되더라도 시간지연 오차가 거의 상수를 유지하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5. 측정치 시간지연 오차 추정치

Fig. 4, 5에서 나타난 바와 같이 다양한 시간지연 오차 모델에 대한 전달정렬 성능을 확인하기 위하여 각각의 경우에 대한 자세 및 속도오차를 그림으로 나타내면 Fig. 6~10과 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 시간지연 추정오차가 큰 Case1~2의 경우에 자세 및 속도오차가 Case3~4와 비교하여 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 특히 Case2의 경우 시간지연 추정 오차 $\delta\hat{T}$ 에 대한 Pitch 방향 자세오차를 계산하면 식 (15)와 같다. 식 (15)의 결과는 Fig. 7의 Case2에 대한 자세오차와 유사한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. Case2는 Pitch 방향 이외에도 다른 축의 자세오차 및 속도오차가 매우 크다. 이는 Pitch 방향 자세오차가 다른 방향의 자세 및 속도오차와 상호 연관되어 나타난 현상이며 이는 관성항법장치 고유의 특성이다.

Case1의 경우에는 Case2와 비교하여 상대적으로 시간지연 추정 오차가 작으나 여전히 Case3~4와 비교하여 큰 자세 및 속도오차를 유발하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9, 10의 결과에서 속도오차가 정현파로 형태로 크게 나타나는 것이 Case1이며 불규칙적으로 크게 점프하는 것이 Case2의 속도오차이다. Case1~2보다 전달정렬 성능이 우수한 Case3~4의 결과를 비교하면 다음과 같다. Case3은 정확하게 모델기반으로 시간지연 오차가 보상되기 때문에 본 논문에서 제시한 방법인 Case4와 유사한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Case4의 경우 시간지연 오차가 가변되는 경우에 이중 버퍼를 이용하여 시간지연 오차가 상수가 되도록 하였기 때문에 두 경우에 대한 직접적인 성능비교는 무의미하다. 위의 시뮬레이션 결과를 종합하여 분석하면 본 논문에서 제시한 이중버퍼 적용을 통하여 가변되는 시간지연 오차를 상수로 고정하는 것만으로도 전달정렬 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 시뮬레이션 결과는 보여주고 있다.

$$\begin{aligned}\Delta y_{\pi tch} &= [C_m^n \Omega_{nm}^n \delta\hat{T}]_{\pi tch} \\ &= (10 \times 0.14 \times 2 \times \pi) \sin(0.14 \times 2 \times \pi \times t) \delta\hat{T}(t) \frac{\pi}{180} \\ &= 0.008 \times \sin(0.14 \times 2 \times \pi \times t) f(\delta\hat{T}(t))\end{aligned}\quad (15)$$

전달정렬 필터 구성시 시간지연 오차는 식 (7), (8)을 선형화하여 식 (11), (12)와 같이 모델링 된다. 이 과정에서 식 (7), (8)에서 시간지연 오차의 제곱에 해당하는 성분이 무시된다. 무시된 성분의 계수는 속도 및 각운동의 고차 미분항이기 때문에 운동의 주파수가 크거나 진폭이 크면 무시할 수 없는 요소가 된다. 특히 0.2Hz 정도의 정현파 운동을 가정하여도 미분할 때마다 진폭이 증폭되는 상황이 발생한다. 이러한 상황에서 Case3과 같이 시간지연 오차를 큰 값으로 유지하면 선형화 과정에서 무시된 식 (16), (17)이 추가적인 추정치 오차를 발생시킨다^[4]. 그러므로 식 (11), (12)의 추정치 모델을 유지하기 위해서는 시간지연 오차를 작게 유지하는 것이 요구된다. 본 논문에서는 이를 위하여 빠른 주기로 Moving Window 버퍼에 저장되는 SINS 정보의 샘플링 시점을 식 (13)과 같이 추정된 시간지연 오차에 해당하는 만큼 가변하여 물리적으로 시간지연 오차를 보상하는 방법을 제시하였고 이에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 5의 Case4와 같다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 전달정렬

50초 시점에서 추정된 시간지연 오차를 SINS 정보의 샘플링 시점을 가변하여 보상한 후 잔여 추정치를 모델기반 방법으로 보상하였다. 이리하여 시간지연 오차를 Case3과 비교하여 거의 20배 이상 작게 유지하는 것을 확인할 수 있으며 이는 고기동 환경에서 시간지연 오차에 의한 전달정렬 성능저하를 방지하는 데 크게 기여할 것이다.

$$\Delta Y^V = -\hat{V}_m^m(t) \frac{\delta T^2}{2} + \dots + v \quad (16)$$

$$\Delta Y^C = C_m^m [(\Omega_{nm}^n)^2 + \dot{\Omega}_{nm}^n] C_n^m \frac{\delta T^2}{2} + \dots + v \quad (17)$$

본 논문에서 제시한 시간지연 오차 보상방법의 추가적인 검증을 위하여 MINS 및 SINS 정보를 실시간으로 획득하여 분석한 결과를 제시한다. 우선 실제 전달정렬에 사용하는 정보를 획득하는 과정에서 Fig. 1과 같은 다양한 시스템을 통과하면서 발생된 시간지연을 주기적으로 계산되는 시간과 비교한 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 주기적으로 상하를 연결한 선이 원하는 MINS 데이터 수신시점이며 펄스 형태로 입력되는 Counter 값이 실제 SINS에 입력된 MINS 데이터 수신시점이다. 두 시점의 차가 일정하면 시간지연 오차가 고정된 것이나 그림에서 나타난바와 같이 매우 심하게 시간지연이 가변하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 실제 시간지연 오차가 Fig. 4의 Case1~2에서 제시한 시간지연 모델과 유사함을 보여주는 결과이다. Fig. 11과 같이 시간지연이 가변되는 경우에는 앞의 시뮬레이션 결과에서 나타난바와 같이 심각하게 전달정렬의 성능이 저하되게 된다. Fig. 11과 같은 상황에서 본 논문에서 제시된 시간지연 보상방법을 적용하여 시험한 시간지연 오차 추정치를 그림으로 나타내면 Fig. 12와 같다. Fig. 12는 실제 함상에서 전달정렬을 실시간으로 수행하면서 시간지연 오차를 본 논문에서 제시한 방법대로 보상한 결과이다. Fig. 12의 우변은 SINS에서 사용하는 버퍼에서 SINS 데이터를 샘플링하는 시점을 가변함을 의미한다. 전체적으로 이중버퍼를 적용하여 추정된 시간지연 오차가 Fig. 11과 같이 시간지연 오차가 가변되더라도 일정하게 상수로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 70초 부근에서 SINS의 Moving Window 버퍼의 샘플링 시점을 변경하여 시간지연 오차를 물

리적으로 보상하는 것도 정상적으로 동작함을 확인하였다. 최종적으로 전달정렬 성능을 확인하기 위하여 Fig. 11과 같이 시간지연 오차가 가변되는 상황에서 장착 비정렬 오차 추정치를 그림으로 나타내면 Fig. 13과 같다. Fig. 13은 시간지연 오차가 Fig. 11과 같이 가변되는 상황에서도 장착 비정렬 오차가 안정적으로 수렴하는 것을 보여주는 결과이다. 장착 비정렬 오차는 속도/자세정합 전달정렬에서 성능을 좌우하는 항목으로 Fig. 13과 같은 수렴특성은 전달정렬이 정상적으로 동작함을 의미한다. 이러한 결과는 Case4의 시뮬레이션 결과와 동일한 결과이며 이와 같은 결과로 판단할 때 본 논문에서 제시한 시간지연 오차 보상방법이 전달정렬 성능개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6. Roll 각 자세오차

Fig. 7. Pitch 각 자세오차

Fig. 8. Yaw 각 자세오차

Fig. 11. 측정치 시간지연 오차 측정치

Fig. 9. E축 속도오차

Fig. 12. 시간지연 보상방법에 대한 시험결과

Fig. 10. N축 속도오차

Fig. 13. 장착 비정렬 오차 추정치 시험결과

5. 결 론

본 논문에서 제시한 전달정렬에서의 측정치 시간지연 오차 보상방법은 측정치 시간지연 오차에 의한 전달정렬 성능저하를 방지하기 위하여 MINS/SINS의 항법/시간 데이터를 일정한 크기의 Moving Window 버퍼에 저장한 후 버퍼에서 데이터를 샘플링하여 전달정렬 측정치를 생성하여 전달정렬을 수행하는 방법을 제시하였다. 이러한 방법을 적용하여 MINS의 항법/시간 데이터를 SINS에 전달시 발생하는 통신지연, 데이터의 누락 등이 발생한 상황에서도 전달정렬의 성능저하 없이 정상적으로 전달정렬이 가능하도록 하였다. 또한 전달정렬 필터에서 추정된 시간지연 오차를 SINS의 Moving Window 버퍼에서 샘플링 시점을 변경함으로 물리적으로 시간지연 오차를 보상하여 항상 시간지연 오차가 SINS 샘플링 주기 이하의 작은 값으로 유지하도록 하였다. 이리하여 큰 시간지연오차가 발생하거나 동적운동이 큰 상황에서도 시간지연 오차에 의한 전달정렬 성능저하가 발생하지 않도록 하여 전달정렬 성능 개선에 크게 기여하였다.

References

- [1] D. H. Titterton and J. L. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd., 1997.
- [2] I. Y. Bar-Itzhack and Y. Vitek, "The Enigma of False Bias Detection in a Strapdown System During Transfer Alignment", J. of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 8, No. 2, 1985.
- [3] N. M. Vepa, "A Dynamic Alignment System for Applications on Flexible Platforms such as Ships", Symposium Gyro Technology, 1989.
- [4] H. K. Lee, J. G. Lee, and G. Jee, "Calibration of Measurement Delay in Global Positioning System/Strapdown Inertial Navigation System", J. of Guidance, Control and Navigation, Vol. 25, No. 2, 2002.
- [5] Y. Lim and J. Lyou, "An Error Compensation Method for Transfer Alignment", IEEE Conference, 2001.
- [6] K. R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1971.