

피치운동을 이용한 정밀 다위치 정렬기법 개발

Development of the Precise Multi-Position Alignment Method using a Pitch Motion

이 정 신*

Jung-Shin Lee

Abstract

In Strapdown Inertial Navigation System, alignment accuracy is the most important factor to determine the performance of navigation. However by an existing self-alignment method, it takes a long time to acquire the alignment accuracy that we want. So, to attain the desired alignment accuracy in as little as \circ minutes, we have developed the precise multi-position alignment method.

In this paper, it is proposed a inertial measurement matching transfer alignment method among alignment methods to minimize the alignment error in a short time. It is based on a mixed velocity-DCM matching method be suitable to the operating environment of vertical launching system. The compensation methods to reduce misalign error, especially azimuth angle error incurred by measurement time-delay error and body flexure error are analyzed and evaluated with simulation. This simulation results are finally confirmed by experimentations using FMS(Flight Motion Simulator) in Lab and the integration test to follow the fire control mission.

Keywords : Transfer Alignment(전달정렬), Velocity-DCM Matching(속도 및 DCM 정합), Time Delay Error(시간지연 오차), Misalignment Angle(장착 비정렬각), Flight Motion Simulator(FMS)

1. 서론

스트랩다운 관성항법장치(SDINS : Strapdown Inertial Navigation System)가 외부 장치의 도움 없이 항체의 위치, 속도 및 자세를 결정하는 항법을 수행하기 위해서는 항법좌표계와 동체좌표계 사이의 변환행렬(C_b^m)

의 초기치가 필요하며 이 초기자세를 구하는 과정을 정렬(Alignment)이라 한다. 초기정렬 기법에는 자이로 콤파스(Gyrocompass) 원리를 이용하는 자체정렬(Self-alignment)과 별도의 기계적 장치 혹은 주 항법장치를 이용한 보조정렬(Aided alignment)로 나눌 수 있다. 보조정렬에는 두위치 정렬(Two Position Alignment)과 전달정렬(Transfer Alignment) 등이 있으며, 이 중 전달정렬 기법은 정밀한 MINS(Master INS : 주 관성항법장치)의 정보를 이용하여 SINS(Slave INS : 부 관성항법장치)의 정렬을 수행하는 기법이다. 이 때 SINS보다

† 2010년 3월 22일 접수~2010년 6월 10일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이정신(sinny34@daum.net)

정밀한 MINS의 항법 정보를 이용함으로써 자체정렬보다 높은 정렬 정확도를 구현할 수 있다. 혹은 SINS와 동일한 성능의 MINS를 사용하여 자체정렬보다 정렬시간을 단축할 수 있다.

이러한 정렬기법 중 기존에 사용하였던 자체정렬기법으로 정렬 정확도 목표 성능을 만족하는 초기자세를 구하기 위해서는 랜덤워크에 의한 정렬 성능 저하를 고려하여 정지 상태에서 최소 15분 이상의 긴 대기시간이 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 정렬시간을 피치운동 환경에서 0분 이내로 단축하는 동시에 기존 자체정렬기법과 동일 수준의 정렬 정확도를 얻기 위해서 정밀 다위치 정렬기법을 개발하였다.

정밀 다위치 정렬기법은 기존의 자체정렬과 전달정렬을 혼합한 기법으로써 이 중 피치운동에 적합한 전달정렬 알고리즘 설계 및 오차 보상 기법을 독자적으로 개발하였다. 본 연구에서는 피치운동만 존재하는 환경에서의 가관측성 분석을 통해 적합한 속도 및 DCM 정합 전달정렬 알고리즘을 설계하였다. 또한 기본적인 전달정렬 알고리즘의 성능 향상을 위해 시간 지연, 지렛대 효과에 의한 속도 오차 및 유연성 오차 보상 기법 등을 적용하였다. 이렇게 설계된 정밀 다위치 정렬 알고리즘을 항법컴퓨터에 탑재하여 FMS (Flight Motion Simulator)를 이용한 시험 및 다경로 통신 환경에서의 통합점검을 통하여 정렬 성능을 검증하였다.

2. 피치 운동에 적합한 다위치 정렬 알고리즘 설계

관성측정정합 전달정렬 알고리즘은 기본적으로 MINS의 관성측정값을 이용하는 칼만필터로 구현된다. 따라서 알고리즘 설계에 앞서 주어진 운동 환경에서 필터 상태변수들이 모두 추정 가능한지 판단하기 위해 가관측성 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 구간 시불변 시스템(Piece-Wise Constant System) 가관측성 분석 기법을 사용하여 각 운동 및 정합 방법에 따른 수평 및 방위각 정렬 가능성을 분석하였다^[1]. 이를 정리하면 다음 Table 1과 같다.

Table 1로부터 정지 상태에서 피치각 운동만 존재하는 운동 환경에 적합한 정합으로 하나의 정합 방법으로는 불가능함을 알 수 있다. 따라서 관성측정 정보로 속도 및 자세를 사용하는 속도 및 DCM 정합 전달정렬 기법으로 알고리즘을 설계하였다.

Table 1. Observability analysis results by various motion conditions

운동	각속도 정합	가속도 정합	속도 정합	자세 정합
정지/정속	X	△	△	△
롤각	△	△	△	▲
피치각	▲	△	△	▲
방위각	△	△	○	△
가속	X	○	○	△

○ : 전체 정렬 가능 △ : 수평축만 정렬 가능
 ▲ : 방위각 정렬 가능 X : 정렬 불가능

가. 속도 및 DCM 정합 전달정렬 알고리즘 설계

속도 및 DCM 정합 구성도는 Fig. 1과 같다. 구성요소로는 크게 기준 속도 및 자세값을 제공하는 MINS, 필터에 의해 속도 및 자세를 갱신하는 SINS, MINS와 SINS의 항체좌표계에서의 속도 및 DCM 자세 측정값으로 상태변수들을 추정하는 칼만필터로 구성된다. 항법모드로 작동하는 SINS는 필터 보정주기 때마다 속도 및 자세값이 필터 상태 변수 값들에 의해 보정된다.

간접 되먹임 방식의 칼만필터의 시스템 방정식으로 INS의 속도 및 자세 오차 방정식과 장착 비정렬각 오차 방정식을 사용한다. 속도 및 자세 오차 방정식은 psi 오차 모델 및 회전벡터 형태의 자세오차 모델을 사용하였는데 쿼터니언 모델보다 시스템 행렬의 정확도가 높고 비교적 느리게 변하는 시변 선형시스템이므로 필터의 안정성에 유리할 것으로 판단된다^[2]. 시스템 방정식과 측정 방정식은 각각 식 (1), (2)과 같다.

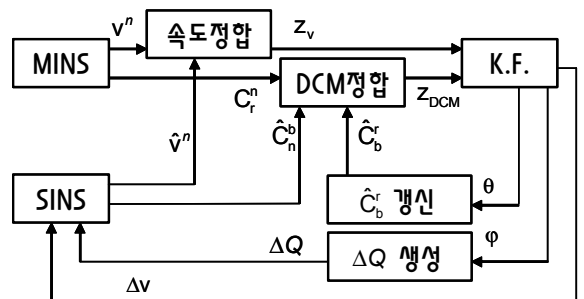


Fig. 1. Block diagram of the velocity & DCM matching transfer alignment

$$\begin{aligned} \dot{\delta v}^n &= -(2\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n)\delta v^n + F^n \psi^n + C_b^n \delta f^b \\ \dot{\psi}^n &= -(\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n)\psi^n - C_b^n \delta \omega^b \\ \dot{\theta} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Z_v(k) &= \delta v^n(k) + \nu_v(k) \\ Z_{DCM}(k) &= \psi^n(k) - C_r^n(k)\theta(k) + \nu_{DCM}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$\delta v^n = [\delta v_e \delta v_n \delta v_u]^T : \text{속도오차}$$

$$\psi^n = [\psi_e \psi_n \psi_u]^T : \text{자세오차}$$

$$\theta = [\theta_x \theta_y \theta_z]^T : \text{장착 비정렬각 오차}$$

$$\Omega_{ie}^n = skew(\omega_{ie}^n)$$

$$\omega_{ie}^n = [0 \ \Omega \cos \phi \ \Omega \sin \phi]^T$$

$$\Omega_{en}^n = skew(\omega_{en}^n)$$

$$\omega_{en}^n = \left[-\frac{v_n}{R_\phi + h} \frac{v_e}{R_\lambda + h} \frac{v_e}{R_\lambda + h} \tan \phi \right]^T$$

$$F^n = \begin{bmatrix} 0 & -f_u & f_n \\ f_u & 0 & -f_e \\ -f_n & f_e & 0 \end{bmatrix}$$

h : 고도

Ω : 지구회전 각속도

ϕ : 위도

R_ϕ, R_λ : 지구 타원체 장반경 및 단반경

$\delta f^b, \delta \omega^b$: 가속도계 및 자이로 오차

ν_v, ν_{DCM} : 속도 및 자세 측정 잡음(백색잡음)

i : 관성좌표계 (x_i, y_i, z_i)

e : 지구좌표계 (x_e, y_e, z_e)

n : 항법좌표계 (e, n, u)

b : SINS 항체좌표계 (x, y, z)

r : MINS 항체좌표계 (X, Y, Z)

식 (1), (2)를 이산시간에서의 상태 방정식으로 나타내면 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} X(t+\Delta t) &= \Phi(\Delta t)X(t) + w(t), \quad w \sim N(0, Q) \\ Z(t) &= H(t)X(t) + \nu(t), \quad \nu \sim N(0, R) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$X = [\delta v_e \delta v_n \delta v_u \psi_e \psi_n \psi_u \theta_x \theta_y \theta_z]^T$$

$$\Phi(\Delta t) = e^{A\Delta t} = I + A\Delta t + \frac{(A\Delta t)^2}{2!} + \frac{(A\Delta t)^3}{3!} + \dots$$

$$A = \begin{bmatrix} -(2\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n)_{3 \times 3} & F_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -(\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n)_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & -C_r^n \end{bmatrix}$$

이산시간에서의 간접 되먹임 칼만필터 식은 다음과 같다.

$$\text{초기 조건} : P_0^+ = P_0$$

$$\text{오차 공분산 전파} : P_k^- = \Phi P_{k-1}^+ \Phi^T + Q \quad (4)$$

$$\text{칼만 이득 행렬} : K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$\text{변수 추정 갱신} : \hat{X} = K_k Z$$

오차 공분산 갱신 :

$$P_k^+ = [I - K_k H] P_k^- [I - K_k H]^T + K_k R K_k^T$$

칼만필터 오차 공분산의 수치적 안정을 위해 U-D 분해 알고리즘을 사용하였다.

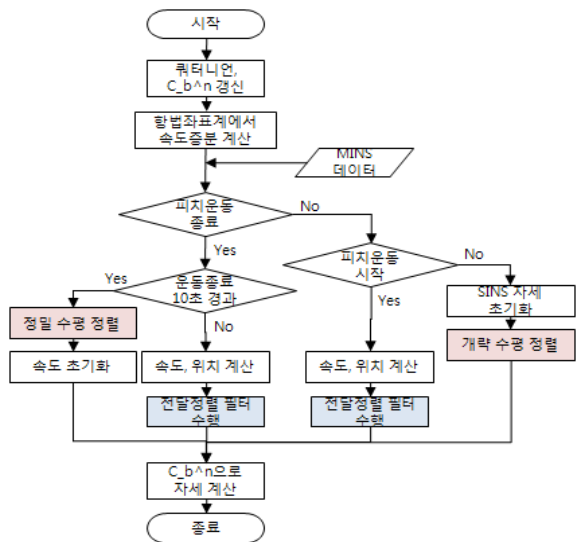


Fig. 2. Procedure for the precise multi-position alignment algorithm

Fig. 2는 앞서 기술한 전달정렬 필터와 기존의 자세 정렬 중 수평정렬 알고리즘을 혼합한 전체 정밀 다위치 정렬 알고리즘 순서도이다. 전달정렬 필터는 피치 운동 시작명령부터 피치운동 종료 후 10초까지만 10Hz

주기로 수행되도록 설계되었다. 이는 피치운동 종료 후 10초가 지나면 필터가 수렴되어 방위각 정렬 성능이 결정되므로 정지 상태에서의 대기모드 동안에는 수평정렬을 수행하여 수평정렬 성능을 개선할 수 있기 때문이다. 또한 정렬모드 진입 시 MINS 자세정보를 입력 받아 저장된 장착 비정렬각과의 조합으로 SINS의 자세를 초기화 하는 One-shot 전달정렬 개념을 적용하여 관성측정정합 전달정렬 필터 수렴 시간을 단축하였다.

나. 오차보상기법

전달정렬 성능을 좌우하는 오차요인으로는 SINS의 센서 오차와 MINS 측정 오차뿐 아니라 전달정렬 과정에서 MINS와 SINS사이의 장착거리에 의해 발생하는 동체의 유연성(Flexibility or Flexure), 지렛대 속도(Lever Arm Velocity) 그리고 MINS 정보의 전송지연 오차 등이 있다. 따라서 정렬성능의 향상을 위해 이러한 오차 요인들을 보상해주어야 하는데 이 중 시간지연 오차는 방위각(수직축) 정렬오차의 주원인으로서 반드시 보상해주어야 한다.

Fig. 3과 같이 MINS와 SINS가 다른 위치에 있고 그 사이에 회전운동이 존재할 때 MINS에는 발생하지 않는 운동이 SINS에 발생하게 된다. 따라서 SINS의 속도나 가속도 값에 지렛대효과에 의한 값을 뺀 후 MINS와 비교하여야 한다. MINS와 SINS가 장착되어 있는 동체를 강체로 가정하고 지렛대 효과에 의한 속도를 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{lever}^n &= C_r^m (\Omega_{ir}^r - \Omega_{ie}^r) L^r \\
 &\approx C_r^m \Omega_{ir}^r L^r = C_r^m (C_b^r \Omega_{ib}^b C_r^b) L^r \\
 &= C_b^r \Omega_{ib}^b L^b
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 \Omega_{ir}^r &= skew(\omega_{ir}^r), \omega_{ir}^r = C_n^r (\omega_{ie}^n + \omega_{cn}^n) + \omega_{nr}^r \\
 \omega_{nr}^r &= \begin{bmatrix} \dot{\theta} \cos \gamma + \dot{\psi} \sin \gamma \cos \theta \\ \dot{\gamma} - \dot{\psi} \sin \theta \\ \dot{\theta} \sin \gamma - \dot{\psi} \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix} \\
 \gamma &: \text{롤}, \theta : \text{피치}, \psi : \text{요}
 \end{aligned}$$

Fig. 4를 통해 지렛대효과에 의한 속도오차를 보상하지 않은 경우 MINS와 SINS 사이에 상대속도가 발생하며 이를 식 (5)를 이용하여 보정한 결과 SINS가 MINS 속도를 잘 추정함을 알 수 있다.

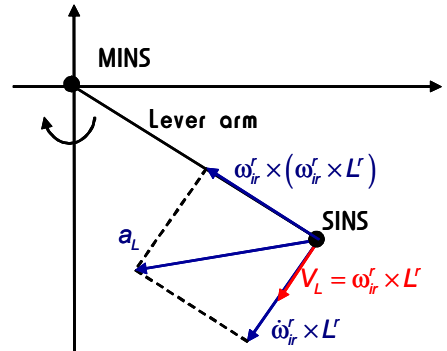
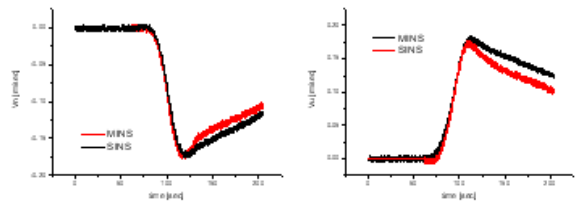
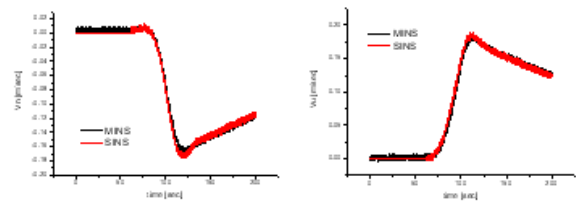


Fig. 3. Velocity & accel. by lever arm effect



a) Case of no compensation for velocity error by lever arm effect



b) Case of compensation for velocity error by lever arm effect

Fig. 4. Comparisons of MINS and SINS velocity error

유연성 오차는 MINS와 SINS가 장착되어 있는 동체가 엄밀히는 강체가 아닌 유연체이기 때문에 발생하는 오차이다. 유연성이 있는 경우에는 SINS에 추가적인 자세 운동이 발생하므로 이를 보상하지 않을 경우 측정오차를 유발하게 된다. 오차보상기법에는 DCM 부분정합, 시변 바이어스 분리형 칼만필터 및 강인한 유연성상태 추정기법 등이 있으나^[3] 그 중 본 연구에서는 DCM 부분정합을 사용하였다. 이는 유연성이 임의의 한 축에 크게 발생할 경우 오차가 발생하는 정합변수를 제외하고 별도로 그 축의 장착 자세각을 복구해주는 기법이다. 시스템의 유연성 주축 성분을 Y 방향이라 하면 θ_Y 을 제외하여 유연성 오차를 효과적

으로 제거할 수 있다. 식 (3)의 변수들 중 θ_Y 을 제외한 칼만필터를 구현하고 이는 식 (6)으로 분리하여 구하도록 한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_X(k) \\ \hat{\theta}_Y(k) \\ \hat{\theta}_Z(k) \end{bmatrix} = \text{rot} \left\{ \hat{C}_r^m(k) \hat{C}_b^m(k) \hat{C}_r^b(k-1) \right\} \quad (6)$$

또한 θ_Y 의 효율적인 제거를 위해 식 (3)의 H 행렬을 다음과 같이 변환한다.

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & C_n^{r \times 2 \times 3} & -I_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

본 연구에서 적용되는 정지 상태에서 피치 운동만 있는 환경에서의 시스템은 강체로 가정하여도 무방하므로 유연성 오차에 대한 영향은 무시할 수 있다. 따라서 최종적인 다위치 정렬 알고리즘에는 유연성 오차 보상기법을 제외하였다.

MINS 자세 및 속도 측정치가 SINS 항법컴퓨터에 전달되는 통신과정에서 시간지연이 발생된다. 이러한 시간지연 오차를 보상하기 위해 평균 시간지연 감안, H^∞ 필터, 지연상태 병합형 칼만필터 그리고 바이어스 분리형 칼만필터 등을 적용할 수 있다^[3]. 그 중 본 연구에서는 지연상태 병합형 칼만필터를 사용하여 보상하는 기법을 사용하였다. 식 (8)과 같이 추가된 시간지연 상태변수를 랜덤 상수로 가정하도록 한다.

$$\Delta t = 0 \quad (8)$$

시간지연에 의한 속도오차는 거의 무시할 수 있으므로 식 (2)의 측정방정식 중 자세 측정방정식만 다음과 같이 수정하도록 한다.

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_{DCM}(k) &= \hat{C}_r^m(k-\Delta t) \hat{C}_b^m(k) \hat{C}_n^b(k) \\ &\approx \left[\hat{C}_r^m(k) + \Delta \hat{C}_r^m(k) \times \Delta t \right] \hat{C}_b^m(k) \hat{C}_n^b(k) \\ &= Z_{DCM}(k) + \Delta \hat{C}_r^m(k) \hat{C}_b^m(k) \hat{C}_n^b(k) \Delta t \\ &= Z_{DCM}(k) + D(k) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$$s(a) = \sin(a), \quad c(a) = \cos(a)$$

$$\begin{aligned} \Delta \hat{C}_r^m(1,1) &= \dot{\gamma} s \gamma c \psi + \dot{\psi} c \gamma s \psi \\ \Delta \hat{C}_r^m(1,2) &= \dot{\psi} c \psi \\ \Delta \hat{C}_r^m(1,3) &= -\dot{\gamma} c \gamma c \psi + \dot{\psi} s \gamma s \psi \\ \Delta \hat{C}_r^m(2,1) &= -\dot{\psi} c \theta s \gamma c \psi + \dot{\gamma} c \theta s \gamma s \psi + \dot{\theta} s \theta c \gamma s \psi - \dot{\gamma} s \theta c \gamma - \dot{\theta} c \theta s \gamma \\ \Delta \hat{C}_r^m(2,2) &= \dot{\theta} s \theta c \psi + \dot{\psi} c \theta s \psi \\ \Delta \hat{C}_r^m(2,3) &= -\dot{\psi} c \theta s \gamma c \psi + \dot{\gamma} c \theta c \gamma s \psi + \dot{\theta} s \theta s \gamma s \psi - \dot{\gamma} s \theta s \gamma + \dot{\theta} c \theta c \gamma \\ \Delta \hat{C}_r^m(3,1) &= -\dot{\psi} s \theta c \gamma c \psi + \dot{\gamma} s \theta s \gamma s \psi - \dot{\theta} c \theta c \gamma s \psi + \dot{\gamma} c \theta c \gamma - \dot{\theta} s \theta s \gamma \\ \Delta \hat{C}_r^m(3,2) &= \dot{\psi} s \theta s \psi - \dot{\theta} c \theta c \psi \\ \Delta \hat{C}_r^m(3,3) &= -\dot{\psi} s \theta s \gamma c \psi - \dot{\gamma} s \theta c \gamma s \psi - \dot{\theta} c \theta s \gamma s \psi + \dot{\gamma} c \theta s \gamma + \dot{\theta} s \theta c \gamma \end{aligned}$$

위 식의 $\Delta \hat{C}_r^m$ 는 오일러 회전 순서에 따라 그 값이 변경된다. Δt 을 포함한 상태변수, 시스템 행렬 및 측정 행렬은 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned} X &= [\delta v_e \ \delta v_n \ \delta v_u \ \psi_e \ \psi_n \ \psi_u \ \theta_X \ \theta_Y \ \theta_Z \ \Delta t]^T \\ A_{new} &= \begin{bmatrix} A_{9 \times 9} & 0_{9 \times 1} \\ 0_{1 \times 9} & 0_{1 \times 1} \end{bmatrix} \\ H_{new} &= \begin{bmatrix} H_{6 \times 9} & 0_{3 \times 1} \\ & d_{3 \times 1} \end{bmatrix} \\ d(k) &= [-D(2,3) \ D(1,3) \ -D(1,2)] \end{aligned}$$

그러나 이러한 지연상태 병합형 칼만필터는 통신지연에 따른 시간지연 바이어스를 보상하는 기법으로써 MINS에서 SINS로 데이터 전달시 발생하는 지터링(Jittering)에 의한 문제는 여전히 해결 되지 않아 실 운용환경에서는 전달정렬 성능이 저하되었다. 이를 보완하기 위해 2단 버퍼링 시각 동기화 기법을 도입하였다. Fig. 5를 통해 지터링 환경에서 버퍼링 기법을 적용하지 않을 경우 필터 측정방정식에 사용되는 MINS 및 SINS 데이터 쌍의 시각이 불규칙적으로 다를 수 있음을 확인할 수 있다.

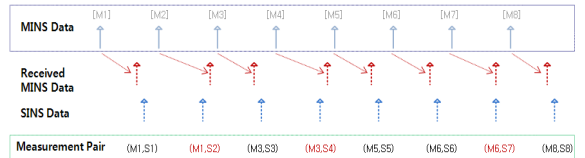


Fig. 5. Case of no using buffering method in jittering envelopment

이를 해결하기 위해 MINS 전달정렬 데이터 및 카운터를 깊이가 3인 버퍼에 저장하였다. 2단 버퍼링 시

각 동기화 기법은 기존의 선입선출(First In First Out) 방식과 달리 최초 버퍼 회수(Retrieve)시 중간 카운터를 취하고 내부 카운터를 생성한다. 그 다음 단계부터는 이 내부 카운터 기준으로 데이터를 취함으로써 기존의 버퍼링보다 MINS와 SINS 데이터 시각 동기화 성능이 더 우수하리라 판단된다.

Fig. 6은 2단 버퍼링 시각 동기화를 적용할 경우와 적용하지 않을 경우의 자세오차 및 시간지연 추정치 특성을 보여준다. 그 결과 적용할 경우 필터 안정성이 높아짐을 알 수 있다.

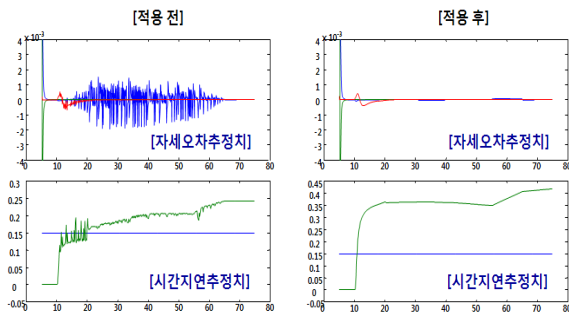
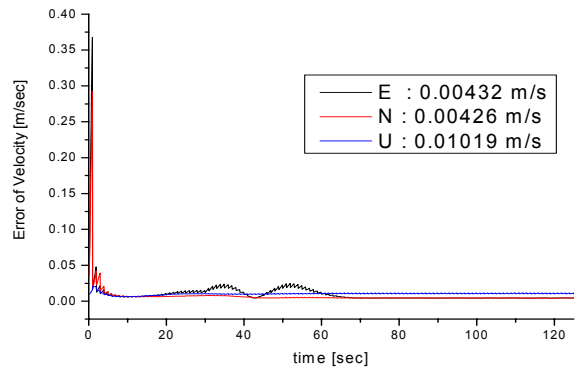


Fig. 6. 2-stage buffering simulation results

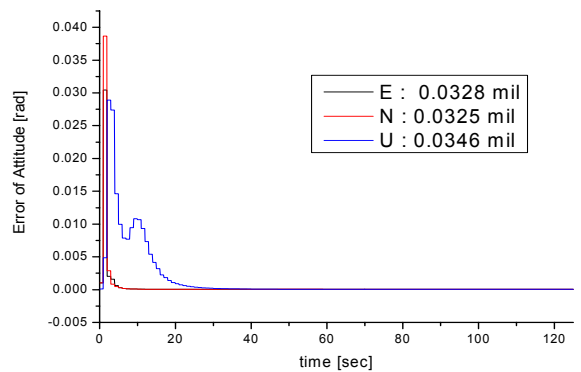
3. 정밀 다위치 정렬 성능 분석

정밀 다위치 정렬기법의 검증에 위해 속도 및 DCM 정렬 전달정렬 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다. 앞서 언급한 바와 같이 지렛대 효과에 의한 속도오차 보상 및 시간지연 병합형 칼만필터를 적용한 보상 기법을 사용하였다. 궤적은 정지 구간 및 가, 감속 피치운동으로 모사하였고 시간지연은 0sec에서 40msec 내로 랜덤하게 발생하도록 모델링하였다. MINS로는 SAGEM사의 정밀 관성항법장치 규격을 이용하였으며 SINS는 자체 개발한 중급 관성항법장치 오차 규격을 적용하였다.

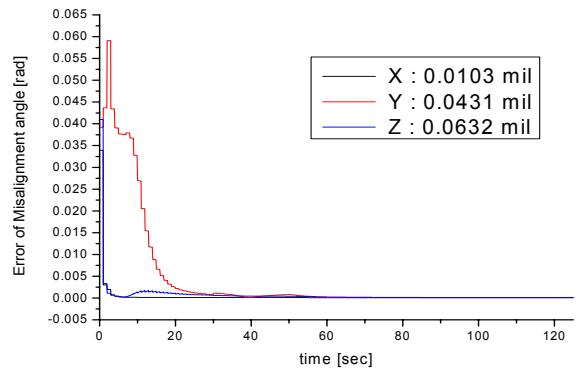
Fig. 7은 몬테칼로 시뮬레이션 1000회를 수행한 결과이다. SINS의 목표 성능과 현재 사용하고 있는 MINS의 성능을 고려하여 전달정렬에 의한 장착 비정렬각 추정오차가 0.07mil 이내로 수렴함을 확인할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 전달정렬 필터 특성을 고려하여 정지구간에는 수평정렬을, 피치운동구간에서는 전달정렬을 수행하여 정렬오차를 위의 시뮬레이션 결과보다 낮출 수 있었다.



a) Velocity error



b) attitude error



c) misalignment angle error

Fig. 7. Monte-carlo simulation results - 1000 times

위 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 FMS(Flight Motion Simulator)에 MINS와 SINS를 장착하여 정밀 다위치 정렬 성능분석을 수행하였다. Fig. 8은 FMS를 이용하여 정밀 다위치 정렬 검증을 하기 위한 시험 구성도이다. 이 시험 세트는 각운동 발생기에 의해 피

치운동 명령이 주어지면 FMS에 장착된 MINS와 SINS가 전달정렬을 수행하게 되고 그 결과를 점검장비(CDU)를 통해 확인할 수 있도록 구성되었다.

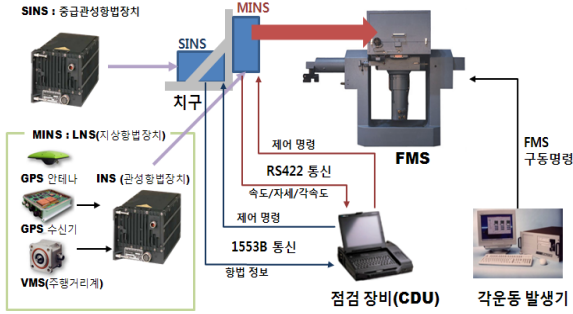


Fig. 8. Test setup of precise multi-position transfer alignment method

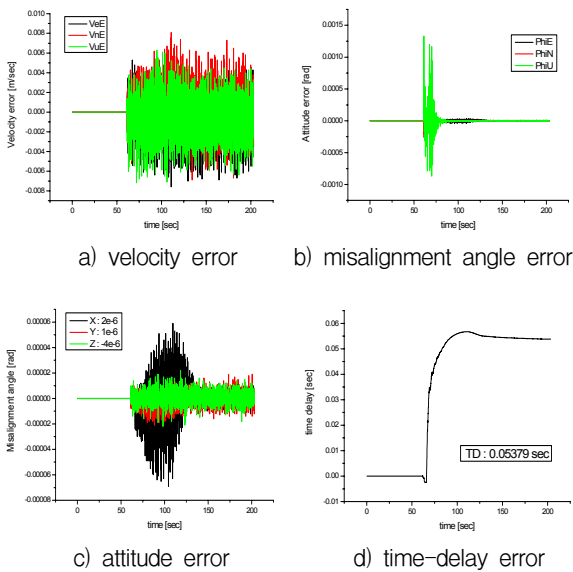


Fig. 9. Precise multi-position alignment performance when heading angle is 0°

Fig. 9는 헤딩 각 0°일 때 FMS 시험 결과로써 속도 오차, 자세오차, 장착 비정렬각 및 시간지연 추정치를 나타낸 그림이다. 이를 통해 시뮬레이션 결과와 동일 수준의 정렬 성능이 나옴을 확인할 수 있었다.

Table 3은 방위각이 0°, +5° 그리고 -5°일 때 자세오차를 정리한 것이다. 이는 동일한 관성항법장치로 15분 동안 자체정렬을 수행하여 나온 자세 오차와 비교한 결과 목표성능을 만족함을 확인할 수 있었다.

Table 3. Alignment error influences by various heading angles

자세오차[°]	0°	+5°	-5°
Roll	0.0121	-0.0153	-0.0108
Pitch	-0.0143	-0.0119	-0.0127
Yaw	0.0157	-0.0160	-0.0165

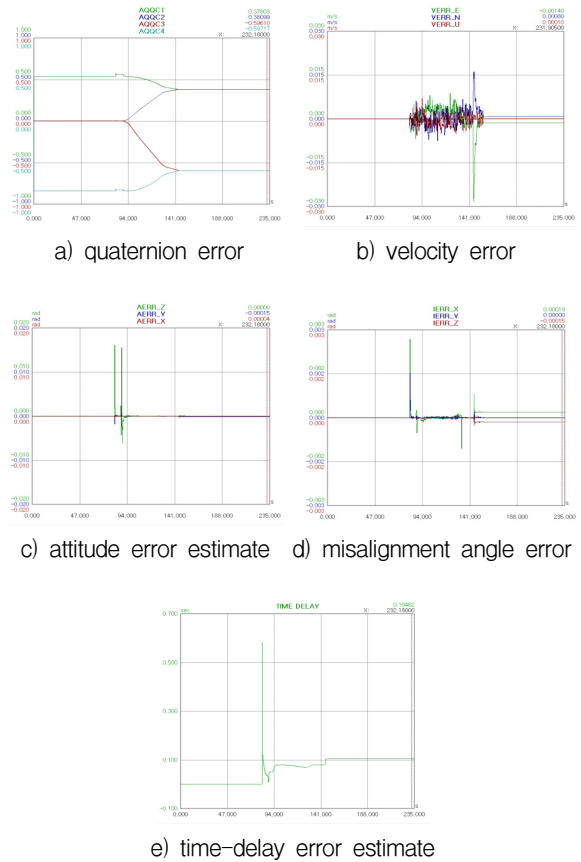


Fig. 10. Precise multi-position alignment test results

마지막으로 다경로 통신 환경에서의 통합점검시험을 통하여 정밀 다위치 정렬 성능 검증을 수행하였고 그 결과는 Fig. 10과 같다. 이는 MINS와 SINS 장착 위치 사이에 상대적 거리가 존재하는 환경에서 MINS데이터 전송 시 RS422, LAN 및 1553B 통신 등의 다경로 통신을 거치도록 구현한 후 별도의 치구에 MINS와 SINS를 장착하여 수동적으로 피치각 운동을 모사하여 얻은 결과이다. 이를 통해 SINS의 쿼터니언 변

화, 속도 오차, 자세 오차 및 장착 비정렬각 오차 특성이 위의 FMS를 이용한 시험과 유사한 결과를 보이며 최종 자세오차가 모두 0.015° 이내로 들어오는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 실제 시험물에 장착하여 전달정렬 점검을 수행하였고 이도 아래와 유사한 결과가 나옴을 확인하였다.

Table 4는 다경로 통신 환경에서의 통합점검 시험 결과로써 본 연구에서 제시한 다위치 정렬 및 자체정렬을 수행한 결과인 자세 오차를 비교한 값이다. 이는 기준 자세를 알 수 없는 상황에서 이미 검증된 자체 정렬 결과와의 비교를 통해서만 다위치 정렬 기법 적용 가능성을 타진해볼 수 있기 때문이다. 이를 통해 기존의 자체 정렬과 동일 수준의 정렬 정확도를 구현하는 동시에 정렬 시간을 단축할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 4. Integration test results to follow the fire control mission

자세오차[°]	다위치 정렬	자체정렬	차이
Roll	157.0368	157.0391	0.0023
Pitch	90.2357	90.2387	0.0030
Yaw	-1.6757	-1.6795	0.0038

4. 결론

본 연구에서는 기존의 자체정렬과 동일 수준의 정렬 정확도를 구현하는 동시에 0분 이내로 정렬시간을 단축하기 위해 정밀 다위치 정렬기법을 개발하였다. 정밀 다위치 정렬 기법의 핵심 기술인 전달정렬 알고리즘을 설계하기 위해 피치운동만 존재하는 운동 환경에서 가관측성 분석을 하였고 그 결과 속도 및 DCM 정합 전달정렬 알고리즘이 적합함을 판단하였다. 또한 전달정렬의 성능을 개선하기 위해 지렛대 효과에 의한 속도 오차 및 시간지연 오차 보상 기법을

적용하였다. 이렇게 설계된 전달정렬 필터와 기존의 자체정렬 중 수평정렬 알고리즘을 혼용하여 정밀 다위치 정렬 기법을 구현하였다. 이러한 정밀 다위치 정렬기법의 성능분석을 위해 FMS를 이용한 전달정렬 시험 세트를 구성하고 자체시험을 수행하였으며 최종적으로 다경로 통신 환경에서의 통합점검시험을 통해 정렬성능을 검증하였다.

Reference

- [1] J. G. Lee, C. G. Park and H. W. Park, "Multiposition Alignment of Strapdown Inertial Navigation System", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 29, No. 4, pp. 1323~1328, October 1993.
- [2] 김현백, 박찬주, "고기동 유도탄에 적합한 전달정렬 방법 연구 및 성능분석", 국방과학연구소, KTRC-417-990779, 1999.
- [3] 임유철, 송기원, 유준, "전달정렬의 선체 유연성 보상을 위한 속도 및 DCM 부분 정합방식", 제어·자동화·시스템 공학 논문지, 제7권 제4호 pp. 369~373, 2001.
- [4] D. Chung, J. G. Lee, C. G. Park and H. W. Park, "Strapdown INS Error Model for Multiposition Alignment", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, No. 4, pp. 1362~1366, October 1996.
- [5] H. V. White, "An All-Purpose Inertial Navigation Concept for Tactical Missile Systems", IEEE Conf. PLANS, Atlantic City, NJ, Dec., pp. 246~253, 1982.
- [6] Litton Guidance & Control Systems, LN-200 Inertial Measurement Unit, 1998.
- [7] Drora Goshen-meskin and Itzhack Y. Bar-Itzhack, "A Unified Approach To Inertial Navigation System Error Modeling", AIAA-90-3367-CP, 1990.