

스트랩다운 관성항법시스템의 정지시 균일 관측 가능성 및 오차 특성 분석

The Uniform Observability and the Error Characteristics for Stationary Strapdown Inertial Navigation System

°정도형*, 박찬국†, 이장규‡

*삼성전자, (E-mail: cdh@asrignc3.snu.ac.kr)

†광운대학교 제어계측공학과 (E-mail: cgpark@daisy.kwangwoon.ac.kr)

‡서울대학교 전기공학부 (E-mail: jgl@asrignc3.snu.ac.kr)

Abstracts In this paper, the uniform observability and the error characteristics for stationary SDINS error are analyzed. The use of the Lyapunov transformation is proposed for transforming the conventional SDINS error model and the sufficient conditions for the uniform observability of SDINS error model are analytically derived. A complete characterization for the SDINS error characteristics during two position alignment is presented which allows us to predict the performance of two position alignment in SDINS.

Keywords Strapdown, Inertial Navigation System, Uniform Observability, Lyapunov Transformation

1. 서론

스트랩다운 관성항법시스템(SDINS - StrapDown Inertial Navigation System)의 오차는 그 오차 시스템 자체가 불안정하므로 시간이 증가함에 따라 누적되어 계속 증가한다. 이러한 항법 오차의 증가를 억제하기 위해서는 항법시스템의 오차를 수학적으로 모델링하고, 유도된 오차 모델을 바탕으로 최적 추정자(optimal estimator)인 칼만필터(Kalman filter)를 설계하여 오차를 보정하는 방법이 보편적으로 많이 사용되고 있다[1,2,3].

가관측성(observability)이란 시스템의 입력과 출력으로써 시스템 상태 변수(state variable)의 추정 가능 여부를 말한다. 따라서 시스템이 관측 가능(observable)하지 않은 경우에는 어떠한 추정자(estimator)를 사용하여도 시스템의 상태 변수를 충분히 추정하지 못하게 된다. 일반적인 선형 시변 시스템(linear time-varying system)에서 가관측성은 시변 칼만필터의 설계 기법과는 무관하며, 그 선형 시변 시스템의 시스템 행렬과 입력력 행렬들의 변화에 의하여 결정된다. 가관측성은 설계된 칼만필터의 안정성(stability)을 보장하기 위한 매우 중요한 조건이다. 선형 시변 시스템이 균일 관측 가능(uniformly observable)하고 공정 잡음이 균일하게 제어 가능하면 설계된 칼만필터는 점근적(asymptotically)으로 안정(stable)하게 된다.

본 연구에서는 SDINS 오차 모델의 가관측성과 균일 가관측성(uniform observability)에 대한 연구를 수행한다. 일반적인 항법 오차 모델의 시스템 행렬은 항체의 위치, 속도 및 자세에 따라 매우 복잡하게 변화하므로 일반적인 SDINS 오차 모델의 가관측성에 대한 연구는 거의 불가능하다. 본 연구에서는 항체가 정지한 상태에서 자세 변화에 의한 항법 오차 모델의 가관측성과 균일 가관측성에 대한 연구를 수행한다. 이는 항체의 자세 변화가 항법 오차에 매우 큰 영향을 미치며, 항법 시작시 필수적으로 수행되는 정렬(alignment)이 주로 항체가 정지한 상태에서 수행되기 때문이다. 그리고 정지시 항법 오차의 동적 특성이 일반적인 항법 오차의 특성을 매우 잘 나타내 준다[4,5]. 또한 가관측성 분석과 함께 오차 공분산 해석 기법을 이용하여 항법 오차의 특성을 분석한다. 본 장의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 SDINS 오차 모델의 Lyapunov 변환에 대하여 논하고 3장에서는 Lyapunov 변환 SDINS 오차 모델을 이용하여 SDINS 오차 모델의 가관측성과 균일 가관측성 분석을 수행한다. 4장에서는 오차 공분산 분석 기법을 통한 SDINS 오차의 특성 분석에 대한 연구를 수행한다.

2. SDINS 오차 모델의 Lyapunov 변환

지역 수평 NED(Local Level North-East-Down) 좌표계를 항법좌표계로서 사용하는 경우, 정지시 SDINS 오차식은 위치 오차와 중력 가속도 오차를 무시하고 센서 오차들을 랜덤상수(random constant) 및 백색잡음(white noise)로 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + w(t), \quad w \sim N(0, Q)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & T(t) \\ 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f \\ x_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_f \\ 0_{6 \times 1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_1 \equiv \begin{bmatrix} -2\Omega_{ie}^n & G \\ 0_{3 \times 3} & -\Omega_{ie}^n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\Omega_{ie}^n \equiv \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_D & 0 \\ \Omega_D & 0 & -\Omega_N \\ 0 & \Omega_N & 0 \end{bmatrix}, \quad G \equiv \begin{bmatrix} 0 & g & 0 \\ -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

Ω_{ie}^n 는 지구 자전 각속도를 나타내는 왜대칭 행렬(skew symmetric matrix)이고 g 는 지구 중력 가속도이다. 그리고 N, E 그리고 D 첨자는 각각 항법좌표계의 북쪽, 동쪽 그리고 수직축을 나타낸다. 항법 오차식 (1)에서 $T(t)$ 행렬은 다음과 같다.

$$T(t) \equiv \begin{bmatrix} C_b^n(t) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & C_b^n(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

여기에서 $C_b^n(t)$ 은 동체좌표계에서 항법좌표계로의 좌표 변환 행렬이다. 오차 상태 변수 x_f 와 x_a 는 다음과 같이 구성된다.

$$x_f \equiv [\delta v_N \quad \delta v_E \quad \delta v_D \quad \psi_N \quad \psi_E \quad \psi_D]^T \quad (4a)$$

$$x_a \equiv [\nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T \quad (4b)$$

δv 와 ψ 는 각각 N, E 그리고 D 방향의 속도 오차와 자세 오차들이다. ∇ 와 ε 은 각각 가속도계 및 자이로의 랜덤상수 오차를 나타낸다. 정지시 항법 알고리즘에서 계산되는 속도는 항법 오차에 의한 것이므로 오차식에 대한 측정식은 다음과 같다.

$$y(t) = Cx(t) + v, v \sim N(0, R),$$

$$= \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & \dots & 0_{3 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f(t) \\ x_a(t) \end{bmatrix} + v. \quad (5)$$

이때 측정 행렬 C 는 항상 시불변임을 알 수 있다.

시변 시스템의 Lyapunov 변환은 선형 시불변 시스템의 유사 변환(similar transformation)과 같이 선형 시변 시스템의 상태 변수를 변환하는 기법이다[7,8]. 이러한 Lyapunov 변환은 주로 주기적 시스템의 안정성 등을 분석하는데 많이 이용되고 있다. Lyapunov 변환 행렬 $M(t)$ 는 다음의 조건들을 만족시켜야 한다.

$$1) M(t) \text{과 } \dot{M}(t) \text{는 연속이고 } [t_0, \infty) \text{ 구간에서 제한되어 있다.} \quad (6a)$$

$$2) \text{ 다음을 만족시키는 상수 } m \text{이 존재한다.} \quad (6b)$$

$$0 < m \leq |\det M(t)|.$$

$M(t)$ 를 다음과 같이 가정한다.

$$M(t) = \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ 0_{6 \times 6} & T(t) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

그리고 다음의 조건이 만족된다고 가정한다.

가정 1 : 동체좌표계와 항법좌표계 사이의 회전 각속도 벡터 $\omega_{nb}^n(t) = [\bar{\omega}_N(t) \ \bar{\omega}_E(t) \ \bar{\omega}_D(t)]^T$ 는 $[t_0, \infty)$ 구간에서 연속이고 제한되어 있다.

이 가정이 만족되면 $M(t)$ 는 Lyapunov 조건 (6a)를 만족한다. 그리고 $T(t)$ 는 유니타리 행렬이므로 $M(t)$ 는 조건 (6b)를 만족하게 된다. 새로운 오차 상태 변수 $x_i(t) \equiv M(t)x(t)$ 를 정의하여 오차 모델을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}(\bar{\omega}_N(t), \bar{\omega}_E(t), \bar{\omega}_D(t))\bar{x}(t) + w, \quad (8)$$

$$\bar{A}(\bar{\omega}_N(t), \bar{\omega}_E(t), \bar{\omega}_D(t)) \equiv \begin{bmatrix} -2\Omega_{ie}^n & G & & & & \\ 0_{3 \times 3} & -\Omega_{ie}^n & & & I_{6 \times 6} & \\ & & \Omega_{nb}^n(t) & 0_{3 \times 3} & & \\ & 0_{6 \times 6} & & & & \Omega_{nb}^n(t) \\ & & 0_{3 \times 3} & \Omega_{nb}^n(t) & & \end{bmatrix},$$

$\Omega_{nb}^n(t)$ 는 다음과 같은 왜대칭 행렬이다.

$$\Omega_{nb}^n(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\bar{\omega}_D(t) & \bar{\omega}_E(t) \\ \bar{\omega}_D(t) & 0 & -\bar{\omega}_N(t) \\ -\bar{\omega}_E(t) & \bar{\omega}_N(t) & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

그리고 측정 모델은 다음과 같다.

$$y(t) = C\bar{x}(t) + v, v \sim N(0, R). \quad (10)$$

$M(t)$ 는 Lyapunov 변환 행렬이므로 Lyapunov 변환 오차 모델 (8), (9)가 관측 및 균일 관측 가능하게 될 필요충분조건은 원래의 오차 모델 (1), (2)가 관측 및 균일 관측 가능하게 되는 것이다[9].

기존의 항법 오차 시스템을 구간 고정시스템으로 가정한 가관측성 분석에서는 항법 오차 시스템을 구간 고정시스템으로 가정하여 항법 오차의 가관측 여부를 판단하였다[6]. 일반적인 SDINS의 경우에는 항체가 처음에 어떠한 자세로 있을 것인지 예측할 수 없으므로 자세 변화에 따른 일반적인 완전 가관측 결과를 유도하기가 어렵다. 또한 항법 오차식에 포함된 좌표 변환 행렬은 항체의 롤(roll), 피치(pitch) 그리고 요(yaw)각들의 복잡한 사인(sine) 및 코사인(cosine) 함수들의 곱으로 나타나므로 일반적인 결과를 유도하기가 매우 어렵다. 이러한 면에서 Lyapunov 변환 SDINS 오차 모델은 좌표 변환 행렬을 포함하고 있지 않으므로 가관측성 분석이 더욱 용이하다.

3. SDINS 오차 모델의 균일 가관측성

앞에서 언급한 바와 같이 SDINS 오차 모델 (1)이 관측 가능하거나 균일 관측 가능하기 위한 필요 충분조건은 Lyapunov 변환 SDINS 오차 모델 (8)이 관측 가능하거나 균일 관측 가능한 것이다. Lyapunov 변환 SDINS 오차 모델을 이용하여, 다음의 조건들이 만족될 때 SDINS 오차 모델이 관측 가능하게 됨을 알 수 있다.

정리 1 [9] : 극지방을 제외한 곳에서 다음의 조건들이 만족되면 $[\bar{A}(\bar{\omega}_N, \bar{\omega}_E, \bar{\omega}_D), C]$ 는 관측 가능한 시스템 및 측정 행렬이 된다.

$$1) \bar{\omega}_N^2 + \bar{\omega}_D^2 > 0.$$

$$2) \bar{\omega}_N^2 + \bar{\omega}_E^2 + \bar{\omega}_D^2 > \omega_{ie}^2,$$

여기서 ω_{ie} 는 지구 회전각속도의 크기이다. ■

정리 1의 결과로부터 영속도 상태의 SDINS에 지구 회전각속도보다 큰 동체 회전각속도가 일정하게 인가되고, 그 회전축이 동쪽축과 일치하지 않으면 SDINS 오차 모델이 관측 가능하게 됨을 알 수 있다. 이 결과는 기존의 구간 고정시스템 분석 기법을 이용하여 구한 가관측 결과를 포함하고 있으며, 초기 자세에 대한 조건이 포함되어 있지 않으므로 기존의 결과에 비하여 더 일반적으로 SDINS 오차 모델의 가관측성을 나타내 준다.

칼만필터의 안정성 보장에 필요한 균일 가관측성 조건을 유도하기 위해서는 다음의 보조정리가 필요하다.

보조정리 1 [9] : A_C 가 다음의 조건을 만족시키는 $n \times n$ 행렬들의 집합이라고 가정한다.

- 1) 모든 $A \in A_C$ 에 대하여 $[A, C]$ 는 관측 가능하다.
- 2) A_C 는 콤팩트(compact)한 집합이다.

이때 임의의 상수 $\delta > 0$ 와 모든 $A \in A_C$ 에 대하여 다음을 만족시키는 양의 함수 $\alpha(\cdot)$ 가 존재한다.

$$0 < \alpha(\delta)I \leq \bar{W}_A[\delta], \quad \bar{W}_A[\delta] \equiv \int_0^\delta e^{A^T \tau} C^T C e^{A \tau} d\tau \quad \blacksquare$$

보조정리 1의 결과를 바탕으로 다음과 같은 균일 가관측 조건을 얻을 수 있다.

정리 2 : 가정 1이 만족될 때에 다음 조건들을 만족시키는 시간 수열 t_i ($i = 0, 1, 2, \dots, t_0$ 는 초기 시각)와 t'_i ($i = 0, 1, 2, \dots$) 그리고 양수 δ 와 δ' 가 존재하고, 임의의 상수 $\alpha_1 > 1$ 에 대하여 SDINS의 동체 회전각속도 $\omega_{nb}^n(t) = [\bar{\omega}_N(t) \ \bar{\omega}_E(t) \ \bar{\omega}_D(t)]^T$ 가 다음 조건들을 만족시키면 SDINS 오차 모델 (1)은 극점을 제외한 곳에서 균일 관측 가능하게 된다.

- 1) $t_{i+1} - t_i \leq \delta, [t'_i, t'_i + \delta'] \subset [t_i, t_{i+1}), \forall i = 0, 1, 2, \dots$
- 2) $\bar{\omega}_N(t) = \bar{\omega}_N(t'_i), \bar{\omega}_E(t) = \bar{\omega}_E(t'_i), \bar{\omega}_D(t) = \bar{\omega}_D(t'_i)$
 $\forall t \in [t'_i, t'_i + \delta'], \forall i = 0, 1, 2, \dots$
- 3) $\bar{\omega}_N^2(t'_i) + \bar{\omega}_D^2(t'_i) \geq \alpha_1 \omega_{ie}^2, \forall i = 0, 1, 2, \dots$

증명 : 정리 2의 조건 2)와 3) 그리고 정리 1에 의해서 다음을 만족시키는 콤팩트한 집합 A_C 가 존재한다.

$$\bar{A}(\bar{\omega}_N(t'_i), \bar{\omega}_E(t'_i), \bar{\omega}_D(t'_i)) \in A_C, \forall i = 0, 1, 2, \dots$$

그리고 가관측 그래미언(grammian) $\bar{W}_O[t'_i, t'_i + \delta']$ 는 보조정리 1에서 $\bar{W}_{\bar{A}(\bar{\omega}_N(t'_i), \bar{\omega}_E(t'_i), \bar{\omega}_D(t'_i))}[\delta']$ 에 해당함을 알 수 있다. 따라서

다음을 만족시키는 양의 함수 $\alpha_2(\cdot)$ 가 존재한다.

$$\bar{W}_O[t'_i, t'_i + \delta'] \geq \alpha_2(\delta')I > 0, \forall i = 0, 1, 2, \dots$$

정리 2의 조건 1)에 의해서 다음을 만족시키는 양수 δ'' 와 양의

함수 $\alpha''(\cdot)$ 가 존재한다.

$$\overline{W}_0[t, t + \delta'] \geq \alpha''(\delta')I > 0, \forall t \geq t_0$$

따라서 Lyapunov 변환 SDINS 오차 모델은 정리 2의 조건들을 만족시키면 균일 관측 가능하게 된다. ■

정리 2에 의하면 항체의 자세 변화가 주어진 조건들을 만족시키고, 이와 같은 자세 변화가 정기적으로 반복되면 SDINS 오차 모델은 균일 관측 가능하게 된다. 그리고 정리 2로부터 $t'_i + \delta'$ 부터 t'_{i+1} 사이의 항체의 변화는 균일 가관측성에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 따라서 운항 중인 항체가 정리 2의 조건을 만족시키도록 영속도(zero velocity) 보정을 정기적으로 수행하면 SDINS 오차 모델은 균일 관측 가능하게 됨을 알 수 있다.

시변 칼만필터의 안정성을 보장하기 위해서는 균일 가관측성과 함께 공정 잡음의 균일 가제어성이 요구된다. 공정 잡음이 균일 제어 가능하지 않은 경우에는 가상 공정 잡음(fictitious process noise)을 고려함으로써 균일 가제어성을 충족시킬 수 있다.

4. 오차 특성 분석

SDINS 오차 모델의 가관측성은 오차의 추정 가능성 여부와 칼만필터의 안정성 여부를 알려 주지만 오차가 자세 변화에 대하여 어떻게 변화할 것인가에 대한 자세한 정보는 제공하지 않는다. 자세 변화에 따른 항법 오차의 변화를 분석하기 위해서 본 연구에서는 칼만필터의 오차 공분산 분석을 수행한다.

시변 칼만필터의 오차 공분산은 대수 리카티식(algebraic Riccati equation)으로 구할 수 없고 수치적인 방법으로 구해야 한다. 따라서 오차 공분산 분석을 위해서는 SDINS 오차 모델에 포함된 시변 요소의 정확한 변화와 센서 오차의 사양을 알아야 한다. 본 연구에서는 항체가 하나의 자세를 유지하다가 다른 자세로 변화하면서 항법 오차의 추정 및 보정을 수행하는 2 위치 정렬에 대하여 오차 공분산 분석을 수행한다.

Lyapunov 변환 SDINS 오차 모델 (8)을 이용하여 구성된 칼만필터의 오차 공분산 행렬 $P(t)$ 와 SDINS 오차 모델 (1)을 이용하여 구성된 칼만필터의 오차 공분산 행렬 $\overline{P}(t)$ 사이에는, 초기 시간 t_0 에서 $\overline{P}(t_0) = M(t_0)P(t_0)M^T(t_0)$ 가 만족되는 경우 다음의 성질이 만족된다[9].

$$\overline{P}(t) = M(t)P(t)M^T(t), t \geq t_0. \quad (11)$$

따라서 Lyapunov 변환 SDINS 오차 모델 (8)을 이용하여 오차 공분산 해석을 시작하기 위해서는 오차의 초기 공분산과 초기 자세 그리고 시간에 따른 항체의 동체 회전각속도 정보가 필요하다. 오차의 초기 공분산이 다음의 조건들을 만족시키면 초기 자세에 대한 정보는 필요 없게 된다.

보조정리 2 [9]: 오차 상태 변수 $x_f(t)$ 와 $x_e(t)$ 의 초기 공분산이 다음의 조건을 만족시키면 $\overline{P}(t_0) = P(t_0)$ 의 성질이 성립된다.

$$E[x_f(t_0)x_a^T(t_0)] = 0_{6 \times 6}, \quad (12)$$

$$E[x_a(t_0)x_a^T(t_0)] = \begin{bmatrix} \alpha I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \beta I_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \alpha \geq 0, \beta \geq 0.$$

보조정리 2의 조건들은 항체의 초기 속도/자세 오차와 센서 오차들이 서로 독립이고, 센서 오차들이 각각 같은 분산값들을 가지며 서로 독립임을 의미한다. 참고로 보조정리 2의 조건들은 기존의 오차 공분산 연구들에서 만족되어 왔던 조건들이다 [6,10].

오차 공분산 특성 (11)과 Lyapunov 변환 행렬 $M(t)$ 로부터 $P(t)$ 와 $\overline{P}(t)$ 에서 속도 및 자세 오차에 해당하는 부분은 동일함을 알 수 있다. 오차 공분산 해석을 위해서 다음과 같은 중급 SDINS 사양을

가정한다.

$$P(t_0) = \text{diag}[(0.1ft/s)^2, (0.1ft/s)^2, (0.1ft/s)^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (1^\circ)^2, (100\mu g)^2, (100\mu g)^2, (100\mu g)^2, (0.02^\circ/h)^2, (0.02^\circ/h)^2, (0.02^\circ/h)^2],$$

$$Q = \text{diag}[(5\mu g)^2, (5\mu g)^2, (5\mu g)^2, (0.01^\circ/h)^2, (0.01^\circ/h)^2, (0.01^\circ/h)^2, 0, 0, 0, 0, 0, 0],$$

$$R = \text{diag}[(0.01ft/s)^2, (0.01ft/s)^2, (0.01ft/s)^2],$$

$\overline{P}(\cdot)$ 는 600초 동안 매초 계산되며, 여러 가지 동체 회전각속도를 인가하기 위하여 그림 1과 같이 동체 회전각속도 ω_{nb}^n 를 정의한다. 그림에서 기울기각 β 는 ω_{nb}^n 벡터와 수직축 사이의 각이고, 방향각 α 는 ω_s 와 북쪽축 사이의 각이다. ω_s 는 ω_{nb}^n 벡터를 평면 S에 투영한 것이다. 2 위치 정렬을 구현하기 위하여 먼저 300초 동안 ω_{nb}^n 의 크기를 영으로 설정한다. 그 후 10초 동안 영이 아닌 값을 지정하여 항체의 회전을 인가하고 10초가 지난 이후에는 다시 그 크기를 영으로 하게 된다.

그림 2는 오차 공분산 해석 결과들 중에서 매우 중요한 자세각 오차인 방위각에 대한 결과이다. 이 결과는 기울기각이 0도일 때의 최종 방위각 오차로서 회전량이 180도 일 때에 가장 많은 오차의 감소를 보여 주고 있다. 그림 3은 기울기각이 60도일 때의 최종 방위각 오차로서, 이 결과 또한 회전량이 180도 일 때에 가장 많은 오차의 감소를 보여 주고 있다. 그러나 기울기각이 60도 일 때의 결과에서는 방향각이 90도나 270도일 때 매우 큰 방위각 오차를 나타내고 있다. 이러한 성질은 그림 4에 잘 나타나 있다. 기울기각이 증가함에 따라 방향각이 90도나 270도일 때의 방위각 오차는 매우 크게 증가한다. 방향각이 90도나 270도인 경우는 동체 회전축이 동쪽이나 서쪽을 향하고 있는 경우를 말한다. 따라서 방위각 오차를 최소화하기 위해서는 회전량을 180도로 하고 항체의 회전축을 되도록이면 북쪽이나 남쪽으로 하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 정지시 SDINS 오차 모델의 가관측성과 균일 가관측성 그리고 오차 특성에 대한 분석을 수행하였다. 항법 오차의 분석이 용이한 Lyapunov 변환 오차 모델을 제안하였으며 SDINS 오차 모델의 가관측성과 균일 가관측성에 대한 충분 조건들을 유도하였다. 동체에 일정한 회전각속도가 인가되고, 그 회전 각속도가 지구 회전각속도 보다 큰 회전축이 동서축과 일치하지 않으면 SDINS 오차 모델이 관측 가능하게 됨을 알 수 있었다. 또한 항체가 영속도 보정을 정기적으로 수행하고, 영속도 상태에 인가되는 동체 회전각속도가 주어진 조건들을 만족시키면 SDINS 오차 모델이 균일 관측 가능하게 됨을 알 수 있었다. Lyapunov 변환 오차 모델을 통한 항법 오차의 공분산 해석 결과, 항체의 회전축을 되도록이면 남쪽이나 북쪽으로 하고 그 회전량을 180도로 하는 것이 오차 감소에 매우 유리함을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시된 SDINS 오차 모델의 균일 가관측성 결과는 항법 칼만필터의 안정성 보장을 위한 가장 중요한 결과이다. 그리고 항법 오차 공분산 해석 결과는 항법 오차의 수렴성 연구 및 최적의 2 위치 정렬 기법 개발에 매우 유용하게 이용될 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

- [1] K. R. Britting and T. Palsson, "Self-Alignment Techniques for Strapdown Inertial Navigation Systems with Aircraft Application," *Journal of Aircraft*, Vol. 7, No. 4, July-Aug., 1970, pp. 302-307.
- [2] 박홍원, 이장규, "칼만필터를 이용한 스트랩다운 관성항법장치의 영속도 보정 항법 알고리즘 설계," *항공우주학회지*, 제 19권, 제 3호, 1991, pp.77-87.
- [3] 이장규외, *조준경 센서를 이용한 간이 지상항법시스템 구성*, 위탁연구 보고서, 국방과학연구소, 1993-1995.
- [4] I. Y. Bar-Itzhack and N. Berman, "Control Theoretic Approach to Inertial Navigation System," *Journal of Guidance and Control*, Vol. 11, No. 3, May-June 1988, pp. 237-245.
- [5] Y. F. Jiang and Y. P. Lin, "Error Estimation of INS Ground Alignment through Observability Analysis," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-28, No. 1, 1992, pp. 92-97.
- [6] J. G. Lee, C. G. Park and H. W. Park, "Multiposition Alignment of Strapdown Inertial Navigation System," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-29, No. 4, October 1993, pp. 1323-1328.
- [7] R. W. Brockett, *Finite Dimensional Linear Systems*, Wiley & Sons, Inc., New York, 1970.
- [8] C. T. Chen, *Linear System Theory and Design*, Holt-Saunders International Editions.
- [9] 박찬국의, *관성항법장치 항법 알고리즘 연구*, 연구 보고서, 국방과학연구소, 1996. 2.
- [10] 정도형, 박찬국, 이장규, "가속도계 측정치를 이용한 스트랩다운 관성항법장치의 초기 정렬 알고리즘 설계," *항공우주학회지*, 제 23권, 제 6호, 1995, pp.121-127.

그림

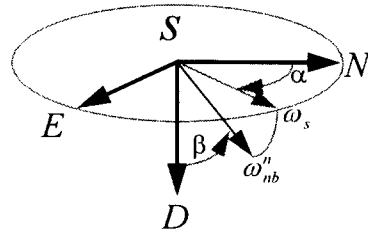


그림 1. 동체 회전각속도축의 정의

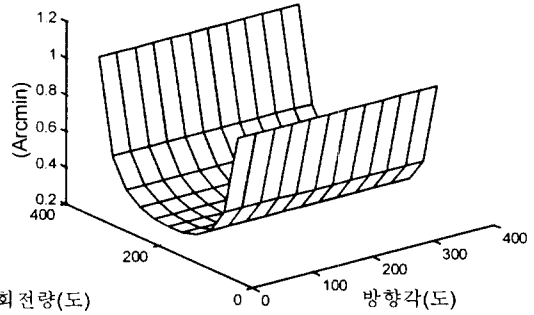


그림 2. 기울기각이 0도일 때의 최종 방위각 오차

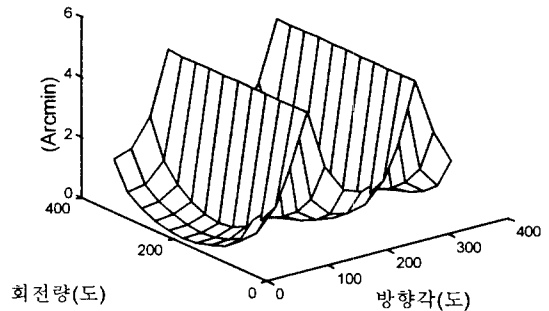


그림 3. 기울기각이 60도일 때의 최종 방위각 오차

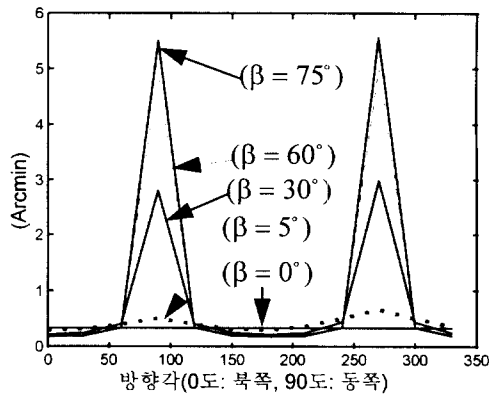


그림 4. 회전량이 180도일 때의 최종 방위각 오차