

수평축 자세운동이 있는 배에서의 전달정렬 알고리즘 설계

Design of Transfer Alignment Algorithm in Ship of Horizontal Axis Attitude Motion

송기원, 전창배*, 김현백*, 유준**

* 국방과학연구소 (TEL:821-4455;FAX:821-2224)

**충남대학교 전자공학과 (TEL:821-5669;FAX:823-5436)

Abstract : This paper presents algorithm including Kalman filter for transfer alignment of velocity and quaternion matching method, when master inertial navigation system is a gimble type and slave inertial navigation system is a strapdown type on a cruising ship which is naturally in motion of horizontal axis attitude. And relative attitudes are considered on a measurement equation for quaternion matching between master INS and slave INS.

Keywords : INS(Inertial Navigation System), Alignment, Kalman filter, Matching.

1. 서론

전달정렬(transfer alignment)은 모선인 배 또는 비행기 등의 항법을 위한 정밀한 주 관성항법장치(Master Inertial Navigation System:MINS)의 출력정보를 이용하여 모선에 장착된 또 다른 부 관성항법장치(Slave Inertial Navigation System:SINS)의 자세정렬을 수행하는 방법이다.[1,2] 이러한 SINS는 모선에서 발생되는 유도탄의 스트랩다운 관성항법장치(Strapdown INS:SDINS)로 가정할 수 있다. SDINS에서 이용되는 자이로스코프는 경제적인 측면에서 저가의 DTG(Dynamic Tuned Gyroscope)가 사용되는데 중급이하의 DTG로 자이로콤파스(gyrocompass) 원리를 이용한 자기정렬(self align)은 고정밀 정렬을 수행할 수 없다. 그러나 보조정렬(aided align)로 알려진 전달정렬 기법을 이용하여 중급이하의 DTG로 가능한 자기정렬보다 정렬성능을 크게 향상시킬 수 있다.

전달정렬 기법에 있어서 SINS 출력정보와 정합(matching) 가능한 MINS 출력정보는 속도, 자세, 각속도, 가속도 등이 있으며, 속도정합 방식의 전달정렬이 가장 널리 적용되고 있다.[3,4] 그런데 전달정렬에 적용되는 정합방식은 모선의 항해중 운동환경에 따라 상이방식을 적절히 조합하여 결정하는 것이 전달정렬 성능을 증대시킬 수 있다.[5] 본 논문은 자연적으로 수평축 자세운동이 존재하는 순항중인 배를 모선으로 하고 SINS가 SDINS인 경우의 초기자세 정렬을 위한 전달정렬 알고리즘을 제안한다. 배의 INS로 김벌형 관성항법장치(Gimble INS:GINS)가 보편적이므로 MINS는 GINS로 가정되었으며, GINS에서 획득가능한 출력정보는 속도와 자세로 제한된다. 따라서 정합방식은 속도 및 자세정합으로 채택되었다.

속도정합의 전달정렬은 가관측성 측면에서 방위각 운동 또는 가속운동시 칼만필터에 의한 방위각 오차추정이 가능하다.[6] 반면에 자세정합의 전달정렬은 수평자세 운동시 방위각 정렬이 가능한 것으로 알려져 있다.[7,8] 따라서 수평축 자세운동만이 존재하는 경우에 속도정합의 전달정렬은 방위각 정렬이 불가능하나, 자세정합을 추가하여 수평자세 정렬 및 방위각 정렬이 가능하다. 본 논문은 자세정합 방식중 널리 알려진 방향코사인 행렬(DCM:Direction Cosine Matrix)정합방식과는 다르게,[8,9]

SDINS에서 자세변수로 이용되어 다루기에 유리한 쿼터니언(quaternion) 정합방식을 MINS와 SINS가 서로 상대적 자세각이 존재하는 경우를 고려하여 새롭게 제시하였다.[7,10]

전달정렬시에는 필히 고려해야 할 칼만필터의 추정오차를 유발시키는 정합오차가 존재하는데 속도정합의 경우 MINS와 SINS 사이의 거리차로 발생하는 지렛대(lever arm) 효과가 있으며, 자세정합의 경우 MINS와 SINS 동체좌표계 사이의 비정렬(misalign)이 존재한다. 지렛대 효과에 의한 속도정합 오차는 MINS와 SINS 사이의 거리가 측정가능하므로 보상될 수 있으며, 또한 비정렬에 의한 정합오차는 MINS와 SINS의 장착구조물이 강체(rigid body)가 아닌 경우 유연성(flexure)이 고려되어야 한다.[8,9] 그러나 장착 구조물이 되는 배의 유연성은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하여 유연성을 고려하지 않았다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서 속도 및 쿼터니언 정합의 전달정렬 시스템에 대한 오차모델이 유도되었으며 3절에서는 칼만필터를 포함한 시스템 구성방안을 제시하였다. 4절에서는 제시된 전달정렬 알고리즘에 대한 성능분석 조건과 방위각 정렬성능을 분석하였다. 그리고 5절은 본 논문의 결론을 기술하였다.

<주요기호>

i : 관성좌표계 n : 항법좌표계 (n, e, d) e : 지구좌표계
 b : SINS 동체좌표계 (x, y, z) r : MINS 동체좌표계 (X, Y, Z)
 L : 위도 l : 경도
 R : 지구반경 Ω_e : 지구자전 각속도

$Q_{AB} = [q_{AB0} \ q_{AB1} \ q_{AB2} \ q_{AB3}]^T$: A좌표계로부터 B좌표계로의 쿼터니언 변수

$Q_{AB}^* = [q_{AB0} \ -q_{AB1} \ -q_{AB2} \ -q_{AB3}]^T$

C_A^B : A좌표계로부터 B좌표계로의 좌표변환행렬

V_B^A : A좌표계에서 측정된 b 좌표계 지점의 속도

ω_{ij}^k : j좌표계의 i좌표계에 대한 각속도의 k좌표계 측정값

f^k : 가속도를 k좌표계에서 측정된 값

Ω : ω 벡터의 왜대칭 행렬

F : f 벡터의 왜대칭 행렬

$\delta \cdot$: 오차를 표현하는 기호
 $\hat{\cdot}$: 계산된 값을 표현하는 기호

2. 전달정렬 시스템의 오차모델

전달정렬은 칼만필터에 의해 자세오차를 추정하게 된다. 그러므로 본 장에서는 우선 칼만필터 설계를 위한 전달정렬 시스템의 오차모델을 제시한다.

2.1 SDINS의 속도 및 쿼터니언 오차 미분방정식

전달정렬을 이용한 초기자세 정렬을 수행 할 SINS인 SDINS의 오차 미분방정식은 속도오차와 쿼터니언 오차로 유도되는데 이러한 오차는 대수합의 섭동오차(additive perturbation error)로 정의된다. SDINS의 n 축 및 e 축 속도오차 및 쿼터니언 오차 미분방정식은 널리 알려진 관계로 그 결과식만 소개하면 (1)과 (2)와 같다.[11]

$$\delta \dot{V}_B^n = -[2\hat{\Omega}_e^n - \hat{T}_1] \delta V_B^n - 2\hat{F}^n R^T(Q_{bn}) \delta Q_{bn} + \hat{C}_b^n \delta f^b \quad (1)$$

$$\delta \dot{Q}_{bn} = -\frac{1}{2} R(Q_{bn}) \hat{T}_2 \delta V_B^n + \frac{1}{2} [\omega_{ib}^b - \omega_{in}^n] \delta Q_{bn} + \frac{1}{2} T(Q_{bn}) \delta \omega_b^b \quad (2)$$

$$f^n = [f_n \ f_e \ f_d]^T \quad \delta f^b : \text{가속도계 오차}$$

$$\omega_{ib}^b = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T \quad \delta \omega_{ib}^b : \text{자이로스코프 오차}$$

$$\omega_{in}^n = [\omega_n \ \omega_e \ \omega_d]^T$$

$$V_B^n = [V_n \ V_e \ V_d]^T$$

$$\delta V_B^n = [\delta V_n \ \delta V_e]^T$$

$$\hat{\Omega}_e^n = \begin{bmatrix} 0 & 2\Omega_e \sin L \\ -2\Omega_e \sin L & 0 \end{bmatrix}$$

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

$$\hat{T}_1 = \begin{bmatrix} -V_d/R & -2\rho_d \\ \rho_d & (V_d + V_n \tan L)/R \end{bmatrix}$$

$$\hat{T}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1/R \\ -1/R & 0 \\ 0 & -\tan L/R \end{bmatrix}$$

$$\hat{C}_b^n = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \end{bmatrix} \quad C_{ij} : C_b^n \text{의 원소}$$

$$T(Q_{bn}) = \begin{bmatrix} -q_{bn1} & -q_{bn2} & -q_{bn3} \\ q_{bn0} & -q_{bn3} & q_{bn2} \\ q_{bn3} & q_{bn0} & -q_{bn1} \\ -q_{bn2} & q_{bn1} & q_{bn0} \end{bmatrix}$$

$$R(Q_{bn}) = \begin{bmatrix} -q_{bn1} & -q_{bn2} & -q_{bn3} \\ q_{bn0} & q_{bn3} & -q_{bn2} \\ -q_{bn3} & q_{bn0} & q_{bn1} \\ q_{bn2} & -q_{bn1} & q_{bn0} \end{bmatrix}$$

$$[\omega_{ib}^b - \omega_{in}^n] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x + \omega_n & -\omega_y + \omega_e & -\omega_z + \omega_d \\ \omega_x - \omega_n & 0 & \omega_z + \omega_d & -\omega_y - \omega_e \\ \omega_y - \omega_e & -\omega_z - \omega_d & 0 & \omega_x + \omega_n \\ \omega_z - \omega_d & \omega_y + \omega_e & -\omega_x - \omega_n & 0 \end{bmatrix}$$

2.2 속도 및 쿼터니언 정합의 측정방정식

속도정합을 위한 측정방정식은 MINS와 SINS의 속도차이로부터 (5)와 같이 유도되고, MINS와 SINS의 속도오차 그리고 지렛대 효과에 의해 ($V_B^n - V_R^n$) 등의 정합오차가 발생한다. 그리고 본 논문에서 제시하는 쿼터니언 정합의 측정방정식은 MINS와 SINS 사이의 비정렬을 쿼터니언 변수로 정의한 4개의 쿼터니언 정합방정식으로부터 유도되었다.

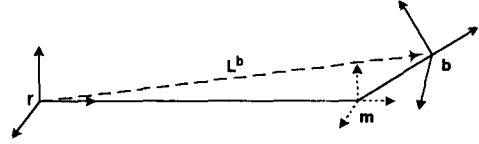


그림1. 전달정렬을 위한 좌표계의 정의

Fig. 1. A coordinate definition for transfer alignment

쿼터니언 정합방정식을 세우기에 앞서 우선 SINS가 장착되는 유도탄 발사대의 MINS에 대한 상대적 자세각을 갖는 m 좌표계를 그림1과 같이 정의한다. 여기서 b 와 m 사이의 상대적 자세각은 발사대 자세각으로부터 알 수 있다. 따라서 쿼터니언 정합방정식은 (3)과 같이 정의할 수 있다. 또한 Q_{mr} 의 미분방정식은 (3)의 양변미분과 \dot{Q}_{rn} , \dot{Q}_{bn} , 그리고 $\dot{Q}_{mb} = 0$ 로부터 (4)와 같이 유도된다. 그런데 MINS와 SINS가 장착되는 구조물이 강체인 경우 $\omega_{rb} = 0$ 가 되며, 이때 (4)은 $\dot{Q}_{mr} = 0$ 가 된다.

$$\dot{Q}_{mr} = \dot{Q}_{rn}^* Q_{bn} Q_{mb} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{mr} = \frac{1}{2} Q_{mr} \omega_{rb}^m \quad (4)$$

쿼터니언 정합의 측정방정식 Z_Q 는 쿼터니언 정합방정식 (3)의 우변과 좌변의 차이로부터 유도하면 (6)과 같고, 정합 오차인 Q_{mr}^* 의 측정오차 δQ_{mr}^* 과 MINS와 SINS 사이의 비정렬 오차 δQ_{mr} 가 발생된다.

$$Z_V = \delta V_B^n - \delta V_R^n + (V_B^n - V_R^n) \quad (5)$$

$$Z_Q = Q_{rn}^* \hat{Q}_{bn} Q_{mb} - \hat{Q}_{mr} \quad (6)$$

$$= \hat{Q}_{rn}^* \delta Q_{bn} Q_{mb} - \delta Q_{mr} + \delta Q_{rn}^* \hat{Q}_{bn} Q_{mb}$$

속도정합의 ($V_B^n - V_R^n$) 정합오차는 MINS와 SINS 장착지점 사이의 거리가 존재하고 자세운동이 있는 경우 지렛대 효과에 의한 MINS와 SINS 사이의 속도차이로 알려져 있다. 그리고 일반적으로 ($V_B^n - V_R^n$)는 MINS와 SINS 사이의 거리인 L^b 를 측정하여 (7)과 같은 방법으로 계산이 가능하므로 보상될 수 있다.

$$V_B^n - V_R^n = C_b^n \Omega_{nb}^b L^b \quad (7)$$

쿼터니언 정합오차 δQ_{mr} 의 오차 미분방정식은 \dot{Q}_{mr} 와 \hat{Q}_{mr} 의 차이로부터 유도할 수 있는데 $\hat{Q}_{mr} = 0$ 이므로 (8)과 같이 유도된다.

$$\dot{Q}_{mr} - \hat{Q}_{mr} = \delta \dot{Q}_{mr} = 0 \quad (8)$$

3. 시스템 구성

전달정렬 시스템의 구성은 각속도 또는 가속도 정합방식의 경우 관성센서인 자이로스코프, 가속도계 정보를 직접 사용하므로 정렬하고자 하는 SINS인 SDINS의 위치, 속도, 자세 등의 항법계산이 요구되지 않으나 속도 또는 자세정합 방식은 항법계산이 필요하다. 본 논문에서 제시하는 칼만필터를 포함한 속도 및 쿼터니언 정합의 전달정렬 시스템 구성은 그림2와 같다. 시스

템 구성도를 간단히 살펴보면 MINS인 GINS의 속도 및 오일러 각은 각각 지렛대 속도보상 및 쿼터니언 변수로 변환되고, 칼만 필터에 의해 추정된 오차들은 피드백(feedback)되어 보정값으로 이용된다.

수평측 자세 운동이 있는 경우 속도 및 쿼터니언 정합이 조합된 전달정렬 시스템의 칼만 필터는 속도정합에 의해 주로 수평 자세 오차추정을 수행하고 방위각 오차추정은 쿼터니언 정합에 의존하여 가능하도록 설계되는데 칼만 필터 설계를 위한 상태방정식과 측정방정식은 2장에서 유도된 오차모델을 기준으로 정리하면 (9)~(11)와 같이 상태변수 X, 시스템 모델 A, 측정모델 H 등이 구해진다. 설계의 주안점들을 살펴보면 속도오차는 n,e축만 고려되었으며, 자이로 및 가속도계 오차요소는 상태변수에 추가하지 않고 공정잡음에 포함시켰다. 그리고 GINS의 속도오차 δV_n^g 와 자세오차 δQ_{mn}^g 은 측정오차로 간주하여 측정잡음에 포함시켰다.

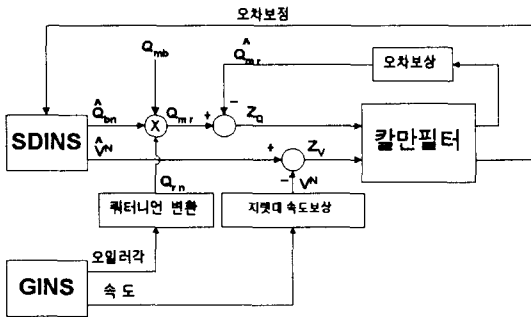


그림 2. 속도 및 쿼터니언 정합의 전달정렬 시스템 구성도
Fig. 2. Transfer alignment system structure of velocity and quaternion matching

$$X = [\delta V_n, \delta V_e, \delta q_{bn0}, \delta q_{bn1}, \delta q_{bn2}, \delta q_{bn3}, \delta q_{mn0}, \delta q_{mn1}, \delta q_{mn2}, \delta q_{mn3}]^T \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} -[2\hat{\Omega}_{ie}^n - \hat{T}_1]_{2 \times 2} & -2[\hat{F}^n R^T(Q_{bn})]_{2 \times 4} & 0_{2 \times 4} \\ -\frac{1}{2}[R(Q_{bn})\hat{T}_2]_{4 \times 2} & \frac{1}{2}[\omega_{ib}^b - \omega_{in}^n]_{4 \times 4} & 0_{4 \times 4} \\ 0_{4 \times 2} & 0_{4 \times 4} & 0_{4 \times 4} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 $G_{4 \times 4}$ 는 다음과 같다.

$$G_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} q_{m0} & q_{m1} & q_{m2} & q_{m3} \\ -q_{m1} & q_{m0} & q_{m3} & -q_{m2} \\ -q_{m2} & -q_{m3} & q_{m0} & q_{m1} \\ -q_{m3} & q_{m2} & -q_{m1} & q_{m0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{m20} & -q_{m21} & -q_{m22} & -q_{m23} \\ q_{m21} & q_{m20} & q_{m23} & -q_{m22} \\ q_{m22} & -q_{m23} & q_{m20} & q_{m21} \\ q_{m23} & q_{m22} & -q_{m21} & q_{m20} \end{bmatrix}$$

4. 시뮬레이션 및 분석

자연적인 수평측 자세운동이 존재하고 지렛대 거리가 비교적 큰 경우의 순항중인 배에서 MINS를 GINS로 하고 SINS인 SDINS를 위한 전달정렬 알고리즘을 본 논문에서 제시하는 속도 및 쿼터니언 정합방식으로 구성하여 몬테칼로 방식의 전산시뮬레이션이 수행되었다.

4.1 배의 수평측 자세운동

배의 운동은 자세운동인 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)와

선형운동인 , 종동요(surge), 횡동요(sway), 수직동요(heave) 등으로 나누어 진다. 시뮬레이션에 사용된 배의 운동은 선수각 변화가 없는 수평측 자세운동에 초점을 맞추어 선형운동은 고려하지 않았다. 보편적인 수평측 자세운동의 주된 크기와 주기는 롤인 경우 $\pm 6^\circ$, 9~10초, 피치인 경우 $\pm 5^\circ$, 6초 이다.[12] 그리고 주파수 범위는 0.05~0.25Hz로 알려져 있으며,[13] 따라서 배의 수평측 자세운동은 (12)와 같이 여러 정현파의 합인 조화신호로 표현할 수 있다. 시뮬레이션에 사용된 A_i 와 f_i 는 롤과 피치 운동에 관하여 표1과 같이 가정하였다.

배에서 장착되는 GINS와 SDINS 사이의 거리는 비교적 큰 경우를 가정하여 X축으로는 100ft, Y축 경우 20ft, Z축 20ft등으로 하였으며, 거리측정 오차는 1ft로 가정하였다.

$$\sum_{i=0}^n A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i), \quad \text{여기서 } 0 < \phi_i < 2\pi \quad (12)$$

표 1. 배의 수평측 자세운동 주파수 및 크기

Table 1. Frequency and amplitude of ship's horizontal attitude motion

롤	f_i (Hz)	0.071	0.090	0.097	0.115	0.139	0.167	0.182
	A_i (도)	0.3	0.75	1.2	1.5	1.35	0.9	0.3
피치	f_i (Hz)	0.107	0.136	0.161	0.170	0.179	0.205	0.224
	A_i (도)	0.6	0.95	1.2	1.1	0.85	0.5	0.25

4.2 GINS와 SDINS의 성능규격

MINS가 GINS인 경우 출력자세인 오일러각에 오차를 유발하는 요소는 항법좌표계에 대한 안정대의 경사각(tilt angle)과 싱크로 변환기(synchro converter)의 변환오차 등이 있다. 이와 같은 오차요소는 GINS 자세출력에서 경사각과 싱크로 변환오차의 고정(fixed bias) 오차와 랜덤오차로 분류하여 포함시킬 수 있는데 경사각의 특성은 짧은 시간내에서 거의 변화하지 않는 랜덤상수로서 크기는 n,e 축의 경우 3 min, d축은 5 min 이며, 싱크로 변환오차의 경우 랜덤 상수 특성의 변환오차는 3 min, 백색잡음 특성의 변환오차는 1 min로 가정하였다. 그리고 GINS 속도오차는 랜덤상수 오차 0.7ft/sec, 백색잡음 특성의 오차 0.3ft/sec로 가정되었다. SDINS의 자이로 및 가속도계 성능규격은 중급성능의 관성측정기로 표2와 같이 가정하였다.

표 2. SDINS의 자이로 및 가속도계 성능 (1σ)

Table 2. Performance of gyroscope and accelerometer of SDINS

분 류	바이어스	환산오차	비정렬	질량불균형	백색잡음
자이로	0.6도/hr	300ppm	1 min	0.3도/hr/g	0.1도/hr
가속도계	250 μg	300ppm	1 min	-	20 μg

4.3 정렬 성능분석

속도 및 쿼터니언 정합 전달정렬 알고리즘의 성능분석을 위한 시뮬레이션은 상기 1,2 절의 조건과 GINS와 SDINS의 발사대 자세각을 제외한 장착비정렬을 3도로(1σ) 가정하여 수행되었다. 그리고 발사대의 자세각은 MINS에 대하여 수직축으로 90도, 피치각은 35도로 가정되었다. 우선 수평자세 정렬에 관한 시뮬레이션 결과를 살펴보면 속도정합에 의해 수평자세 오차추정은 그림3과 같이 지렛대 속도보상이 수행된 경우 매우 빠른 속도로 1mrad 이내로 추정되며 방위각 정렬의 경우 3mrad 내외로 가능하다. 그리고 롤, 피치 각운동 있는 상태에서 X축 방향의 다소 큰 100ft 지렛대 거리에 대하여 지렛대 속도보상이 안된 경우 그 영향은 그림4와 같이 거의 없음을 볼 수 있는데, 이와같

은 결과는 쿼터니언 정합이 속도정합시의 오차요인 지렛대 효과를 억제하고 있음을 반증하고 있다.

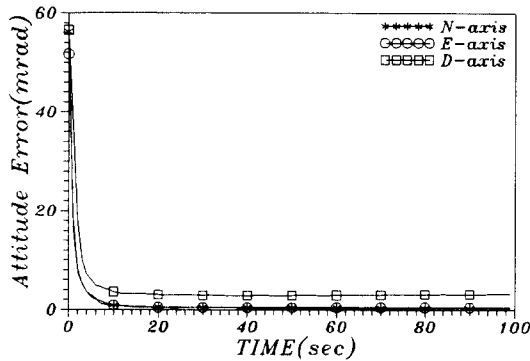


그림 3. 속도 및 쿼터니언 정합의 전달정렬을 위한 칼만필터의 정렬오차 추이 (지렛대 속도보상)

Fig. 3. Trend of alignment error by Kalman filter for transfer alignment of velocity and quaternion matching (Compensated lever-arm velocity)

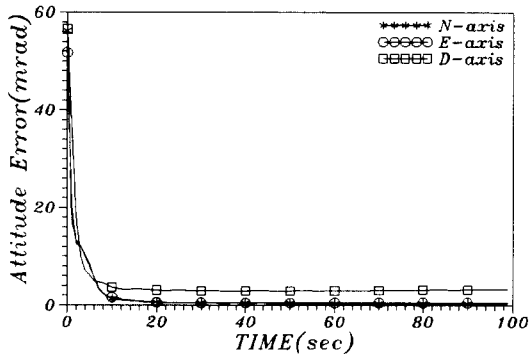


그림 4. 속도 및 쿼터니언 정합의 전달정렬을 위한 칼만필터의 정렬오차 추이 (지렛대 속도보상이 없는 경우)

Fig. 4. Trend of alignment error by Kalman filter for transfer alignment of velocity and quaternion matching (Non-compensated lever-arm velocity)

5. 결 론

속도 및 쿼터니언 정합을 이용한 전달정렬 알고리즘이 10차의 칼만필터를 중심으로 구성 제시되었다. 본 논문은 쿼터니언 정합에 있어서 상대적 자세각이 존재하는 경우를 고려하였으며 지렛대효과에 대해서도 살펴보았다. 결과적으로 전달정렬을 위한 속도와 쿼터니언 정합의 조합은 서로의 결점을 보완하고 있어 적당한 수평축 자세운동이 있는 배에서 수평축 자세정렬은 물론 방위각 정렬이 지렛대 속도보상 없이도 수행될 수 있음을 GINS의 속도 및 자세오차 등을 고려한 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] J. Deyst Jr. , A. Sutherland Jr., "Strapdown Inertial System Alignment Using Statistical Filters : Simplified

Formulation," *AIAA J.*, vol. 11, pp. 452-456, Apr. 1973.

[2] A. M. Schneider, "Kalman Filter Formulation for Transfer Alignment of Strapdown Inertial Unit," *Journal of Institute of Navigation*, vol. 30, no. 1, pp. 72-89, Spr 1983.

[3] O. Hallingstad , "Design of a Kalman Filter for Transfer Alignment." *AGARD Lecture Series* no. 166, pp. 2.1-2.15, 1989.

[4] James L. Farrell, "Transfer Alignment for Precision Pointing Applications," *NAECON*, pp. 1033-1039, 1979.

[5] D. H. Titterton , J. L. Westone, "Dynamic Shipboard Alignment Technique," *Symposium Gyro Technology*, pp. 9.1-9.27, 1989.

[6] I. Y. Bar-Itzhack , Boaz Porat, "Azimuth Observability Enhancement During Inertial Navigation System In-Flight Alignment," *J. Guidance and Control*, vol. 3, no. 4, pp. 337-344, Jul-Aug 1980.

[7] 송기원, 전창배, 김현백, "스트랩다운 관성항법장치의 각을 이용한 초기전달 정렬기법," 한국 자동제어학회지의논문집, pp. 29-33, 1993.

[8] J. E. Kain , J. R. Cloutier, "Rapid Transfer Alignment for Tactical Weapon Application," *Proc. of the AIAA GN&C Conference*, pp. 1290-1300, 1989.

[9] K. Spalding, "An Efficient Rapid Transfer Alignment Filter," *Proc. of the AIAA GN&C Conference*, pp. 1276-1286, 1992.

[10] D. J. Schmidt, G. A. Bendor "Quaternion Matching in Transfer Alignment for SAR Motion compensation," *NAECON*, pp. 600-604, 1979.

[11] 박홍원, 이장규, "칼만필터를 이용한 스트랩다운 관성항법장치의 영속도 보정항법 알고리즘 설계," 한국항공우주학회지, 19권, 3호, pp.77-87, 1991.

[12] K. J. Rawson , E. C. Tupper, *Basic Ship Theory*, Longmans, London, 1968.

[13] J. Fotakis , M. J. Grimble , B. Kouvaritakis, "A Comparison of Characteristic Locus and Optimal Designs for Dynamic Ship Positioning Systems," *IEEE Trans. on A. C.* vol 27., no. 6, Dec. 1982.