

관성항법시스템의 중첩센서 배치에 대한 항법 및 고장검출 성능분석

Navigation and Fault Detection Performance Analysis for INS Redundant Sensor Configurations

김 정 용, 양 철 관, 심 덕 선
(Jeong-Yong Kim, Cheol-Kwan Yang and Duk-Sun Shim)

Abstract : The redundant sensor configuration problem of inertial navigation system(INS) is considered and analyzed the navigation and fault detection performance according to various sensor configurations. We considered various kinds of redundant sensor configurations for symmetric, cone, and orthogonal configurations and compare the navigation and fault detection performance for the configurations. We show that the navigation and fault detection performance is not affected by the coordinate change for a fixed configuration.

Keywords : INS, GN&C, FDI, sensor configurations

I. 서론

관성항법시스템(INS)에서 사용하는 센서인 자이로스코프와 가속도계는 3차원 공간에서 위치, 속도, 자세를 구하기 위해 최소한 3개씩 필요하다. 하지만 여분의 센서를 통해 5개 이상 센서가 사용되면 더욱 정확한 추정치를 구할 수 있으므로 항법 성능(Guidance, Navigation and Control, GN&C)을 향상시킬 수 있으며 고장 검출 및 분리(Fault Detection and Isolation, FDI) 기법 사용이 가능하여 INS의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 여분의 센서를 사용하는 경우 항법의 신뢰성을 향상시키기 위해 다양한 FDI기법이 연구되어 왔다 [2][5]-[8].

센서의 개수 뿐만 아니라 이의 적절한 배치는 INS의 항법 성능 및 신뢰성을 향상시키기 위한 중요한 요소이다. 따라서 INS에서 여분의 센서를 사용할 때 항법 성능과 FDI 성능이 관성 센서 개수와 배치에 따라 얼마나 영향을 있는지 고려해야 한다.

일반적인 FDI기법은 센서의 개수가 증가하면 패리티식 (parity equation)의 개수가 기하급수적으로 증가하나 본 논문에서는 i 번째 패리티 식이 i 번째 센서 고장을 감지하는 방법인 n parity equation 기법[1]을 이용하였다. 이 방법은 계산량이 감소하여 많은 센서를 사용하는 센서 배치의 FDI 성능을 고려하는데 적합하다.

본 논문에서는 항법 성능과 FDI 성능을 일반적인 관성 센서의 중첩 배치인 대칭, 원추, 직교 배치에 대해 고려하였고 각 배치 정의에 따라 다양한 센서 배치를 제안하였다. 제안된 센서 배치에 대해 항법 성능과 FDI 성능을 비교 분석하여

센서 개수와 배치가 항법 및 FDI 성능에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았으며, 또한 기준 좌표계 변화에 따른 항법 및 FDI 성능에 대해서도 알아보았다. 이 결과는 같은 개수의 센서로 향상된 성능을 발휘할 수 있는 센서 배치와 배치의 기준방향을 찾는 데 유용한 결과일 것이다.

II. 관성항법 시스템의 다양한 센서 배치

1. 센서배치 정의

본 논문에서는 센서배치의 대표적 세 가지 경우인 대칭, 원추, 직교 형태의 배치에 대해 TDOF(Two degree of freedom), SDOF(Single degree of freedom) 센서를 사용하여 항법 및 FDI 성능을 비교하였다.

1.1. 대칭 배치(Symmetric Configuration)

TDOF의 경우는 센서 회전축, SDOF은 센서간의 사이 각이 같은 경우를 대칭 배치라 정의한다. 따라서 (1)이 만족된다.

$$|h_i \cdot h_j| = K, i \neq j \quad (1)$$

여기서 K 는 상수

이렇게 센서나 센서축 사이의 각을 동일하게 배치하는 방법에는 정다면체에 센서나 센서 회전축을 배치하는 방법이 있다. 예를들면 정8면체의 경우 $K = 1/3$ 이고 정12면체의 경우 $K = 1/\sqrt{5}$ 이다.

SDOF 센서를 이용한 정12면체의 면에 배치하는 센서 배치형태는 정12면체 중 어떤 면을 선택하느냐에 따라 센서 배치 형태가 달라진다. 본 논문에서는 그림 8, 9와 같이 서로 다른 두 가지 형태를 제시하였으며 이들은 원추 배치의 변형된 형태로 표현될 수 있다. 여기서 그림 7[2]과 그림 9의 센서 배치는 원추 배치를 두 개 겹쳐놓은 배치이지만 기준 좌표가 다른 형태라고 볼 수 있다.

논문접수 : 2002. 12. 29., 채택확정 : 2002. 5. 13.

김정용, 양철관, 심덕선 : 중앙대학교 전자전기공학부

(coupler1@netian.com / ckyang@jupiter.cie.cau.ac.kr / dshim@cau.ac.kr)

※ 본 연구는 국방과학연구소 및 서울대학교 자동제어특화연구센터의 연구비 지원에 의한 연구 결과입니다.

1.2. 원추 배치(Cone Configuration)

TDOF이나 SDOF의 모든 센서가 한 축을 중심으로 서로 동일한 각을 유지하며 둘러싸고, 또한 모든 센서와 그 중심축 사이의 각이 모두 같을 때를 원추 배치라 정의한다. 이 때 센서 배치 형태는 원추형으로써 한 축을 감싸고 있는 형태이다. 원추 배치는 다음의 식을 만족한다.

$$|h_z \cdot h_i| = G, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

여기서

h_z : 중심 축의 단위벡터

h_i : 각 센서들의 단위 방향벡터

G : 상수

또한, 인접한 센서들간의 사이각 θ 는 다음과 같다.

$$\theta = 2 \sin^{-1}(\cos |\theta| \cdot \sin(\pi/n)) \quad (3)$$

여기서

$$\theta = |\pi/2 - \cos^{-1} |G| | \quad (4)$$

본 논문에서는 SDOF 센서를 사용한 일반적인 원추 배치와 [3]에서 제시한 센서 배치의 성능을 비교하기 위해 변형된 원추 배치를 제시하였다.

1.3. 직교 배치(Orthogonal Configuration)

직교 배치는 TDOF의 경우 센서 회전축이 서로 수직인 배치이고, SDOF의 경우 각각의 센서들이 서로 수직인 배치이다. 본 논문에서는 TDOF의 경우만을 고려하였다. SDOF의 경우 직교 배치는 TDOF의 직교 배치와 동일한 배치이기 때문에 항법 성능과 FDI 성능이 같다. 따라서 SDOF 직교 배치는 생략하였다.

2. 다양한 센서 배치

2.1. TDOF 4개를 사용한 센서 배치

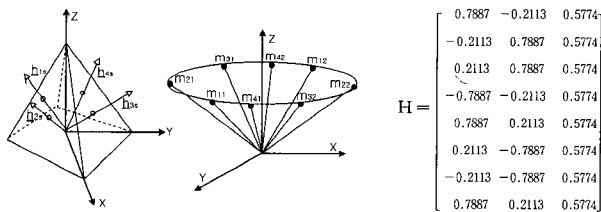


그림 1. 4 TDOF 대칭 배치.
Fig. 1. 4 TDOF Symmetric Configuration.

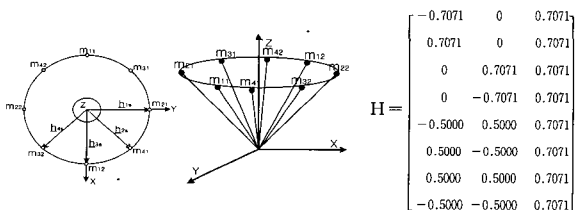


그림 2. 4 TDOF 원추 배치.
Fig. 2. 4 TDOF Cone Configuration.

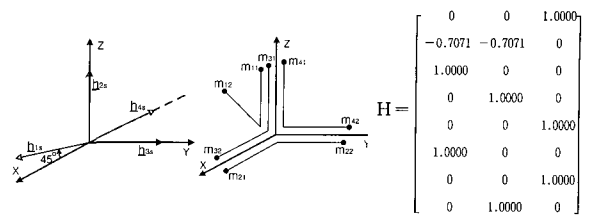


그림 3. 4 TDOF 직교 배치.
Fig. 3. 4 TDOF Orthogonal Configuration.

2.2. TDOF 3개를 사용한 센서 배치

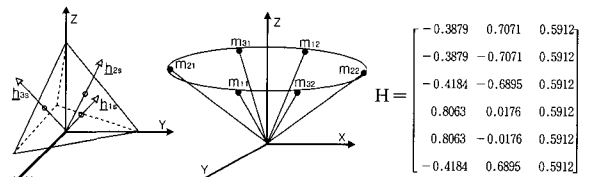


그림 4. 3 TDOF 대칭 배치.
Fig. 4. 3 TDOF Symmetric Configuration.

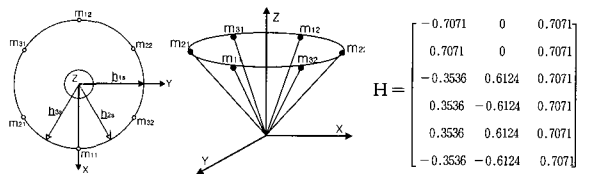


그림 5. 3 TDOF 원추 배치.
Fig. 5. 3 TDOF Cone Configuration.

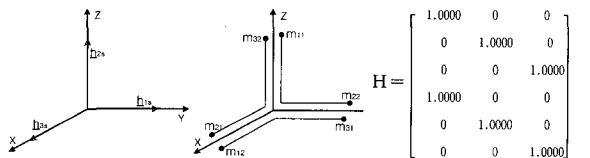


그림 6. 3 TDOF 직교 배치.
Fig. 6. 3 TDOF Orthogonal Configuration.

2.3. SDOF 6개를 사용한 symmetric형 센서 배치

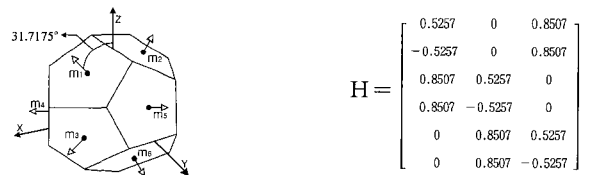


그림 7. 6 SDOF 대칭 배치 ①.
Fig. 7. 6 SDOF Symmetric Configuration ①.

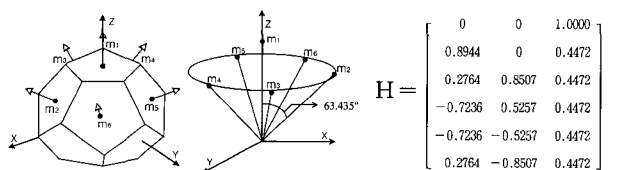


그림 8. 6 SDOF 대칭 배치 ②.
Fig. 8. 6 SDOF Symmetric Configuration ②.

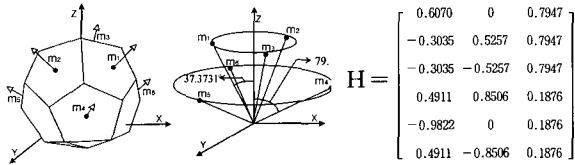


그림 9. 6 SDOF 대칭 배치 ③.
Fig. 9. 6 SDOF Symmetric Configuration ③.

2.4. SDOF 6개를 사용한 cone형 센서 배치

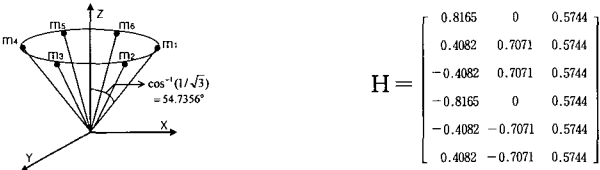


그림 10. 6 SDOF 원추 배치 ①.
Fig. 10. 6 SDOF Cone Configuration ①.

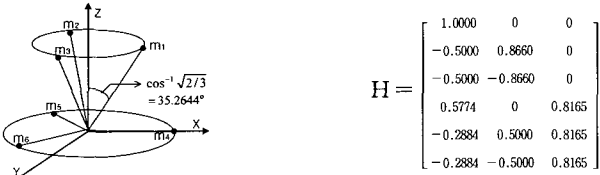


그림 11. 6 SDOF 원추 배치 ②.
Fig. 11. 6 SDOF Cone Configuration ②.

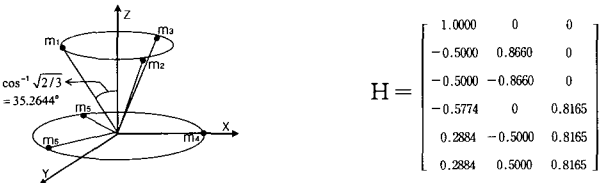


그림 12. 6 SDOF 원추 배치 ③.
Fig. 12. 6 SDOF Cone Configuration ③.

III. 센서 배치에 따른 항법 성능 분석

1. 항법 성능

다양한 센서배치에 대한 항법 성능을 비교하기 위해서는 모든 배치에 적용할 수 있는 성능 측정 기준이 필요하다. 본 논문에서는 항법 성능 측정기준을 각속도 추정치의 추정오차 공분산의 크기로 정한다. 센서 n개의 측정치는 다음과 같다.

$$m = Hx + \epsilon \tag{5}$$

여기서

m : n개의 센서 측정치 ($m \in R^n$)

H : 각 센서축의 방향벡터 ($H \in R^{n \times 3}$)

x : 입력 각속도 ($x \in R^3$)

ϵ : 센서의 측정 잡음 ($\epsilon \in R^n$)

ϵ 의 통계치는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$E(\epsilon) = 0; E(\epsilon\epsilon^T) = \sigma^2 I_n \tag{6}$$

x 의 최소자승 추정값 \hat{x} 은 다음과 같다.

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T m \tag{7}$$

x 의 최소자승 추정오차 공분산 C 는 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$C = E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T] = (H^T H)^{-1} \sigma^2 \tag{8}$$

여기서 C 는 H, σ 의 함수로써 센서배치와 개수만을 고려한 항법 성능을 비교하기 위해서는 변수 σ^2 을 정규화를 통해 배제하고 센서 축 방향벡터로 구성된 H 만을 고려할 필요가 있다.

따라서 C 를 일반화한 식은 다음과 같다.

$$C = (H^T H)^{-1} \tag{9}$$

만약 ϵ 이 영평균 가우시안(zero-mean Gaussian)이라면 확률 밀도 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_\epsilon(\eta) = (2\pi)^{-n/2} |C|^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2} \eta^T C^{-1} \eta\right), \eta = x - \hat{x} \tag{10}$$

η 에 대하여 (11)과 같이 정의하면

$$\eta^T C^{-1} \eta = k, k \geq 0 \tag{11}$$

(11)은 일정한 확률밀도 값을 갖는 타원체로 나타낼 수 있으며 이 타원체는 좌표 변환을 통해 반지름이 $k^{1/2}$ 인 구로 나타낼 수 있다. 구의 부피를 나타내면 다음과 같다.

$$V = 4/3 k^{3/2} \pi \sqrt{|C|} \tag{12}$$

위와 같이 $\sqrt{|C|}$ 에 비례하는 부피는 오차의 크기를 나타내므로 그 부피가 작을수록 추정오차는 작아진다. 따라서 $\sqrt{|C|}$ 를 센서 배치 및 개수에 따른 항법 성능 기준으로 삼을 수 있다. 이를 항법 성능을 위한 Figure of merit[1](FOM)라 정의하고 본 논문의 항법 성능 기준으로 삼는다.

$$\text{Figure of merit : } F = \sqrt{|(H^T H)^{-1}|} \tag{13}$$

2. 기준 좌표계의 좌표 변환에 따른 항법성능

만약 GN&C FOM을 이용해 최적 센서배치를 찾아서 동체에 센서를 탑재할 때 그 배치와 기준 좌표계의 관계에 의해 항법 성능이 달라진다면, 센서 배치의 기준방향을 찾는 것은 중요한 사항이 될 것이다.

본 논문에서는 센서 배치 정보를 갖는 H 를 임의의 각으로 기울인 H^* 의 정보를 이용해 항법 성능이 센서 배치의 좌표 변환에 따라 어떤 관계를 갖는지 알아보았다.

정리 1 : 여분 센서(redundant sensors)를 사용한 관성항법 시스템에서 센서의 수와 배치가 결정되면 동체에 어떻게 부착되던지 항법 성능은 동일하다.

증명 : 센서 배치 정보를 갖는 H를 임의의 각으로 기울인 H*은 (14)와 같은 관계를 갖는다.

$$H^* = HR \tag{14}$$

여기서 R은 임의의 회전 행렬로 (15)과 같이 표현될 수 있고 ϕ, θ, ψ 는 오일러 각이다.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta \cos \psi - \sin \phi \sin \psi & -\sin \phi \cos \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \theta \cos \psi \\ \sin \phi \cos \theta \cos \psi + \cos \phi \sin \psi & -\sin \phi \sin \theta \cos \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \theta \sin \psi \\ -\cos \phi \sin \theta & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{15}$$

여기서

ϕ : 기준 좌표계 z축과 좌표 변환된 좌표계 z축과의 사이각

θ : 기준 좌표계 y축과 좌표 변환된 좌표계 y축과의 사이각

ψ : 기준 좌표계의 z축을 기준으로 회전한 각

(15)의 R는 orthogormal 행렬이며, (16)과 같은 특성을 갖는다.

$$RR^T = I, R^T = R^{-1}, \det\{R\} = \det\{R^T\} = 1 \tag{16}$$

(17)에 의해 $F^* = F$ 임을 보임으로써 좌표 변환 전·후의 항법 성능이 동일함을 증명하였다.

$$\begin{aligned} F^* &= \sqrt{|(H^{*T}H^*)^{-1}|} = \sqrt{|((HR)^T HR)^{-1}|} \\ &= \sqrt{|(R^T H^T H R)^{-1}|} \\ &= \sqrt{|R^T| \cdot |(H^T H)^{-1}| \cdot |R|} \\ &= \sqrt{|(H^T H)^{-1}|} = F \end{aligned} \tag{17}$$

센서 배치의 좌표 변환 후의 FOM 값은 센서 배치를 좌표 변환하기 전의 FOM 값과 동일하다. 따라서 주어진 센서 배치를 어느 방향을 향해 놓아도 항법 성능에는 영향이 없다.

IV. 센서 배치에 따른 고장 검출 및 분리 성능 분석

1. 고장 검출 및 분리 성능

다양한 고장 검출 및 분리 기법 중 본 논문에서 사용한 FDI기법은 하나의 패러티 식이 하나의 센서 고장을 감지하도록 패러티 식을 만드는 방법이다[1]. 따라서 이 방법은 총 n개의 패러티 식을 만든다.

하나의 패러티 식은 n개의 센서 출력의 선형 조합일 때, 패러티 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = v_n^T m \tag{18}$$

여기서

$$v_n^T = (\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n) \tag{19}$$

p가 x에 대해 독립이기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$H^T v_n = 0 \tag{20}$$

n개의 패러티 식에서 i번째 패러티 식은 i번째 센서의 고장 여부를 감지하고 있다. 예를들어, 첫 번째 센서의 고장 여부를 감지하는 패러티 식은 다음과 같다.

$$p_1 = v_{1n}^T m \tag{21}$$

여기서

$$v_{1n}^T = (\nu_{11}, \nu_{12}, \dots, \nu_{1n}) \tag{22}$$

$$\nu_{11} = 1, \min_{\{\nu_{1k}, \dots, \nu_{1n}\}} \sum_{k=2}^n \nu_{1k}^2 \tag{23}$$

만약에 (22)의 벡터 값이 (23)을 만족하면 측정치 m_1 에는 민감하게 작용하고 다른 측정치에는 민감하지 않은 p_1 을 구할 수 있다.

(23)에 의해 한정된 조건의 패러티 식 계수 값을 (18)에 대입하면 다음과 같은 식이 만족된다.

$$H^T v_{1n} = 0 \tag{24}$$

$$H_{n-1}^T v_{1(n-1)} + h_1 = 0 \tag{25}$$

여기서 $v_{1(n-1)}$ 벡터는 v_{1n} 벡터에서 ν_{11} 원소가 제외된 벡터를 뜻한다.

(23)과 (25)의 조건을 만족하는 $v_{1(n-1)}$ 을 구하기 위하여 Lagrange method를 이용한 Lagrange multiplier식을 (26)과 같이 세울 수 있다.

$$L = \sum_{k=2}^n \nu_{1k}^2 + \eta^T (H_{n-1}^T v_{1(n-1)} + h_1) \tag{26}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \eta} = 0 \Rightarrow H_{n-1}^T v_{1(n-1)} + h_1 = 0 \tag{27}$$

$$\frac{\partial L}{\partial v_{1(n-1)}} = 0 \Rightarrow 2v_{1(n-1)} + H_{n-1} \eta = 0 \tag{28}$$

(27)과 (28)은 (29)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} 2I_{(n-1)} & H_{n-1} \\ H_{n-1}^T & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{1(n-1)} \\ \eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0_{n-1} \\ -h_1 \end{pmatrix} \tag{29}$$

위 식에서 $v_{1(n-1)}$ 은 (30)과 같이 구할 수 있다.

$$v_{1(n-1)} = -H_{n-1}(H_{n-1}^T H_{n-1})^{-1} h_1 \quad (30)$$

여기서

$$v_{1(n-1)}^T = (\nu_{12}, \nu_{13}, \dots, \nu_{1n}) \quad (31)$$

$$H_{n-1}^T = (h_2, h_3, \dots, h_n) \quad (32)$$

$\nu_{11} = 1$ 과 (30)에 의해 (21)은 다음과 같이 표현된다.

$$p_1 = m_1 - h_1^T (H_{n-1}^T H_{n-1})^{-1} H_{n-1}^T m_{n-1} \quad (33)$$

여기서

$$m_{n-1}^T = (m_2, m_3, \dots, m_n) \quad (34)$$

따라서 (33)은 (34)로 표현할 수 있다.

$$p_1 = m_1 - \hat{m}_1 \quad (35)$$

여기서

$$\hat{m}_1 = h_1^T (H_{n-1}^T H_{n-1})^{-1} H_{n-1}^T m_{n-1} \quad (36)$$

\hat{m}_1 은 측정값 m_1 을 제외한 나머지 측정 값을 이용해서 m_1 을 추정한 값이다. 따라서 (35)는 측정값 m_1 에 대해 민감하게 작용하는 패러티 식이다. 위와 같은 방법으로 나머지 $n-1$ 개의 패러티 식을 구하면 특정한 센서 배치에 대해서 n 개의 패러티 식을 만들 수 있다.

다음으로 센서가 고장일 경우와 그렇지 않을 경우의 패러티 식의 통계치는 다음과 같다.

- 고장이 없을 때

$$E(p_i) = 0; \sigma_{p_i}^2 = v_{in}^T v_{in} \sigma^2 \quad (37)$$

- 고장이 있을 때

$$E(p_i) = \nu_{ij} b_j; \sigma_{p_i}^2 = v_{in}^T v_{in} \sigma^2 \quad (38)$$

(37)과 (38)을 이용하면 (39)을 구할 수 있는데 이는 고장이 있는 경우와 없는 경우의 오차거리를 의미한다.

$$J_{ij} = (v_{in}^T v_{in})^{-1} \nu_{ij}^2 \quad (39)$$

(39)에서 b_j 를 고려하지 않은 이유는 고장 검출하는데 센서의 배치만을 고려하기 위해서 이다. 각각의 패러티 식에

대해서 (39)와 같은 식을 구하면 (40)과 같은 행렬식을 구할 수 있다.

$$J_i^T = (J_{i1}, J_{i2}, \dots, J_{in}) \quad (40)$$

여기서 각각의 패러티 식에서 가중치를 둔 센서는 오차거리도 크게 나타나므로 하나의 패러티 식 중 가중치를 둔 센서에서 측정된 오차거리가 가장 큰 값과 가중치를 두지 않은 나머지 $n-1$ 개의 센서에서 측정된 오차거리 중에서 가장 크게 나온 값의 반영된 비를 구하면 가중치를 둔 센서가 지금 해당되는 배치에서 얼마나 크게 반영되는지 알 수 있다. 따라서 (41)과 같은 값을 정의하고 이 값을 FDI의 Figure of merit(FOM)이라 정의한다[1].

$$F' = J_{ii} / \max J_{ij}, i \neq j \quad (41)$$

이러한 FOM이 의미하는 것은 i 번째 패러티 식은 i 번째 센서의 고장 진단을 판단하는 것으로써 하나의 FOM을 가지며 그 가중치를 둔 센서가 얼마나 크게 반영되는가를 보는 것이다. 하지만 센서 전체 배치에 따른 FDI성능을 알기 위해선 모든 패러티 식의 FOM 값을 비교해야 한다. 이 FOM 값이 크면 클수록 고장 센서의 감지된 값이 크게 나타난다는 의미로 FDI성능이 뛰어난 것을 의미한다. 따라서 모든 FOM을 비교하여 가장 FOM가 낮은 값을 전체 센서 배치의 FDI성능을 나타내는 값으로 봐야한다. 즉, 센서 중에서 FDI 성능이 가장 안 좋은 것으로 전체 센서배치의 성능을 나타낸다는 의미다.

$$\text{Figure of merit : } F = \min [J_{ii} / \max J_{ij}], i \neq j \quad (42)$$

2. 기준 좌표계의 좌표 변환에 따른 고장 검출 및 분리 성능
본 논문에서는 항법 성능과 마찬가지로 FDI 성능이 센서 배치의 좌표 변환에 따라 어떤 관계를 갖는지 알아보았다.

정리 2 : 여분 센서(redundant sensors)를 사용한 관성항법 시스템에서 센서의 수와 배치가 결정되면 동체에 어떻게 부착되든지 FDI 성능은 동일하다.

증명 : (42)에 의하면 FDI성능은 (40)의 J행렬에 의해 정해진다. 또한 (39)에 의하면 J행렬은 ν_{ij} 값에 의해 정해짐을 알 수 있다. 따라서 ν_{ij} 으로 이루어진 v_{in} 행렬을 살펴봄으로써 센서 배치 좌표 변환 시 FDI 성능을 알아 볼 수 있다. 하지만 $\nu_{ii} = 1$ 으로 고정되어 있으므로 $v_{i(n-i)}$ 만을 고려하면 된다. 본 증명에서는 n 개의 패러티 식 중에서 첫 번째 패러티 식에 대해서만 알아보았다.

(30)에서 ν_{11} 을 제외한 나머지 패러티 식 계수 값을 다음과 같이 정의하였다.

$$v_{1(n-1)} = -H_{n-1}(H_{n-1}^T H_{n-1})^{-1} h_1 \quad (43)$$

센서 배치를 좌표 변환 시킨 후의 패러티 식 계수 값은 (44)와 같이 변형된다.

$$\begin{aligned}
 v_{1(n-1)}^* &= -(H_{n-1}R)\{(H_{n-1}R)^T(H_{n-1}R)\}^{-1}(R^Th_1) \\
 &= -(H_{n-1}R)(R^TH_{n-1}^TH_{n-1}R)^{-1}(R^Th_1) \\
 &= -(H_{n-1}R)(H_{n-1}^TH_{n-1}R)^{-1}(R^T)^{-1}(R^Th_1) \quad (44) \\
 &= -(H_{n-1}R)(R^{-1})(H_{n-1}^TH_{n-1})^{-1}(R^T)^{-1}(R^Th_1) \\
 &= -H_{n-1}(RR^{-1})(H_{n-1}^TH_{n-1})^{-1}(RR^T)h_1 \\
 &= -H_{n-1}(H_{n-1}^TH_{n-1})^{-1}h_1 \\
 &= v_{1(n-1)}
 \end{aligned}$$

(44)를 보면 센서 배치 좌표 변환 후의 패리티 식 계수가 좌표 변환 전과 동일함을 알 수 있다. 같은 방법으로 센서 배치 좌표 변환 전·후에 관한 나머지 패리티 식의 계수를 증명할 수 있다. 이와같이 센서 배치 좌표 변환 전·후의 패리티 식의 계수가 같으면 (40) J행렬이 같으므로 FDI 성능을 나타내는 FOM 값이 같다.

즉, 주어진 센서 배치를 어느 방향을 향해 놓아도 FDI 성능에는 영향이 없다.

V. 시뮬레이션 및 성능비교

1. 항법 및 FDI 성능 비교분석

본 논문에서는 각각의 센서 배치에 대하여 GN&C 및 FDI의 FOM 값을 비교 분석하였다. 비교 분석 결과는 다음과 같다.

표 1은 FDI 성능이 가장 뛰어난 6-SDOF 대칭 배치의 패리티 식의 계수와 distance measure 그리고 FDI FOM를 나타낸 것이다. 이러한 센서 배치에서는 모든 패리티 식이 동일한 FOM 값을 갖는다. 따라서 모든 패리티 식 중의 최소 FOM은 5.0000이 된다. 이는 센서 고장 발생 시 고장신호 크기가 정상 센서 방향에 비해 고장 센서 방향에 5배 크게 나타나게 된다는 의미이다.

지금까지 다른 배치에 대한 GN&C 및 FDI FOM은 그림 13, 14와 표 2에 명시하였다.

그림 13에 의하면 TDOF 4개(센서8개)를 사용한 배치가 다른 배치보다 항법 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 나머지 배치(센서6개)에서는 항법 성능이 거의 비슷함을 알 수

표 1. 6 SDOF 대칭 배치의 FDI FOM.

Table 1. 6 SDOF symmetric configuration FDI FOM.

parity	Parity Equation Coefficients for Measurements						
	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₆	
P ₁	1.0000	-0.4472	-0.4472	-0.4472	-0.4472	0.4472	
P ₂	-0.4472	1.0000	0.4472	0.4472	-0.4472	0.4472	
P ₃	-0.4472	0.4472	1.0000	-0.4472	-0.4472	-0.4472	
P ₄	-0.4472	0.4472	-0.4472	1.0000	0.4472	0.4472	
P ₅	-0.4472	-0.4472	-0.4472	0.4472	1.0000	-0.4472	
P ₆	0.4472	0.4472	-0.4472	0.4472	-0.4472	1.0000	
parity equation	figure of merit	Distance Measures J _i					
		J ₁	J ₂	J ₃	J ₄	J ₅	J ₆
P ₁	5.0000	0.5000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	
P ₂	5.0000	0.1000	0.5000	0.1000	0.1000	0.1000	
P ₃	5.0000	0.1000	0.1000	0.5000	0.1000	0.1000	
P ₄	5.0000	0.1000	0.1000	0.1000	0.5000	0.1000	
P ₅	5.0000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.5000	
P ₆	5.0000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.5000	

있다. 이 결과는 항법 성능이 센서의 배치보다 센서의 개수에 더 민감하다는 것을 나타낸다.

그림 14에 의하면 FDI 성능은 센서 6개를 사용한 것이 센서 8개 사용한 것 보다 더 성능이 좋아질 수 있음을 보여준다. FDI 성능은 센서의 개수에 따라 영향이 있지만 그 보다 센서 배치에 더 민감하게 영향이 나타남을 알 수 있다.

TDOF 4개를 사용한 센서 배치 중에서 원추 배치는 4 TDOF 대칭, 직교 배치보다 항법 성능은 다소 떨어지나 FDI 성능은 나머지 두 배치보다 좋음을 알 수 있다.

TDOF 3개를 사용한 경우 표 2의 6번 배치(그림 6 참조)처럼 직교 배치를 하면 FDI FOM 값이 1이므로 본 논문에서 사

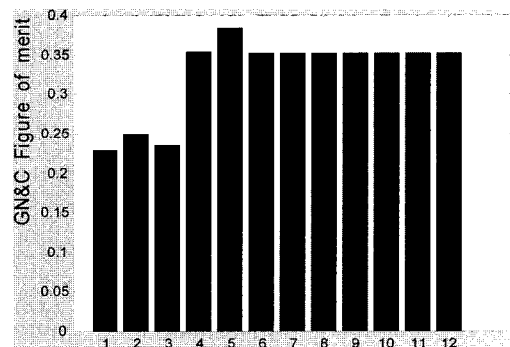


그림 13. 항법 성능에 관한 FOM.

Fig. 13. GN&C FOM.

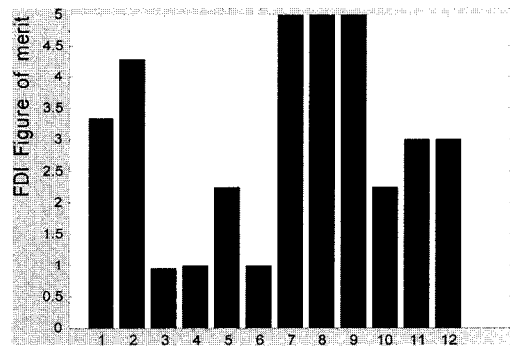


그림 14. FDI 성능에 관한 FOM.

Fig. 14. FDI FOM.

표 2. 다양한 센서 배치에 따른 항법 및 FDI 성능.

Table 2. The navigation and fault detection performance according to various sensor configurations.

그림번호	센서 배치	GN & C Figure of merit	FDI Figure of merit
1	4 TDOF 대칭 배치	0.2296	3.3494
2	4 TDOF 원추 배치	0.2500	4.2893
3	4 TDOF 직교 배치	0.2357	1.9600
4	3 TDOF 대칭 배치	0.3539	1.0013
5	3 TDOF 원추 배치	0.3849	2.2500
6	3 TDOF 직교 배치	0.3536	1.0000
7	6 SDOF 대칭 배치①	0.3536	5.0000
8	6 SDOF 대칭 배치②	0.3536	5.0000
9	6 SDOF 대칭 배치③	0.3536	5.0000
10	6 SDOF 원추 배치①	0.3536	2.2500
11	6 SDOF 원추 배치②	0.3536	3.0000
12	6 SDOF 원추 배치③	0.3536	3.0000

용된 FDI기법으로는 관성 센서의 고장 검출 및 분리를 할 수 없다.

표 2의 10번 배치(그림 10 참조)인 6 SDOF 원추 배치 ①의 경우 중심 축과 센서 사이의 각을 변화시키며 시뮬레이션한 결과 항법 성능에 영향을 미치나 FDI 성능에는 영향이 없음을 알 수 있었다. 하지만 원추 배치가 두 개 이상 중첩되면 중심 축과 센서 사이의 각이 FDI 성능에도 영향이 있음을 알 수 있었다.

표 2의 5번 배치(그림 5 참조)인 3 TDOF 원추 배치의 경우는 표 2의 10번 배치(그림 10 참조)인 6 SDOF 원추 배치 ①과 같은 FDI 성능을 갖으나 항법 성능은 조금 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 TDOF는 센서 사이 각이 고정되어있어 중심 축과의 최적각을 만들 수 없기 때문이다.

센서 6개를 사용할 경우 정 12면체 이웃한 면에 센서를 배치하는 6 SDOF 대칭 배치(그림 7, 8, 9 참조)가 항법 성능을 유지하면서 뛰어난 FDI 성능을 갖는 방법이라는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 6 SDOF 대칭 배치는 정12면체 어느 면에 배치를 해도 항법 성능 및 FDI 성능은 변화 없었다.

2. FDI 시뮬레이션

본 논문에서는 FDI 성능 비교 방법으로 Optimal Parity Test(OPT) 기법[7]을 사용하였다. 시뮬레이션은 SDOF 센서 6개를 사용한 6 SDOF 대칭 배치 ③(그림 9 참조), 6 SDOF 원추 배치 ①(그림 10 참조), 6 SDOF 원추 배치 ②(그림 11 참조) 배치를 대상으로 하였다. 이 세가지 배치들은 관성 센서 개수와 GN&C FOM 값이 모두 동일하지만 FDI FOM 값이 모두 다른 값을 갖는 특징이 있다. 따라서 이 세가지 배치들은 FDI 성능만을 고려하여 비교하기 적당한 배치들이다. 제시된 세가지 배치들은 표 2의 배치별 FDI FOM 값을 통한 FDI 성능결과와 시뮬레이션을 통한 FDI 성능결과를 비교하기 적당하다.

세가지 배치에 대해 동일한 시뮬레이션 조건으로 false alarm 확률은 0.01, 관성 센서 noise의 분산 값은 1로 하였고, 각각의 F/N(Fault/Noise) ratio에 대해 10,000번의 시뮬레이션을 하였다. 그리고 하나의 관성 센서에서 고장이 발생한 경우만 다루었다.

그림 15는 고장이 발생하였을 때 고장 관성 센서의 correct isolation 확률을 나타내고 그림 16은 고장이 발생하였을 때 각

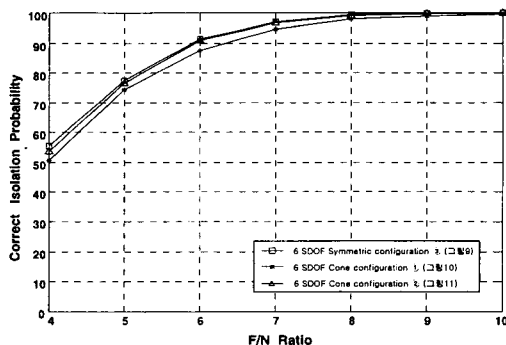


그림 15. Optimal parity test 기법을 이용한 6 SDOF 센서 배치들의 고장 관성 센서 분리 확률.

Fig. 15. Correct isolation probability according to 6 SDOF sensor configurations using the OPT approach.

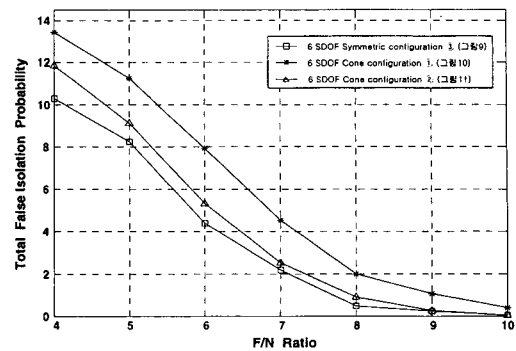


그림 16. Optimal parity test 기법을 이용한 6 SDOF 센서 배치들의 정상 관성 센서 분리 확률.

Fig. 16. False isolation probability according to 6 SDOF sensor configurations using the OPT approach.

각의 정상 관성 센서들의 false isolation 확률 합을 나타낸다. 그림 15, 16을 통해 F/N ratio가 클수록 고장 관성 센서의 correct isolation 확률이 증가 하고, 정상 관성 센서의 false isolation 확률이 낮아짐을 알 수 있다.

그림 15에서 6 SDOF 대칭 배치 ③의 correct isolation 확률은 다른 배치의 correct isolation 확률에 비해 높음을 알 수 있다. 하지만 각 배치의 FDI 성능은 correct isolation 확률뿐만 아니라 false isolation 확률도 함께 고려해야 한다. 그림 16은 각 배치별 5개 정상 관성 센서의 total false isolation 확률을 나타낸다. Total false isolation 확률을 보면 6 SDOF 대칭 배치 ③이 가장 낮은 확률을 갖는 배치임을 알 수 있다.

Correct isolation 확률이 높고 false isolation 확률이 낮은 배치가 FDI에 유리한 배치이므로 제시된 세가지 배치 중 6 SDOF 대칭 배치 ③이 FDI에 가장 유리한 배치임을 알 수 있다. 또한 6 SDOF 대칭 배치 ③, 원추 배치 ②, 원추 배치 ① 순으로 FDI 성능이 좋은 배치임을 확인할 수 있다. 이 결과는 표 2의 FDI FOM 값을 통한 FDI 성능비교 결과와 동일하다.

VI. 결론

본 논문에서는 다양한 센서 배치 및 개수에 따른 항법 및 FDI 성능을 비교하기 위해서 각각의 Figure of merit를 구하였다. 그 결과 항법 성능은 센서 배치보다는 센서 개수에 더 민감하게 작용하나 FDI 성능은 센서의 개수보다는 센서 배치에 크게 민감함을 알 수 있었다. 또한 센서 배치의 기준 좌표계의 변화는 항법 및 FDI 성능에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 그리고 동일 개수의 센서의 경우 공간상에 일정하게 배치하는 정다면체에 배치하는 방법이 다른 배치와 비교해 볼 때 비슷한 항법 성능을 지니면서 가장 뛰어난 FDI 성능을 지님을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] J. V. Harrison and E. G. Gai, "Evaluating sensor orientations for navigation performance and failure detection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-13, no. 6, pp. 631-643, November, 1977.

[2] J. P. Gilmore and R. A. Mckern, "A redundant strapdown inertial reference unit(SIRU)," *Journal of Spacecraft*, vol.

9, no. 1, pp. 39-47, January, 1972.

[3] A. J. Pejsa, "Optimum skewed redundant inertial navigators," *AIAA Journal*, vol. 12, no. 7, pp. 899-902, July, 1974.

[4] J. C. Wilcox, "Competitive evaluation of failure detection algorithms for strapdown redundant inertial instruments," *Journal of Spacecraft*, vol. 11, no. 7, pp.525-530, July, 1974.

[5] J. E. Poter and J. C. Deckert, "Minimax failure detection and identification in redundant gyro and accelerometer systems," *Journal of Spacecraft*, vol. 10, no. 4, pp. 236-243, April, 1973.

[6] K. C. Daly, E. Gai, and J. V. Harrison, "Generalized likelihood test for FDI in redundant sensor configurations," *AIAA Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 9-17, February, 1979.

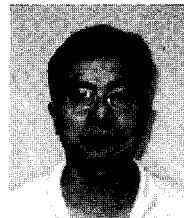
[7] Hong Jin and H. Y. Zhang, "Optimal parity vector sensitive to designated sensor fault," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 35 pp.1122-1128, October, 1999.

[8] T. T. Chien and M. B. Adams, "A sequential failure detection technique and its application," *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 750-757, October, 1976.



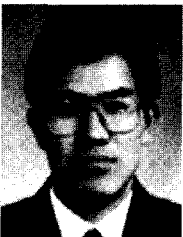
김정용

1977년 4월 13일 생, 2001년 중앙대 전자전기공학부 졸업(학사). 2001년~현재 중앙대 전자전기공학부 석사과정, 관심 분야는 관성항법시스템, 고장 검출 및 분리 기법 등.



양철관

1972년 5월 15일 생, 1996년 중앙대 제어계측학과 졸업(학사). 1998년 동대학원 졸업(석사). 1998년~현재 중앙대 전자전기공학부 박사과정, 관심 분야는 관성항법시스템, GPS, 건실 필터링, 고장 검출 및 분리 기법 등.



심덕선

1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 1986년 동대학원 졸업(공학석사), 1993년 University of Michigan 항공우주공학과 졸업(공학박사), 1994년 1월~1995년 1월 University of Michigan 전기 및 컴퓨터 공학과 Post-doc, 2001년 7월~2002년 7월 Pennsylvania State University 전기공학과 교환교수, 1995년 3월~현재, 중앙대학교 전자전기공학부 조교수, 부교수, 관심분야는 건실 제어, 관성항법 시스템, GPS, 고장 검출 및 분리 등.

터 공학과 Post-doc, 2001년 7월~2002년 7월 Pennsylvania State University 전기공학과 교환교수, 1995년 3월~현재, 중앙대학교 전자전기공학부 조교수, 부교수, 관심분야는 건실 제어, 관성항법 시스템, GPS, 고장 검출 및 분리 등.