

# 레버암 효과와 고장 감지 및 배제 성능을 고려한 여분의 3축 MEMS IMU의 평면 배치 기법

## Optimal In-Plane Configuration of 3-axis MEMS IMUs Considering Fault Detection and Isolation Performance and Lever Arm Effect

김 응 주\* · 김 용 훈\* · 최 민 준\* · 송 진 우\*  
(Eung Ju Kim · Yong Hun Kim · Min Jun Choi · Jin Woo Song)

**Abstract** - The configuration of redundant inertial sensors are very important when considering navigation performance and fault detection and isolation (FDI) performance. By constructing a redundant sensor system using multiple inertial sensors, it is possible to improve the navigation performance and fault detection and isolation performance, which are highly related to the sensor configuration and allocation. In order to deploy multiple MEMS inertial measurement units effectively, a configuration and allocation methods considering navigation performance, fault detection and isolation performance, and lever arm effect in one plane are presented, and the performance is analyzed through simulation in this research. From the results, it is confirmed that the proposed configuration and allocation method can improve navigation, FDI, and lever arm effect rejection performances more effectively by more than 70%.

**Key Words** : Navigation performance, FDI performance, Lever arm effect, Redundant IMU, Optimal configuration

### 1. 서 론

관성센서 기술이 발전함에 따라, 저가의 관성센서가 널리 보급되기 시작하였고, 특히 MEMS 기술의 발전과 무인이동체의 발달로 인해 소형 저가 관성센서에 대한 관심과 수요가 급증하고 있다[1,2]. 또한 드론, 무인기, 자율주행자동차, 무인잠수정 등의 무인이동체 기술의 발달로 인해 무인이동체의 안정성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 이와 함께 로봇, 자동차, 드론 등의 무인화에 대한 요구가 높아지면서, 저가의 무인화 시스템에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다[3,4]. 이러한 서로 다른 두 가지의 요구를 만족시키기 위해, 센서의 소형화, 저가화에 따른 성능 저하 및 신뢰성 저하를 극복할 수 있는 중첩센서시스템(redundant sensor system)에 대한 연구가 민수부에서도 급속도로 진행되고 있다[5].

현재, 중첩센서시스템은 주로 군수분야, 항공 우주 분야에서 연구되던 분야이나, 무인화 기술의 발달과 센서 기술의 발달로 인해 다른 분야에서도 개발 및 수요가 증가하고 있다. 중첩센서시스템은 동일한 물리량을 측정하는 여러 개의 센서로 구성되어 있어 측정치의 정확도가 높아지는 장점이 있으며, 센서에서 고장

이 발생할 경우에도 여분의 센서를 이용하여 대처가 가능하다는 장점이 있다[6, 7].

현재, 시중에서 판매되는 관성센서를 이용하여 중첩센서시스템을 구성하는 방법에는 다수의 단축 관성센서를 이용하여 4개 이상의 가속도계, 자이로스코프를 가지는 여분의 관성측정장치(redundant inertial measurement unit, RIMU)를 구성하는 방법과 3개의 가속도계와 자이로스코프를 가지는 관성측정장치(inertial measurement unit, IMU)를 여러 개 사용하여 하나의 시스템으로 묶어 구성하는 방법이 있다.

특히 관성센서를 이용하여 구성된 중첩관성센서시스템의 성능을 향상시키는 방법에 관한 연구로는 배치의 기하학적 접근 방법에 대한 연구[5-10]와 센서 정보의 필터링 및 알고리즘을 통해 성능을 향상시키는 연구[11, 12] 등이 진행되었다. 배치 방법에 대한 연구는 중첩관성센서시스템을 구성할 때 최적 배치를 구하는 방법을 제시하는 것으로, 센서의 설계 및 제작 단계에서 항법 추정 성능과 고장 감지 및 배제(fault detection and isolation, FDI) 성능을 고려하는 방법이다. 필터링과 알고리즘을 통해 중첩관성센서시스템의 성능을 향상시키는 방법은 배치에 대한 고려 없이, 여러 센서가 제공하는 정보의 중요성을 판단하여 최종 해를 구하는 방법으로, 정보필터(information filter), 연합형 칼만필터, 고장 감지 및 배제 알고리즘 등을 사용하는 방법이 이에 해당한다. 이러한 방식은 센서 배치에 따라 항법 추정 성능과 고장 감지 및 배제 성능이 변화한다는 것은 고려하지 않는 방식이다.

† Corresponding Author : School of Intelligent Mechatronic Engineering, Sejong University, Korea.

E-mail: jwsong.sejong.ac.kr

\* Dept. of software convergence, Sejong University, Korea.

Received : August 21, 2018; Accepted : November 22, 2018

따라서 항법 추정 성능을 극대화하고 고장 감지 및 배제 성능을 높이기 위해, 중첩관성센서시스템의 설계 또는 제작 단계에서 일반적인 센서의 설계 시 고려되었던 것 이외에 추가적인 것들을 고려해야 한다. 여러 가지 고려사항들 중, 특히 추정 정확도 향상을 극대화하기 위한 최적 배치기법에 관한 연구와 센서의 고장 감지 및 배제 성능을 극대화하기 위한 연구[13-15], 레버암 효과를 최소화하기 위한 연구[6]들이 많이 진행되어 왔다.

기존의 중첩관성센서시스템 연구 내용들은 센서의 배치에 있어서 항법 성능과 레버암 효과만을 고려하거나 [6], 항법 성능과 고장 감지 및 배제 성능만을 고려한 경우가 대부분이었으며[5, 7] 센서 배치 각도에만 초점을 맞춰 많은 연구들이 진행되어 왔다[9, 10]. 특히 대부분의 중첩관성센서시스템에 대한 연구는 고성능 항법 시스템 구성을 목적으로 센서 배치를 고려하였기 때문에 일반적으로 저가형 센서인 3축 MEMS IMU를 배치 기법에 직접 적용하는 것은 매우 어렵다. 이러한 이유로 3축 MEMS IMU를 중첩하여 사용하는 경우 단순하게 동일한 모양으로 배치하는 경우가 대부분이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 여러 개의 직교 배치된 3축 MEMS IMU를 이용하여 항법 성능과 고장 감지 및 배제 성능을 극대화하며 레버암 효과를 최소화하는, 단일 평면에서의 중첩 센서 배치 방법을 제안하였다. 이를 위해 항법 성능의 검증과 고장 감지 및 배제 성능 최적화 조건을 동시에 만족시키며 레버암 효과를 최소화하는 조건을 2장, 3장과 4장에서 각각 제시하였으며, 5장에서 이러한 조건을 만족하는 평면 배치 예를 제시하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 확인하였다.

## 2. 여분의 3축 MEMS IMU로 구성된 중첩관성센서시스템 추정 모델링

여분의 3축 MEMS IMU를 이용하여 측정치 정확도를 판별하기 위해서는 여분의 3축 MEMS IMU의 측정 모델링이 필요하다. 3축 MEMS IMU는 3개의 단축 관성센서가 직교배치 되어 있는 형태이기 때문에 단축 관성센서의 측정 모델링으로부터 확장해서 전체 측정 모델링을 구할 수 있다.

다수의 단축 관성센서를 이용하는 경우, 여러 개의 센서 정보를 이용하여 한축 방향의 가속도와 각속도를 추정하게 된다. 이 경우 모든 센서의 측정치가 서로 상관관계가 없고 측정잡음이 동일한 분산을 갖는다고 가정하면 다음과 같은 식 (1)로 단축 관성센서의 측정 모델링을 나타낼 수 있다[6].

$$z_i(k) = \mathbf{h}_i \mathbf{x}(k) + \eta_i(k) \quad (1)$$

위 식 (1)은  $3n$ 개의 단축 관성센서를 중첩하는 경우  $i$ 번째 센서의 측정 모델링이며,  $\mathbf{x} \in R^{3 \times 1}$ 는 실제 측정할 가속도 혹은 각속도 벡터,  $z_i \in R^{1 \times 1}$ 는 단축 관성센서의 측정값,  $\eta_i \in R^{1 \times 1}$ 는 측정잡음,  $\mathbf{h}_i \in R^{1 \times 3}$ 는 단축 관성센서의 방향코사인벡터이다. ( $i = 1, 2, 3, \dots, 3n$ )

단축 관성센서의 측정 모델링 식 (1)을 3축 직교배치된 3축 MEMS IMU로 확장해서 측정값을 모델링할 경우,  $j$ 번째 3축

MEMS IMU의 측정 모델링을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{z}_j(k) = \mathbf{H}_j \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}_j(k) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_j &= [z_{3j+1} \ z_{3j+2} \ z_{3j+3}]^T \in R^{3 \times 1} \\ \mathbf{H}_j &= [\mathbf{h}_{3j+1} \ \mathbf{h}_{3j+2} \ \mathbf{h}_{3j+3}]^T \in R^{3 \times 3} \\ \mathbf{w}_j &= [\eta_{3j+1} \ \eta_{3j+2} \ \eta_{3j+3}]^T \in R^{3 \times 1} \end{aligned} \quad (3)$$

3축 MEMS IMU의 측정 모델링을 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며,  $\mathbf{x} \in R^{3 \times 1}$ 는 실제 측정할 가속도 혹은 각속도 벡터,  $\mathbf{z}_j \in R^{3 \times 1}$ 는  $j$ 번째 3축 MEMS IMU의 측정값 벡터,  $\mathbf{w}_j \in R^{3 \times 1}$ 는 측정잡음 벡터,  $\mathbf{H}_j \in R^{3 \times 3}$ 는 3축 MEMS IMU에 대한 방향코사인행렬이다. ( $j = 0, 1, \dots, n-1$ )

최종적으로 3축 MEMS IMU의 측정 모델링 식 (2)를 이용하여  $n$ 개의 3축 MEMS IMU를 가지는 중첩관성센서시스템에 대한 측정값을 모델링하면 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_R(k) = \mathbf{H}_R \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}_R(k) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_R &= [\mathbf{z}_1 \ \mathbf{z}_2 \ \dots \ \mathbf{z}_n]^T \in R^{3n \times 1} \\ \mathbf{H}_R &= [\mathbf{H}_1 \ \mathbf{H}_2 \ \dots \ \mathbf{H}_n]^T \in R^{3n \times 3} \\ \mathbf{w}_R &= [\mathbf{w}_1 \ \mathbf{w}_2 \ \dots \ \mathbf{w}_n]^T \in R^{3n \times 1} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4)에서,  $\mathbf{z}_R \in R^{3n \times 1}$ 은  $n$ 개의 중첩 IMU에 대한 측정 벡터,  $\mathbf{w}_R \in R^{3n \times 1}$ 은 측정잡음 벡터,  $\mathbf{H}_R \in R^{3n \times 3}$ 은  $n$ 개의 3축 MEMS IMU의 방향코사인행렬로 구성된 행렬이다.

## 3. 단축 관성센서로 구성된 중첩관성센서시스템

### 3.1 단축 관성센서로 구성된 중첩관성센서시스템의 항법 성능

일반적으로 항법 수행에 필요한 관성센서의 입력 값을 추정하기 위하여 주로 최소자승법, 칼만필터 등을 이용하게 된다. 중첩 관성센서시스템에서 추정 성능의 확보는 항법 성능을 결정하는 주요 요인이 될 수 있다. 결과적으로, 항법 성능은 센서 측정값의 추정 성능으로 표현할 수 있으며, 중첩관성센서시스템에서 추정 성능은 센서의 배치에 따라 달라진다. 이와 같은 센서 배치에 따른 성능지표를 FOM(Figure Of Merit)이라고 한다. 단축 관성센서를 이용하여 구성한 중첩관성센서시스템의 항법 성능을 나타내는  $FOM_{nav}$ 는 아래의 식 (6)과 같으며 성능지표 값이 작을수록 좋다고 알려져 있다 [6].

$$FOM_{nav} = trace((\mathbf{H}_R^T \mathbf{H}_R)^{-1}) \quad (6)$$

### 3.2 단축 관성센서로 구성된 중첩관성센서시스템의 고장 감지 및 배제 성능

고장 감지 및 배제 성능이란 어떠한 센서시스템에서 센서의 고장이 발생 했을 때, 센서에 대한 고장을 감지하고 배제하여 올바른 결과 값을 출력시키는 성능을 의미한다.

두 개 이상의 단축 관성센서가 동일한 축을 측정하게 될 경우

우, 그 측정값의 비교를 통하여 관성센서의 고장을 감지할 수 있다. 또한 세 개 이상의 단축 관성센서로 측정하게 될 경우 고장을 감지하게 될 뿐만 아니라 고장이 발생한 관성센서를 찾아낼 수 있으며, 해당 관성센서를 배제할 수 있다. 반면에 단축 관성센서들의 배치가 서로 직교하여 배치된 경우에는 관성센서의 고장을 감지할 수 없게 된다. 따라서 중첩관성센서시스템의 고장 감지 및 배제 성능은 센서의 배치각도에 의해 결정된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 패리티 공간을 이용한 고장 감지 및 배제 기법을 적용하였으며, 각 센서마다 패리티 식이 하나씩 주어진 형태를 사용하였다. 패리티 값을 이용한 방식의 경우, 고장이 발생하면 해당 패리티 벡터의 값이 커지게 되어 어떠한 센서에 고장이 발생하였는지 확인하는 것이 가능하다. 패리티 벡터는 자신을 기준으로 나머지 센서들 간의 고장감지감도로 이루어져 있는 벡터이며 일반적인 동작 상태와 고장이 발생했을 때의 패리티 값은 아래의 수식으로 표현 된다[8]. 즉 패리티 값의 평균이 큰 경우 고장이 발생했다는 것을 알 수 있다.

- 일반적인 상태

$$E(P_i) = E(v_i, m) = 0 \tag{7}$$

- k번째 센서에서 고장이 발생 했을 때

$$E(P_i) = E(v_i, m) = v_{i,k} f_k \tag{8}$$

일반적인 패리티를 이용한 방식은 직관적으로 파악하기 어려운 단점이 있으나, 식 (7, 8)과 같은 형태로 구성하여 이용하게 될 경우, 쉽게 센서의 고장을 판단할 수 있다. 또한 이러한 방법을 통해 유도된 고장 감지 및 배제 성능지표  $FOM_{FDD}$ 은 다음과 같다. 아래의  $FOM_{FDD}$  식 (9)는 중첩관성센서시스템에서 센서 간의 고장 감도가 가장 적은 값을 의미하며  $FOM_{FDD}$ 가 클수록 센서시스템의 가장 작은 고장 감도가 높아진다는 것을 의미하므로 좋은 고장 감지 및 배제 성능을 갖는다고 할 수 있다[8].

$$FOM_{FDD} = \min_p \left( \frac{1}{\max_q v_{pq}^2} \right) (p \neq q) \tag{9}$$

한편, 고장 감지 및 배제 성능지표 식 (8)의 p번째 관성센서와 q번째 관성센서의 패리티 벡터의 제곱값  $v_{pq}^2$ 을 p번째 관성센서와 q번째 관성센서 간의 각도  $\psi_{pq}$ 로 표현할 수 있으며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다[8].

$$v_{pq} = 1, v_{pq} = -\cos \psi_{pq} \left( \sum_{k=1, k \neq p}^{3n} \cos \psi_{pk} \right)^{-1} (q \neq p) \tag{10}$$

만약, p번째 관성센서의 방향코사인 벡터  $\mathbf{h}_p$ 와 q번째 관성센서의 방향코사인 벡터  $\mathbf{h}_q$ 가 서로 직교하지 않는다면, 중첩관성센서시스템에서의  $FOM_{FDD}$ 은 식 (10)에 의해 다음과 같은 관계를 갖는다[8].

$$c = \max_{p,q} |\cos \psi_{pq}| (p \neq q) \propto 1/FOM_{FDD} \tag{11}$$

$$0 \leq \psi_{pq} \leq 180^\circ \tag{12}$$

결과적으로 식 (11)의 c는  $FOM_{FDD}$ 에 반비례하므로 c를 최소화함으로써 최적의 배치를 구성할 수 있으며 식 (11)을 통하여 최적의  $FOM_{FDD}$ 을 구하는 과정에 있어서  $\psi_{pq}$ 는  $|\cos \psi_{pq}|$ 에 의해서 0도와 180도 이내의 각을 갖는다고 할 수 있다.

### 3.3 단축 관성센서에서의 레버암 효과

관성센서에서 발생하는 레버암 효과는 물체가 회전할 때, 회전체의 중심점 이외의 점에서 회전력에 의해 생기는 가속도에 의한 효과를 의미한다. 일반적인 관성센서시스템에서는 센서를 플랫폼의 무게중심에 배치한다고 가정하기 때문에 레버암 효과는 무시할 수 있으나, 중첩관성센서시스템의 경우, 센서 수량의 증가로 인해 일부 관성센서의 경우 플랫폼의 무게중심에 배치하는 것이 불가능하므로 레버암 효과를 고려해야 한다.

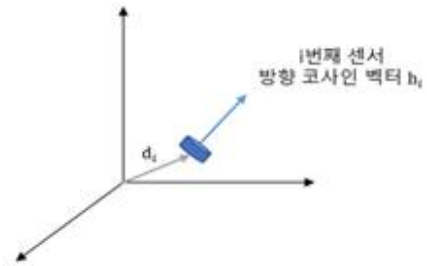


그림 1 i번째 관성센서의 레버암 효과

Fig. 1 Lever arm effect on i-th inertial sensor

어떠한 회전하는 플랫폼 위의 i번째 센서가 무게 중심으로부터  $\mathbf{d}_i$ 만큼 떨어져 있고 회전체가  $\mathbf{w}_c$ 만큼의 각속도를 가지는 i번째 센서에서 발생하는 레버암 효과를 포함하는 단축 관성센서의 측정 모델링은 다음 수식과 같다[6].

$$z_i = \mathbf{h}_i^T \mathbf{a}_c + (\mathbf{d}_i \times \mathbf{h}_i)^T \mathbf{w}_c + \mathbf{h}_i^T \Omega^T \mathbf{d}_i - \mathbf{h}_i^T \mathbf{g}_c \tag{13}$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 & -w_D & w_E \\ w_D & 0 & -w_N \\ -w_E & w_N & 0 \end{pmatrix} \tag{14}$$

위 식에서  $\Omega$ 는 플랫폼의 입력 각속도로 구성된 반대칭 행렬 (skew-symmetric matrix)이며,  $\mathbf{a}_c$ 는 선형 입력 각속도,  $\mathbf{g}_c$ 는 중력가속도 벡터이다.

## 4. 3축 MEMS IMU로 구성된 중첩관성센서시스템

### 4.1 여분의 3축 MEMS IMU로 구성된 중첩관성센서시스템의 항법 성능

3축 MEMS IMU를 이용하여 중첩관성센서시스템을 구성할

경우, 식 (6)에서의  $\mathbf{H}_R$ 는 3축 MEMS IMU의 방향코사인행렬들로 구성되어 있으며, 3개의 축이 서로 직교 배치 되어있으므로, 3축 MEMS IMU는  $\mathbf{H}_j^T \mathbf{H}_j = \mathbf{I}$ 를 항상 만족시킨다. 따라서 배치와 관계없이 항상 최적의 관측성을 가지기 때문에 중첩관성센서시스템의 항법 성능은 아래의 식 (15)와 같이 항상 성능지표의 최소값인  $3/n$ 을 가진다.

$$FOM_{nav,opt} = \frac{3}{n} \quad (15)$$

#### 4.2 여분의 3축 MEMS IMU로 구성된 중첩관성센서시스템의 고장 감지 및 배제 성능

3축 MEMS IMU를 이용하여 중첩관성센서시스템을 구성할 경우, 3축 MEMS IMU내의  $x$ 축을  $3j+1$ ,  $y$ 축을  $3j+2$ ,  $z$ 축을  $3j+3$ 이라 할 때, 각축은 서로 직교성을 가지며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi_{(3j+1)(3j+2)} &= \psi_{(3j+2)(3j+3)} \\ &= \psi_{(3j+1)(3j+3)} \\ &= 90^\circ \\ &(j = (0, 1, \dots, (n-1))) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 3축 MEMS IMU를 단일 평면에 배치하는 경우,  $z$ 축 배치는 항상 평면에 수직인 방향이 되므로,  $x, y$ 축만을 고려할 수 있다. 이 경우 한 3축 MEMS IMU 내의  $x, y$ 축은 항상 직교하므로, 다른 3축 MEMS IMU 사이의 각도는 식 (12)와 식 (16)에 의해서 다음과 같은 조건을 갖는 것으로 간략화할 수 있다.

$$0 \leq \psi_{(3j+1)(3j+2)} \leq 90^\circ \quad (17)$$

따라서  $n$ 개의 3축 MEMS IMU로 구성된 중첩관성센서시스템에

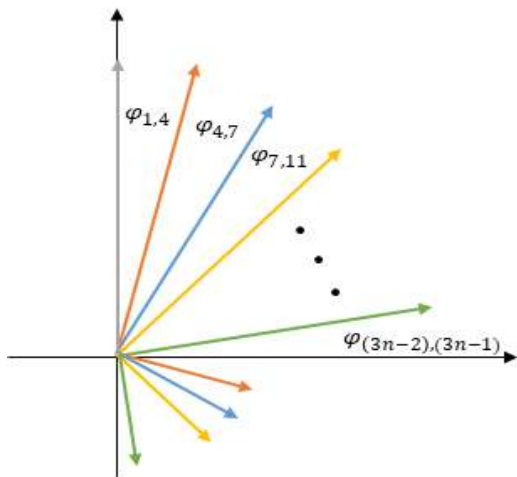


그림 2  $n$ 개의 3축 MEMS IMU 평면 배치 ( $x$ 축)

Fig. 2 In-plane configuration of  $n$  3-axis MEMS IMUs ( $x$  axis)

서 각 인접한  $x$ 축 센서 간의 각도를 그림 2와 같이 표현할 수 있으며, 이러한 가정으로부터 식 (18)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\psi_{1,4} + \psi_{4,7} + \dots + \psi_{(3n-2),(3n-1)} = 90^\circ \quad (18)$$

또한 식 (16)에 의해  $y$ 축은  $x$ 축의 각도에 의해 결정된다고 할 수 있으므로, 보다 직관적으로  $FOM_{FDI}$ 이 최대값을 갖도록 하는 배치 각도를 찾기 위해  $x$ 축만을 고려할 수 있다. 이 경우  $n$ 개의 3축 MEMS IMU에 대한 중첩관성센서시스템에서의  $FOM_{FDI}$ 을 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$FOM_{FDI} = \min_p \left( \frac{1}{\max_q \cos^2(\psi_{pq})} \right), (p \neq q) \quad (19)$$

$$p = 3j+1, q = 3j+2, (j = 0, 1, \dots, n-1)$$

$90^\circ$  이내의 범위에서 코사인 함수는 단조 감소하므로,  $FOM_{FDI}$ 을 최대로 만드는 최적의 각도는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\psi_{opt} = \min \left( \frac{1}{\min(\psi_{pq})} \right) \quad (20)$$

따라서 3축 MEMS IMU에 의한 제한조건을 고려한  $FOM_{FDI}$ 이 최대값을 가지는 최적의 각도  $\psi_{opt}$ 는 식 (17), (18)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} n \times \min(\psi_{pq}) &\leq 90^\circ \leq n \times \max(\psi_{pq}) \\ (p = 3j+1, q = 3j+2) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\psi_{opt} = \min \left( \frac{1}{\min(\psi_{pq})} \right) = \frac{90^\circ}{n} \quad (22)$$

#### 4.3 여분의 3축 MEMS IMU로 구성된 중첩관성센서시스템의 레버암 효과

레버암 효과를 포함한 단축 관성센서의 측정 모델링 식 (13)을 3축 MEMS IMU의 측정 모델링으로 확장하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{z}_j = \mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{w}_j \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}} &= \mathbf{x} + \mathbf{M}_{L,j} \\ \mathbf{x} &= \mathbf{a}_c - \mathbf{g}_c \end{aligned} \quad (24)$$

$$\mathbf{M}_{L,j} = \hat{\Omega} \mathbf{d}_j + \Omega^2 \mathbf{d}_j$$

위 식들에서  $\tilde{\mathbf{x}}$ 는 레버암 효과를 포함한 실제 측정할 가속도 벡터이며 플랫폼이 가지는 가속도 벡터  $\mathbf{x}$ 와 레버암 효과에 의해 생기는 가속도 벡터  $\mathbf{M}_L$ 로 이루어져 있다.

레버암 효과를 최소화하기 위해서는 플랫폼의 무게중심으로부터 각 IMU 사이의 거리  $\mathbf{d}_j$ 를 최소화해야 하지만, 중첩관성센서 시스템에서 최소화하는데 한계가 있으므로, 레버암 효과를 서로

상쇄할 수 있는 새로운 배치 기법의 찾아야할 필요가 있다. 만약  $j$ 번째 3축 MEMS IMU와  $j+1$ 번째 3축 MEMS IMU가 어떠한 플랫폼의 무게중심으로부터 대칭을 이루어 배치되어 있을 경우, 각 3축 MEMS IMU는 무게중심으로부터 각각 거리 벡터  $\mathbf{d}_j$ 와  $-\mathbf{d}_j$ 만큼 떨어져 있다고 할 수 있으며 각 3축 MEMS IMU의 측정값  $z_{j+}$ 와  $z_{j-}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

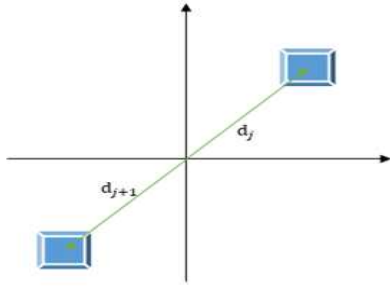


그림 3 대칭성을 이용한 3축 MEMS IMU 배치  
**Fig. 3** Configuration of 3-axis MEMS IMU using symmetric configuration

$$\mathbf{z}_j = \mathbf{H}_j (\mathbf{x} + \mathbf{M}_{L,j}) + \mathbf{w}_j \quad (25)$$

$$\mathbf{M}_{L,j} = \dot{\Omega} \mathbf{d}_j + \Omega^2 \mathbf{d}_j \quad (26)$$

$$\mathbf{z}_{j+1} = \mathbf{H}_{j+1} (\mathbf{x} + \mathbf{M}_{L,j+1}) + \mathbf{w}_{j+1} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{L,j+1} &= \dot{\Omega} \mathbf{d}_{j+1} + \Omega^2 \mathbf{d}_{j+1} \\ &= -\dot{\Omega} \mathbf{d}_j - \Omega^2 \mathbf{d}_j \end{aligned} \quad (28)$$

식 (25)와 식 (27)을 통하여 3축 MEMS IMU가 플랫폼의 중심으로부터 원점 대칭을 이루고 있을 때 발생하는 레버암 효과는 서로 반대방향의 가속도를 갖는다는 것을 알 수 있다. 이를 이용하여 플랫폼의 무게중심으로부터 원점 대칭을 이루고 있는 2개의 3축 MEMS IMU의 레버암 효과를 상쇄시킬 수 있으며, 이 경우 직교 배치는 최적의 항법 성능을 만족시키므로  $\mathbf{H}_j^T \mathbf{H}_j = \mathbf{I}$ 이며, 이 결과를 이용하여 다음과 같이 레버암 효과를 제거한 가속도 벡터  $\mathbf{x}$ 를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{a}_c - \mathbf{g}_c = \frac{1}{2} ((\mathbf{H}_j^T \mathbf{H}_j)^{-1} \mathbf{H}_j^T \mathbf{z}_j + (\mathbf{H}_{j+1}^T \mathbf{H}_{j+1})^{-1} \mathbf{H}_{j+1}^T \mathbf{z}_{j+1}) \quad (29)$$

#### 4.4 여분의 3축 MEMS IMU로 구성된 중첩관성센서시스템 최적 배치 기법

$n$ 개의 3축 MEMS IMU를 이용하여 중첩관성센서시스템을 구성할 때, 항법 성능, 고장 감지 및 배제 성능을 극대화 하고 레버암 효과의 영향을 최소로 받는 최적의 배치를 위해서는 각 3축 MEMS IMU가 서로 간에 고장 감지 및 배제 성능에 대한 최적 각도  $\psi_{opt}$ 만큼의 각도를 갖고 배치되고, 2개의 3축 MEMS IMU가 서로 쌍을 이루어 플랫폼의 무게중심으로부터 대칭성을 갖도록 배치하여 한다. 하지만 센서의 개수가 홀수일 경우, 1개의 3축 MEMS IMU가 남게지므로 아래와 같이 센서의 배치 기

법을 홀수개의 경우와 짝수개의 경우로 나누어 배치 기법을 구해야 한다.

- 홀수 개의 경우

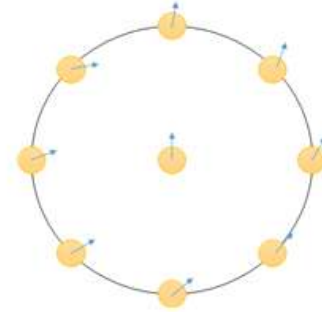


그림 4 IMU가 홀수 개(9개) 인 경우 최적 배치 예시  
**Fig. 4** Optimal configuration for odd numbers(9) of IMUs

3축 MEMS IMU가 홀수 개인 경우에는 첫 번째 IMU를 중첩 관성센서시스템의 무게중심에 배치하고, 나머지 3축 MEMS IMU의 경우 2개의 3축 MEMS IMU가 서로 쌍을 이루어 무게중심으로부터 원점 대칭이 되도록 배치를 하면 레버암 효과의 영향을 최소화할 수 있다. 또한 각 3축 MEMS IMU의 배치 방향은 모든 3축 MEMS IMU 사이의 각도가 식 (22)를 만족하도록 배치하면 고장 감지 및 배제 성능을 극대화할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 아래의 식과 같다. 여기서  $\psi_j$ 는 센서 좌표계의 북쪽 방향과  $j$ 번째 3축 MEMS IMU사이의 각도이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_o &= (0,0), \psi_o = 0 \\ \psi_j &= \frac{\pi}{2} \frac{j}{n} \\ \mathbf{d}_j &= (x_j, y_j) = L \times \left( \sin \frac{2\pi(j-1)}{n-1}, \cos \frac{2\pi(j-1)}{n-1} \right) \\ &(j = 1, 2, 3, \dots, n-1) \end{aligned} \quad (30)$$

이 식에서  $L$ 은 무게중심으로부터 3축 MEMS IMU 사이의 거리이다.

- 짝수 개의 경우

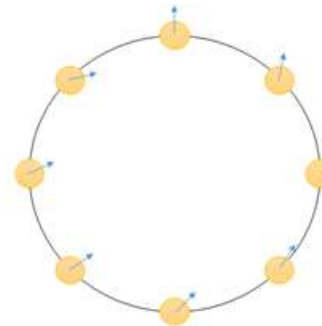


그림 5 IMU가 짝수 개(8개)인 경우 최적 배치 예시  
**Fig. 5** Optimal configuration for even numbers(8) of IMUs

3축 MEMS IMU의 개수가 짝수 개인 경우에는 2개의 3축 MEMS IMU가 서로 쌍을 이루어 중심으로부터의 원점 대칭이 되도록 배치를 하면 레버암 효과의 영향을 최소화할 수 있다. 또한 배치 각도는 각 3축 MEMS IMU가 식 (20)을 만족하도록 배치한다. 이를 수식으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$\psi_j = \frac{\pi}{2} \frac{j}{n} \quad (31)$$

$$\mathbf{d}_j = (x_j, y_j) = L \times \left( \sin \frac{2\pi j}{n}, \cos \frac{2\pi j}{n} \right)$$

( $j = 0, 1, 2, \dots, n-1$ )

위에서 제시한 홀수 개, 짝수 개에 대한 배치 방법을 이용하여 중첩관성센서시스템을 구성할 경우, 고장 감지 및 배제 성능을 극대화하면서 레버암 효과를 제거한 올바른 측정값을 얻을 수 있다.

### 5. 최적 배치 예 및 시뮬레이션

4장에서 제시한 성능 지표를 이용하여 3~6개의 3축 MEMS IMU를 이용하여 중첩관성센서시스템을 구성할 경우, 항법성능과 고장 감지 및 배제 성능, 최적배치각도  $\psi_{opt}$ 를 계산하면 아래의 표 1과 같다.

표 1 3축 MEMS IMU를 이용한 중첩관성센서시스템 성능

Table 1 Performance of RIMU using 3-axis MEMS IMUs

IMU 개수	3	4	5	6
FOM_nav	1	0.75	0.6	0.5
FOM_FDI	0.4553	0.5034	0.5314	0.5496
$\psi_{opt}$	30°	22.5°	18°	15°

표 2 고장 감지 및 배제 성능 검증을 위한 시뮬레이션 조건

Table 2 Simulation condition for verifying FDI performance

	동일각도 배치 (Equal)	최적각도 배치 (Opt.)
IMU 개수	3개	
측정 물리량	가속도	
고장 발생 시간	300초	
고장 종류	가속도 바이어스	
고장 크기	2[m/s <sup>2</sup> ]	
IMU 사이 각도	0°	30°

#### 5.1 최적 배치의 고장 감지 및 배제 성능 시뮬레이션

고장 감지 및 배제 성능을 검증하기 위하여 아래의 표 2와 같은 조건으로 그림 6과 같이 일반적인 동일각도 배치와, 본 논문에서 제시한 최적각도 배치로 각각 중첩관성센서시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용한 센서 데이

터는 실제 차량 주행을 통해 얻었으며, 고장 감지 및 배제 성능을 확인하기 위해 300초에 계단 형태의 센서 바이어스 고장을 인위적으로 인가하였다. 이 경우 패리티 값의 확률 특성 중 기댓값을 확인하여 일반적인 동일각도배치와 최적각도배치의 성능을 비교하여 확인하였다.

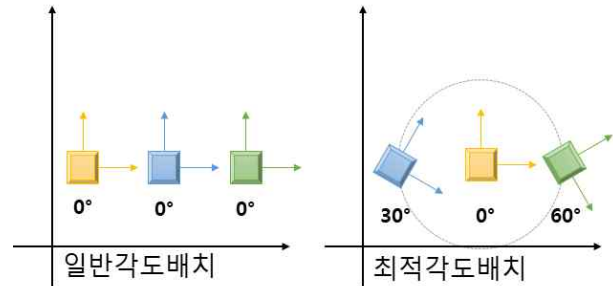


그림 6 3개의 3축 IMU의 일반각도, 최적각도 평면 배치

Fig. 6 Typical and optimal configuration of 3 IMUs

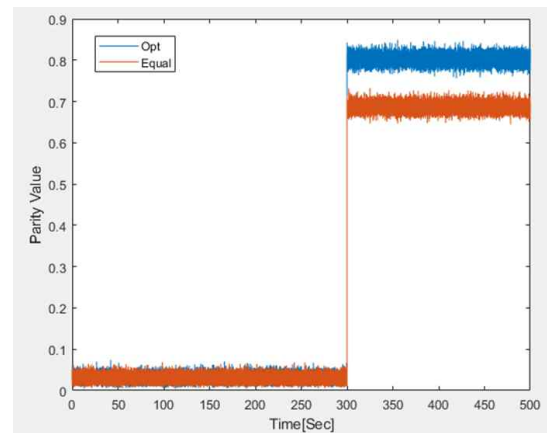


그림 7 고장에 대한 패리티 벡터의 기댓값  $E(P_i)$

Fig. 7 Expectation of parity vector for fault  $E(P_i)$

3개의 3축 MEMS IMU를 이용한 중첩관성센서시스템의 고장 검출 및 배제 성능의 검증 위하여 기댓값을 확인 결과, 그림 7과 같이 동일각도 배치에 비해 최적각도 배치의 경우 패리티 벡터의 기댓값이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 패리티 벡터의 기댓값이 더 큰 경우 잡음이 많은 경우에도 더욱 확실하게 고장 여부를 검출할 수 있으므로, 고장 감지 및 배제 성능이 뛰어나다고 할 수 있다. 따라서 시뮬레이션을 통해 제안한 방법을 사용하여 배치하는 경우 고장 감지 및 배제 성능을 높일 수 있다.

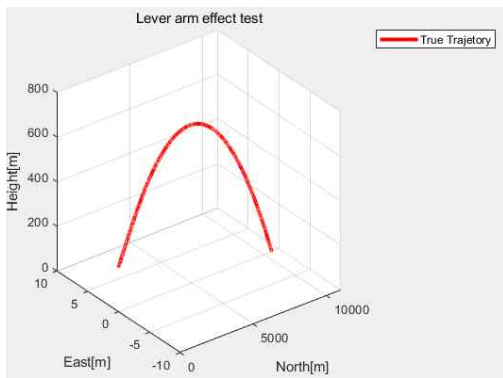
#### 5.2 최적 배치의 레버암 효과 시뮬레이션

본 논문에서는 일반적인 배치와 본 논문에서 제시한 배치 방법을 시뮬레이션을 통해 비교하여, 제안한 배치기법이 레버암 효과에 의한 영향을 효과적으로 상쇄함을 확인하였다. 시뮬레이션

을 위한 궤적으로는 롤(roll)각 방향으로 10Hz의 각속도를 갖고 회전하며 포물선 운동을 하는 미사일 궤적을 사용하였다. 배치 방법은 그림 6과 동일한 방법을 적용하였으며 시뮬레이션에서 미사일의 총 이동거리는 약 10km, 미사일의 평균속도는 약 mach number 1.5로 설정하였다. 시뮬레이션 조건과 궤적은 각각 표 3, 그림 8과 같다.

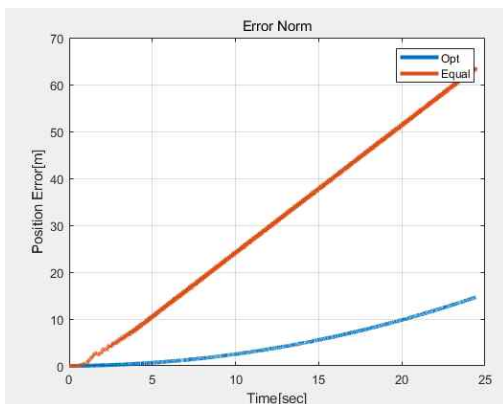
**표 3** 레버암 효과 성능 검증을 위한 시뮬레이션 조건  
**Table 3** Simulation condition for verifying lever arm effect

항목	내용
IMU 성능	가속도 노이즈 : 0.3mg 가속도 바이어스 : 5mg 자이로 노이즈 : 1deg/hr 자이로 바이어스 : 20deg/hr
IMU 개수	3개
측정 물리량	가속도
센서 배치 거리	4cm



**그림 8** 미사일의 궤적 시뮬레이션

**Fig. 8** Simulation trajectory



**그림 9** 배치법에 따른 관성항법 RMS 오차

**Fig. 9** RMS inertial navigation error according to configurations

**표 4** 레버암 효과 성능 검증 시뮬레이션 결과

**Table 4** Simulation results

항목	거리 [m]	
	동일각도 배치 (Equal)	최적각도 배치 (Opt.)
최종 목적지 오차	63.6110m	14.6365m
평균 RMS 오차	30.3388m	4.9134m

시뮬레이션 결과, 다중 3축 MEMS IMU를 배치함에 따라 레버암 효과가 발생했을 때, 본 논문에서 제시한 최적 배치 기법과 보상 기법을 이용하여 관성항법을 진행하였을 경우, 일반적인 배치 방법 보다 최종 목적지의 오차와 평균 RMS 오차가 70% 이상 감소하는 것을 확인할 수 있다.

### 6. 결론

본 연구에서는 여분의 3축 MEMS IMU를 이용하여 중첩관성 센서시스템을 구성할 때의 항법성능, 고장 감지 및 배제 성능과 레버암 효과를 고려한 성능지표를 선정하였으며 성능 지표를 토대로 최적의 평면 배치 기법을 제시하였다. 최적 배치의 각 성능 검증을 위하여 성능 지표를 계산하여 성능지표의 결과 값을 제시하고 시뮬레이션을 통하여 시스템의 성능을 검증하였다.

여분의 3축 MEMS IMU를 이용하여 중첩관성센서시스템을 구성하는 경우, 고장 감지 및 배제 성능은 센서의 배치 각도에 따라 달라지며, 레버암 효과를 제거하기 위해서는 센서의 위치를 고려하여 배치해야 한다는 결론을 얻었으며, 두 성능을 모두 최적으로 만족 하는 배치 결과를 제시하였다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2018-0-01423).

### References

- [1] E. T. Benser, "Trends in inertial sensors and applications", in *Inertial Sensors and Systems (ISISS), 2015 IEEE International Symposium on*, pp. 1-4, 2015.
- [2] H. Ahmed and M. Tahir, "Accurate attitude estimation of a moving land vehicle using low-cost MEMS IMU sensors", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 7, pp. 1723-1739, 2017.
- [3] M. R. Boukhari, A. Chaibet, M. Boukhniifer, and S. Glaser, "Sensor fault tolerant control strategy for autonomous vehicle driving", in *Systems, Signals & Devices (SSD)*,

- 2016 13th International Multi-Conference on, pp. 241-248, 2016.
- [4] S. Kim, L. Negash, and H. Choi, "A Study of Sensor Fault Detection and Fault Information Management Method for Unmanned Vehicles", *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, pp. 459-462, 2015.
- [5] M. Jafari and J. Roshanian, "Optimal redundant sensor configuration for accuracy and reliability increasing in space inertial navigation systems", *The Journal of Navigation*, vol. 66, no. 2, pp. 199-208, 2013.
- [6] J. W. Song and C. G. Park, "Optimal configuration of redundant inertial sensors considering lever arm effect", *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 9, pp. 3171-3180, 2016.
- [7] H. J. Kim, J. W. Song, C. W. Kang, and C. G. Park, "FDI performance Analysis of Inertial Sensors on Multiple Conic Configuration", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 43, no. 11, pp. 943-951, 2015.
- [8] H. Kim, J. Song, and C. Park, "Analytic optimal solution of multiple gyros configuration based on FDI/GNC performance", *Electronics Letters*, vol. 52, no. 19, pp. 1633-1635, 2016.
- [9] I. Skog, J.-O. Nilsson, P. Händel, and A. Nehorai, "Inertial Sensor Arrays, Maximum Likelihood, and Cramér-Rao Bound", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 16, pp. 4218-4227, 2016.
- [10] J. Cheng, J. Dong, R. Landry Jr, and D. Chen, "A novel optimal configuration form redundant MEMS inertial sensors based on the orthogonal rotation method", *Sensors*, vol. 14, no. 8, pp. 13661-13678, 2014.
- [11] R. Rasoulzadeh and A. M. Shahri, "Implementation of A low-cost multi-IMU hardware by using a homogenous multi-sensor fusion", in *Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), 2016 4th International Conference on*, pp. 451-456, 2016.
- [12] F. fen Wang, T. Zhang, and W. X. Fu, "An Improved Principal Component Analysis Algorithm on FDI of Redundant Inertial Measurement Unit", in *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 6082-6086, 2018.
- [13] K. C. Daly, E. Gai, and J. V. Harrison, "Generalized likelihood test for FDI in redundant sensor configurations", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 2, no. 1, pp. 9-17, 1979.
- [14] H. Jin and H. Y. Zhang, "Optimal parity vector sensitive to designated sensor fault", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 1122-1128, 1999.
- [15] S. Guerrier, A. Waegli, J. Skaloud, and M.-P. Victoria-Feser, "Fault detection and isolation in multiple MEMS-IMUs configurations", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 3, pp. 2015-2031, 2012.
- [16] J. P. Gilmore and R. A. McKern, "A redundant strapdown inertial reference unit (SIRU)", *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 9, no. 1, pp. 39-47, 1972.
- [17] D. Yan and H. Zhang, "Optimal design of robust analytical redundancy for a redundant strapdown inertial navigation system", *Control Engineering Practice*, vol. 4, no. 12, pp. 1747-1752, 1996.
- [18] L. Fu, X. Yang, and L. Wang, "A novel optimal redundant inertial sensor configuration in strapdown inertial navigation system", in *Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION*, pp. 240-246, 2012.
- [19] J. Cheng, J. Dong, R. Landry Jr, and D. Chen, "A novel optimal configuration form redundant MEMS inertial sensors based on the orthogonal rotation method", *Sensors*, vol. 14, no. 8, pp. 13661-13678, 2014.

## 저 자 소 개



### 김 응 주 (Eung Ju Kim)

2018년 호서대학교 로봇자동화공학과(공학사), 2018년~현재 세종대학교 소프트웨어융합학과 석사과정. 관심분야는 센서 융합, GPS/INS 통합 항법 시스템, 자율이동체 제어 시스템 등.



### 김 용 훈 (Yong Hun Kim)

2018년 호서대학교 로봇자동화공학과(공학사), 2018년~현재 세종대학교 소프트웨어융합학과 석사과정. 관심분야는 자기센서, GPS/INS 통합 항법 시스템, 실내 항법 시스템, 보행자 항법 시스템 등.



### 최 민 준 (Min Jun Choi)

2018년 호서대학교 로봇자동화공학과(공학사), 2018년~현재 세종대학교 소프트웨어융합학과 석사과정. 관심분야는 GPS/INS 결합 항법시스템, 무인이동체 항법시스템, SDINS 등.





**송진우 (Jin Woo Song)**

1995년, 1997년, 2002년 서울대학교 제어계측공학과(공학사), 제어계측공학과(공학석사), 전기컴퓨터공학과(공학박사), 2003년~2014년 마이크로인피니티 CTO, 2014년~2015년 서울대학교 기계항공공학부 연구교수, 2016년~2017년 호서대학교 로봇자동화공학과 조교수, 2017년~현재 세종대학교 지능기전공학부 조교수. 관심분야는 GPS/INS 통합 항법 시스템, 강인 및 최적 제어, MEMS 관성센서 및 시스템, 실내 항법 시스템 등.