

불확실성을 고려한 중복 관성센서의 최적 배치

Optimal Configuration of Redundant Inertial Sensors with Uncertainty

沈 德 善* · 梁 哲 官†

(Cheol-Kwan Yang · Duk-Sun Shim)

Abstract - In this paper we consider an optimal configuration problem for redundant inertial sensors which have uncertainty such as misalignment, scale factor error. The optimal configuration problem is treated from the viewpoint of navigation accuracy. We propose a necessary and sufficient condition for the optimal configuration of redundant sensors with no uncertainty, and a sufficient condition for the optimal configuration of redundant sensors with uncertainty. Finally we propose a condition for the optimal configuration based both navigation performance and FDI(fault detection and isolation).

Key Words : Sensor Configuration, Fault Detection and Isolation(FDI), Least Square(LS), Total Least Square(TLS), Redundant Inertial Sensors.

1. 서 론

각종 산업, 항공, 우주 분야에 사용되는 시스템은 여러 복합 요소로 구성되어 하드웨어 및 소프트웨어의 구조가 복잡화되었다. 따라서 각 시스템을 이루는 요소의 동작 신뢰성을 높여서 시스템의 오동작을 방지하는 일에 대한 중요성이 커지고 있다. 고장검출 및 분리(Fault Detection and Isolation) 기법은 시스템의 신뢰성을 높이기 위한 것으로 다중 센서를 사용하는 경우에 필수적인 연구 분야이다.

FDI 기법은 하드웨어 중복(hardware redundancy)[1,2,3,4] 혹은 해석적 중복(analytic redundancy)의 형태로 구현이 가능하다. 하드웨어 중복의 경우 센서의 수를 필요 이상으로 배치해야 한다. 각속도, 가속도 등의 벡터량을 측정하는 경우 최소 3개의 센서를 사용해야 하며 중복 배치는 4개 이상의 센서를 사용한다. 따라서 센서 배치를 어떻게 할 것인가 하는 문제가 따르게 된다.

중복 관성 센서의 배치 구조에 대한 연구는 1960년대 후반부터 1970년대 초반까지 주로 이루어져 왔으나 이들 대부분의 연구는 센서 배치의 불확실성(misalignment, scale factor error)을 고려하지 않은 센서 배치에 관한 것이다. 관성 센서의 최적 배치로는 대칭배치(symmetric configuration)와 콘배치(cone configuration)가 제안되어[8] 있고 [12]에는 2자유도 센서를 2개 사용했을 경우 최적배치의 필요조건을 제시하고 있다. 관성 센서는 위치나 속도 등 항법을 위한 센서이므로 항법 성능이 우수하도록 배치되어야 한다. 일반적으로

으로 관성 센서를 많이 사용할수록 항법성능이 좋아지는 것으로 알려져 있는데 같은 수의 센서를 사용했을 때는 어떤 배치가 가장 좋은지에 관한 연구는 많지 않다[11].

본 논문에서는 항법 성능 측면에서 불확실성을 고려하지 않은 경우의 최적센서배치의 조건과 불확실성이 있는 경우에 대한 최적 센서 배치 문제를 다루었다. 항법 성능은 여분의 측정 센서를 이용하는 방법이므로 선형 측정 모델의 해를 구하기 위한 추정자(estimator)들의 추정 성능으로 볼 수 있다. 여분의 측정치가 있을 경우에 많이 사용되는 최소자승법(least square)과 측정 행렬의 불확실성을 고려한 전체 최소자승법(total least square)을 사용하였다. 불확실성을 고려하지 않은 경우의 추정오차의 공분산을 최소화할 수 있는 센서 배치의 필요충분조건을 제시하였고 측정 행렬에 불확실성이 있을 경우 측정 행렬의 불확실성을 고려한 최소자승법의 민감도 분석을 통하여 강인한 센서 배치의 충분조건은 불확실성을 고려하지 않은 경우와 같은 조건임을 보였다.

이 결과를 바탕으로 기존의 대표적인 세 가지 센서 배치인 orthogonal, symmetric, coplanar배치들[7,8]에 대하여 본 논문에서 제시한 조건을 적용하여 비교 분석하였다.

2. 불확실성이 없을 경우의 최적 센서 배치 조건

본 절에서는 항법 성능 측면에서 불확실성이 없을 경우의 최적 센서 배치 조건에 관하여 살펴본다. 먼저 n 개의 센서들에 대한 측정식은 다음과 같다.

$$m = Hx + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n) \quad (1)$$

여기서 측정 행렬 $H = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_n]^T$ 는 $\text{rank}(H) = 3$ 이고 $h_i (\in \mathbb{R}^{3 \times 1})$ ($i = 1, 2, \dots, n$)는 센서 배치에

* 교신저자, 正會員 : 中央大 工大 電子電氣工學部 教授

E-mail : ckyang92@empal.com

* 正會員 : 中央大 情報通信研究員 招聘教授

接受日 : 2004年 11月 8日

最終完了 : 2005年 12月 27日

다른 방향 코사인 벡터로써 $\|h_i\| = 1$ 이다. 그리고 실제 항법 해인 $x (\in \mathbb{R}^{3 \times 1})$ 와 측정 잡음 $\varepsilon (\in \mathbb{R}^{n \times 1})$ 는 서로 상관관계가 없는 것으로 가정한다.

식(1)의 추정식에 대한 최소자승 해는 식(2)와 같다.

$$\hat{x}_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T m \tag{2}$$

식(2)의 추정자의 추정 오차(e)를 다음과 같이 정의하면

$$e = x - \hat{x}_{LS} \tag{3}$$

추정 오차의 공분산을 식(4)와 같이 얻을 수 있다.

$$P = E[ee^T] = (H^T H)^{-1} \rho^2 \tag{4}$$

그러면 식(4)로부터 식(5)와 같은 성능 지수(J)를 얻을 수 있다.

$$J = \text{trace}(P) \tag{5}$$

$$= E[(x_x - \hat{x}_x)^2] + E[(x_y - \hat{x}_y)^2] + E[(x_z - \hat{x}_z)^2]$$

여기서 $x = [x_x \ x_y \ x_z]^T$, $\hat{x}_{LS} = [\hat{x}_x \ \hat{x}_y \ \hat{x}_z]^T$.
 식(5)로부터 항법 성능 측면에서의 최적 센서 배치 문제를 다음과 같이 정의한다.

정의 1: 최적 센서 배치(항법 성능 측면)

여분의 관성 센서에 대한 최적 센서 배치란 식(5)의 성능 지수(J)를 최소화 해주는 센서 배치이다.

Theorem 1. 식(1)에서 측정 행렬(H)의 특이치(singular value)를 $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ 이라 하자. 측정 행렬 H 를 갖는 센서 배치가 최적 센서 배치가 될 필요충분조건은 측정행렬 H 의 특이치가 모두 같을 때이다. 즉, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 이다.

증명)

(필요조건) : 측정 행렬 H 가 최적 센서 배치라고 가정한다. 식(4)로부터 다음을 얻는다.

$$J = \text{trace}(P) = \rho^2 \text{trace}\{(H^T H)^{-1}\} = \rho^2 \left\{ \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} \right\} \tag{6}$$

여기서 $\bar{\lambda}_i (i = 1, 2, 3)$ 는 $(H^T H)^{-1}$ 의 고유치(eigenvalue)로써 $\bar{\lambda}_3 \geq \bar{\lambda}_2 \geq \bar{\lambda}_1 > 0$ 이다. 그리고 $\lambda_i (i = 1, 2, 3)$ 는 $H^T H$ 의 고유치로써 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 > 0$ 이라 하면 $\lambda_i = \sigma_i^2$ 이고 $\bar{\lambda}_i = \frac{1}{\lambda_i}$ 이다. 그러므로 식(5)의 성능 지수(J)는 식(7)과 같이 전개된다.

$$J(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \rho^2 \left\{ \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} \right\} = \rho^2 \left\{ \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \frac{1}{\sigma_3^2} \right\} \tag{7}$$

여기서 $\text{trace}\{H^T H\} = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) =$

$\sum_{i=1}^n \text{trace}\{h_i h_i^T\} = \sum_{i=1}^n \|h_i\|_2^2 = n$ 이므로 제한 조건 방정식(constraint equation)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$g(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - n = 0 \tag{8}$$

따라서 식(7),(8)에 대하여 Lagrange's multiply method를

적용하면 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sqrt{n/3}$ 일 경우 $J = \frac{9}{n} \rho^2$ 로 최소가 된다.

(충분조건) : 측정행렬 H 의 특이치가 모두 같다고 가정한다. 즉, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 이다.

x, y, z 에 대하여 산술 평균과 기하 평균에 대한 다음 부등식이 성립한다.

$$\frac{x+y+z}{3} \geq \sqrt[3]{xyz} \tag{9}$$

여기서 등식은 $x = y = z$ 일 때 성립하며 이 때 좌변은 최소값을 갖는다.

식(5)의 성능 지수 J 는 아래와 같다.

$$J(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \rho^2 \left\{ \frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \frac{1}{\sigma_3^2} \right\} \geq 3\rho^2 \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2}} \right) \tag{10}$$

위의 J 는 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 일 때 최소이고 $\text{trace}\{H^T H\} =$

$(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = \sum_{i=1}^n \text{trace}\{h_i h_i^T\} = \sum_{i=1}^n \|h_i\|_2^2 = n$ 이므로

$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sqrt{n/3}$ 이고 $J = \frac{9}{n} \rho^2$ 로 최소가 된다. ■

Theorem1의 최적 센서 배치 조건은 [12]에 제시되어있는 최적 센서 배치 조건과 동일하다. 그러나 [12]의 조건은 2자유도 센서를 2개 사용하였을 경우의 최적 센서 배치가 되기 위한 필요조건이고, 본 논문의 theorem1에 제시한 조건은 3개 이상의 1자유도 센서들에 대하여 최적의 센서 배치가 되기 위한 필요충분조건이다.

Lemma 1. 최적의 센서 배치를 갖는 측정 행렬(H)의 필요충분 조건은 다음과 같다.

$$H^T H = \sigma^2 I_3 \tag{11}$$

여기서 σ_i ($i=1,2,3$)는 측정 행렬(H)의 특이치이고 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$ 이다.

증명(필요조건) : 최적 센서 배치를 갖는 측정 행렬(H)는 $H^T H = \sigma^2 I_3$ 를 갖음을 보이면 다음과 같다. 먼저 측정 행렬(H)에 대한 특이치 분해(singular value decomposition)를 하면 다음과 같다.

$$H = U A V^T \quad (12)$$

$$U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_6], \quad V = [v_1 \ v_2 \ v_3], \quad A = \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\Sigma = \text{diag}([\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3])$$

여기서 u_i ($\in \mathbb{R}^{6 \times 1}$)와 v_i ($\in \mathbb{R}^{3 \times 1}$)는 특이치 σ_i 에 대응하는 좌특이벡터(left singular vector)와 우특이벡터(right singular vector)로써 unitary 행렬이다. 그리고 최적 센서 배치이므로 특이치들은 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$ 이다.

여기서 $H^T H = V A^T A V^T$ 이고 $A^T A = \sigma^2 I_3$ 이므로 따라서 $H^T H = \sigma^2 I_3$ 이다.

(충분조건) : $H^T H = \sigma^2 I_3$ 이면 theorem 1에 의해서 최적 센서 배치가 된다. ■

Theorem1은 센서 배치에 대한 불확실성이 없을 경우의 최적 센서 배치 조건을 제시하고 있는데 실제적으로 센서를 배치할 경우 장착비정렬각(misalignment)과 환산 계수 오차(scale factor error)가 항상 존재하기 때문에 이러한 불확실성을 고려한 최적의 센서 배치 조건에 관한 연구가 필요하다. 먼저 그림1은 링 레이저 자이로(ring laser gyroscope)의 블록도로써 장착비정렬각과 환산 계수 오차가 측정 행렬에 어떠한 영향을 주고 있는지를 보여 주고 있다. 구체적인 내용은 다음과 같다. 그림1과 같은 구조의 자이로 측정치는 식(13)과 같다.

$$m_j(t) = h_j^T \omega(t) + b_j + \epsilon_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (13)$$

여기서 $m_j(t)$ 는 j 번째 자이로 측정값이고 $\omega(t)$ 는 입력 각 속도, $h_j = h_j^* [1 + \epsilon_{SF}]$ 는 방향 코사인 벡터이다. 그리고 $h_j^* (= h_{j0} + h_{jm})$ 는 장착비정렬각(misalignment)을 내포하고 있는 방향 코사인 벡터로서 실제 방향 코사인 벡터(h_{j0})와 장착비정렬각에 의한 방향 코사인 벡터(h_{jm})부분으로 구성된다. ϵ_{SF} 는 scale factor 오차, b_j 는 바이어스 오차, ϵ_j 는 측정 잡음을 의미한다. 그러므로 6개의 자이로 측정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m(t) = H \omega(t) + b + \epsilon(t) \quad (14)$$

$$H = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5 \ h_6]^T = H_0 + \Delta H,$$

$$b = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6]^T$$

여기서 $H_0 (= [h_{10} \ h_{20} \ h_{30} \ h_{40} \ h_{50} \ h_{60}]^T)$ 는 실제 센서 배치의 측정 행렬이고

$\Delta H (= [h_{1m} + \epsilon_{SF_1} h_{1j}^*, \ h_{2m} + \epsilon_{SF_2} h_{2j}^*, \ \dots, \ h_{6m} + \epsilon_{SF_6} h_{6j}^*]^T)$ 는 센서 배치의 불확실성 부분을 나타낸다.

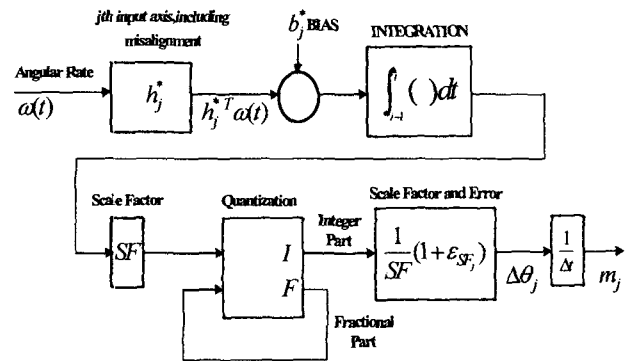


그림 1. j 번째 자이로 측정치의 구조
Fig. 1 A structure of j -th gyro measurement

3. 불확실성이 있을 경우의 최적 센서 배치 조건

본 절에서는 측정 행렬에 불확실성이 있을 경우 센서의 최적배치 조건을 최소자승법(TLS:total least square)을 사용하여 구해본다. 측정 행렬에 불확실성이 존재할 경우 추정자의 추정 성능이 미치는 영향을 분석함으로써 센서 배치의 불확실성이 존재할 경우의 최적 센서 배치 조건을 살펴본다. 먼저 TLS의 민감도 분석을 하면 다음과 같다.

일반적으로 측정 행렬에 불확실성이 있을 경우의 선형 측정 모델 식은 식(15)-(17)와 같다.

$$Hx \approx m \quad (15)$$

$$H_0 x = m_0 \quad (16)$$

$$H = H_0 + \Delta H, \quad m = m_0 + \delta m \quad (17)$$

$$H \in \mathbb{R}^{m \times n}, \quad m \in \mathbb{R}^m, \quad x \in \mathbb{R}^n$$

여기서 H_0 는 실제 측정 행렬이고 H 는 계산식에 사용되는 측정 행렬로서 ΔH 만큼의 오차를 내포하고 있다. m_0 는 실제 값이고 m 은 δm 만큼의 오차가 있는 측정값이다.

최소자승법의 문제는 식(18), (19)를 만족하는 x 를 구하는 문제로서 측정 행렬의 불확실성을 고려하지 않고 있다.

$$Hx = m' \quad (18)$$

$$\min_x \|r\|_2 \quad (19)$$

여기서 $m' = m + r$ 이고 r 은 잔차(residual)이다. 식(15)-(17)와 같은 측정 모델식에 대하여 측정 행렬의 불확실성을 고려한 최소자승법은 다음의 식(20)을 만족하는 추

정자 \hat{x} 을 구하는 문제로써 이러한 추정자(\hat{x}_{TLS} : total least square)는 식(21)와 같이 주어진다[5,9,10].

$$\hat{x}_{\text{TLS}} = \arg \min_x \|(H_0 + \Delta H)x - (m_0 + \delta m)\|_2 \quad (20)$$

$$\hat{x}_{\text{TLS}} = (H^T H - \sigma_n^2 I)^{-1} H^T m \quad (21)$$

Theorem 2. 식(15)-(17)의 측정 모델 식에 대하여 측정 행렬(H)의 특이치들이 모두 같을 경우에 식(21)의 추정자 \hat{x}_{TLS} 에 대한 측정 행렬의 불확실성(ΔH)의 영향이 최소가 된다.

증명)

식(21)의 추정자에 대하여 식(22),(23)의 부등식이 성립한다 [6].

$$\frac{\|\hat{x}_{\text{TLS}} - x\|_2}{\|x\|_2} \leq 2\eta \kappa_2(H) + O(\eta^2) \quad (22)$$

여기서

$$\eta = \max \left\{ \frac{\|\Delta H\|_2}{\|H\|_2}, \frac{\|\delta m\|_2}{\|m\|_2} \right\} < \frac{\sigma_{\min}(H)}{\sigma_{\max}(H)}$$

$$\|H\|_2 = \sqrt{\lambda_{\max}(H^T H)} = \sigma_{\max}(H),$$

$$\kappa_2(H) = \|H\|_2 \|(H^T H)^{-1} H^T\|_2 \quad (23)$$

식(22)의 부등식은 식(21)의 추정자의 추정 오차 성능의 상한 경계값(upper boundness)을 나타내는 식으로써 만약에 $\kappa_2(H)$ 이 최소가 되면 식(22)의 상한 경계값이 최소가 된다. $\kappa_2(H)$ 가 최소가 되도록 해주는 측정 행렬(H)의 조건을 구하면 다음과 같다. 먼저 임의의 실수 행렬 A ($\in \mathbb{R}^{m \times n}$)에 대하여 $\|A\|_2^2 = \|AA^T\|_2$ 이 성립하므로

$$\|(H^T H)^{-1} H^T\|_2^2 = \|(H^T H)^{-1}\|_2 = \frac{1}{\sigma_{\min}^2(H)} \text{ 이고}$$

$$\|H\|_2^2 = \sigma_{\max}^2(H) \text{ 이므로 만약에 } \sigma_{\max} = \sigma_{\min} \text{ 이면}$$

$\kappa_2(H)^2 = \|H\|_2^2 \|(H^T H)^{-1}\|_2^2$ 이 $\kappa_2(H)^2 = 1$ 로 최소가 된다. 이러한 결과로부터 $H^T H = \sigma^2 I$ 이면

$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} = \sigma$ 이 되므로 추정자 \hat{x}_{TLS} 은 측정 행렬의 불확실성에 대한 영향이 최소가 된다. ■

4. 최적의 중복 관성 센서 배치 조건 및 중복 관성 센서 배치들의 비교

위의 분석 결과들을 정리하면 측정 행렬의 불확실성이 있을 경우에 항법 성능 측면에서 최적의 센서 배치 조건은 측정 행렬 H 의 특이치가 모두 같을 경우이다.

이러한 센서 배치 조건은 항법 성능 측면에서 살펴본 것

이며 고장 검출 및 분리 성능 측면에서 고려하였을 경우의 센서 배치 조건은 Gilmore[8]에 제시되었다. 즉, Gilmore에 의하면 관성센서 6개를 동일 평면상에 3개 이상 놓이지 않게 배치하면 3개의 고장 센서를 감지할 수 있으며 2개의 고장센서를 분리할 수 있음을 증명하였다.

Theorem1,2의 결과와 Gilmore의 결과들로부터 다음과 같이 불확실성을 고려했을 경우 항법의 정확도와 고장검출 및 분리 관점 모두에 대한 최적 관성 센서 배치 조건을 제시한다.

조건1.) 측정 행렬의 특이치가 동일하도록 배치한다. 즉, $H^T H = \sigma^2 I_3$,

여기서 σ 는 측정 행렬(H)의 특이치이다.

조건2.) 동일 평면상에 3개 이상의 관성 센서가 놓이지 않도록 배치한다.

본 논문에서는 6개의 자이로에 대한 기존의 배치인 orthogonal, symmetric, coplanar에 대하여 위의 결과 식들을 적용하여 비교 분석하였다.

다음으로 기존의 세 가지 센서배치 각각에 대하여 본 논문에서 제시한 2가지 최적 배치 조건을 적용한 결과는 다음과 같다.

orthogonal 배치일 경우(그림2. 참조)

- 측정행렬식

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H^T H = 2I_3 \quad (24)$$

측정행렬식은 식(25)과 같으며 이러한 배치는 조건1은 만족하지만 조건2는 만족하고 있지 않음을 알 수 있다.

symmetric 배치일 경우(그림3. 참조)

- 측정행렬식

$$H = \begin{bmatrix} C & S & 0 \\ C & -S & 0 \\ 0 & C & S \\ 0 & C & -S \\ S & 0 & C \\ -S & 0 & C \end{bmatrix}, \quad H^T H = 2I_3 \quad (25)$$

여기서 $C = \cos(\alpha)$, $S = \sin(\alpha)$, $\alpha = 31.7^\circ$ 이다. Symmetric 배치는 가장 많이 사용되는 관성 센서 배치 구조로써 조건1과 2를 동시에 만족하고 있음을 알 수 있다.

coplanar 배치일 경우(그림4. 참조)

- 측정행렬식

$$H = \begin{bmatrix} W & 0 & Z \\ WC_6 & -WS_6 & Z \\ -WC_6 & -WS_6 & Z \\ -W & 0 & Z \\ -WC_6 & WS_6 & Z \\ WC_6 & WS_6 & Z \end{bmatrix}, \quad H^T H = 2I_3 \quad (26)$$

여기서 $W = \sin(\theta)$, $Z = \cos(\theta)$, $C_6 = \cos(60^\circ)$,

$S_6 = \sin(60^\circ)$, θ 는 cone 각도이다.

이러한 배치 구조에서는 θ 의 값을 결정하기 위한 다양한 접근 방법들이 있었는데 본 논문에서는 조건1을 만족하도록 θ ($\approx 54.715^\circ$)를 결정하였다. 또한 H는 조건2를 만족하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 symmetric 배치일 경우의 결과와 동일하나 세 개의 센서가 orthogonal 하게 배치되어 있는 관성 센서 측정 장치인 IMU(Inertial Measurement Unit) 두 개를 가지고 구성 할 수 있다는 특징이 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 중복 관성 센서의 배치 문제에서 항법 해를 구하는데 주로 사용되는 방법인 최소자승법에 대하여 추정오차의 공분산을 최소화할 수 있는 센서 배치의 필요충분조건을 제시하였다. 그리고 측정 행렬에 불확실성이 있을 경우 측정 행렬의 불확실성을 고려한 최소자승법(TLS: Total Least Square)의 민감도 분석을 통하여 강인한 센서 배치의 충분조건을 제시하였다. 이 분석 결과를 토대로 측정 행렬의 특이치가 모두 동일할 경우가 최적의 항법 성능을 발휘할 수 있는 센서 배치 조건임을 알 수 있었다. 이 연구 결과를 기존의 세 가지 대표적인 관성 센서 배치(orthogonal, symmetric, coplanar)에 적용하여 비교 분석한 결과 symmetric 배치와 coplanar 배치(6개의 센서 사용시 $\theta \approx 54.715^\circ$ 인 경우)가 최적의 배치임을 알 수 있었다. 위의 coplanar 배치는 두 개의 IMU 장치로 구현될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2003-000-10430-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] James C. Wilcox, "Competitive Evaluation of Failure Detection Algorithms for Strapdown Redundant Inertial Instruments," *Journal of Spacecraft*. Vol. 11, No. 7, July 1974.

[2] Tze-thong Chien and Milton B. Adams, "A Sequential Failure Detection Technique and its Application," *IEEE Transactions on Automatic Control*. October 1976.

[3] Kevin C. Daly, Eliezer Gai and James V. Harrison, "Generalized Likelihood Test for FDI in Redundant Sensor Configurations," *Journal of Guidance and Control*. Vol. 2, No. 1, Jan-Feb 1979.

[4] Hong Jin and Hong 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.

[5] Gene H. Golub, Charles F. Van Loan, "An Analysis of The Total Least Squares Problem," *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol.17, No.6, pp.883-893, December 1980.

[6] Gene H. Golub, Charles F. Van Loan, *Matrix Computations, The Johns Hopkins Univ. Press*, pp.242-245, 1996.

[7] Harrison, J.V. and Gai, E.G. "Evaluating Sensor Orientations for Navigation Performance and Failure Detection," *IEEE Trans. AES*, Vol. AES-13, pp. 631-643, November 1977.

[8] Jerold P Gilmore and Richard A. McKern, "A Redundant Strapdown Inertial Reference Unit(SIRU)," *Journal of Spacecraft*, Vol. 9, No. 1, pp.39-47, 1972.

[9] Jerry M. Mendel, *Lessons in Estimation Theory for Signal Processing, Communications, and Control*, Prentice-Hall International, Inc., pp.38-39, 1995.

[10] Sabine Van Huffel and Joos Vandewalle, "On the Accuracy of Total Least Squares and Least Squares Techniques in the Presence of Errors on all Data," *Automatica*, Vol. 25, No. 5, pp. 765-769, 1989.

[11] 김정용, 양철관, 심덕선, "관성항법시스템의 중첩센서 배치에 대한 항법 및 고장검출 성능 분석", 제어자동화시스템공학회 논문지, vol.8, No.8, pp.698-705, 2002.8.

[12] 정도형, 박찬국, 이장규, "2-자유도 중첩센서의 최적배치," 한국항공우주학회, pp.97-106, Vol.20, No.3, 1992.9.

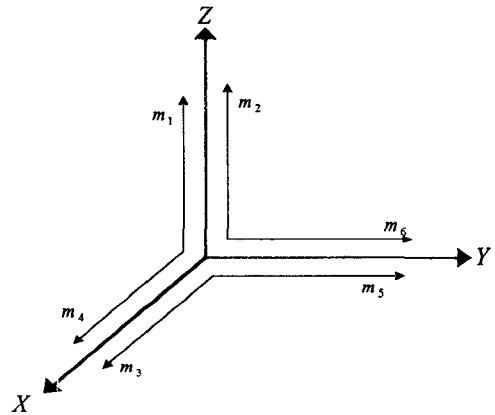


그림 2. 6개 센서의 orthogonal 배치
Fig. 2 A orthogonal configuration for six sensors

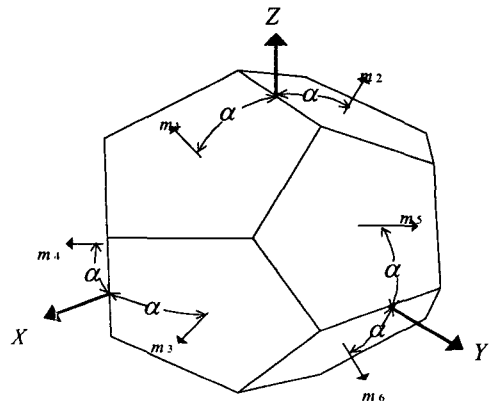


그림 3. 6개 센서의 Symmetric 배치
Fig. 3 A symmetric configuration for six sensors

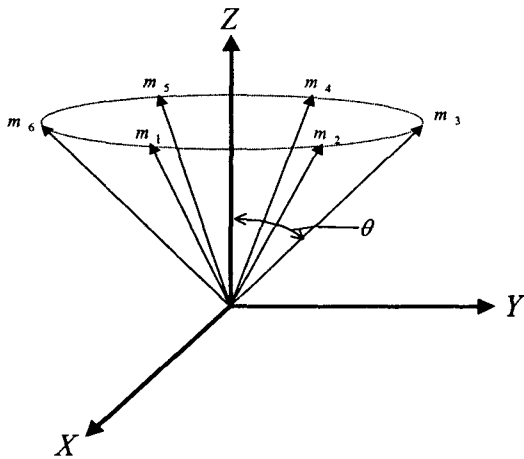


그림 4. 6개 센서의 coplanar배치
 Fig. 4 A coplanar configuration for six sensors

저 자 소 개



심 덕 선 (沈 德 善)

1961년 10월 18일생. 1984년 서울대 제어계측공학 공학사 1986년 동 대학원 제어계측공학 공학석사, 1993년 미시간대 항공우주공학과 공학박사, 1995년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수
 Tel : 02-820-5329, Fax : 02-825-1585
 E-mail : dshim@cau.ac.kr



양 철 관(梁 哲 官)

1972년 5월 15일생. 1996년 중앙대 제어계측공학 공학사, 1998년 동 대학원 제어계측공학 공학석사, 2003년 동 대학원 제어계측공학 공학박사, 2003년 9월~2004년 3월 중앙대 박사후과정, 2004년 4월~현재 중앙대 정보통신연구원 초빙 교수
 E-mail : ckyang92@empal.com