

論文

평균 TRIAD를 이용한 자세 결정

김동훈*, 이현재**, 오화석***

Averaging TRIAD Algorithm for Attitude Determination

Dong-Hoon Kim*, Henzeh Lee** and Hwa-Suk Oh***

ABSTRACT

In general, accurate attitude information is essential to perform the mission. Two algorithms are well-known to determine the attitude through two or more vector observations. One is deterministic method such as TRIAD algorithm, the other is optimal method such as QUEST algorithm. This paper suggests the idea to improve performance of the TRIAD algorithm and to determine the attitude by combination of different sensors. First, we change the attitude matrix to Euler angle instead of using orthogonalization method and also use covariance in place of variance, then apply an unbiased minimum variance formula for more accurate solutions. We also suggest the methodology to determine the attitude when more than two measurements are given. The performance of the Averaging TRIAD algorithm upon the combination of different sensors is analyzed by numerical simulation in terms of standard deviation and probability.

초 록

임무를 수행하는데 있어 정확한 자세 정보는 필수적이다. 두 개 또는 그 이상의 관측 벡터를 이용하는 자세 결정 알고리즘에는 크게 두 가지가 널리 알려져 있다. 하나는 결정적인 방법인 TRIAD 알고리즘이며, 다른 하나는 최적의 해를 찾는 방법인 QUEST 알고리즘이다. 본 논문은 TRIAD 알고리즘의 성능 향상과 서로 다른 정확도를 가진 센서의 조합을 이용한 자세 결정 방법을 제안하였다. 첫째, 보다 정확한 자세 행렬을 구하기 위하여 직교화 방법을 이용하는 대신 방향 여현 행렬을 오일러 각으로 바꾸고, 분산 대신 공분산 행렬을 고려하여 편향되지 않은 최소 공분산 기법을 적용하였다. 또한, 세 개 이상의 측정값이 주어졌을 경우 TRIAD 알고리즘을 적용할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 평균 TRIAD 알고리즘의 성능은 서로 다른 센서의 조합을 가정하여 표준편차와 확률적 측면에서의 수치 시뮬레이션을 통해 분석되었다.

Key Words : Attitude(자세), Determination(결정), Accuracy(정확도), Covariance(공분산), Orthogonality(직교성), Standard Deviation(표준편차), Probability(확률)

1. 서 론

인공위성의 임무 수행에 있어 자세 결정은 매우 중요하다. 인공위성의 자세는 탑재된 센서의 측정값을 이용하여 결정할 수 있다. 인공위성의 자세 결정 시 별 센서(Star Tracker), 태양 센서(Sun Sensor), 지구 센서(Earth Sensor) 등이 이

† 2008년 7월 24일 접수 ~ 2008년 12월 12일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주공학과 대학원 교신저자, E-mail : aerospace38@kau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

*** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

용된다. 이미 알고 있는 별, 태양 또는 지구의 위치를 관성 좌표계를 기준으로 나타내고, 인공위성에 장착된 센서를 통해 얻은 방향 벡터와의 관계를 이용하여 인공위성의 자세를 추정 및 결정할 수 있다.

자세 결정 방법에는 크게 결정론적 방법과 최적의 해를 찾는 방법인 TRIAD(TRI-axis Attitude Determination), QUEST(QUaternion ESTimator)가 각각 있다. TRIAD는 알고리즘이 간단하며 계산량이 적은 장점을 가지고 있다. 그러나 두 벡터가 평행하는 경우에는 사용이 불가능하며, 오직 두 개의 벡터만 이용하여 구할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 반면, QUEST는 최적의 해를 찾을 수 있지만 복잡하며, 상대적으로 계산량이 많은 단점이 있다[1-3].

현재 과학기술위성 3호(STSAT-3)의 제작 및 자세 결정을 위한 연구가 이루어지고 있다. 저성능 센서를 사용하는 STSAT-3의 경우 일반적으로 사용되는 TRIAD 알고리즘을 통한 자세 추정은 정확도가 낮은 단점이 있다. 또한 오직 두 개의 관측 벡터만 이용할 수 있으며, 두 개의 관측 벡터만 주어진다 하더라도 관측 벡터를 제공하는 센서의 표준편차에 따라 자세의 정확도가 낮아지는 문제가 발생할 수 있다.

TRIAD 알고리즘의 단점을 보완하기 위한 최적(Optimized) TRIAD 알고리즘이 연구되었다. 하지만 식과 계산의 단순화를 위해 공분산 대신 분산을 적용하였으며, 최소 분산 추정값을 계산하는 과정에 있어 방향 여현 행렬의 직교성을 고려하지 않았다.

본 논문에서는 기존의 TRIAD 알고리즘과 최적 TRIAD 알고리즘의 단점과 문제점을 보완한 평균(Averaging) TRIAD 알고리즘을 제안하였다. 여기서, 평균이라는 용어는 측정 벡터의 값을 모두 이용한다는 의미로 사용하였다. 각각의 알고리즘에 대한 내용을 설명하고 표준편차와 확률적 측면에서의 수치 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘을 검증하였다.

II. TRIAD를 이용한 자세 결정

2.1 TRIAD 알고리즘

TRIAD 알고리즘은 각각 평행하지 않는 두 개의 기준 단위 벡터 \hat{v}_1, \hat{v}_2 와 관측 단위 벡터 \hat{w}_1, \hat{w}_2 가 주어졌을 경우 두 벡터 사이의 방향 여현 행렬 A 를 구하여 자세를 결정하며, 직교 행렬 A 와 단위 벡터의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A\hat{v}_1 = \hat{w}_1 \quad A\hat{v}_2 = \hat{w}_2 \quad (1)$$

직교하는 임의의 기준 단위 벡터와 관측 단위 벡터는 다음과 같이 각각 만들 수 있다[1].

$$\hat{r}_1 = \hat{v}_1 \quad \hat{r}_2 = \frac{(\hat{v}_1 \times \hat{v}_2)}{|\hat{v}_1 \times \hat{v}_2|} \quad \hat{r}_3 = \hat{r}_1 \times \hat{r}_2 \quad (2)$$

$$\hat{s}_1 = \hat{w}_1 \quad \hat{s}_2 = \frac{(\hat{w}_1 \times \hat{w}_2)}{|\hat{w}_1 \times \hat{w}_2|} \quad \hat{s}_3 = \hat{s}_1 \times \hat{s}_2 \quad (3)$$

식 (2)와 (3)의 벡터로 구성된 행렬과 그 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$M_{ref} = [\hat{r}_1 : \hat{r}_2 : \hat{r}_3] \quad M_{obs} = [\hat{s}_1 : \hat{s}_2 : \hat{s}_3] \quad (4)$$

$$A = M_{obs} M_{ref}^T \quad (5)$$

방향 여현 행렬 A 의 경우 직교성을 위하여 다음과 같은 조건들을 만족해야 한다.

$$\hat{v}_1 \cdot \hat{v}_2 = \hat{w}_1 \cdot \hat{w}_2 \quad (6)$$

$$|\hat{v}_1 \cdot \hat{v}_2| = |\hat{w}_1 \cdot \hat{w}_2| \quad (7)$$

2.2 TRIAD 공분산 행렬

자세 공분산 행렬은 오일러 각의 공분산 행렬로 정의할 수 있으며, 아래에 그 과정을 정리하였다. 오차각 벡터는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta\theta = (\delta\theta_1, \delta\theta_2, \delta\theta_3)^T \quad (8)$$

오차각이 매우 작다고 가정하면 실제 방향 여현 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \delta\theta_3 & -\delta\theta_2 \\ -\delta\theta_3 & 1 & \delta\theta_1 \\ \delta\theta_2 & -\delta\theta_1 & 1 \end{bmatrix} \langle A \rangle \quad (9)$$

공분산 행렬과 방향 여현 행렬 A 와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \langle \delta A \delta A^T \rangle \quad (10)$$

여기서, δA 는 다음과 같다.

$$\delta A = A - \langle A \rangle \quad (11)$$

직각 좌표계에서의 자세 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$P_{\theta\theta} = \left(\frac{1}{2} \text{trace}(P) \right) I - P \quad (12)$$

식 (5)로부터 P 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \langle \delta M_{\text{obs}} \delta M_{\text{obs}}^T \rangle + A \langle \delta M_{\text{ref}} \delta M_{\text{ref}}^T \rangle A^T \quad (13)$$

$$P = P_{\text{obs}} + A P_{\text{ref}} A^T$$

위의 정의를 통해 직각 좌표계에서의 자세 공분산 행렬을 관측 단위 벡터를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{\theta\theta} = \sigma_1^2 I + \frac{1}{|\hat{w}_1 \times \hat{w}_2|^2} \left\{ (\sigma_2^2 - \sigma_1^2) \hat{w}_1 \hat{w}_1^T + \sigma_1^2 (\hat{w}_1 \cdot \hat{w}_2) (\hat{w}_1 \hat{w}_2^T + \hat{w}_2 \hat{w}_1^T) \right\} \quad (14)$$

여기서, σ_1^2 과 σ_2^2 은 다음과 같다.

$$\sigma_1^2 = \sigma_{v_1}^2 + \sigma_{w_1}^2, \quad \sigma_2^2 = \sigma_{v_2}^2 + \sigma_{w_2}^2 \quad (15)$$

III. 최적 TRIAD를 이용한 자세 결정

벡터를 측정하는 장치의 정확도는 오차의 표준 편차를 통해 정량적으로 표현된다. 수학적 개념을 이용하면 x_1 과 x_2 가 알 수 없는 임의의 실수 x 의 측정값과 독립이고 표준편차가 σ_1 과 σ_2 일 경우, x 의 최소 분산 추정값 \hat{x} 는 다음과 같이 정의할 수 있다[4].

$$\hat{x} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} x_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} x_2 \quad (16)$$

식 (16)의 개념을 TRIAD 알고리즘에 적용하여 최적의 해를 찾는 과정을 아래에 정리하였다. $k_1 = \sigma_2^2 / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)$ 이라고 정의하면 식 (16)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x} = k_1 x_1 + (1 - k_1) x_2 \quad (17)$$

추정 오차를 $\hat{x} - x$ 라고 하였을 경우 \hat{x} 의 분산 $\hat{\sigma}^2$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$\hat{\sigma}^2 = k_1^2 \sigma_1^2 + (1 - k_1)^2 \sigma_2^2 \quad (18)$$

$\hat{\sigma}^2$ 의 최소(최적)값은 $k_1 = \sigma_2^2 / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)$ 일 경우 존재하며 이를 식 (18)에 대입하면 다음과 같다.

$$\hat{\sigma}^2 = \hat{\sigma}_{\text{opt}}^2 = \sigma_1^2 \sigma_2^2 / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \quad (19)$$

\hat{v}_1 과 \hat{v}_2 를 고정 벡터로 하였을 경우 각각의 표준편차는 σ_1 과 σ_2 이며, 이를 통해 구한 자세 행렬은 A_1 과 A_2 이다. 이를 식 (16)에 적용하면 다음과 같다[5].

$$\hat{A}' = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} A_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} A_2 \quad (20)$$

실제 두 개의 직교 행렬 조합인 \hat{A}' 는 직교 행렬이지 않지만 거의 직교 행렬에 가깝다. 이를 직교화하기 위한 방법은 다음과 같다[6].

$$\hat{A} = 0.5 [\hat{A}' + (\hat{A}'^{-1})^T] \quad (21)$$

IV. 평균 TRIAD를 이용한 자세 결정

앞에서 보인 최적 TRIAD는 고정 벡터의 분산을 그대로 사용하였으나 정확한 계산을 위해서 식 (14)의 공분산 행렬을 이용해야 한다. 또한 방향 여현 행렬을 식 (16)에 그대로 적용한다면 필요 충분 조건인 직교성을 만족하지 못하므로 다른 형태로의 변환이 필요하다.

자세 행렬의 변환 방법에는 오일러(Euler), 쿼터니언(Quaternions), RP(Rodriguez Parameter), MRP(Modified Rodriguez Parameter) 등이 있다. 쿼터니언은 $q^T q = 1$ 이라는 특성을 고려하여 변환해야 하는 번거로움이 있다. 오일러는 90° , RP는 180° , MRP는 360° 에서 각각 특이점이 발생하는 특성을 가진다. 그러므로 자세각에 따라 적절히 선택하여 적용하면 된다. 본 논문에서는 90° 이내의 자세각 변화의 경우를 가정하였으므로, 오일러 각으로의 변환을 선택하여 적용하였다.

기존의 TRIAD 알고리즘에서 고려하지 않았던 센서의 정확도를 고려하여 각 센서의 분산(σ^2)을 이용하여 가중치를 부여한 최적 TRIAD의 식 (20)의 분산 대신 공분산($P_{\theta\theta}$)을, 그리고 자세 행렬(A) 대신 이를 오일러 각(θ)으로 변환하여 식을 재정리 하면 다음과 같다.

$$\hat{\theta} = P_{\theta\theta_2} [P_{\theta\theta_1} + P_{\theta\theta_2}]^{-1} \theta_1 + P_{\theta\theta_1} [P_{\theta\theta_1} + P_{\theta\theta_2}]^{-1} \theta_2 \quad (22)$$

$$(\theta_1, \theta_2 \in R^{3 \times 1})$$

여기서, $P_{\theta\theta_1}$, $P_{\theta\theta_2}$ 은 각각 \hat{v}_1 , \hat{v}_2 를 고정 벡터로 하였을 경우의 공분산 행렬을, θ_1 과 θ_2 는 각각 \hat{v}_1 , \hat{v}_2 를 고정 벡터로 하였을 경우 추정한 자세 행렬을 오일러 각으로 변환한 것이다.

세 개 이상의 관측 벡터가 주어지면 임의의 두 벡터를 선정하여 자세를 추정해야 한다. 하지만 어떤 관측 벡터를 선정할 것인지에 대한 문제가 존재한다. 그러므로 주어진 벡터를 각각의 경우에 대해 선정하여 방향 여현 행렬들을 구한 후, 정확도에 따른 가중치를 적용하여 해를 구하는 방법을 사용하였다.

평행하지 않는 3개의 벡터가 주어졌을 경우 직교 행렬 A 와 벡터의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$A_{ij}\hat{v}_i = \hat{w}_i \quad A_{ji}\hat{v}_j = \hat{w}_j \quad (23)$$

$$(i, j = 1, \dots, 3) (i \neq j)$$

식 (2)~(5)와 같은 과정을 통해 $i=1, j=2$ 일 경우에 대한 직교 행렬 A_{12}, A_{21} 를 구한 후, 계산 과정에서의 직교성 유지를 위하여 각각의 방향 여현 행렬을 오일러 각 θ_{12}, θ_{21} 로 변환한다. 이를 다시 식 (16)에 대입하면 오일러 벡터 $\hat{\theta}_1$ 를 구할 수 있다. 이와 같이 i, j 값에 따라 나머지 오일러 벡터 $\hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3$ 를 각각 구할 수 있으며, 이 결과를 이용하여 자세 벡터를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\theta} = P_{\theta_2} P_{\theta_3} [P_{\theta_1} P_{\theta_2} + P_{\theta_2} P_{\theta_3} + P_{\theta_3} P_{\theta_1}]^{-1} \hat{\theta}_1$$

$$+ P_{\theta_1} P_{\theta_3} [P_{\theta_1} P_{\theta_2} + P_{\theta_2} P_{\theta_3} + P_{\theta_3} P_{\theta_1}]^{-1} \hat{\theta}_2 \quad (24)$$

$$+ P_{\theta_1} P_{\theta_2} [P_{\theta_1} P_{\theta_2} + P_{\theta_2} P_{\theta_3} + P_{\theta_3} P_{\theta_1}]^{-1} \hat{\theta}_3$$

자세 벡터에서 자세 행렬로 변환하는 방법은 다음과 같다.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\hat{\theta}_1 & s\hat{\theta}_1 \\ 0 & -s\hat{\theta}_1 & c\hat{\theta}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\hat{\theta}_2 & 0 & -s\hat{\theta}_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ s\hat{\theta}_2 & 0 & c\hat{\theta}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\hat{\theta}_3 & s\hat{\theta}_3 & 0 \\ -s\hat{\theta}_3 & c\hat{\theta}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서, c 는 \cos 을 s 는 \sin 이다.

V. 알고리즘 성능 비교

제안된 알고리즘의 성능 검증을 위하여 서로 다른 성능을 가진 센서의 조합 시나리오가 필요하다. 이를 위해 과학기술위성 3호의 센서 배치를 그림 1에 나타냈으며, 센서의 배치 축 방향을 표 1에 정리하였다[7].

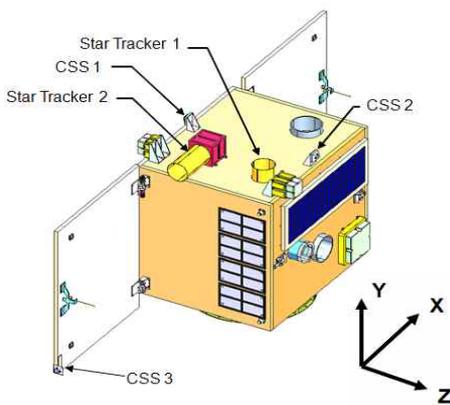


Fig. 1. Sensor Allocation

Table 1. Sensor Allocation upon the axis

Sensor	+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z
Star Tracker 1			O			
Star Tracker 2		O				
Sun Sensor 1						O
Sun Sensor 2					O	
Sun Sensor 3		O				

Table 2. Scenario Analysis

Case	Sensor Accuracy (rad)		
	σ_1	σ_2	σ_3
TRIAD	1	O	X
ATRIAD(2)	2	O	X
ATRIAD(3)	3	O	O

(Number) : Number of observation vectors

과학기술위성 3호의 경우 태양 센서에 비해 별 센서의 정확도가 높으므로 별 센서를 통해 얻은 자세 정보를 이용하면 된다. 하지만 별 센서를 통해 자세 정보를 얻을 수 없는 경우 태양 센서를 이용하여야 한다.

태양 센서만을 이용하여 자세 정보를 얻을 수 있으나 보다 나은 정확도를 가진 자세 정보를 얻기 위해 별 센서와 태양 센서의 조합을 이용하고자 한다. 이와 같은 센서의 조합을 위한 시나리오를 표 2에 정리하였으며, 평균(Averaging) TRIAD는 ATRIAD로 간단히 나타냈다.

여기서 σ_1 은 별 센서의 정확도(8.3776×10^{-5}), σ_2 와 σ_3 는 태양 센서의 정확도(0.0175)를 각각 나타낸다.

경우 1, 2는 별 센서와 태양 센서를 하나씩 이용하여 TRIAD와 ATRIAD 알고리즘에 적용한 것을 나타내며, 경우 3은 별 센서 하나와 태양 센서 2개를 이용하여 ATRIAD 알고리즘에 적용한 것을 나타낸다. 하지만 TRIAD 알고리즘의 경우 정확도에 따른 가중치를 고려하지 않으므로 태양 센서와 별 센서의 평균 정확도를 가진 값이라고 가정하였다.

경우 1~3에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 그림 2~4에 나타냈다.

경우 1~3에 대하여 Roll, Pitch, Yaw축 오차를 비교한 결과, 그 차이를 그래프를 통해 정확히 구분할 수 없었다. 따라서 알고리즘 성능 분석을 위해 동일 조건에서 100번의 시뮬레이션을 수행하였으며, 반복 횟수에 따른 표준 편차의 결과를 그림 5~7에 나타냈다. 또한, 시뮬레이션을 통한 표준 편차의 평균을 각 축에 대해 표 3에 정리하였다.

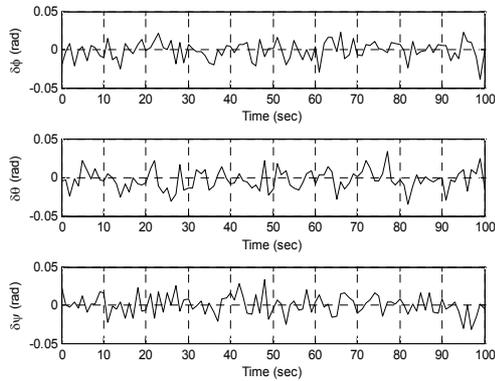


Fig. 2. TRIAD Algorithm Error

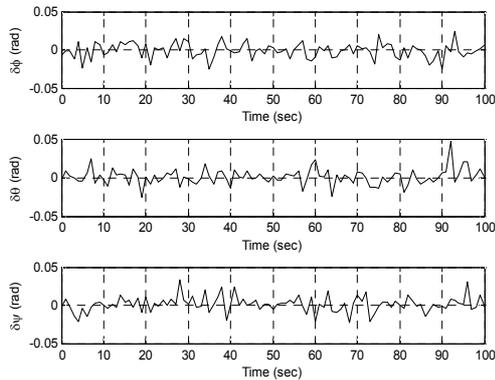


Fig. 3. Averaging TRIAD Algorithm Error (using 2 vectors)

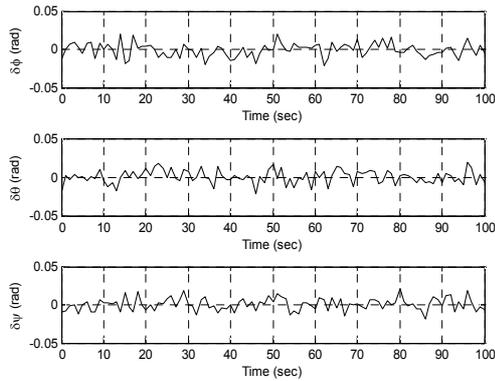


Fig. 4. Averaging TRIAD Algorithm Error (using 3 vectors)

두 개의 측정 벡터가 주어졌을 경우 TRIAD와 ATRIAD의 정확도를 비교하면, ATRIAD의 정확도가 약 17~22% 정도 향상된 것을 알 수 있다.

ATRIAD의 경우, 두 개의 측정 벡터를 이용한 경우와 세 개의 측정 벡터를 이용한 경우의 정확도를 비교하면, 세 개의 측정 벡터를 이용한 경우의 정확도가 약 16~20% 정도 향상된 것을 알 수 있다.

TRIAD의 경우 각각 두 개의 측정 벡터를 이용하여 구한 결과의 평균값과 제안된 ATRIAD의 결과와 비교를 위하여 TRIAD의 평균 정확도를 표 4에 정리하였다.

Table 3. Standard Deviation Comparison

Axis	Method	STD (rad)
Roll	TRIAD	0.0118
	ATRIAD(2)	0.0098
	ATRIAD(3)	0.0088
Pitch	TRIAD	0.0130
	ATRIAD(2)	0.0101
	ATRIAD(3)	0.0085
Yaw	TRIAD	0.0126
	ATRIAD(2)	0.0101
	ATRIAD(3)	0.0081

■ : Minimum standard deviation

Table 4. Average accuracy of TRIAD

	관측 (1,2)	관측 (2,3)	관측 (3,1)	평균
Roll (rad)	0.0177	0.0241	0.0128	0.0182
Pitch (rad)	0.0124	0.0228	0.0115	0.0156
Yaw (rad)	0.0128	0.0251	0.0109	0.0163

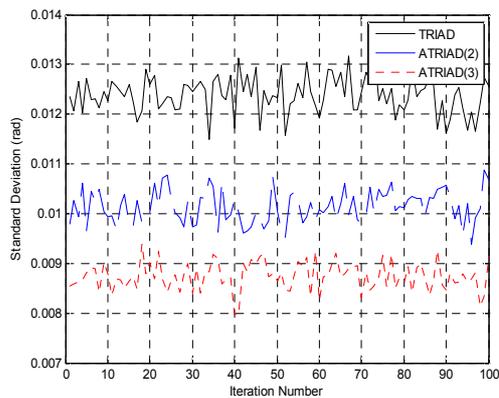


Fig. 5. Standard Deviation (Roll)

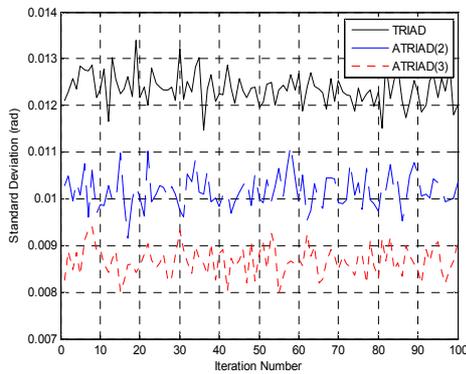


Fig. 6. Standard Deviation (Pitch)

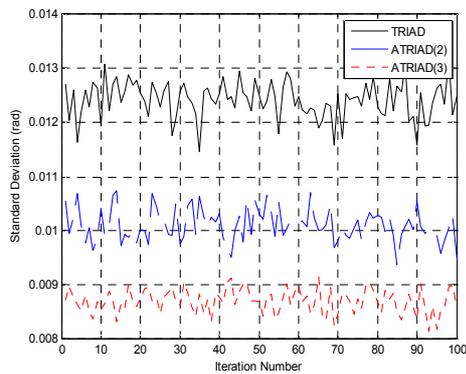


Fig. 7. Standard Deviation (Yaw)

여기서, 관측 (1,2), (2,3), (3,1)는 각 센서의 조합을 말하며, 1은 별 센서, 2와 3은 태양 센서를 말한다.

두 개의 측정 벡터를 각각 이용하여 평균값을 취한 TRIAD의 경우, 성능이 좋지 않은 센서들 (σ_2, σ_3)만의 사용값을 가중치 없이 그대로 이용하기에 성능이 좋은 센서(σ_1)와 좋지 않은 센서 (σ_2 또는 σ_3)만을 이용한 값보다 더 정확도가 더 떨어지는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

인공위성의 자세 결정에 사용되는 TRIAD 알고리즘의 경우 자세 행렬을 구하는데 오직 두 개의 측정 벡터만 이용할 수 있다. 서로 다른 정확도를 가지는 센서의 사용을 위해 가중치를 부여하는 최적 TRIAD 알고리즘이 연구되었다. 하지만 식과 계산의 단순화를 위해 공분산 대신 분산을 적용하였으며, 최소 분산 추정값을 계산하는 과정에 있어 방향 여현 행렬의 직교성을 고려하지 않았다.

본 논문에서는 두 개의 측정 벡터가 주어졌을 경우, TRIAD와 최적 TRIAD 알고리즘의 단점과 문제점을 보완하여 신뢰성을 높였다. 또한 세 개 이상의 측정 벡터가 주어졌을 경우, 주어진 벡터의 조합 가능 경우의 수에 따라 추정된 자세에 가중치를 고려한 평균 접근 방법을 제안하였으며, 수치적으로 성능을 검증하였다. 그 결과 정확도에 따른 가중치를 적용할수록 그리고 측정 벡터의 수가 많을수록 정확도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

과학기술위성 3호의 경우 별 센서를 사용할 수 없는 경우(예, 한 개 고장) 태양 센서만을 이용하여 자세 결정을 해야 한다. 하지만 제안된 평균 TRIAD 알고리즘을 적용한다면 다른 센서(예, 태양 센서)와의 조합을 통해 태양 센서만을 이용한 자세 결정보다 정확한 자세 정보를 얻을 수 있음을 보였다.

향후 최적의 해를 구하는 방법인 QUEST 알고리즘의 결과와 비교할 필요가 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술위성 3호 개발 사업에 의해 진행되었습니다.

참고문헌

- 1) M. D. Shuster and S. D. Oh, "Three-Axis Attitude Determination from Vector Observations", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 4, No. 1, 1981, pp. 70~77
- 2) Lerner, G. M., "Three-Axis Attitude Determination", *Spacecraft Attitude Determination and Control*, edited by J. R. Wertz, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, The Netherlands, 1978, pp. 420~428
- 3) Black, H. D., "A Passive System for Determining the Attitude of a Satellite", *AIAA Journal*, Vol. 2, No. 7, 1964, pp. 1350~1351
- 4) Gelb, A. (ed.), *Applied Optimal Estimation*, MIT Press, Cambridge, MA, 1988, pp. 5~6
- 5) Itzhack Y. Bar-Itzhack and Richard R. Harman, "Optimized TRIAD Algorithm for Attitude Determination", *Journal of Guidance*, Vol. 20, No. 1, 1996, pp. 208~211
- 6) Bar-Itzhack, I. Y., and Meyer, J., "On the Convergence of Iterative Orthogonalization Processes", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-12, No. 2, 1976, pp. 146~151
- 7) 2007, "STSAT-3 SDR", pp. 193~241.