

論文

영상데이터를 이용한 항공기 자세각 추정

박성수*

Attitude Estimation of an Aircraft using Image Data

Sungsu Park*

ABSTRACT

This paper presents the algorithm for attitude determination of an aircraft using binary image. An image feature vector, which is invariant to translation, scale and rotation, is constructed to capture the functional relations between the feature vector and the corresponding aircraft attitude. An iterated least squares method is suggested for estimating the attitude of given aircraft using the constructed feature vector library. Simulation results show that the proposed algorithm yields good estimates of aircraft attitude in most viewing range, although a relatively large error occurs in some limited viewing direction.

Key Words : Attitude Estimation(자세각 추정), Image Feature Vector(영상 특성벡터), Iterated Least Squares(반복최소제곱법), Image Data(영상데이터)

1. 서 론

최근 전투기의 고성능화와 무인화가 진행되면서 급격한 기동이 가능해짐에 따라 호밍미사일의 획기적인 요격성능 향상이 요구되고 있다. 호밍 정밀도를 향상시키려면 표적 항공기의 가속도를 신속하고 정밀하게 추정하는 것이 필요하다. 표적의 가속도를 추정하기 위한 기존의 방법은 표적의 위치정보를 두 번 미분하는 것이다. 미분은 근본적으로 잡음이 증폭되는 프로세서로서 과중한 필터링이 필요하며, 필터링은 표적의 가속도를 추정하는데 있어서 시간지연을 초래한다 [1]. 이러한 시간지연 때문에 유도법칙은 빠르게 기동하는 표적에 맞서 신속하게 대응할 수가 없게 된다.

또 다른 방법은 그림 1과 같이 항공기의 자세

각과 가속도 사이의 강력한 상관관계를 이용하는 것으로서, 항공기의 자세 변화를 측정하여 가속도의 방향과 크기를 시간지연 없이 추정하는 것이다. 문헌에 의하면, 종말단계(terminal guidance)에서 표적 항공기의 자세각을 이용하여 표적 항공기의 가속도를 추정할 경우 미사일의 호밍 정밀도가 크게 향상된다는 사실이 보고되었다 [2,3]. 종말단계에서는 표적에 접근할수록 표적의 영상이 점점 커지므로 영상을 이용한 표적 항공기의 자세각 추정은 대단히 유용한 방법일 수 있다. 하지만 어떤 방법으로 항공기의 자세각을 측정할 수 있는지, 또한 어떤 방법으로 자세각에서 가속도를 추정할 수 있는지에 대한 연구는 부족한 형편이다.

본 논문은 영상데이터를 이용하여 표적 항공기의 자세각을 추정하는 방법에 중점을 두고, 영상데이터를 처리하여 표적 항공기의 자세각을 영상 특성(image feature)벡터의 함수로 표현하고 반복최소제곱추정법을 이용하여 주어진 영상데이터에서 자세각을 추정할 수는 방법을 제안하였다.

2011년 11월 29일 접수 ~ 2011년 12월 14일 심사완료

* 세종대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail : sungsu@sejong.ac.kr

서울시 광진구 군자동 98

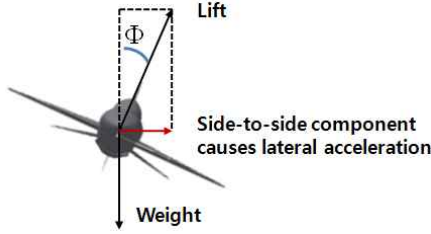


Fig 1. 항공기 자세각과 가속도의 상관관계

II. 자세각 추정

2.1 핀홀 카메라 모델

3차원 항공기가 영상센서를 통해 2차원 영상면에 투영되어 영상데이터로 전환되는 과정은 핀홀 카메라 모델로 근사화 할 수 있다 [4]. 핀홀 카메라 모델의 좌표계는 그림 2에 정의되어 있다. $\{c\}$ 는 카메라좌표계로서 \hat{c}_3 축은 시선축과 일치하고, $\{u,v\}$ 는 영상면에 정의된 좌표계로서 \hat{c}_1, \hat{c}_2 축과 방향이 같다. 영상면은 카메라좌표계의 원점에서 f 만큼 떨어진 곳에 위치한다. 카메라가 캘리브레이션이 되었다고 가정하면 핀홀 카메라 영상면에 투영되는 항공기 표면의 점 $P(X, Y, Z)$ 의 투사점 $P'(u, v)$ 은 아래 식으로 표현된다.

$$(u, v) = \left(fk \frac{X}{Z}, fk \frac{Y}{Z} \right) \quad (1)$$

여기서 f 는 초점거리(meter)이고, k 는 배율(pixel/meters)이다.

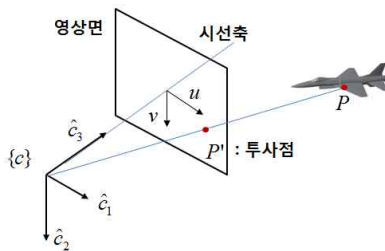


Fig 2. 카메라와 영상면 좌표계

2.2 영상모멘트

항공기의 자세각 정보와 영상데이터 사이의 관계를 수식화하기 위해서는 표적 항공기의 자세

정보를 포함하고 있는 영상 특성벡터(image feature vector)가 필요하다. 영상 특성벡터는 자세각 정보와의 관계를 수식화하기 용이해야 하며 계산하기 쉽고 차원(dimension)이 작아야 한다. 또한 영상 특성벡터는 영상면에서 표적 항공기 영상의 이동, 크기, 회전에 불변해야 한다. 관련 문헌에 의하면, 영상 특성벡터에는 실루엣 푸리에 기술자(silhouette Fourier descriptors) [5], 실루엣모멘트(silhouette moments) [6], 영상모멘트(image moment) [4,7] 등이 있으나, 영상모멘트 방법이 다른 방법에 비하여 배경으로부터 항공기를 분리하고 분리된 영상으로 부터 특성벡터를 쉽게 계산해 낼 수 있으며 영상 잡음에 강인하다는 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 이동, 크기, 회전에 불변인 영상모멘트 방법을 영상 특성벡터로 선정하기로 한다.

2진 영상에 대한 영상모멘트의 정의는 다음과 같다.

$$M_{pq} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_i^p y_j^q f(x_i, y_j) \quad (2)$$

여기서 p 와 q 는 모멘트차수를 뜻하며, m 과 n 은 각각 영상면의 (u, v) 축 픽셀 수를 나타내고, x_i 와 y_j 는 원점으로부터의 픽셀 좌표, $f(x_i, y_j)$ 는 항공기의 영역에 해당하는 부분은 1, 배경은 0으로 표시되는 픽셀 (i, j) 의 weighting 함수이다.

영상모멘트의 정의에 의해서 영상의 면적은

$$M_{00} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) \quad (3)$$

으로 주어지고, 영상의 질량중심은

$$\bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (4)$$

로 계산된다. 영상의 위치 변화에 대해 불변인 중심모멘트는 영상 중심점에서 모멘트를 계산하면 되는데 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\eta_{pq} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^p (y_j - \bar{y})^q f(x_i, y_j) \quad (5)$$

영상의 크기에 불변인 모멘트는 중심모멘트를 영상의 면적이 1이 되도록 정규화(normalization)시키면 된다. 정규 중심모멘트(normalized central moment)는 다음과 같이 주어진다.

$$\mu_{pq} = \frac{\eta_{pq}}{(\sqrt{\eta_{00}})^{p+q+2}} \quad (6)$$

영상의 회전에 불변인 모멘트는 주축(principal axis)에서의 중심모멘트이다. 주축에서의 중심모멘트는 영상의 좌표축을 $\mu_{11} = 0$ 이 될 때까지 회전시켜서 계산한 모멘트이다. 이 때 원래 좌표축에서 주축까지의 회전각은 다음과 같이 주어진다.

$$\delta_m = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \right) \quad (7)$$

위 식으로 주어진 회전각이 주축의 양의 장축(positive major principal axis)까지의 회전각이 될 수 있도록 다음과 같은 제한 조건을 추가한다.

$$\begin{aligned} \mu_{20} &> \mu_{02} \\ \mu_{30} &> 0 \end{aligned} \quad (8)$$

이제 영상의 이동, 크기, 회전에 모두 불변인 영상모멘트는 다음 순서로 계산할 수 있다.

첫째, 중심모멘트를 계산한다.

둘째, 중심모멘트를 정규화 시킨다.

셋째, 좌표축을 δ_m 만큼 회전시켜 정규 중심모멘트를 다시 계산한다.

2.3 영상 특성벡터

선정된 영상 특성벡터와 표적 항공기의 자세 각 정보의 관계를 구체화하기 위하여 그림 3과 같이 표적을 단위길이의 원구(sphere) 중심에 두고, 원구 주위에 다수의 관측지점(view point)을 선정하여 각 관측지점에서 얻어진 영상 데이터를 처리하여 영상 특성벡터 라이브러리를 구축한다. 영상 특성벡터 라이브러리는 표적의 종류마다 다르기 때문에 대상 표적마다 달리 구축하여야 한다. 이러한 과정을 통하여 표적 항공기를 식별할 수 있는 정보가 영상 특성벡터에 포함됨은 물론이다. 하지만, 본 논문에서는 표적 항공기의 자세 각을 추정하는 방법에 중점을 두고 있기 때문에, 표적기를 식별하기 위한 연구는 제외한다.

일반적으로 항공기는 좌우대칭 형상이기 때문에 3차원 형상을 2차원 형상인 2진 영상으로 바꾸는 과정에서 영상모호성(image ambiguity)이 발생한다.

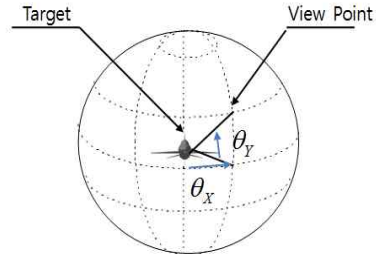


Fig 3. 원구와 관측지점

영상모호성은 서로 다른 표적 항공기의 자세 각에서 동일한 영상 특성벡터값이 얻어지는 현상이다. 따라서 영상 특성벡터 라이브러리는 그림 3에 표시된 바와 같이 azimuth각의 범위는 $0 \leq \theta_x \leq 360^\circ$ 로, elevation각은 $0 \leq \theta_y \leq 90^\circ$ 로 한정하여 구축해도 무방하다.

3차원 형상의 표적 항공기는 관측지점에 따라 다른 모습을 나타내므로 영상 특성벡터 z 는 관측지점의 위치를 나타내는 각도 θ_x, θ_y 의 함수가 된다.

$$z = g_1(\theta_x, \theta_y) \quad (9)$$

주축까지의 회전각 δ_{mlib} 은 관측지점마다 유일하게 정해지므로 역시 각도 θ_x, θ_y 의 함수가 된다.

$$\delta_{mlib} = g_2(\theta_x, \theta_y) \quad (10)$$

그림 4는 각각의 관측지점에서 본 표적 항공기의 모습을 예시한 것이고, 그림 5는 영상 모멘트의 일부와 주축까지의 회전각을 각도 θ_x 와 θ_y 의 함수로 도시한 것이다.



Fig 4. 관측지점에 따른 항공기 모습

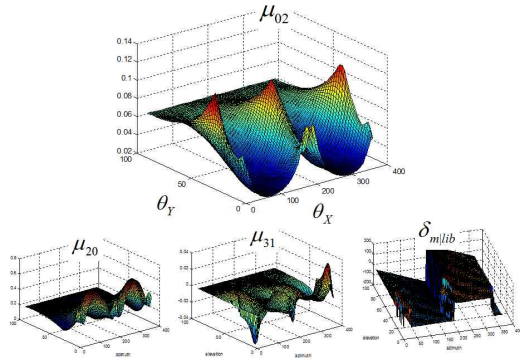


Fig 5. 영상 모멘트의 예

2.4 측정방정식

3차원 형상의 항공기는 관측지점뿐 만 아니라 영상 센서와 항공기의 상대적인 자세각에 따라 관측되는 형상이 다르다. 따라서 영상 특성벡터 라이브러리에서 관측지점에 따른 항공기의 자세와, 항법좌표계에 대한 항공기의 자세와의 상관 관계를 파악하는 것이 중요하다.

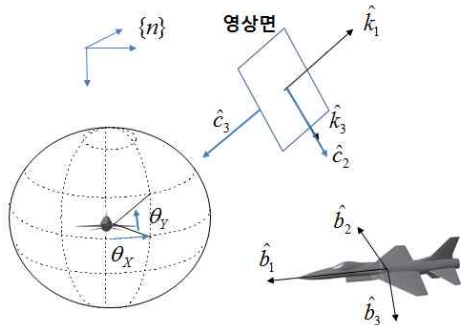


Fig 6. 좌표계간의 상관관계

먼저 그림 6과 같이 항법좌표계 $\{n\}$, 항공기 동체좌표계 $\{b\}$, 영상센서좌표계 $\{c\}$, 그리고 중간좌표계 $\{k\}$ 를 가정한다. 항공기좌표계 $\{b\}$ 는 항공기 질량중심에 원점이 위치하며 \hat{b}_1 축은 전방, \hat{b}_2 축은 오른쪽 날개 방향인 직교좌표계이다. 중간좌표계는 계산상의 편의를 위해 도입한 가상의 좌표계로서 카메라좌표계와의 DCM (Direction Cosine Matrix)은 다음과 같다.

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

표적 항공기좌표계에서 중간좌표계까지의 DCM C_k^b 는 $(-\theta_{x_y}, -\theta_{y_z}, -\theta_{z_x})$ 의 3-2-1 Euler 회전으로 주어진다. 여기서 θ_{z_x} 는 카메라 시선축을 중심으로 하는 회전각이다. 항공기좌표계에서 관측지점을 바라보는 카메라좌표계까지의 DCM C_c^b 는 다음과 같다.

$$C_c^b = C_k^b C_c^k \quad (12)$$

만약 항법좌표계에서 카메라좌표계로의 DCM C_c^m 와 항공기좌표계에서 카메라좌표계로의 DCM C_b^m 을 안다고 가정한다면, 항법좌표계에서 항공기좌표계로의 DCM C_b^n 는 다음 식을 통해 계산할 수 있다.

$$C_b^n = C_c^m (C_c^b)^T \quad (13)$$

C_c^m 는 미사일에 장착된 항법장치를 통해 알 수 있고, C_c^b 는 영상데이터를 처리하여 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 를 추정하면 얻을 수 있다. 항법좌표계에서 항공기좌표계로의 변환은 (ψ, θ, ϕ) 의 3-2-1 오일러각으로 주어지므로, 식 (13)의 C_b^n 로부터 항공기의 자세각을 추정할 수 있다. 따라서 영상 특성벡터 라이브러리에서의 자세각 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 와 항공기 자세각 (ϕ, θ, ψ) 은 다음과 같은 함수관계로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} = h(\phi, \theta, \psi) \quad (14)$$

2.5 자세각 추정 알고리즘

표적 항공기의 자세추정 문제는 주어진 영상 데이터로부터 영상 특성벡터를 계산한 후 영상 특성벡터 라이브러리에서 해당하는 θ_x, θ_y 를 추출하는 문제이다. 라이브러리 구축은 관측지점의 위치각 θ_x, θ_y 로부터 n 차원의 영상 특성벡터를 계산하는 매핑 $F: R^2 \rightarrow R^n$ 이라고 한다면, 자세추정 문제는 주어진 특성벡터로부터 위치각 θ_x, θ_y 을 계산하는 역매핑 $G: R^n \rightarrow R^2$ 이라고 볼 수 있

다.

영상잡음, 영상 전처리 과정의 오류, 관측거리에 따른 영상 스케일 변화로 인한 영상 모멘트 계산오차 등을 감안하여 식 (9)의 영상 특성벡터 식은 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$z = g_1(\theta_x, \theta_y) + v_1 \quad (15)$$

여기서 v_1 은 영상 특성벡터와 자세각사이의 모델링 오차이다. 영상면 시선축을 중심으로 한 회전각 θ_z 는 주어진 영상데이터로부터 계산된 주축 회전각 δ_{meas} 과 라이브러리에 저장된 주축까지의 회전각 δ_{mlib} 과의 차이로 계산할 수 있다.

$$\theta_z = \delta_{meas} - \delta_{mlib}(\theta_x, \theta_y) + v_2 \quad (16)$$

여기서 v_2 는 주축 회전각 사이의 모델링 오차이다.

주어진 영상데이터로부터 위치각을 추정하기 위하여 본 논문에서는 반복최소제곱추정법 (Iterated Least Squares Estimation)을 이용하였다. 위치각 추정은 다음 식으로 주어진다.

$$\hat{\theta}_{j+1} = \hat{\theta}_j + (J_j^T J_j)^{-1} J_j^T (z - g_1(\hat{\theta}_j)) \quad (17)$$

여기서

$$J_j = \left(\frac{\partial g_1(\theta)}{\partial \theta} \right)_{\theta = \hat{\theta}_j}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix}$$

이고, j 는 반복회수이며 위치각이 수렴할 때까지 반복한다. 한편, θ_z 의 추정값은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\hat{\theta}_z = \delta_{meas} - \delta_{mlib}(\hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y) \quad (18)$$

III. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 항공기의 자세각 추정방법의 성능을 검증하기 위하여 F-16 항공기를 표적 항공기 (target aircraft)로 선정하고 영상 특성벡터 라이브러리를 구축하였다. F-16 모델은 CAD 소프트웨어를 사용하여 생성하였다.

라이브러리는 azimuth각과 elevation각을 각각 2° 간격으로 분할하여 총 8100개의 관측지점을 선정하고, 각 관측지점에서 960×600 픽셀 영상을 이진화한 후, 영상의 이동, 크기, 회전에 불변인

정규 중심모멘트를 4차승까지 계산하여 구축하였다. 또한 각 관측지점에서 영상의 주축까지의 회전각 계산하여 따로 저장하였다. 주축까지의 회전각은 영상면의 시선축을 중심으로 한 회전각을 추정하는데 사용된다.

카메라는 지상에 고정되어 있다고 가정하여 관측지점의 자세각 ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)만 추정하였다. 영상 특성벡터 z 는 $\mu_{02}, \mu_{20}, \mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{03}, \mu_{30}, \mu_{13}, \mu_{31}$ 등 총 8개의 요소를 갖는다.

시뮬레이션에서는 영상잡음 효과를 고려하기 위하여 항공기 영상에 가우시안(Gaussian) 잡음을 첨가하였고, 영상처리시 가우시안 스무딩 필터링을 통하여 영상잡음을 제거한 후, 2진 영상으로 변환하였다. 그림 7은 원본 영상과 잡음이 첨가된 영상, 그리고 필터링된 영상 및 2진화 영상의 예를 보여준다.

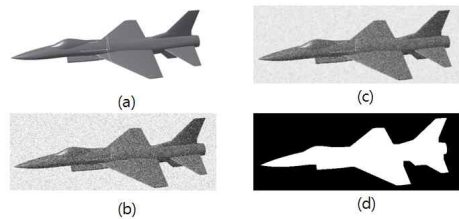


Fig 7. (a) 원본 영상; (b) 잡음첨가 영상; (c) 필터링 영상; (d) 2진 영상

영상잡음을 제외하고는 영상분할과 같은 전처리과정에서 발생할 수 있는 오류는 고려하지 않았으며 영상모호성을 배제시키고, azimuth각 $0 \leq \theta_x \leq 360^\circ$, elevation각 $0 \leq \theta_y \leq 90^\circ$ 의 범위에서 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 영상센서에서 표적 항공기까지의 거리에 따른 효과를 고려하기 위하여 1/2과 1/10등 두 가지 스케일에 대해서 시뮬레이션을 반복하였다. 기준영상과 스케일 1/2, 1/10의 2진 영상의 예는 그림 8에 있다.

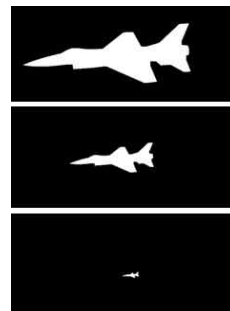


Fig 8. 기준영상과 1/2, 1/10 스케일 영상

그림 9는 스케일 팩터 1/2에 대해서 관측지점에 따른 항공기의 azimuth각, elevation각과 영상면 시선축을 중심으로 한 회전각(θ_z)의 추정오차를 보여주고 있다. 그림에서 x-축은 관측지점의 azimuth각(θ_x), y-축은 elevation각(θ_y)이며 추정오차의 크기는 파란색으로 표시하였다(colormap 참조). 색깔이 진할수록 추정오차가 큰 것을 의미하며, 빨간색은 추정오차의 크기가 5도 이상임을 의미한다. 대부분의 영역에서 추정오차가 평균 0.17도로서 매우 작으나, elevation각이 15도 이하와 80도 이상의 영역과 azimuth각이 0도, 180도, 360도에 가까운 대부분 영역에서는 추정오차가 5도 이상으로 매우 큼을 보여주고 있다. 이는 이 영역에서 관측지점의 변화에 따른 특성벡터의 변화가 매우 작거나, 또는 특성벡터의 변화가 불규칙하게 커서 반복최소제곱추정법의 자코비안 계산에 영향을 미쳤기 때문이다.

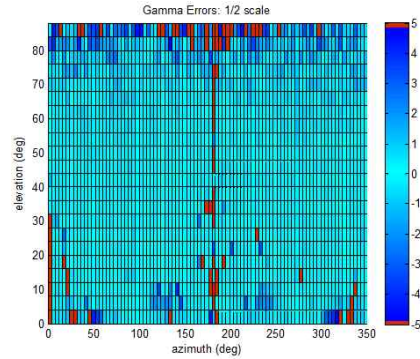
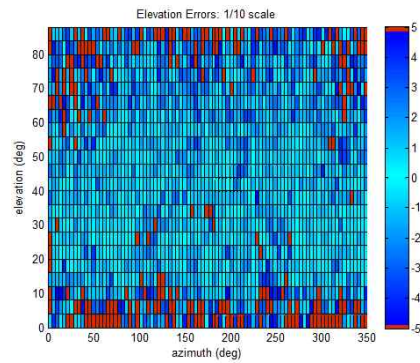
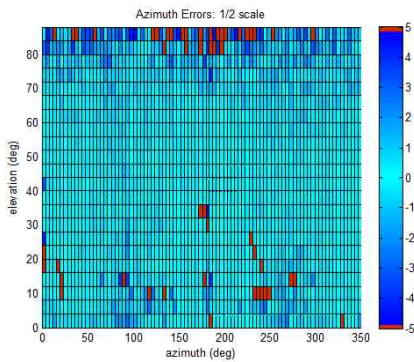
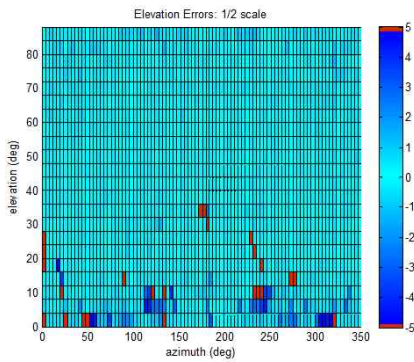


Fig 9. 자세각 추정오차 맵: 1/2 스케일

그림 10은 스케일 팩터 1/10에 대해서 관측지점에 따른 항공기의 azimuth각과 elevation각의 추정오차를 보여주고 있다. 그림 9와 동일한 경향을 보이고 있으나 전체적으로 추정오차가 커짐을 알 수 있다. 대부분의 영역에서는 추정오차가 평균 0.47도이고 elevation각이 15도 이하와 75도 이상인 전 영역과 azimuth각이 0도, 180도, 360도에 가까운 대부분 영역에서는 추정오차가 5도 이상으로 매우 큼을 보여주고 있다. 항공기 영상이 매우 작으므로 작은 항공기의 자세 변화에 대해서 관측지점에 따라 특성벡터가 매우 둔감하거나 또는 매우 민감하게 변하기 때문이다.

다양한 스케일 팩터의 변화에 따른 azimuth각과 elevation각의 추정오차 크기의 추세를 파악한다면, 영상잡음과 가시거리에 따른 특성벡터의 관측오차를 정량적으로 모델링할 수 있을 것이다.



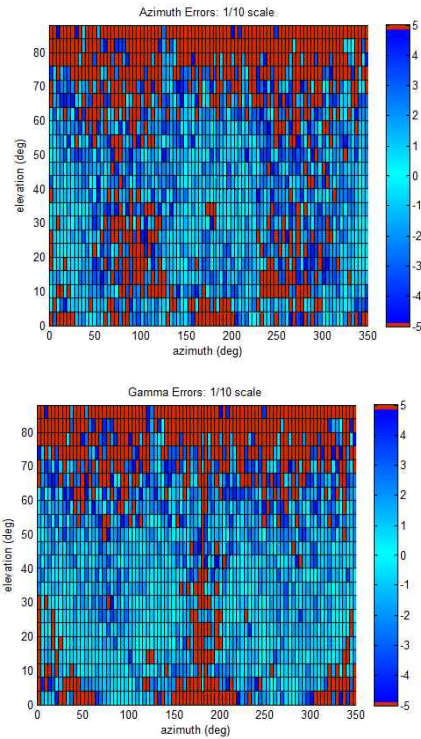


Fig 10. 자세각 추정오차 맵: 1/10 스케일

IV. 결 론

본 논문에서는 항공기의 자세각을 영상 특성 (image feature) 벡터의 함수로 표현하고, 주어진 영상데이터에서 표적 항공기의 자세각을 반복최소제곱추정법을 이용하여 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 특정 영역을 제외한 대부분의 관측 영역에서 항공기의 자세각을 정확하게 추정할 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 항공기의 궤적정보를 고려하지 않았으나, 영상데이터를 이용한 자세정보와 기존의 레이다 측정데이터를 이용한 궤적(trajjectory) 정보를 공간적/시간적으로 융합한다면, 항공기의 자세각을 좀 더 정확하게 추정할 수 있을 뿐 아니라, 표적 항공기의 가속도를 신속 정확하게 추정할 수 있을 것으로 보인다. 물론 이러한 융합 필터를 설계하기 위해서는 필터의 시스템방정식은 기존의 질점모델을 바탕으로 한 방정식과는 달리, 항공기의 자세정보가 포함된 강체모델에 기반한 방정식을 필요로 할 것이므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(KRF-2007-331-D00084).

참고문헌

- [1] 김정환, 박근범, 송용규, 황익호, 최동균, "사전 정보가 없는 비행체의 정밀 파라미터 추정", 항공운항학회논문지 제18권 제3호, 2010, pp.21~26.
- [2] Andrisani, D., Kuhl, F., and Gleason, D., "A Nonlinear Tracker using Attitude Measurements", *IEEE Tran. Aerospace and Electron.*, Vol.22, No.5, Sep. 1986, pp.533~539.
- [3] Sworder, D., Boyd, J., and Clapp, G., "Imahe Fusion for Tracking Maneuvering Targets", *Int. Journal of Systems Science*, Vol. 28, Jan. 1997, pp.1~14.
- [4] Giordano P., Luca, A., and Oriolo, G., "3D Structure Identification from Image Moments", *IEEE Int. Conf. Robotics and Auomation*, May.19-23, 2008, pp.93~100.
- [5] Reeves, A., Prokop, R., Andrews, S., and Kuhl, F., "Three-Dimensional Shape Analysis Using Moments and Fourier Descriptors", *IEEE Tran. Pattern Anal. and Machine Intell.*, Vol.10, No.6, Nov. 1988, pp.937~943.
- [6] Wallace, T., and Wintz, P., "An Efficient Three-Dimensional Aircraft Recognition Algorithm Using Normalized Fourier Descriptors", *Computer Graphics and Image Proc.*, Vol.13, Sep. 1980, pp.99~126.
- [7] Dudani S., Breeding, K., and McGhee, R., "Aircraft Identification by Moment Invariants", *IEEE Tran. Computers.*, Vol.26, No.1, Jan. 1977, pp.39~46.