

가관측성 향상을 통한 수동소나체계의 표적기동 분석

Target Motion Analysis for a Passive Sonar System with Observability Enhancing

한 태 곤*, 송 택 렬*
(Tae Gon Han*, Taek Lyul Song*)

* 이 연구는 서울대학교 수중음향특화연구센터의 지원을 받아 수행했습니다.

요 약

이 논문은 측정잡음이 큰 수동소나체계의 각도정보만을 이용한 표적기동분석(TMA ; Target Motion Analysis) 기법 연구의 일환으로서 표적의 상태변수를 추정하는 순차적 추정자로 수정이득확장칼만필터(MGEKF : Modified Gain Extended Kalman Filter)를 사용하며, 이 MGEKF의 초기화를 위해 비선형 batch estimation 알고리즘을 제안한다. 수동표적추적 시스템의 가관측성(observability) 해석을 바탕으로 시스템의 가관측성의 향상을 통해 TMA 성능을 개선시킬 수 있는 관측자의 기동을 결정하는 실용적이면서도 효과적인 방법을 제안한다. 또한 가관측성 확보가 어려운 초기단계의 TMA를 위해 관측자의 진행방향과 표적의 각도정보와 같은 기하학적 자료와 시스템의 가관측성과의 관계를 나타내는 engagement boundary를 산출하여 가관측성이 큰 기하학적 관계를 갖는 위치로 관측자를 선기동(pre-maneuver) 시키는 방법도 제시한다. 제시하는 TMA 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 입증한다.

ABSTRACT

As a part of target motion analysis(TMA) with highly noisy bearings-only measurements from a passive sonar system, a nonlinear batch estimator is proposed to provide the initial estimates to a sequential estimator called the modified gain extended Kalman filter(MGEKF). Based on the system observability analysis of passive target tracking, a practical and effective method is suggested to determine the observer maneuvers for improved TMA performance through system observability enhancing. Also suggested is a method to determine observer location for enhanced system observability at the initial phase of TMA from various engagement boundaries which represent the relationship between observer-target relative geometrical data and system observability. The proposed TMA methods are tested by a series of computer simulation runs.

I. 서 론

수동소나체계와 같이 각도정보만을 측정하는 센서를 통해 표적의 위치와 속도를 추정하는 표적기동분석(TMA)에는 관측자의 기동을 통해 가관측성을 향상시키며 표적의 위치, 속도와 같은 상태변수의 추정에 사용되는 필터의 안정성과 수렴성 등의 성능향상을 위해 시스템의 가관측성 해석이 선행되어야 하며 기존의 문헌에 많은 연구 결과가 제시되었다 [1~5]. [1, 2]에서는 가관측성 판별행렬이 nonsingular가 되어야 가관측성이 확보된다는 것을 이용하여 반복적인 시간미분을 통해 가관측성의 조건을 제시했으며 [3]은 [1, 2]의 결과가 가관측성을 확보하기 위한

필요조건임을 보였다. [3]의 결과는 표적과 관측자의 상대위치를 시간 t 의 N 차 다항식으로 표현할 수 있는 경우에 대해 시스템 가관측성 확보를 위한 필요충분조건을 제시했으며 N 차의 다항식으로 표현할 수 없는 경우에도 적용 가능한 가관측성 해석 결과는 [4]에 발표되었다. [5]에서는 표적의 각도정보 외에 주파수 신호를 추가로 측정할 수 있는 경우에 대해서 해석 결과를 제시했다. 그러나 이러한 해석 결과는 직교좌표계에서 정의된 시스템 상태변수를 이용함으로써 가관측성과 상태변수와의 직접적인 관계가 결여되어 있어서 제시한 조건들이 성립하지 않으면 어떤 상태변수의 가관측성이 결여되는지 알 수 없어서 관측자의 기동을 통한 가관측성 향상에 어려움이 있게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 [7]에서는 변형 극좌표계(Modified Polar Coordinates) [6]를 사용하여 가관측성과 상태변수의 직접적인 관계를 알 수 있는 충분

* 한양대학교 제어계측공학과
접수일자: 1999년 1월 6일

조건을 도출하였다.

TMA에서는 이러한 가관측성에 대한 해석을 바탕으로 조류, 수온, 심도 등의 해양환경과 표적과 수동소나체계의 기하학적 관계에 따라 크기가 변화하는 측정잡음의 공분산을 고려하며, 큰 잡음이 실린 표적의 각도정보로부터 표적의 위치와 속도를 추정할 수 있는 순차적 추정자(sequential estimator)인 비선형 필터가 필요하다. 이러한 필터의 후보로서 확장칼만필터(Extended Kalman Filter ; EKF)[8]를 고려할 수 있으나 비선형 시스템을 선형화하는 과정에서 1차의 도함수만을 사용하는 시험적인 필터 구조를 갖고 있기 때문에 엄정한 수학적 기반이 결여되어 있어서 필터의 출력인 상태변수 추정치의 수렴성과 안정성 등의 성능에 대한 신뢰도가 낮은 실정이며 가끔 예측치 못한 발산현상을 보이는 단점이 있다 [9]. 이러한 EKF의 단점을 보완하기 위해 [9]에서는 상태변수의 비선형함수로 표현되는 각도측정치를 삼각함수를 이용하여 상태변수의 의사선형 구조(Pseudo-linear structure)를 갖는 의사측정치(pseudomeasurement)를 이용한 의사측정필터(Pseudomeasurement Filter ; PMF)를 고안했다. 그러나 PMF는 안정한 추정치를 출력하나 추정치에 바이어스가 실리는 수렴성의 문제점이 발견되었고 바이어스의 원인은 PMF의 필터이득과 잔차(residual)가 모두 측정잡음이 실린 현재의 각도측정치의 함수이기 때문에 확률적인 상관관계(correlation)가 존재하기 때문으로 규명되었다[10]. 이러한 PMF의 단점을 보완하기 위해 각도측정치를 표현하는 비선형함수가 'modifiable' 이라 규정된 총체적인 선형화(universal linearization)가 가능한 특수한 비선형함수의 일종으로 정의하여 추정치의 안정성과 수렴성을 개선시킨 수정이득확장칼만필터(Modified Gain EKF ; MGEKF)가 [11]에 발표되었다. 이 MGEKF는 필터이득과 잔차의 상관관계를 감소시키기 위해 필터이득을 현재의 측정치와 확률적으로 독립적인 과거의 측정치들의 함수가 되도록 고안되었다. MGEKF의 안정도 해석은 [11]에 수록되어 있다. [12]에서는 MGEKF를 수동소나를 이용한 TMA에 적용하여 바이어스가 실리지 않는 표적상태변수를 추정하는데 사용했다.

이 논문에서는 각도정보만을 이용한 수동표적추적 시스템에서 추정치의 안정성과 수렴성이 우수한 MGEKF를 추정자로 이용하고 시스템의 가관측성을 향상시켜 TMA 성능을 개선시킬 수 있는 관측자의 기동을 결정하는 실용적이면서도 효과적인 방법을 제안한다. MGEKF의 초기화를 위해 일정시간동안 측정치를 모은 뒤 최소자승오차(LSE ; Least Squares Error) 방법을 사용하여 초기치를 추정하는 비선형 batch estimation 알고리즘을 사용하며 이 알고리즘은 사용자의 개입이 없이도 자동적으로 초기추정치들을 제공하도록 고안되었다. 이 논문에서 고려하는 측정잡음은 공분산이 크기 때문에 저역통과필터(Low-Pass Filter)를 사용한 전처리 과정을 통해 공분산을 감소시킨다. 이 논문에서 선택한 시스템 가관측성 향상방안은 관측자의 현재 진행방향을 기준으로 변침할 수 있는 4개의 방향을 미리 정하고 각각의 방향으로 관측자가 변침할 경우에 예측되는 가관측성의 지수들을 계산하여 가장 가관측성이

큰 방향으로 변침하는 것이다. 이러한 방안은 가관측성을 극대화시키는 최적의 관측자 기동형태를 얻는 기존의 방법 [15, 16]들을 실시간으로 적용할 수 없다는 점을 고려할 때 실용적인 대안이 될 것이다. 또한 가관측성의 확보가 어려운 TMA의 초기단계에서 만족스러운 성능을 얻기 위해 관측자의 진행방향과 표적의 각도정보와 같은 기하학적 자료와 시스템 가관측성의 관계를 나타내는 engagement boundary를 산출하여 TMA를 시작하기 전에 가관측성이 큰 기하학적인 관계를 갖는 위치로 관측자를 선기동시키는 방법도 제시한다. 끝으로 제시하는 TMA 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 입증한다.

II. 표적기동분석

2.1 시스템 모델

수동소나체계를 통해 얻어진 표적의 각도측정치를 이용하여 표적의 위치와 속도를 추정하는 표적기동분석(TMA)을 위해서 표적추적 시스템의 동력학을 2차원 평면상에서 기술하는 시스템 모델이 필요하다. 이 시스템 모델은 표적과 관측자의 상대위치와 상대속도, 표적의 가속도를 상태변수로 가지며 표적의 각도정보가 측정치가 된다. 직교좌표계를 사용하여 표적과 관측자의 기하학적 관계를 도식한 것이 그림 1이다.

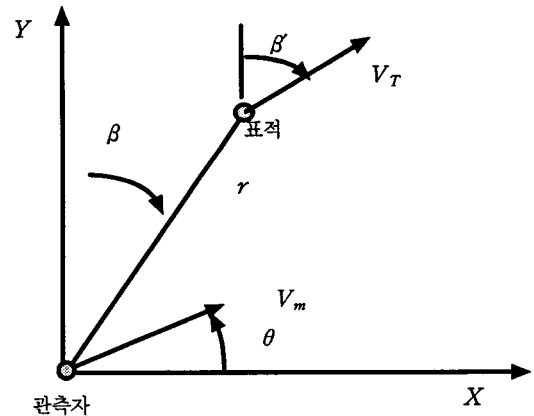


그림 1. 표적과 관측자의 기하학적 관계
Fig. 1. Target-observer engagement geometry.

이러한 직교좌표계를 사용할 경우에 표적과 관측자의 상대위치, 상대속도와 표적의 가속도를 X축과 Y축 성분으로 분리하여 기술할 수 있으므로 6개의 상태변수로서 시스템 동력학을 기술할 수 있고 시스템의 입력은 관측자의 가속도가 된다. 표적의 각도정보는 상태변수의 비선형함수가 됨을 알 수 있다. 시스템 동력학을 수식으로 나타내면 다음과 같다 [1, 7].

$$\dot{x} = Ax + BA_m \tag{1}$$

여기서 상태벡터 $x = (PVA_T)^T = (X, Y, \dot{X}, \dot{Y}, A_{Tx}, A_{Ty})^T$ 이며 시스템 행렬 A 와 B 는 다음과 같이 표현된다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ -I_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

식(1)에서 A_T 는 일정하다고 가정했으며 A_m 은 관측자 즉, 수동센서의 가속도를 나타내며 변침을 할 경우의 특정시간 동안만 일정한 각속도 w 를 가지고 기동을 한다고 가정하였으며 관측자의 초기 방향각은 θ_0 로 보았다. 따라서 A_m 은 아래 식을 만족한다.

$$A_m = \begin{pmatrix} A_{mx} \\ A_{my} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -V_m w \cos(\theta_0 + w(t-t_m)) \\ V_m w \sin(\theta_0 + w(t-t_m)) \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서 t_m 는 관측자가 변침을 하는 특정 시간을 나타내고 있으며 w 는 관측자의 침로각 θ 를 증가시킬 때 '+'부호를 갖는다고 정의된다. 그림 1에서의 각도측정치는 잠음환경하에서

$$z(t_i) = \tan^{-1} \frac{X(t_i)}{Y(t_i)} + v(t_i) \quad (4)$$

로 표현되며 이 증에서 잡음이 섞이지 않은 순수한 표적 방위각 β 는

$$\beta(t_i) \triangleq \tan^{-1} \frac{X(t_i)}{Y(t_i)} = h(x(t_i)) \quad (5)$$

으로 정의되며 측정잡음 $v(t_i)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 백색 가우시안으로 가정한다.

식(1)의 시스템 동력학의 해는 아래와 같다.

$$x(t) = \Phi(t-t_0)x(t_0) + \sum_{i=1}^n \left(\int_{t_m}^{t_m'} \Phi(t-\sigma)BA_m(\sigma)d\sigma \right) \quad (6)$$

여기서 $x(t_0)$ 는 $x(t)$ 의 초기치를 나타내고 상태변수 천 이행렬 $\Phi(t-t_0)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi(t-t_0) = \begin{pmatrix} I_2 & (t-t_0)I_2 & \frac{1}{2}(t-t_0)^2 I_2 \\ 0 & I_2 & (t-t_0)I_2 \\ 0 & 0 & I_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

또한 식(6)의 n 은 현재시간 t 까지의 관측자의 변침 횟수를 나타내고 있으며, t_{m_1} 부터 t_{m_n} 까지 일정한 각속도

w 로 변침한다고 가정하였다. 각도정보만을 이용한 표적 추적 시스템의 가관측성 해석 [1~4] 결과로 관측자가 변침을 통해 가속도 성분을 가져야 시스템의 가관측성을 확보할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 변침을 할 경우에 소나체제를 둘러싼 주변환경의 변화로 인해 측정잡음이 크게 실릴 가능성도 있으며, 특히 예인을 필요로 하는 배열형 소나일 경우는 변침시 측정잡음이 큰 것으로 알려져 있다. 이 논문에서는 관측자의 지속적인 변침은 가관측성의 향상을 가져올 수 있으나 측정오차가 커지는 단점이 있으므로 관측자는 짧은 시간동안 변침을 수행한 후 변침없이 직선으로 운동한다고 가정했으며 그림 2는 이러한 경우의 표적과 관측자의 기동모델을 도시한 것이다.

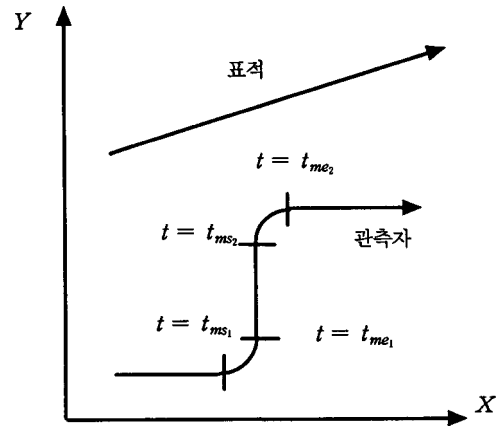


그림 2. 표적과 관측자의 기동 형태
Fig. 2. Maneuver patterns for target and observer.

2.2 MGEKF 초기화

이 논문에서는 표적의 상태변수를 추정하기 위한 순차적 추정자로 수정이득확장칼만필터(MGEKF; Modified Gain Extended Kalman Filter)를 선택했으며 이 MGEKF는 각도정보만을 이용한 표적추적 시스템에 사용될 경우에 확장칼만필터(EKF)나 의사추정필터(PMF)에 비해 추정치의 안정성과 수렴성이 우수한 것으로 알려져 있다 [11, 12]. MGEKF의 안정도 해석 [11] 결과로 알 수 있듯이 시험적 필터이며 가끔 예측치 못한 이유로 발산하는 성향 [9]을 가지는 EKF에 비해 MGEKF의 수렴영역은 클 것으로 예상되지만 수렴영역 외부에 존재하는 추정치를 초기치로 선택할 경우 발산이 예상된다. 따라서 MGEKF의 수렴성을 보장하며 수렴속도를 증가시키기 위해 적절한 초기추정치 선택하는 것이 중요하다. 이를 위해 최소자승오차(LSE) 방법을 이용한 batch estimator를 사용한다. 식(1), (4)와 (5)로 표현되는 비선형 시스템일 경우 LSE 방법은 반복적인 계산에 의해 초기추정치를 찾아야 하며 이 논문의 batch estimator는 최소화시켜야 할 성능지수함수 J 를 식(8)과 같이 정하고 이를 최소화하는 초기치 $x(t_0)$

를 구하는 반복적인 알고리즘으로 구성된다.

$$J = \sum_1^k (z(t_i) - h(t_i, x(t_0)))^T (z(t_i) - h(x(t_i))) \quad (8)$$

J를 최소화하는 $\hat{x}(t_0)$ 는 J를 $x(t_0)$ 에 대해 편미분을 취하여 이를 zero row vector로 두면

$$\sum_1^k (z(t_i) - h(t_i, x(t_0)))^T \left(\frac{\partial h}{\partial x(t_i)} \right) \left(\frac{\partial x(t_i)}{\partial x(t_0)} \right) = 0 \quad (9)$$

가 되고 이를 만족하는 $x(t_0)$ 를 Newton Raphson 방법 [14]으로 구한다. 식(9)에서 $\partial x(t_i)/\partial x(t_0)$ 는 식(6)으로부터 천이행렬 $\Phi(t_i - t_0)$ 임을 알 수 있다. Newton Raphson 방법으로 $\hat{x}(t_0)$ 를 반복적인 수치해로 구하면 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x}^{k+1}(t_0) &= \hat{x}^k(t_0) + \\ &\left[\sum_{i=0}^k \left(\frac{\partial h(x(t_i))}{\partial x(t_i)} \frac{\partial x(t_i)}{\partial x(t_0)} \right)^T \left(\frac{\partial h(x(t_i))}{\partial x(t_i)} \frac{\partial x(t_i)}{\partial x(t_0)} \right) \right]^{-1} \Bigg|_{x(t_0) = x^k(t_0)} \\ &\cdot \left[\sum_{i=0}^k \left(\frac{\partial h(x(t_i))}{\partial x(t_i)} \frac{\partial x(t_i)}{\partial x(t_0)} \right)^T (z(t_i) - h(x(t_i))) \right] \Bigg|_{x(t_0) = x^k(t_0)} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\hat{x}^k(t_0)$ 는 k번째 반복계산 수행 시 얻어진 $x(t_0)$ 의 추정치를 나타낸다. 식(10)에서 알 수 있듯이 수식 오른쪽의 역행렬의 존재유무는 시스템 가관측성의 유무를 나타내고 시스템의 가관측성이 존재할 경우에만 이 batch estimation 알고리즘은 수렴한다. 따라서 초기치를 추정하기 위해서 추정치를 수집하는 기간 내에 관측자가 변침해야함은 필수적이다. 변침에 의한 leg와 길이는 수동센서의 측정치에 실린 잡음의 분산의 크기, 필터 알고리즘의 측정쇄신주기등에 따라 정해져야 한다. 또한 식(10)의 비선형 batch estimator 알고리즘을 시작하기 위해서는 반복계산의 초기치 $\hat{x}^0(t_0)$ 가 필요하며 알고리즘이 발산할 경우에 운용자가 다른 값을 재입력해야 하는 불편이 있다. 이 논문에서는 MGEKF의 추정치를 수렴하는 batch estimation 알고리즘으로부터 얻기 위해 batch estimator의 반복계산 알고리즘의 첫 번째 입력이 되는 상대위치와 상대속도를 다음과 같은 방법으로 구한다. 우선 예측된 상대거리 \hat{R}_0 와 표적의 각도추정치를 이용하여 \hat{X}_0 와 \hat{Y}_0 를 구하며, 상대속도를 얻기 위해 \hat{X}_0 와 \hat{Y}_0 의 크기를 일정하게 두고 그 부호들을 변화시킨 4개의 군 중에서 하나씩 선택하여 식(10)의 반복계산을 이용하여 MGEKF의 초기추정치들을 구한다. 만약에 알고리즘이 발산하면 다음 군의 \hat{X}_0 와 \hat{Y}_0 를 사용한다. 이런 과정을 거쳐 4개의 군의 값을 모두 사용하여서도 알고리즘이 발산하면 예측된 상대거리 \hat{R}_0 를 $\Delta \hat{R}_0$ 만큼 증가시키고 다시 \hat{X}_0 와 \hat{Y}_0 의 4개의 군 중에서 하나씩 선택하여 반복계산을

수행한다. Batch estimation 알고리즘의 수렴여부는 식(10)의 $\hat{x}^{(k+1)}(t_0)$ 와 $\hat{x}^k(t_0)$ 의 값의 차이가 변화가 거의 없는 것으로 판정한다. 시뮬레이션을 통해 이러한 자동(autonomous) 알고리즘의 수렴속도가 빠르다는 것을 인지했으며 발산하는 경우는 없었다.

2.3 Prefiltering

수동소나체계로부터 얻어지는 표적각도 측정치에는 공분산이 큰 측정잡음이 실리게 되고 조류, 수온, 심도 등의 해양환경과 표적과 센서의 기하학적 관계와 관측자의 변침, 관측자에 의해 표적신호가 가려지는 masking 현상 등에 의해 측정잡음의 공분산의 크기가 달라지게 된다. 이러한 측정치를 앞에서 제시한 batch estimator나 MGEKF에 바로 사용할 경우에 큰 오차가 유발되어 알고리즘의 안정성과 수렴성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 환경에서 TMA를 수행하기 위해서는 소나로부터의 측정치를 전처리과정을 거쳐야 하며 측정잡음의 공분산의 크기를 줄여주어야 한다. 이 논문에서는 prefilter로 그림 3의 1차 저역통과필터(LPF ; Low-Pass Filter)를 사용하는 전처리과정을 사용했으며 대상이 되는 소나의 측정주기 T가 5초인 점과 표적의 운동이 LPF에 의해 왜곡되지 않도록 LPF의 시상수 $\alpha = 0.1$ 로 선택하였다. 이 prefilter의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$y_{k+1} = e^{-\alpha T} y_k + (1 - e^{-\alpha T}) z_k \quad (11)$$

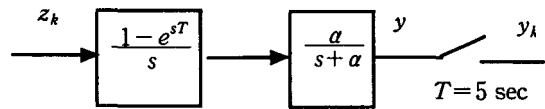


그림 3. 1차 prefilter
Fig. 3. First-order prefilter.

이 LPF를 사용할 경우 정상상태 (steady-state)에서 측정잡음의 공분산을 약 $\frac{1}{4}$ 배로 줄일 수 있음을 해석적으로 알 수 있다.

LPF를 사용하여 측정잡음의 공분산을 감소시키는 방법 외에도 sample mean을 사용하는 방법을 검토했으며 sample의 개수를 4~5개 사용하여 평균값을 구하여 새로운 측정치로 사용할 경우에 LPF와 유사한 측정잡음의 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 sample mean의 공분산은 원래잡음의 공분산을 sample 개수로 나눈 것이 되기 때문에 4~5개의 sample을 사용할 때의 sample mean의 공분산은 LPF의 시상수 $\alpha = 0.1$ 을 선택했을 때의 정상상태의 공분산의 크기와 유사하기 때문이다. 그림 4는 잡음이 섞인 원래의 측정치와 표적각도의 실제값을 나타내고 있고 그림 3의 LPF를 사용했을 때 얻어지는 새로운 측정치를 그림 5에 도시하였다. 이 두 그림을 통해 실제의 표적

각도정보에 왜곡현상이 나타나지 않으면서 측정잡음의 크기는 현저히 줄어들음을 알 수 있다.

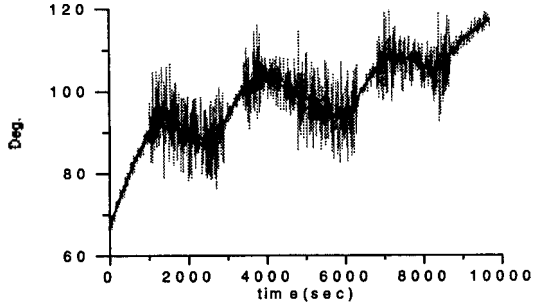


그림 4. 표적각도의 실제값과 측정치
Fig. 4. Time histories for true target angle and noisy measurement.

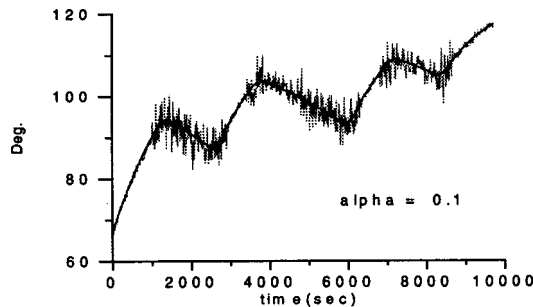


그림 5. Prefilter를 통과한 측정치
Fig. 5. Filtered measurement history.

2.4 가관측성 향상을 통한 표적기동분석

효과적인 표적기동분석을 위해 중요한 것은 TMA의 초기단계에 관측자가 선기동을 하여 가관측성이 큰 기하학적 관계를 갖는 위치로 이동한 후에 측정치를 수집해야 하며 그 후에도 관측자가 가관측성이 큰 방향으로 변침해야 하는 것이다. 이러한 과정을 통해 MGEKF로부터 정확한 표적의 상태변수들을 추정하고 추정치의 수렴속도도 향상시킬 수 있게 된다. 가관측성 향상에 관한 기존의 연구는 시스템의 가관측성을 나타내는 성능지수함수를 정의하고 이를 극대화시킬 수 있는 제어변수를 최적제이론을 사용하여 구하고자 하는 접근방식 [15, 16]이 대부분이며 표적추적 시스템의 비선형성으로 인해 two-point boundary value problem으로 귀결되는 복잡한 문제에 대해 반복적인 수치 해석적인 방법을 통해 구하거나 dynamic programming 방법을 적용하여 최적의 해를 구하게 되므로 실시간 계산성과 실용성이 결여되는 큰 단점이 있다. 이 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해서 관측자의 현재위치에서 그림 6과 같은 4개의 방향의 예상진로 중에서 가관측성을 표현할 수 있는 지수함수를 극대화시키는 방향으로 관측자를 기동시키는 방법을 제안한다.

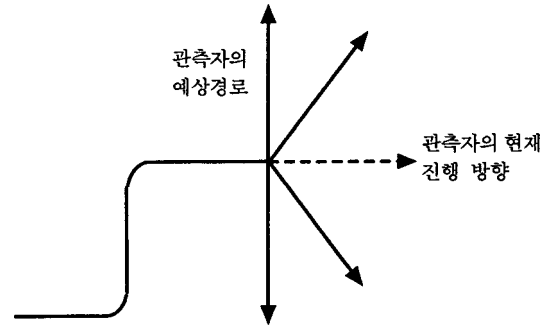


그림 6. 가관측성 산출에 사용되는 예상진로
Fig. 6. Predicted paths for observability evaluation.

가관측성을 표현하는 지수함수로 다음 식과 같이 가관측성 행렬 [4]의 trace를 사용하였다.

$$J = tr \left(\sum_{i=1}^n \hat{H}^T(z) \frac{1}{r_i^2 \sigma_i^2} \hat{H}(z) \right) \tag{12}$$

여기서 r_i 는 표적과 관측자의 상대거리, σ_i^2 는 측정잡음의 공분산을 나타내고 $\hat{H}(z) \triangleq \Phi H(z)$ 이며 Φ 는 식(7)의 전이행렬이고 $H(z) = (\cos z, -\sin z, 0, 0, 0, 0)$ 의 행렬을 뜻한다. 식(12)의 J 는 표적의 속도가 일정한 시스템에 대해서 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$J = \sum_{i=1}^4 \frac{(1 + T^2)}{r_i^2 \sigma_i^2} \tag{13}$$

여기서 T 는 소나제계의 측정주기를 나타낸다. 이 논문에서는 MGEKF로 추정된 표적의 위치와 속도를 이용하고 그림 6에 표시된 것 같이 관측자의 현재진행방향에 대해 상대적으로 정의되는 4개 방향의 예상진로를 따라 운동할 때의 r_i 와 σ_i^2 을 산출하여 식(13)의 J 에 대입하여 가관측성을 예측하고 4개의 예상방향 중에서 가장 J 가 큰 값을 가지는 방향으로 관측자를 이동시킨다. 이 때 관측자에 의해 표적신호가 가려져서 측정신호를 얻을 수 없는 masking 현상이 발생하는 예상진로는 선택에서 제외시킨다. 기존의 최적기동형태를 얻는 방법 [15, 16]들이 실시간으로 계산될 수 없는 단점이 있음을 고려하고, 실용 실시간으로 계산될 수 있더라도 알고리즘이 제시하는 기동형태를 가동성이 낮은 관측자가 그대로 추종하기가 불가능한 점을 고려하면 이 논문이 제시하는 가관측성 향상방법은 실용적인 대안이 될 것이다.

2.5 Engagement boundary 산출

Batch estimator를 사용하여 MGEKF를 초기화시키는데 필요한 표적의 각도측정치를 수집하는 TMA의 초기단계에는 아직 표적의 위치나 속도를 추정할 수 없기 때문에 어느 방향으로 관측자가 기동하여야 가관측성을 확보할 수 있는지 알 수가 없다. 이 논문에서는 이러한 문제점을

해결하기 위해 표적정보를 수집하는 TMA 초기단계에서의 관측자의 기동형태를 미리 정해놓고 이러한 기동형태에 대해 TMA 시작시점에서의 표적의 위치와 진행방향을 변수로 하여 앞 절에서 제안한 TMA를 수행할 경우에 어떤 성능을 나타낼 것인가를 그림으로 도시하는 engagement boundary를 산출해서 우수한 TMA 성능이 나오는 표적과 관측자의 기하학적 관계를 도출하는 방법을 사용한다. 이 engagement boundary는 TMA 시작시점에서의 관측자의 위치를 원점으로 하고 그 시점에서의 관측자의 진행 방향을 X축이나 Y축으로 정의하고 TMA 시작시점의 표적의 위치를 변수로 하고 정해진 진로로 표적이 운동할 경우에 시스템 가관측성의 정도를 대변할 수 있는 batch estimator와 MGEKF의 수렴속도를 도식화한 것이다. 이 engagement boundary에서 (X, Y) 좌표로 표시되는 위치는 TMA 시작시점에서의 표적의 위치를 나타내며 이 위치에서의 지수값이 크다면 표적이 그 위치에 있을 때 TMA가 시작되고 표적이 주어진 운동방향 β' 로 운동할 경우에 제시한 TMA 방법을 사용하면 표적상태변수 추정 성능이 우수하다는 것을 나타낸다. 이 논문에서 사용한 TMA 초기단계에서의 관측자의 기동형태는 관측자가 X축 방향으로 일정시간동안 직선운동을 한 후 변침을 하여 Y축 방향으로 움직이게 하는 방법(기동형태 A)과 Y축 방향으로 일정시간동안 직선운동을 한 후 변침을 하여 X축 방향으로 움직이는 방법(기동형태 B)를 선택하였다. 이러한 기동형태는 초기단계에만 필요하며 그 이후에는 2.4절에서 제시한 가관측성을 향상시키는 방향으로 관측자가 가동하게 된다.

Engagement boundary 산출을 위해서는 TMA 시작시점에서의 표적의 위치를 변화시켜가며 TMA를 반복 수행하는 많은 시뮬레이션이 필요하다. 그림 7은 정해진 관측자가 기동형태 A를 따라 기동하며 표적의 운동방향 $\beta = 60^\circ$ 일 경우에 대해 engagement boundary를 도시한 것이다. 시뮬레이션에서는 표적의 속도를 3 m/s , 관측자의 속도는 4 m/s , 관측자의 변침각속도 $\omega = 0.2^\circ/\text{s}$ 가정했다. TMA 초기단계에서 관측자는 직선운동과 90° 변침 그리고 직선운동으로 이어지는 일련의 정해진 기동형태를 가지며 직선운동구간을 각각 1000초, 변침구간은 450초가 소요된다. 수동소나체계의 측정주기 5초를 고려할 때 전체 490개의 표적각도정보를 이용하여 batch estimation을 수행하게 된다. 시뮬레이션에서 사용한 측정잡음은 백색 가우시안으로 관측자가 직선운동을 하는 동안 센서에서 감지하는 표적신호의 도착방향(DOA ; Direction of Arrival)에 따라 표준편차를 각각 $1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$ 로 가정했으며 변침시에는 표준편차를 5° 로 큰 측정잡음이 포함되는 것으로 가정하였고 TMA에서 사용하는 측정치는 prefiltering 과정을 거쳤다. 그림 8은 그림 7의 경우와 같은 조건이나 관측자가 기동형태 B를 따라 기동할 때의 engagement boundary를 나타낸 것이다. 두 그림 7, 8은 TMA 시작시점에서 표적의 각도측정치 β 가 10° 에서 30° 사이 에 있으면 어느 경우에도 TMA 성능이 우수함을 알려주고 있다. 따라서

TMA를 시작하기 전에 관측자는 선기동을 통해 이러한 각도측정치가 얻어지는 자세를 갖는 위치로 이동함이 필요하고 그 위치로 이동한 후 TMA를 수행하면 우수한 TMA 성능을 기대할 수 있다. 그림 7과 8에 표시된 표적진행 방향 β' 외의 다른 값을 사용하면 구한 engagement boundary들에서도 TMA 시작점에서 β 가 $10^\circ \sim 30^\circ$ 가 우수한 TMA 성능을 위해 필요하다는 것을 알 수 있었다.

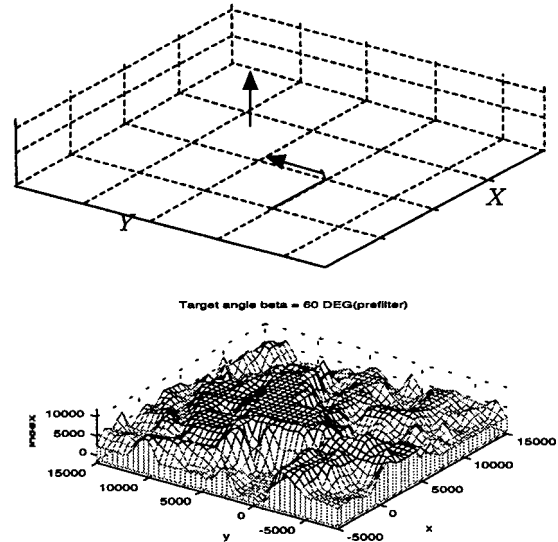


그림 7. 관측자 기동형태 A와 표적운동방향 $\beta' = 60^\circ$ 일 경우의 engagement boundary

Fig. 7. Engagement boundary evaluated for the observer maneuver pattern A and $\beta' = 60^\circ$.

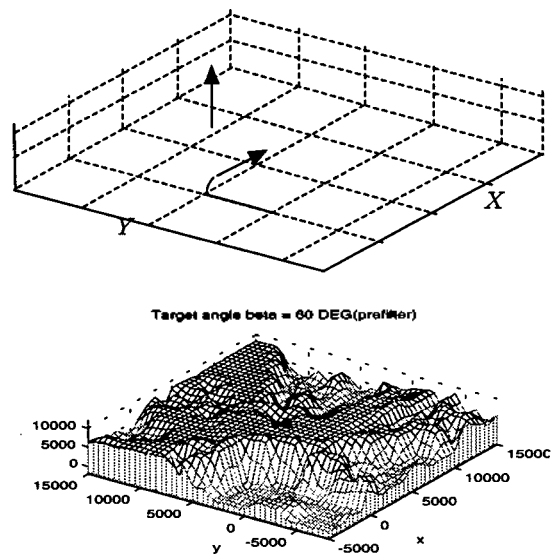


그림 8. 관측자 기동형태 B와 표적운동방향 $\beta' = 60^\circ$ 일 경우의 engagement boundary

Fig. 8. Engagement boundary evaluated for the observer maneuver pattern B and $\beta' = 60^\circ$.

III. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 2장에서 제안한 관측자의 선기동, batch estimator를 이용한 MGEKF의 초기화, 실용적인 가관측성 향상 방법과 MGEKF를 순차적 추정자로 사용한 표적상 태변수 추정 방법을 종합한 TMA 성능을 시뮬레이션을 통해 입증하고자 한다.

시뮬레이션에서 표적은 초기에 (2.7km, 10km)의 좌표에 위치하고 있으며 운동방향 β' 는 45°로 일정한 속도로 움직이고 있으며, 관측자는 선기동을 통해 TMA의 성능이 보장되는 조건인 표적의 각도측정치 β 가 15°가 되는 자세를 갖는 위치로 이동을 해서 이 위치를 좌표계의 원점으로 정하고 TMA를 시작하는 경우를 고려하였다. 표적과 관측자의 속도, 관측자의 변침각속도 등 시뮬레이션에 필요한 변수의 값들은 2.5절에서 사용한 것과 동일하다. 그림 9는 TMA의 초기단계에 관측자의 직선운동이 X축 방향으로 시작할 경우(기동형태 A)의 TMA 성능을 도사한 것으로 실제의 표적과 관측자의 궤적과, 자동 (autonomous) batch estimation에 의해 얻어진 표적 위치와 속도의 추정치로 초기화시킨 MGEKF에 의해 순차적으로 추정된 표적궤적을 나타내고 있다. 관측자는 TMA의 초기단계에서는 기동형태에 따라 미리 정해진 1번의 변침을 거쳐 2개의 leg를 가진 후에는 2.4절에서 제시한 방법으로 가관측성을 향상시키는 방향을 찾아 변침을 하는 것을 반복적으로 수행한다.

그림 10과 11은 이 시나리오에서의 표적의 X축 위치와 속도에 대한 TMA 성능을 나타내고 있으며 batch estimator에 의해 초기화된 MGEKF의 추정치는 2개의 leg를 가지는 TMA 초기단계 중에서 가관측성이 확보되지 않는 첫 번째 leg에서는 발산하다가 변침을 통해 확보된 시스템 가관측성에 의해 두 번째 leg에서 수렴하기 시작하며 가관측성이 향상되는 방향으로 기동함으로써 얻어지는 세 번째 leg부터 정확도가 현저히 개선됨을 보여주고 있다. 이 경우 Y축의 상태변수추정 성능도 유사한 결과를 보인다. 표적의 운동방향 β' 와 TMA 초기단계에서의 관측자 기동형태를 변수로 하여 다수의 시뮬레이션을 수행했을 경우에도 유사한 TMA 성능을 얻을 수 있었다.

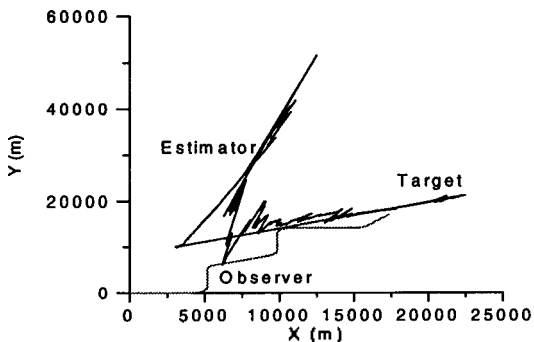


그림 9. 관측자와 표적의 실제 궤적 및 추정된 표적 궤적
Fig. 9. True trajectories for target and observer and estimated target trajectory.

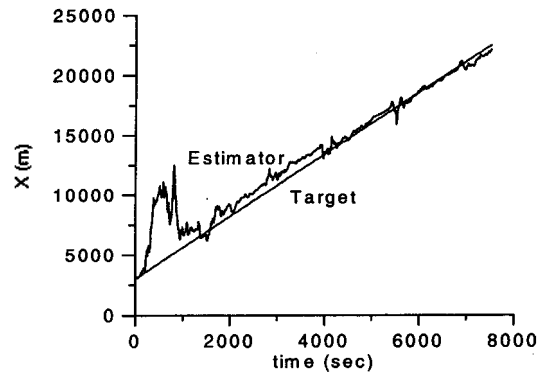


그림 10. X축 표적위치의 실제값과 추정치
Fig. 10. True and estimated target X - position.

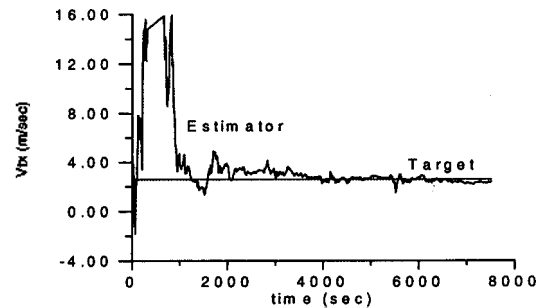


그림 11. X축 표적속도의 실제값과 추정치
Fig. 11. True and estimated target X - velocity.

IV. 결론

이 논문에서는 큰 측정잡음이 섞인 각도정보만을 이용하는 수동소나체계의 TMA 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 성능을 입증한 결과를 수록하였다. 제안한 TMA 기법은 MGEKF를 표적의 상태변수를 추정하는 순차적 추정자로 사용하고 MGEKF의 초기화에 필요한 필터의 초기위치와 속도의 추정치는 LSE방법으로 유도된 비선형 batch estimation 알고리즘으로 반복적 계산에 의해 얻는다. Batch estimation 과정에 발생할 수 있는 알고리즘의 발산에 따른 사용자의 개입을 없애주기 위해 자동적으로 수렴영역내의 초기추정치들을 찾을 수 있는 방법을 제안하였다. 큰 측정잡음의 공분산을 감소시키기 위해 LPF를 전처리 과정에 사용하였다. 가관측성의 유무 판단이 어려운 TMA의 초기단계를 위해 관측자의 기동형태를 정해 놓고 TMA 시작시점의 표적의 위치와 진행방향을 변수로 하여 TMA 성능을 예측할 수 있는 engagement boundary를 구해서 TMA 성능을 향상시킬 수 있는 관측자의 자세를 결정하고 TMA를 시작하기 전에 이러한 자세를 갖는 위치로 관측자가 선기동을 통해 이동하는 방법을 제시했다. 또한 지속적인 TMA 성능향상을 위해 현재의 관측자가 진행하는 방향을 기준으로 변침할 수 있는 4개의 방향을 정해서 각각의 방향으로 관측자가 운동할 경우 예상되는 가관측

성의 지수를 산출하여 가장 가관측성이 큰 방향으로 변칙시키는 방법을 제시했다. 이 방법은 기존의 가관측성을 극대화시키는 최적기동형태를 얻는 방법들이 실시간으로 수행될 수 없다는 점을 고려할 때 실용적인 대안이 될 수 있다. 제시한 TMA 기법은 시뮬레이션을 수행한 결과 우수한 성능을 가짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Nardon, S. C., and Aidala, V. J. (1981), "Observability criteria for bearings-only target motion analysis," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-17, 2(Mar. 1981), 162-166
2. Hammel, S. E., and Aidala, V. J. (1985), "Observability requirements for three-dimensional tracking via angle measurements," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-21, 2(Mar. 1985), 200-207.
3. Fogel, E. and Gavish, M. (1988), "Nth order dynamics target observability from angle measurements," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-23, 3(May 1988), 305-308.
4. Song, T. L. (1996), "Observability of target tracking with bearings-only measurements," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-32, 4(Oct. 1996), 1468-1472.
5. Jauffret, C., and Pillon, D. (1996), "Observability of passive target motion analysis," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-32, 4(Oct. 1996), 1290-1300.
6. Aidala, V.J., and Hammel, S. E. (1983), "Utilization of modified polar coordinates for bearings-only tracking," *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-28, 3(Mar. 1983), 283-294.
7. Song, T. L., and Um, T. Y. (1996), "Practical guidance for homing missiles with bearings-only measurements," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-31, 1(Jan. 1996), 434-443.
8. Jazwinski, A. H. (1970), *Stochastic Processes and Filtering Theory*. New York : Academic Press, 1970.
9. Aidala, V.J. (1979), "Kalman filter behavior in bearings-only tracking applications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-15, 1(Jan. 1979), 29-39
10. Aidala, V. J., and Nardon, S. C. (1982), "Biased estimation properties of the pseudolinear tracking filter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-18, 4(Jul. 1982), 432-441.
11. Song, T. L., and Speyer, J. L. (1985), "A stochastic analysis of a modified gain extended Kalman filter with applications to estimation with bearings only measurements," *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-30, 10(Oct. 1985), 940-949.
12. Ohshima, T. and Nakamizo, T. (1987) "An adaptive unbiased estimation of a maneuvering target via bearing observations," *System and Control, Japan*, Vol. 31, 6, 465-472.
13. Maybeck, P. S.(1979), *Stochastic Models, Estimation, and Control*, Vol. 1. New York : Academic Press, 1979.
14. Chapra, S. C., and Canale, P. P. (1990), *Numerical Methods for Engineers*, McGraw-Hill, 1990
15. J.P Le Cadre (1997), "Optimization of the Observer Motion for Bearings-Only Target Motion Analysis." *Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control*, San Diego California, 3126-3131, Dec. 1997.
16. Passerieux, J. M. and Cappel, D. V. (1998), "Optimal observer maneuver for bearings-only tracking," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-34, 3(Jul. 1998), 777-788.

▲한 태 곤 (Tae Gon Han)

1997년 : 한양대학교 제어계측공학과 졸업

1999년 : 한양대학교 제어계측공학과 석사

1999년 ~ 현재 : LG정밀 연구소 연구원

※주관심분야 : 표적기동분석 및 탐지, 표적추적, 칼만필터링

▲송 택 렬 (Taek Lyul Song)

1974년 : 서울대학교 공학사

1981년 : Univ. of Texas at Austin 항공우주공학과 석사

1983년 : Univ. of Texas at Austin 항공우주공학과 박사

1974년 ~ 1995년 국방과학연구소

1995년 ~ 현재 : 한양대학교 제어계측공학과 부교수

※주관심분야 : 유도제어, 항법, 표적상태추정 등