레이돔 굴절 오차 보상을 위한 적응 파티클 필터 설계

Adaptive Particle Filter Design for Radome Aberration Error Compensation

한 상 설, 이 상 정*

(Sang Sul Han¹ and Sang Jeong Lee²)

¹Agency for Defense Development

²Chungnam National University

Abstract: Radome aberration error causes degradation of miss distance as well as stability of high maneuver missile system with RF seeker. A study about radome compensation method is important in this kind of missile system design. Several kinds of methods showed good compensation performance in their paper. Proposed adaptive Particle filter estimates line of sight rate excluding the radome induced error. This paper shows effectiveness of adaptive Particle filter as compensation method of radome aberration error. Robust performance of this filter depends on external aiding measurement, target acceleration. Tuning of system error covariance can make this filter unsensitive against the error of target acceleration information. This paper demonstrates practical usage of adaptive Particle filter for reducing miss distance and increasing stability against disturbance of radome aberration error through performance analysis.

Keywords: adaptive particle filter, radome, aberration, LOS rate

기호 정의

θ_M	유도탄 자세각
$\dot{\theta}_M$	유도탄 자세각 변화율
θ_H	탐색기 김발각
$\dot{\theta}_H$	탐색기 김발각 변화율
a_c	유도탄 횡방향 가속도 명령
a_M	유도탄 횡방향 가속도
V_M	유도탄 속도
V_c	유도탄-표적 상대속도 (상수로 가정)
R	유도탄-표적 상대거리
Y_M	유도탄의 횡방향 이동거리 (관성좌표계)
$\ddot{Y}_M$	유도탄의 횡방향 가속도
Y_T	표적의 수직면 이동거리 (관성좌표계)
$\ddot{Y}_T$	표적의 수직면 가속도
λ	시선각
$\dot{\lambda}$	시선각속도
$\ddot{\lambda}$	시선각속도의 변화율
$\hat{\lambda}$	시선각 추정치
$\tilde{\lambda}$	시선각속도의 추정치
$\hat{\dot{\lambda}}$	시선각속도의 추정치
λ_r	레이돔에 의한 시선각 오차

r	탐색기 김발각에 대한 레이돔 오차의 변화율
ϵ	탐색기 추적 오차각
n_λ	시선각 측정치의 측정잡음
σ_v^2	시선각속도 측정값의 공분산
T_α	유도탄 회전을 시상수
T_g	유도 시정수
N	PNG 항법 상수
T_{go}	조우 잔여 시간 (Time to Go)
a_T	표적 횡방향 기동

I. 서론

호밍 유도 방식으로 표적과 교전하는 대공 유도탄은 표적을 추적하는 주 센서로 탐색기를 사용하고, 탐색기 출력 데이터 중 하나인 시선각속도를 유도 명령 계산에 사용한다. 따라서 시선각속도의 오차 특성은 유도 성능에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 시선각속도는 유도탄이 표적을 바라보는 시선각의 시간에 따른 변화율로서 관성좌표계에서 정의된다.

탐색기의 전파 신호는 레이돔을 통과하면서 굴절 되므로 탐색기가 표적 정상적으로 잘 추적하고 있음에도 불구하고 안테나는 실제 표적 방향이 아닌 다른 방향을 바라보게 되며 안테나 김발각에 따라서 굴절의 크기뿐만 아니라 김발각에 따른 굴절의 변화율도 달라진다. 굴절의 크기는 탐색기의 추적 루프에 영향을 주고, 김발각에 따른 굴절의 변화율(또는 레이돔 굴절 오차 기울기)은 유도 루프에 영향을 준다[3,14].

레이돔 굴절 오차 기울기가 양(+)의 값을 갖는 구간에서

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 9. 1., 수정: 2011. 3. 10., 채택확정: 2011. 6. 28.

한상설: 국방과학연구소 전술체계개발단(sangsul.han@yahoo.com)

이상정: 충남대학교 전자공학과(eesjl@cnu.ac.kr)

그림 1. 레이돔에 의한 굴절 현상.

Fig. 1. Radome aberration phenomenon.

그림 2. 시스템의 좌표계와 각도 정의.

Fig. 2. Definition of the coordinates system and angles.

는 유도 루프의 이득이 감소하여 저고도 교전에서 유도 오차를 증가시키고, 음(-)의 값을 갖는 구간에서는 유도 루프의 이득이 증가하여 고고도 교전에서 시스템 안정도를 저하시킨다[3,5,6,10,14,15].

레이돔 굴절 오차를 보상하기 위한 방법으로 많은 연구 결과들이 제시되었으며 크게 세 가지 범주로 분류할 수 있다. 첫째는 레이돔 굴절 오차를 실측하여 데이터베이스로 저장한 후 비행 환경에서 실시간으로 보상하는 방법이다 [4]. 이 방법은 근본적인 오차를 측정하여 보상하기 때문에 안전한 방법으로 볼 수 있으나, 고가의 3차원 측정 장비가 필요하고 측정 장비의 오차가 여전히 존재하므로 시설 투자 비용과 측정에 소요되는 노력에 비해 효율이 낮은 방법이다. 둘째는 유도탄을 인위적으로 일정한 주파수로 진동시켜서 시선각속도에 나타나는 응답을 해석하여 레이돔 굴절 오차를 식별하는 방법이다[10]. 이 방법은 해석적인 방법을 적용하여 레이돔 굴절 오차를 식별함으로써 학술적인 가치가 매우 높은 방법이지만 유도탄을 높은 주파수로 진동시키는 것은 유도탄의 공진을 유발할 수도 있는 위험성이 큰 방법이다. 마지막으로 레이돔 굴절 오차의 영향이 제거된 시선각속도를 추정하는 필터를 구성하는 방법이다[8,16]. 이 방법은 별도의 시설이나 측정을 요구하지 않으며 유도탄의 특별한 기동을 필요로 하지 않는 편리함이 있지만 주로 모델 기반의 필터를 사용하므로 모델의 정확도가 충분히 보

그림 3. 모델 기반 적응 필터와 IMM 필터의 구조.

Fig. 3. Architecture of the model based adaptive filter and IMM.

장되어야 하므로 설계 과정에서 많은 노력이 필요하다.

이 범주에 속하는 많은 필터들 가운데 좋은 성능을 보이는 것 중 하나인 IMM (Interactive Multiple Model) 방식의 필터는 레이돔 굴절 오차 기율기를 인자로 갖는 다수의 필터가 동시에 동작하면서 추정값과 추정값과의 관계에 의해 가중치를 산출하여 시선각속도를 추정한다[8,16]. 레이돔 굴절 오차 기율기는 실제 비행 환경에서 비선형적인 특성을 갖고 변화한다. 그리고 제어 루프에 비해서 상대적으로 느리게 변화하기 때문에 적응 인자로 다루기에 적합하다. 그러므로 레이돔 굴절 오차를 보상하기 위해 IMM 필터를 선택하는 것은 좋은 선택이다.

모델 기반 적응 필터는 일반적으로 그림 3과 같은 구조를 갖는다. 각기 다른 인자를 가진 다수의 필터를 동시에 동작시켜서 가중치를 결정함으로써 원하는 상태 변수를 추정한다. IMM 필터 또한 이와 같은 구조를 갖는다[8,9,16]. 이런 구조의 필터는 적응 인자로 취급되는 변수의 범위와 구간에 따라 필터의 수를 결정하게 되는데 넓은 범위와 많은 구간을 고려하기 위해서는 많은 필터가 필요하므로 계산량이 증가하여 실시간 요구 조건을 비롯한 실용적인 측면에서 불리하다. 동작 중에는 적응 인자가 실제로 갖는 값과 거리가 먼 필터의 출력은 가중치가 낮아서 실질적으로 불필요하게 계산량만 차지하는 비효율적인 면이 있다. 본 논문에서 제안하는 적응 파티클 필터는 기존의 다중모델 필터에 비해서 계산의 효율성을 높이고 적응인자의 구간을 결정하기 위한 설계의 부담을 줄여준다.

II. 레이돔 굴절 오차 보상 필터 설계

본 논문에서 제안하는 적응 파티클 필터는 그림 3의 IMM 필터와 유사한 구조를 갖는다. 그림 4에서와 같이 초기화 단계에서 필요한 적응 인자의 개수 만큼 파티클 군을 생성한다. 각 파티클 군은 동일한 수의 파티클들을 갖는다. 여기에서 파티클 군으로 표현되는 [E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7]은 IMM 필터에서의 [Estimator 1, Estimator 2, Estimator 3...]에 해당한다. 즉, 같은 파티클군에 속한 파티클들은 같은 적응인자를 갖는다. 초기화 과정까지는 IMM 필터와 유사한 구조로 표현되지만 동작 중에는 분명한 차이를 보인다. 추정값과 유사한 특성을 보이는 추정값을 갖는 파티클 군의 파티클 수는 증가하고 반대로 유사성이 낮은 파티클 군의 파티클 수는 감소한다. 즉, 전체 파티클 수는 고정된 채 추정값 근처에 많은 파티클을 할당하고 추정값과 상관관계가 먼 곳에는 파티클을 적게 할당하는 것이다. 적응 인자의 값을 추정하는데 뿐만 아니라 각 파티클 군의 파티클

그림 4. 적응 파티클 필터의 구조. (a) 초기 상태에서 동일한 파티클 수를 갖는 파티클 군 (b) 동작 중 적응 인자의 추정에 따른 파티클 수 변화.

Fig. 4. Architecture of the adaptive Particle filter (a) Same size set in initial phase (b) Variable sized set due to estimation.

개수도 유도적으로 사용함으로써 우수한 성능과 함께 확장성에도 용이한 실용적인 필터를 설계하였다.

본 논문에서는 레이돔 굴절 오차 기울기의 영향이 제거된 시선각속도를 추정하는 적응 파티클 필터를 설계하고 다양한 시뮬레이션 결과를 근거로 시스템 안정도 향상 및 유도 성능 개선에 효과적으로 동작함을 입증하고자 한다.

설계한 적응 파티클 필터는 레이돔 굴절 오차 기울기를 인자로 갖는 파티클들을 다수 생성하고 시선각속도를 상태 변수로 추정한다. 적응 파티클 필터는 이 과정에서 시선각속도 측정값과 각 파티클들의 상태 변수인 시선각속도 추정값과의 유사성을 비교함으로써 적응 인자인 레이돔 굴절 오차 기울기도 추정할 수 있다. 전체 파티클들의 인자에 대한 통계적 누계는 레이돔 굴절 오차 기울기의 확률 밀도 함수와 유사하다.

레이돔 굴절 오차 기울기의 예상 범위 내에서 이산적인 값으로 몇 개를 선정하고 필터 초기화 과정에서 각각의 인자 값에 대하여 동일한 개수의 파티클들을 생성한다. 상태 변수의 천이 과정이 반복되면서 실제 레이돔 굴절 오차 기울기와 유사한 인자를 갖는 파티클들은 증가하고 유사성이 낮은 파티클들은 감소한다. 단, 초기에 생성된 인자 값을 갖는 파티클이 완전히 사라지면 가변하는 레이돔 굴절 오차 기울기를 추정할 수 없게 되므로 최소 몇 개 이상의 파티클들은 항상 존재할 수 있도록 제한 조건을 둔다.

필터의 내부 모델을 설계하기 전에 전체 유도 조종 루프를 다음과 같이 정의한다. 전체 루프는 공력, 유도 조종, 탐색기 모델로 간단하게 구성하였다. 공력 모델은 식 (1)과 같이 유도탄의 회전을 시상수로 기동 특성을 정의하는 1차 모델을 사용하였다[11].

$$\frac{\dot{\theta}_M}{a_M} = \frac{1}{V_M}(1 + T_{\alpha}s) \quad (1)$$

조종 모델은 식 (2)와 같이 유도 시상수로 가속도 명령에 대한 응답 특성을 정의하는 3차 모델을 사용하였다[11].

$$\frac{a_M}{a_c} = \frac{1}{\left(\frac{T_g}{5}s + 1\right)^3} \quad (2)$$

그림 5. 필터를 포함한 유도 루프 구성도.

Fig. 5. Guidance loop with a filter.

유도 모델은 잡음제거 필터와 식 (3)과 같은 비례항법 유도 방정식을 사용하였다[11].

$$a_c = N \cdot V_c \cdot \dot{\lambda} \quad (3)$$

시선각은 식 (4)-(5), 탐색기 추적 오차각은 식 (6)과 같이 기하학적으로 정의하여 사용하였다[11]. 식 (4)에서 시선각의 기하학적 표현은 tangent 함수로 표현되지만 일반적으로 시선각은 50도 이하에서 운용되므로 선형화하여 사용한다.

$$\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{R}\right) \approx \frac{Y}{R} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{Y_T - Y_M}{R} = \frac{Y_T - Y_M}{V_c T_{go}} \quad (5)$$

$$\epsilon = \lambda - \theta_M - \theta_H \quad (6)$$

시선각속도는 식 (7)과 같이 탐색기 추적 오차에 비례하고 탐색기 추적 루프의 이득만큼 배수관계에 있다[11].

$$\dot{\lambda} = \frac{5}{T_g} \epsilon \quad (7)$$

그림 5는 전체 유도 루프를 구성하는 각 모델들 간의 상호 관계와 입출력을 개략적으로 표현한 것이다. 그림의 중앙에 있는 ‘Radome Slope’ 블록은 레이돔 굴절 오차 기울기를 김발각의 함수로 정의하여 유도 루프에 적용하는 역할을 수행한다. 상수 또는 김발각에 비례하는 선형 방정식으로 적용할 수도 있으며, 본 연구에서는 삼각함수를 이용한 비선형 방정식을 사용하였다.

필터 설계를 위한 시스템 모델을 다음과 같이 유도하여 적용하였다. 기하학적으로 시선각을 정의하는 식 (5)를 다시 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_c T_{go} \lambda = Y_T - Y_M \quad (8)$$

식 (8)의 양변을 시간에 대해 미분하면 다음과 같이 표현할 수 있다. T_{go} 는 음의 시간의 함수이므로 $\dot{T}_{go} = -1$ 이다. 일반적으로는 상대속도가 시간에 따라 변하지만 본 논문에서는 상대속도를 상수로 가정하였다.

$$V_c T_{go} \dot{\lambda} - V_c \lambda = \dot{Y}_T - \dot{Y}_M \quad (9)$$

식 (9)의 양변을 시간에 대해서 한 번 더 미분하면 다음과 같다.

$$V_c T_{go} \ddot{\lambda} - V_c \dot{\lambda} - V_c \lambda = \ddot{Y}_T - \ddot{Y}_M \quad (10)$$

식 (10)을 시선각속도에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{\lambda} = \frac{2V_c}{R} \dot{\lambda} + \frac{\ddot{Y}_T - \ddot{Y}_M}{R} \quad (11)$$

식 (11)은 상대 속도, 상대 거리, 표적 가속도, 유도탄 가속도로 시선각속도의 변화율을 정의한다. 본 논문에서는 적응 파티클 필터의 시스템 모델로 식 (11)을 사용하였다. 상대 속도와 상대 거리는 탐색기 측정값으로 사용 가능하다. 단, 상대 거리는 경우에 따라서는 탐색기 측정값이 존재하지 않을 수 있으나 본 논문에서는 탐색기 측정값으로 상대 거리를 사용할 수 있는 경우에 대하여 전개하였다. 유도탄 가속도는 관성 센서로부터 정밀한 측정값을 획득할 수 있다. 표적 가속도는 유도탄 내부에는 측정할 수 있는 센서가 없으므로 지상 레이더로부터 획득하여 사용하거나 별도의 추정 필터를 구성하여 도움을 받아야 한다. 따라서 실용성을 입증하기 위해 성능 분석 수행 시에는 오차 모델이 포함된 표적 가속도를 사용 하였다.

시선각 측정치는 식 (12)와 같이 참 시선각에 측정 잡음과 레이더 굴절 오차가 더해진 것으로 정의할 수 있다. 이 때 레이더 굴절 오차는 탐색기 김발각의 함수이다.

$$\tilde{\lambda} = \lambda + \lambda_r(\theta_H) + n_\lambda \quad (12)$$

식 (12)에서 측정 잡음을 제외하고 양변을 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{\lambda}} = \dot{\lambda} + \frac{\partial \lambda_r}{\partial \theta_H} \dot{\theta}_H \quad (13)$$

한 편 식 (6)을 이용하여 정상상태 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$0 = \lambda - \theta_M - \theta_H \quad (14)$$

식 (14)의 양변을 시간에 대하여 미분하고 김발각에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\theta}_H = \dot{\lambda} - \dot{\theta}_M \quad (15)$$

식 (15)를 이용하여 식 (13)을 다시 정리하면 다음과 같다. 이 때 레이더 굴절 오차의 김발각에 대한 변화율은 레이더 굴절 오차 기울기로 명명하고 기호는 r 로 표기한다.

$$\dot{\tilde{\lambda}} = (1+r)\dot{\lambda} - r\dot{\theta}_M \quad (16)$$

식 (16)은 시선각속도와 유도탄 각속도, 레이더 굴절 오차 기울기로 시선각속도 측정치를 정의한다. 본 논문에서는 적응 파티클 필터의 측정 모델로 식 (16)에 측정 잡음을 더하여 사용하였다.

시선각속도 측정값과 추정값과의 유사성을 비교하여 가중치를 결정하는 방법으로 식 (17)과 같은 Likelihood 함수를 사용하였다.

그림 6. 적응 파티클 필터의 알고리즘.

Fig. 6. Algorithm of the adaptive Particle filter.

$$weight^{(i)} = \exp\left(-0.5 \frac{(\tilde{\lambda} - g(\tilde{\lambda}^{(i)}))^2}{\sigma_v^2}\right) \quad (17)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N (\text{Number of particles})$$

이상으로 적응 파티클 필터 설계에 적용하기 위한 수식을 유도하였다. 구현에 필요한 결정된 수식들을 포함하여 필터의 구조와 알고리즘을 간략하게 정리하면 그림 6과 같다. 그림에서 'N'은 전체 파티클 수이고 'm'은 적응 인자가 소멸되는 것을 방지하기 위해 주기적으로 초기화 시킬 파티클의 수로서 적응 인자의 구간 수의 배수이다. 일반적인 파티클 필터는 모든 파티클에 대해서 역샘플을 취하지만 제안하는 적응 파티클 필터에서는 역샘플 과정에서 N개의 파티클을 'N-m'개로 축소시키고 'm'개의 파티클을 새롭게 생성한다. 새롭게 생성된 'm'개의 파티클에 대해서 적응 인자 각 구간의 값을 균등하게 부여하고 상태 변수는 현재 추정된 출력값을 부여한다. 이런 방법으로 전체 파티클 수를 유지하면서 적응 인자의 수를 조절한다.

III. 필터 성능 분석

앞 장에서 설명한 유도 조종 모델과 필터를 구현하여 적응 파티클 필터의 성능 분석을 수행하였다. 시뮬레이션 모델에 사용된 주요 변수와 적응 값은 표 1과 같다.

필터 측정 모델의 오차 공분산은 탐색기에서 측정하는 시선각속도의 특성을 반영하여 결정하였으며, 시스템 모델의 오차 공분산은 식 (12)의 신뢰도와 지상 레이더에서 제공하는 표적 가속도 데이터의 오차 특성을 반영하여 결정하였다. 이 부분에서 많은 시뮬레이션을 통해 튜닝을 수행하였으며 교전 대상이 되는 표적의 최대 기동 능력을 전제로 최대 성능이 나타나도록 튜닝 하였다.

표 1. 주요 변수 적용 값.

Table 1. Values of major variables.

이름	기호	적용 값	단위
상대속도	V_c	1500	m/s
유도탄 속도	V_M	1200	m/s
표적 기동	a_T	4	g
회전을 시상수	T_a	5	초
유도 시상수	T_g	0.3	초
총 파티클 수	N	1100	개
레이돔 굴절오차 기울기	구간 수	m	11
	추정 범위	r	-5 ~ 5

그림 7은 호밍 시간을 달리 하면서 기동하는 표적과의 교전을 수행하고 각각의 결과 유도 오차를 호밍 시간에 대하여 표현한 것이다. 이 그래프를 통해서 레이돔 굴절 오차 기울기가 유도 성능에 얼마나 영향을 주며 적응 파티클 필터가 얼마나 효과적으로 작동하는지 알 수 있다. 굵은 실선은 레이돔 굴절 오차가 없을 때의 유도 오차이다. 호밍 시간이 부족할 경우에는 유도 오차가 2~3m 정도까지 증가하지만 3초 이상의 충분한 호밍 시간이 확보되면 현저 작은 유도 오차가 가능하다. 가는 실선은 2% 레이돔 굴절 오차 기울기가 존재할 때의 유도 오차이다. 레이돔 굴절 오차에 의해서 유도 성능이 저하됨을 분명하게 알 수 있다. 호밍 시간이 충분히 긴 경우에도 유도 오차를 줄일 수 없음을 명확하게 보여준다. 굵은 점선은 2% 레이돔 굴절 오차 기울기가 존재하고 적응 파티클 필터가 동작하는 경우이다. 레이돔 굴절 오차가 존재하지 않을 때와 유사한 형태의 결과가 얻어졌으며 호밍 시간이 짧은 구간에서는 오히려 더 좋은 결과를 보여준다.

그림 8은 레이돔 굴절 오차 기울기가 시스템을 불안정하게 만들어서 유도탄 자세각이 크게 흔들리는 것을 보여준다. 또한, 적응 파티클 필터가 동작하여 안정도를 향상시키는 것도 보여준다.

레이돔 굴절 오차가 존재할 때 시선각속도 측정치는 그림 9의 실선과 같이 심하게 진동한다. 그 결과로 불필요한 기동 명령이 산출되어 유도탄의 자세가 불안정하게 진동하

그림 7. 주어진 호밍 시간과 유도 오차의 관계.

Fig. 7. Relationship between homing time and miss distance.

는 것이다. 그림 9의 굵은 점선은 적응 파티클 필터가 작동하여 불안정한 진동이 사라진 시선각속도 측정값을 보여준다. 이것은 레이돔 굴절 오차가 없을 때의 시선각속도와 유사하다.

그림 8. 유도탄 자세각.

Fig. 8. Attitude angle of the missile body.

그림 9. 시선각속도 측정치.

Fig. 9. Measurement of the LOS rate.

그림 10. 시선각속도 측정치와 추정값.

Fig. 10. Measurement and estimation value of the LOS rate.

그림 10의 붉은 실선은 시선각속도 추정치이고 붉은 점선은 적응 파티클 필터에서 추정하고 있는 시선각속도이다. 두 값의 차이는 레이돔 굴절 오차에 의해서 왜곡되는 시선각속도의 오차라고 볼 수 있다. 그 오차를 보상할 수 있는 것은 그림 11과 같이 레이돔 굴절 오차 기율기의 추정값이 실제 값을 매우 빠르게 잘 추정하고 있기 때문이다. 다만

그림 11. 레이돔 굴절 오차 기율기.

Fig. 11. Radome aberration slope.

그림 12. 다중 모델 파티클 필터 성능 (N=440).

Fig. 12. Performance of multiple model Particle filter (N=440).

그림 13. 적응 파티클 필터 성능 (N=220).

Fig. 13. Performance of adaptive Particle filter (N=220).

표적과의 상대거리가 가까워지면 기하학적 시선각이 증가하게 되고 이것은 식 (4)에서 tangent 함수의 선형구간에 대하여 선형 간소화시킨 결과를 사용하였기 때문에 비선형 구간으로 확대되는 순간 추정 성능이 저하 된다.

본 논문에서 제안하는 적응 파티클 필터는 최근의 연구 결과들과 비교해 볼 때 유사한 수준의 성능을 보이며 효율적으로 파티클을 운용하는 장점을 갖는다. 이에 대한 비교를 위해 일반적인 구조의 다중 모델 파티클 필터를 설계하여 성능을 비교하였다. 앞의 시뮬레이션에서는 1100개의 파티클을 사용하였지만 파티클의 효율성을 확인하기 위해 파티클의 개수를 줄여보았다. 그림 12는 440개의 파티클을 사용하는 다중 모델 파티클 필터의 성능을 보여주고 그림 13은 220개의 파티클을 사용하는 적응 파티클 필터의 성능을 보여준다. 절반의 파티클을 사용하면서도 동등한 수준의 성능을 보여주고 있는 적응 파티클 필터는 불필요한 구간에서 낭비되는 파티클들의 수를 줄임으로써 파티클 개수를 줄여야만 하는 조건에서 효과적인 알고리즘이다. 일반적으로 지대공유도탄에 탑재되는 컴퓨터는 제한된 리소스를 사용하게 되므로 실질적인 효과가 예상된다.

IV. 결론

본 논문에서 제안하는 적응 파티클 필터는 파티클의 운용에 융통성을 주어 기존의 다중 모델 필터에 비해 효율적인 계산량을 통제할 수 있으며, 레이돔 굴절 오차 기율기가 김발각에 대해서 비선형적 특성을 갖는 경우에도 좋은 성능을 보여준다.

레이돔 굴절 오차 기율기를 추정하는 기법에 있어서는 초기화 단계에서는 IMM과 유사한 접근 방법으로 시작하지만 필터가 동작하면서 추정값과 상관관계가 높은 파티클들은 역샘플을 통해 계속 상태 변수를 추정하고 상관관계가 낮은 파티클들은 소멸되어 전체 파티클 수를 증가시키지 않고도 더 넓은 범위에서 더 많은 구간으로 효율적으로 적응 인자를 추정할 수 있다. 추가적인 개념으로 상관관계가 매우 낮은 파티클 군이 모두 소멸되는 것을 방지하고 예측 범위를 벗어나는 비정상적으로 특성을 고려하기 위해 일부 파티클을 주기적으로 재생성하여 모든 적응 인자가 최소한의 개수를 유지할 수 있도록 하였다.

모델 기반 필터의 성능은 시스템 모델의 정확도에 따라 많은 영향을 받는다. 본 필터에서 사용하고 있는 시스템 모델에는 외부에서 제공 받아 사용하는 표적 가속도 정보가 있기 때문에 여기에 오차 모델을 포함시켜 분석함으로써 실용성을 입증하였다. 본 논문에서는 레이돔 굴절 오차 보상을 위해 설계된 적응 파티클 필터는 상태변수인 시선각속도와 적응 인자인 레이돔 굴절오차 기율기의 추정 성능이 우수하여 시스템 안정도를 향상시키고 유도 성능을 개선시킬 수 있음을 보여준다.

참고문헌

- [1] A. Bhattacharyya and R. N. Bhattacharjee, "Seeker based optimal guidance law, a few issues," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2003.

- [2] A. Bhattacharyya, P. K. Tiwari, P. Vora, and R. N. Bhattacharjee, "In flight radome error compensation through simulated test data," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2005.
- [3] C.-F. Lin, *Modern Navigation, Guidance, and Control Processing*, Prentice-Hall, 1991.
- [4] D. Peterson, J. Otto, and K. Douglas, "Radome boresight error and compensation techniques for electronically scanned arrays," *AIAA SDIO Interceptor Technology Conference*, June 1993.
- [5] F. W. Nesline and P. Zarchan, "Missile guidance design tradeoffs for high-altitude air defense," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 6, no. 3, pp. 207-212, 1983.
- [6] F. W. Nesline and P. Zarchan, "Radome induced miss distance in aerodynamically controlled homing missile," *AIAA Guidance and Control Conference*, Aug. 1984.
- [7] J. H. Jin, J. W. Park, B. M. Kim, B. S. Kim, and Y. Y. Lee, "Robust airspeed estimation of an unpowered gliding vehicle by using multiple model Kalman filters," *Journal of Institute of Control, Robotics and System (in Korean)*, vol. 15, no. 8, pp. 859-866, Aug. 2009.
- [8] J. M. Lin and Y. F. Chau, "Radome slope compensation using multiple-model Kalman filters," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 18, no. 3, pp. 637-640, 1995.
- [9] J. L. Crassidis and J. L. Junkins, *Optimal Estimation of Dynamic systems*, Chapman & Hall/CRC, 2004.
- [10] P. Zarchan and H. Gratt, "Adaptive radome compensation using dither," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 22, no. 1, pp. 51-57, 1999.
- [11] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance*, AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, 4th Ed., vol. 199, 2002.
- [12] P. Gurfil and N. Jeremy Kasdin, "Improving missile guidance performance by in-flight two-step nonlinear estimation of radome aberration," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2003.
- [13] S. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, and T. Clapp, "A tutorial on particle filters for on-line non-linear/non-Gaussian Bayesian tracking," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 50, no. 2, pp. 174-188, 2002.
- [14] S. Miwa and S. Kouya, "Radome effect on the miss distance of a radar homing missile," *AIAA Guidance and Control Conference*, Aug. 1995.
- [15] S. S. Han, S. K. Jang, and S. J. Lee, "Radome compensation using adaptive particle filter," *17th IFAC Symposium on Automatic Control and Aerospace*, vol. 17, Part 1, 2007.
- [16] T. R. Song and S. J. Shin, "Active homing performance enhancement with multiple model radome slope estimation," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2004.
- [17] Y. S. Jung, K. S. Kim, and T. L. Song, "Performance improvement for tracking small targets," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 11, pp. 1044-1052, Nov. 2010.

한 상 설

1994년 충남대학교 전자공학과 졸업.
1996년 동 대학원 석사. 2011년 동 대학원 박사. 1996년~현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 최적제어, 적응제어, 유도조종기법.

이 상 정

1979년 서울대학교 전자공학과 졸업.
1981년 동 대학원 석사. 1987년 동 대학원 박사. 1987년~현재 충남대학교 교수. 관심분야는 강인제어, GNSS, 항재밍기법.