

필터링 기술

송택렬

(안양대학교 전자컴퓨터공학부)

항공제어 시스템의 운용에는 제어시스템의 설계에 못지 않게 레이더나 열상장비 등의 센서를 이용하여 표적을 탐색하고 지속적으로 추적하면서 표적의 위협 정도에 따라 회피운동을 한다든지, 탑재한 무기체제를 발사한다든지 하는 필요한 조치를 취하는 과정이 필요하다. 표적추적은 동시에 여러 개의 표적을 추적하는 다중표적 추적기술이 요구되며, 탐지 레이더에 의한 탐지 중 추적방식 (Track while Scan-TWS)을 통해 정밀추적이 요구되는 표적을 정의하고 그 표적에 대해서는 추적 레이더에 좌표를 전달하여 정밀추적을 수행하는 방식과, 하나의 다기능 레이더를 통해 표적탐지와 추적을 동시에 수행하는 TAS(Track and Search) 방법이 있다. 이러한 표적추적 기술의 핵심기술로는 측정신호와 표적의 궤적을 결합시키는 자료결합 (Data Association) 기술과 표적의 위치, 속도, 가속도 등의 상태변수의 추정치를 산출하는 필터구조의 설계기술을 들 수 있다.

1. 자료결합 기술

동시에 여러개의 표적을 추적하기 위해서는 각각의 표적의 궤적을 유지하며 이 표적이 다음 주기에 어느 위치에 있을 것이라는 예측치를 정확히 산출하여 다음주기가 되었을 때 그 예상위치로 레이더의 추적빔을 쏘아주어 표적신호를 얻어내야 한다. 이를 위해서 동역학적 필터(dynamic filter)가 필요하며 이 필터는 현재 표적의 위치, 속도, 가속도를 추정하고 필터내의 표적 동역학 모델을 가동시켜 다음 주기에서의 표적의 위치를 산출하고, 예상위치를 중심으로 하고 예상위치 산출의 정확도에 따라 크기를 달리하는 공간상의 타원체(V_G)를 형성하여 이 내부에 존재하는 신호들 중에서 표적을 찾아내어 지속적으로 표적의 궤적(트랙)을 관리하는 기능이 수반되어야 한다.

실제상황의 표적추적에는 표적이 생성하는 대전자전 방해신호(ECM), 구름이나 지표로부터 추적빔이 반사되어 형성되는 클러터에 의해 여러 개의 신호가 V_G 내에 존재하게 되는데 이들 중에서 표적을 어떻게 찾아내서 현재까지 유지시켜온 표적궤적(트랙)과 결합시킬까 하는 문제가 대두되

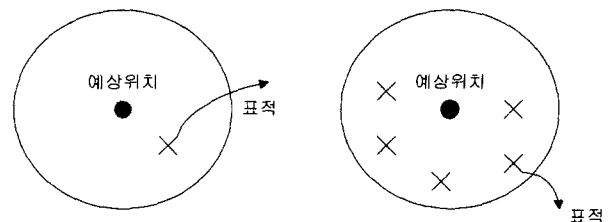


그림 1. V_G 내의 측정신호

게 된다. 아래 그림은 잡음이 없는 이상적인 환경에서의 V_G 내부의 표적위치와 잡음환경에서의 표적위치를 도시한 것이다.

V_G 내에서 트랙과 측정신호를 결합하는 방법 (Data Association) 중 가장 많이 사용하는 방법으로 Nearest Neighbor (NN) [1] 방법이 있다. 이 방법은 이름 그대로 예상위치에서 가장 가까운 거리에 있는 측정신호를 표적으로 간주하여 V_G 내의 다른 신호들을 무시하는 방법이다. 이 방법에 소요되는 계산량은 적으나 잡음이 심한 환경에서는 잡음신호를 표적으로 오인하여 표적추적에 실패할 확률이 커지는 단점이 있다. 또한 V_G 내의 측정신호들 중에서 가장 세기가 큰 것을 표적으로 간주하는 Strongest Neighbor (SN) [2] 방식도 있다. 이러한 NN과 SN의 자료결합 방법은 V_G 내의 모든 측정신호 중에서 표적신호를 단정적으로 선택하는 것이 되므로 선택이 틀릴 경우에 다음주기의 예상위치 추정과 예상위치를 중심으로 형성되는 V_G 의 크기 추정에 오류가 발생하여 트랙의 유지에 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 V_G 내의 모든 측정신호들을 확률적으로 결합시키는 Probabilistic Data Association (PDA) [3] 방법이 제안되었다. 이 방법은 표적의 추정치를 단정적으로 정하지 않는 대신에 그 추정치가 표적에 해당한다는 가정으로서 표적의 예상위치와 측정치와의 위치오차가 평균이 0이고, 공분산이 P_k 인 가우시안 확률밀도함수 특성을 가진다는 것을 사용하고, 클러터에 해당하는 측정치는 V_G 내부에서 균일한 확률밀도함수를 갖는다는 가정을 사용하여 각 측정치가 표적신호일 확률을 계산한다. 그리고 이 확률을 가중치로 사용해서 표적위치 추정치와

공분산을 결정해야 하는 복잡하고 계산시간이 많이 소요되는 알고리즘으로 구성된다. 이러한 자료결합 방법에는 V_G 내의 측정신호의 세기가 일정한 문턱값을 넘는 것들을 골라서 자료결합에 사용하게 되는데 이 문턱값은 오경보 확률 (False Alarm Rate - FAR)을 일정한 작은 값으로 유지하는 신호의 세기로 정하는 것이 일반적이다. 최근에는 표적 자료결합 성능을 향상시키기 위해 V_G 내에서 얻어지는 신호들 중에서 표적의 예상위치에서 떨어진 정도에 따라 문턱값의 크기를 달리하는 Bayes Detection [4] 방법도 제안되었다. 이러한 방법 외에도 표적신호의 세기에 대한 확률밀도 함수를 기존의 PDA에 부가하여 PDA의 성능을 증가시킬 수 있음도 알려져 있다 [5]. 만약에 추적중인 표적의 V_G 내에 다른 트랙을 유지해온 또 다른 표적의 V_G 가 겹쳐서 측정신호가 공유될 경우에는 좀더 복잡한 상황이 되며 이러한 경우의 자료결합에는 Joint PDA (JPDA) [6] 방법을 사용하여 트랙과 측정신호를 결합시킨다. 그림 2는 JPDA 방법을 사용해야 할 경우를 도시한 것이다.

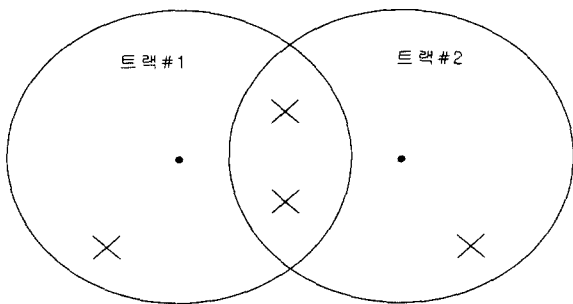


그림 2. JPDA방법을 사용해야 하는 경우

또한 여러 주기의 측정신호들을 모으고 그 기간 중 새로운 표적들의 생성까지 고려하여 트랙과 측정신호를 결합시킬 수 있는 가능한 경우를 모두 고려하며, 확률이 적은 경우는 없애는 Multiple Hypothesis Tracking (MHT) [7] 방법이 제안되기도 했으나 계산량의 과다로 인해 실용적이지 못하다는 평이 많다. 다음 장에서는 이러한 자료결합 알고리즘을 통해 트랙과 결합할 표적신호가 선택된 후에 이 측정신호를 사용하여 현재의 표적의 상태변수인 위치, 속도, 가속도를 추정하며 다음주기의 예상위치와 그 예상위치의 추정오차 공분산을 산출하고, 이를 이용하여 V_G 를 결정하는 필터의 종류와 구조에 대해 알아보려고 한다.

2. 필터구조

2.1 단수모델 필터구조

다수의 표적을 동시에 추적해야 하는 동역학적 필터는 표적 상태변수의 추정성능이 우수해야 하며 많은 표적을 추적해야 하므로 알고리즘의 계산에 소요되는 계산량이 적어 실시간 적용이 가능해야 한다. 표적추적에 사용되는 필터 알고리즘은 바로 전 주기에서 지금 시간의 예상위치가

포함된 표적상태변수 추정치의 예측치와 그 예측치의 오차 공분산 값과 적절한 자료결합 방법에 의해 선택된 표적신호를 이용하여 추정치와 공분산을 수정하는 측정치 채신과정 (Measurement Update Process)과, 표적의 예상운동에 바탕을 둔 표적동력학을 기술하는 미분 방정식의 해를 구하여 다음 주기에서의 표적상태변수의 예측치와 예측오차 공분산을 산출하는 예측과정 (Prediction Process) 또는 시간채신과정 (Time Update Process)로 나누어 진다. 표적추적의 동역학 방정식과 측정방정식을 선형으로 가정할 경우에는 칼만필터 (Kalman Filter) [8]를 사용하게 되나, 레이더나 추적센서의 표적 추정치가 표적의 거리, 방위각, 고각으로서 상태변수의 비선형식으로 표현되게 되어 표적추적 시스템은 비선형 시스템이 되며 이에 적합한 비선형 필터들로는 확장 칼만필터 (Extended Kalman Filter - EKF) [8]와 EKF의 변형된 필터구조가 많이 사용되고 있다. 비선형 필터의 경우 실용적인 최적필터는 존재하지 않으므로 알고리즘의 발산성이 없고 안정된 추정치를 제공하는 필터 구조를 개발하여 사용하고 있다. 또한 비선형 추정치를 선형화하여 마치 표적추적 시스템을 선형시스템으로 간주하여 칼만필터 형태를 적용시키는 방법도 널리 쓰이고 있다. 이 비선형 추정치를 선형화 시키는 방법으로 가장 많이 사용되는 방법으로 좌표변환을 이용하여 측정방정식을 상태변수의 선형으로 표현할 수 있는 의사측정치 (Pseudo-measurement)를 형성하고 변형된 시스템에 칼만필터를 사용하든지 보다 더 알고리즘이 간단한 α - β 필터 또는 α - β - γ 필터를 사용한다. 이 필터들의 특징은 미리 정해진 이득을 사용하므로 칼만필터류의 공분산 계산과정이 생략되어 가장 단순한 필터구조와 소요되는 계산시간이 적게 든다는 데 있다. 표적의 기동성, 측정잡음의 공분산, 측정주기의 함수로 결정되는 필터이득은 off-line으로 구해진다. 이러한 필터는 원거리 표적, 비교적 기동이 심하지 않은 표적의 추적에는 고효율성이 있다고 알려졌으나 비우호적인 환경에서는 표적을 놓치는 확률이 높은 단점이 있다. 일반적으로는 칼만필터와 EKF와 같이 환경에 적응하는 공분산을 계산하여 필터의 이득과 표적자료결합을 위한 V_G 를 설정하는데 사용된다. 따라서 표적추적에는 비선형 표적신호를 선형으로 변형시킨 의사측정치를 형성하고 칼만필터 알고리즘을 적용하는 방법이 많이 사용하고 있으며 한 예로 [9]에서는 공분산은 표적시선 (Line of sight - LOS) 좌표계에서 계산되고, 상태변수 추정치는 관성좌표계에서 계산되어 측정치 채신과정에서 필터이득을 산출하는데, 두 좌표계사이의 좌표변환행렬이 사용되는 특징이 있다. 위의 과정에서 얻어지는 의사측정치에는 표적추적오차의 요인이 되는 바이어스가 무시할 만큼 작다는 것이 연구되었다. 이러한 필터의 단점은 알고리즘이 복잡하며 계산량도 많다는데 있으나 의사측정 잡음의 분산을 대각행렬로 근사화하면 3차원 공간의 좌표를 결정하는 X, Y, Z 채널이 분리되므로 계산량이 크게 줄어들 수 있다. 이러한 필터는 표적추적 환경에 적용하여 V_G 의 크기를 조절할 수 있는 장점이 있으나 계산량이 많이 소요되어 유도탄의 요격 대상이 되는 위협

도가 높은 표적의 정밀추적으로 사용된다. 이러한 필터들은 표적의 기동성을 추정 또는 예측하게되어 레이더나 탐색기(seeker)와 같은 표적추적장치의 추적성을 향상시키는 보조 알고리즘으로 사용될 수 있다. 그림 3은 이러한 예로서 유도탄에 탑재하는 표적추적장치인 탐색기의 경우를 나타낸 것으로 표적의 기동을 추정하고 이를 탐색기에서가 추적해야할 각속도와 각가속도를 산출하여 탐색기의 김발 구동모터에 직접 인가하여 추적장치의 반응속도와 추적성을 향상시키는 방법을 소개한 것이다.

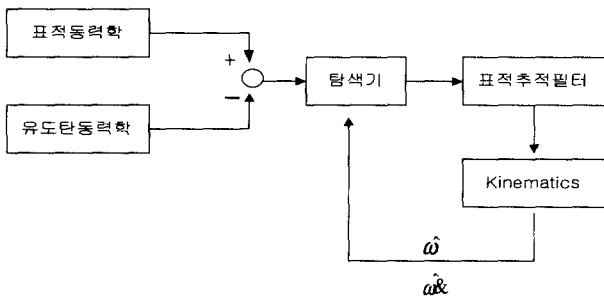


그림 3. 보조추적 개념도

2.2. 다수모델 필터구조

실제표적의 기동이 필터가 가정한 표적기동 모델과 맞지 않을 경우에는 이러한 필터들은 큰 오차를 유발할 수 있는데 이를 방지하기 위해 표적의 기동을 검출하고 기동의 크기를 추정하여 상태변수 추정치를 수정하는 방법들이 많이 사용되고 있다. 이 방법 중에는 기본적으로 기동이 없다는 가정 하에서 일정속도 모델을 기본모델로 사용하다가 표적의 기동이 검출되면 기동모델로 전환시키는 가변차원필터구조[10]와, 기동의 발생시간과 기동의 크기를 추정하여 필터출력을 수정하는 입력추정기법 (Input Estimation)[11] 기술이 연구되었다. 기동검출에 쓰이는 χ^2 Test, Generalized Likelihood Ratio Test(GLRT) Sequential Probability Ratio Test(SPRT)와 이들의 변형된 형태는 산업체에서 널리 사용되는 고장진단 (Fault Detection and Isolation)에 사용되는 알고리즘과 동일하다. 이러한 방법들도 표적기동 검출의 지연과 표적의 예상치 못한 기동, 레이더 잡음, 표적 신호잡음, 클러터 등의 요소가 공존하는 경우에는 단일 필터 구조가 가지는 정밀도 유지한계에 따른 성능저하가 존재한다. 이를 해결하는 방안으로 다수의 필터를 하나의 표적에 동시에 적용하는 다수모델 기법이 연구되었다. 여기에 사용되는 필터들은 각각 서로 다른 가설 또는 모드에 기반을 두고 표적상태변수 추정치를 산출하게 되며, 최종적인 상태추정치는 각 필터의 추정치들이 맞을 확률인 모드확률을 계산하여 가중치로 결합시켜 구하게 된다. 이 다수모델 필터는 표적의 기동모델의 정확도에 대한 필터성능의 민감도가 단수모델에 비해 감소하게 되어 모델의 정확성이 추정성능에 중요한 영향을 미치는 단수모델의 단점을 감소시킬 수 있는 반면에 계산시간이 늘어나는 단점이 있다. 다수모델 필터구조에는 필터의 추정치 사이에 혼합과정이 없는

Multiple Model Adaptive Estimation (MMAE) 방법과 혼합과정이 존재하는 Interacting Multiple Model (IMM) [10] 방법이 있다. 시간에 따라 모드의 변화가 없는 시스템에서는 두 방법이 동일하게 된다. 이중에서 IMM은 모드의 수를 작게 하면서도 성능이 우수한 장점이 있어 많이 사용되고 있다. 그림 4는 다수모델 추정 알고리즘 중 IMM 방법의 표적상태변수 추정치 \hat{x}_k 와 추정오차 공분산 P_k 의 산출 과정을 도시한 것이다.

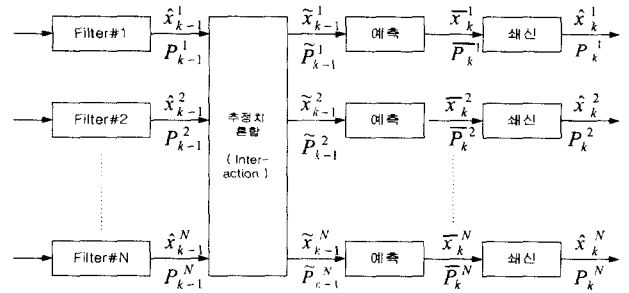


그림 4. IMM 방식

또한 기존의 IMM 알고리즘에서는 사용되는 모드가 미리 정해져 있고 초기부터 모든 모드에 기초를 둔 필터들을 동작시켜 계산량이 많이 소요되는데 반하여 최근에는 이러한 모드들을 여러 개의 model group으로 나누고 초기에는 model group 하나만 동작시킨 후, 모드 확률에 따라 다른 model group을 가동시켜서 두 개의 model group으로 동작시키다가 모드확률에 따라 어느 하나의 model group을 중단시키는 방법을 취하는 가변구조의 IMM (VSIMM) 알고리즘이 제안되었다. [11] VSIMM은 기존의 IMM에 비해 다수의 모드를 갖는 시스템에서 계산량을 훨씬 줄일 수 있는 장점이 있다.

3. 결 론

앞 장에서 항공제어기술과 관련된 필터링 기술로서 표적 추적에 사용되는 필터구조와, 센서에 의해 얻어지는 측정신호와 트랙과의 자료결합기술에 대한 기술내용과 동향에 대해 기술했다. 이러한 기술들을 실제 시스템에 적용시킬 때는 다수의 표적을 동시에 추적할 수 있는 실시간 계산성과 상태변수 추정성능의 정확성과의 절충작업을 거쳐 실용성 있는 알고리즘으로 개발하는 데 중점을 두어야 할 것이다. 국내에서는 다수의 표적을 추적하는 소프트웨어 개발기술은 1970년대 중반 이후부터 많은 분야에 걸쳐 활발히 진행되고 있으며, 다중표적추적을 위해서도 탐지레이더용 추적 소프트웨어가 개발되어 있고, 추후 민간 항공기의 관제 소프트웨어, 군용 표적추적 소프트웨어 등의 연구개발로 이어질 전망이다. 이러한 필터링 기술은 항공분야의 표적추적기술 부분뿐만 아니라 산업체의 시스템 고장진단, 시스템 매개변수 추정, 로봇이나 로켓의 항법성능개선, ITS 분야의

자동차 위치추정 부분에도 널리 사용되고 있으므로 독자 여러분의 지속적인 관심이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] X. R. Li, "The pdf of nearest neighbor measurement and a probabilistic nearest neighbor filter for tracking in clutter," Proceedings of the 32nd CDC, San Antonio, Texas, Dec. 1993.
- [2] X. R. Li, "Tracking in clutter with strongest neighbor measurements-Part I : Theoretical analysis," IEEE. Trans. on Automatic Control, Vol. 43, No. 11, Nov. 1998.
- [3] Y. Bar-Shalom and T. E. Fortmann, "Tracking and Data Association," Academic Press, New York, 1988.
- [4] P. Willett et al., "Integration of Bayes Detection with target tracking," IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 49, No. 1, Jan. 2001.
- [5] D. Lerro and Y. Bar-Shalom, "Interacting multiple model tracking with target amplitude feature," IEEE Trans. on AES, Vol. 29, No. 2, Apr. 1993.
- [6] Y. Bar-Shalom and X. R. Li, Tracking, and Techniques," Storrs, CT : YBS Publishing, 1995.
- [7] S. S. Blackman, "Multiple-Target Tracking with Radar Applications," Artech House, 1986.
- [8] A. Jazwinski, "Stochastic Processes and Filtering Theory," Academic Press, 1970.
- [9] T. L. Song, J. Y. Ahn, and C. B. Park, "Suboptimal filter design with pseudomeasurements for target tracking," IEEE. Trans. on AES, Vol. 24, No. 1, Jan. 1988.
- [10] H. Blom and Y. Bar-Shalom, "The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients," IEEE. Trans. on Automatic Control, Vol. 33, No. 8, Aug. 1988.
- [11] X. R. Li, "Multiple-model estimation with variable structure Part III : Model-group switching algorithm," IEEE. Trans. on AES, Vol. 35, No. 1, Jan. 1999.