

표적 추적과 화기 제어 시스템의 설계

이 만 형* 김 종 화** 은 강 섭** 배 종 일***

* 부산대학교 공대 정밀과 ** 부산대학교 대학원 *** 부산 개방대학

Target Tracking and Design of Fire Control System

Lee, Man Hyung* Kim, Jong Hwa** Yoon, Kang Seop** Bae, Jong Il***

* ** Pusan National University *** Pusan Open University

1. 서 론

해상, 해저, 우주 등에서 기동중인 목표물의 탐색 및

추적을 위한 기법 중 칼만필터링의 응용은 최근에 가장 많이 사용되고 있다. 시스템 기술자들은 대부분 칼만필터링을 발달시켜 왔고, 이미 이를 이용한 제품들이 제작되어 운용되고 있다. 이러한 많은 응용 이유는 적절한 시기에 목표물 혹은 표적 추적을 위한 증가된 수요와 수학적 기법의 도래, 컴퓨터와 같은 우수한 장비들이 함께 출현되었기 때문이다. 효과적인 데이터 프로세싱 장치들을 위한 수요는 표적의 실시간 추적을 위해서 아주 유용하다. 칼만 필터링 기법은 현재설계 기술자들에게 최상의 시스템이란 신념을 갖도록 해 주며, 필터의 순환 모형은 설계자에게 간편하고 편리함을 제공해 준다.

본 연구에서는 포탑포 시스템의 모델링과 제어문제를 생각해 보고 표적 트래킹과 포탑포 제어치 사이의 관계를 제시하겠으며, 칼만 필터링 기법을 소형 컴퓨터 차원에서 구현시킬 때 실시간 트래킹을 행한다는 조건하에 요구되는 사항들을 언급하고자 한다.

2. 표적에 대한 칼만 필터

일반적으로 6자유도를 가지고 움직이는 표적은 다음과 같은 추계학적 다이나믹 방정식으로 기술할 수가 있다.

$$\dot{x}(t) = f [x(t), c(t), n(t), t] \quad (2-1)$$

여기서 $c(t)$ 는 제어입력이고, $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음이다. 또 제어입력 $c(t)$ 는 최적 필터의 설계에 아무런 영향을 미치지 않을 때 이산시간에 대한 측정치는 다음의 관계를 갖는다.

$$m(t_m) = h [x(t_m), v(t_m)] \quad (2-2)$$

여기서 $v(t_m)$ 는 측정치 사이에 비상관된 관계를 가진 측정치내의 오차를 나타낸다. 최적 추정치가 고차원의 항

들을 무시하더라도 충분히 실제치에 접근한다고 가정하면 최적 추정 프로세스는 칼만의 최적 선형 필터에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{x} = \hat{x}' + E'H^T(HE'H^T + V)^{-1}(m - h(\hat{x}', t_m)) \quad (2-3)$$

$$E = E' - E'H^T(HE'H^T + V)^{-1}HE'$$

이며, 추정치 사이의 관계식은

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, t) \quad (2-4)$$

$$\dot{E} = FE + E^T F^T + N$$

이다. 여기서 " F " 은 측정 바로 직전에 존재하고 있던 조건들을 나타내고 있다.

$$F = \partial f / \partial x |_{x=\hat{x}}, \quad H = \partial h / \partial x |_{x=\hat{x}} \quad (2-5)$$

$$V = (\partial h / \partial v) R (\partial h^T / \partial v) |_{x=\hat{x}}, \quad N = (\partial f / \partial n) Q (\partial f^T / \partial n) |_{x=\hat{x}}$$

행렬 R 과 Q 는

$$E[v(t_m) v^T(t_m)] = R, \quad (2-6)$$

$$E[n(t) n^T(\tau)] = Q \delta(t - \tau)$$

고차항을 무시할 수 있는 선형화 시스템을 위한 최적 필터는 그림.1에서 보여 주고 있으며, 샘플시 상태변수 x 의 추정치는 웨이팅 요소 $K = E'H^T(HE'H^T + V)^{-1}$ 을 통한 임펄스에 의해서 바뀌어진다.

칼만 필터링에 있어서 초기치 설정과 추적 시스템의 보정은 아주 중요하다. 표적 추적을 위해 사용할 유형의 필터는 시스템의 오설정과 오측정을 평가하기 위하여 경험, 외부 정보등과 함께과거 자료들을 사용할 수 있다.

측정 문제와 추적 문제가 같은 컴퓨터를 사용할 경우에는 아주이상적이다. 시스템의 오설정과 오보정 요인 등의 대부분은 추적 필터내에 포함되어야 하는 것이 필수적이다.

통계적 필터를 사용하는 데 있어 중요한 두가지문제는 대형 컴퓨터의 요구와 추적 시스템의 각 부분에 적합한 통계학적 모델의 필요성이다.

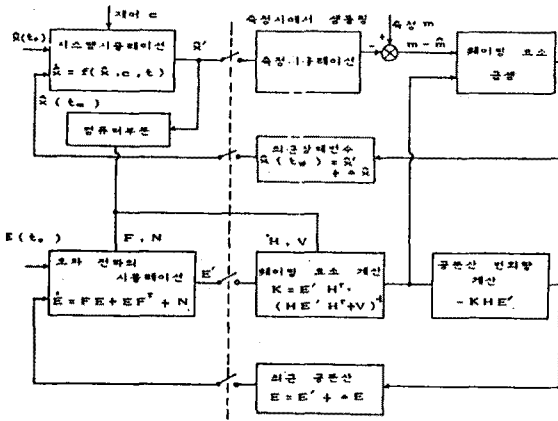


그림.1 칼만 필터의 기능적 다이어그램

3. 포탑포 시스템의 모델과 제어

2장에서 언급된 바와 같이 필터링에 의해 표적의 정보를 추정하였다면 이 절에서는 그 정보를 가지고 화기 통제(fire control)를 위한 포탑포(turret gun)의 제어 문제를 생각해 보기로 한다. 그림.2와 같이 포탑포류의 각 위치를 제어하는 단순한 1차원 시스템을 생각해 보기로 하자. 포탑포류의 명령신호 θ_c 와 감지된 실제신호 θ 에 의하여 오차신호 $\theta_e = \theta_c - \theta$ 를 계산하고, 오차가 0으로 감소할 때까지 플랜트를 작동시켜 나아가도록 하는 것을 보여 주고 있다.

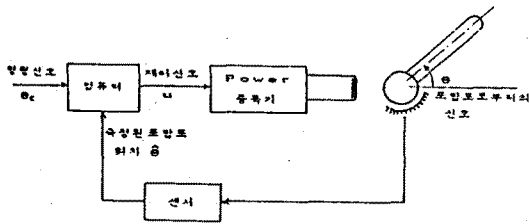


그림.2 단일축에 대한 포탑포를 제어하는 시스템

상기의 포탑포 피드백 제어시스템은 다음 3가지의 부시스템을 포함하고

- 1) 플랜트의 상태를 측정할 센서,
- 2) 플랜트를 추진시킬 액츄에이터,
- 3) θ_c 와 θ 를 비교하고 액츄에이터에 얼마만한 추진력을 인가해야 할 것인가를 결정하는 제어용 컴퓨터

가 있어야만 한다. 아주 단순한 제어 시스템일지라도 컴퓨터는 매우 중요한 역할을 수행한다. 포탑포의 각 위치를 제어하는 시스템에서 컴퓨터는 순간 순간마다 포신을 얼마만큼 올리고 내리어야 하는지를 결정하고 다음에 예견되는 동작을 할 수 있도록 θ 와 $\dot{\theta}$ 의 값을 감지하여야 한다. 다른 한편으로 제어기(controller)는 신호 θ 와 이에 포함된 잡음만 취급하게 될 것이다. 이 때 제어기는 잡음을 아마도 필터링 해야 할 것이며, 신속한 제어 효과를 얻기 위하여 θ 의 최근값에서 추정치 $\hat{\theta} = \hat{\theta}(t|y)$ 을 추론하여 다음 단계를 예측해 주어야만 한다.

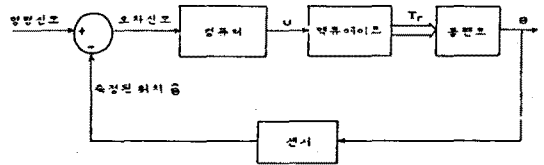


그림.3 그림.2에 대한 블록 다이어그램

목표물 트래킹을 위한 또 다른 컴퓨터는 목표물의 이동 변화(위치, 고도, 속도, 가속도 등)를 추정할, 트래킹 센서에 수집된 정보들을 처리하여 순간 순간마다 포탑포에 명령신호를 전달해야만 한다.

그림.2에 대한 다이내믹 모델을 다음과 같이 둔다면

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = T_r \quad (3-1)$$

여기서 J 는 관성, b 는 댐핑계수, T_r 는 인가토크이다. 식(3-1)에 대해 잡음의 영향을 고려한 다이내믹 상태방정식은

$$\dot{z}(t) = A(t)z(t) + B(t)u(t) + G(t)w^1(t) \quad (3-2)$$

이며, 이 때 플랜트 상태변수를 센서로 측정할 측정 방정식은 다음과 같이 주어지며

$$y(t) = C(t)z(t) + D(t)w^2(t) \quad (3-3)$$

$w^1(t)$ 과 $w^2(t)$ 는 서로 독립인 가우시안 잡음이라고 가정한다. 여기서

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -b/J \end{bmatrix}, \quad B(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J \end{bmatrix}$$

$$u(t) = T_r, \quad G(t) = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{12} \end{bmatrix}$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D(t) = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 \\ 0 & d_{12} \end{bmatrix}$$

이다. 이 때 다이내믹 방정식 식(3-2)와 식(3-3)에 의하여 그림.4와 같은 포탑포 제어를 위해 주어지는 칼만 필터를 구현할 수가 있다.

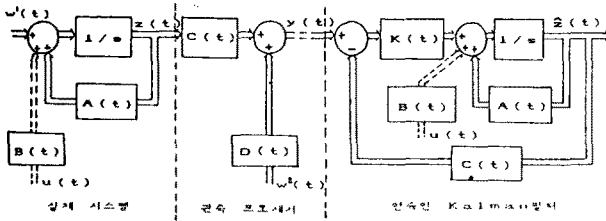


그림.4 포탑포 제어를 위한 칼만 필터

따라서, 칼만 필터로부터 추정된 상태변수 $\hat{z}(t)$ 을 실제 상태변수 $z(t)$ 대신에 사용함으로써 포탑포의 최적 제어를 위한 최적 제어를 설계할 수 있다.

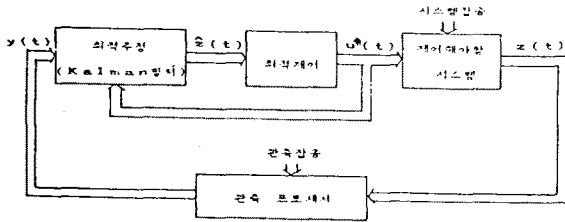


그림.5 포탑포 제어를 위한 필터와 최적제어와의 관계

포탑포의 입력신호 $u(t)$ 를 최적화하기 위하여 오차에 대한 시간 적분과 동작 수행에 사용된 제어입력 $u(t)$ 의 시간적분의 합으로 평가함수(performance index)를 기술할 수 있다. 이 경우의 평가함수는

$$J = \min_{u \in \mathcal{U}} E \left[\int_0^T z(t)^T S z(t) + u(t)^T T u(t) \right] dt \quad (3-4)$$

같이 정의할 수 있으며, 제어입력 $u(t)$ 를 포함하고 있는 주어진 다이내믹 시스템에 대한 칼만 필터 $\hat{z}(t)$ 와 최적 제어 $u^*(t)$ 는 위에서 가정된 조건하에서 다음과 같이 주어진다.

$$u^*(t) = -T^{-1} B^T(t) V(t) \hat{z}(t) \quad (3-5)$$

여기서

$$\dot{\hat{z}}(t) = A(t)\hat{z}(t) + B(t)u^*(t) + P(t)C^T(t) [D(t)D^T(t)]^{-1} [y(t) - C(t)\hat{z}(t)] \quad (3-6)$$

$$\dot{P}(t) = G(t)G^T(t) + A(t)P(t) + P(t)A^T(t) - P(t)C(t)[D(t)D^T(t)]^{-1} C^T(t)P(t), \quad (3-7)$$

$$P(0) = \text{cov}[z_0]$$

$$\begin{aligned} & \dot{V}(t) + V(t)A(t) + A^T(t)V(t) + S \\ & - V^T(t)B(t)T^{-1}B^T(t)V(t) = 0, \quad (3-8) \\ & V(T) = 0 \end{aligned}$$

이다.

포탑포 화기 통제에 있어서 적 표적을 파괴하고 나면 식(3-4)의 둘째항은 제어가 완료되었음을 의미한다.

지금까지 기술된 내용은 적 표적을 추적한 다음, 포탑포에서 공격을 시작하여 적 표적을 파괴할 수 있는 장비의 최적 설계에 관한 내용이라고 할 수 있다.

다음 그림.6 은 표적 트래킹과 포탑포 제어, 화기 통제 시스템의 다이어그램이다. 표적 추적을 위해 칼만 필터링이 수행되는 순간 순간의 정보들이 포탑포 제어 시스템에 전송되어 온라인으로 상호 협조가 이루어지면서 최적의 조건들이 계속 유지되어 나간다.

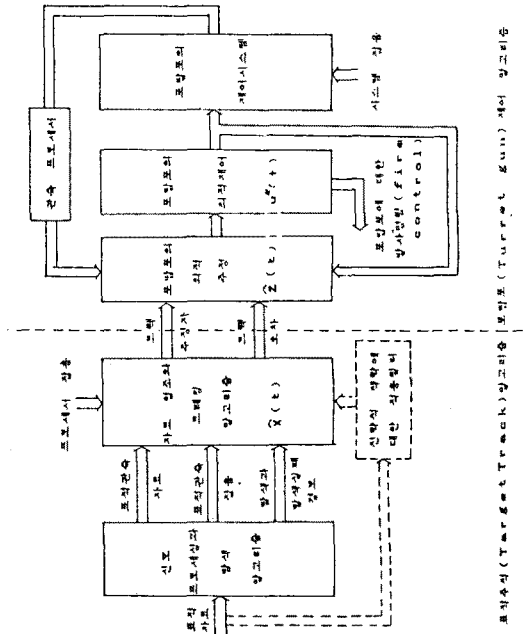


그림.6 표적 트래킹과 포탑포 제어 시스템

4. 실시간 트래킹을 위한 필터의 구현

4-1 소프트웨어의 개발

표적 모델에 대한 트래킹 필터는 개략적으로 다음 그림과 같은 5단계의 과정을 거쳐서 구현할 수 있다.

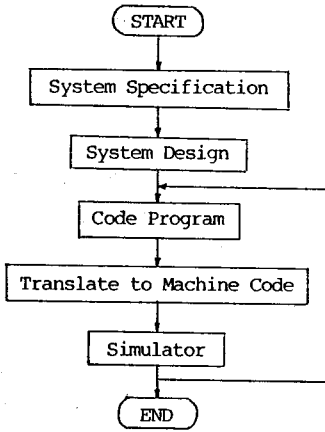


그림.7 소프트웨어 개발의 흐름선도

첫 단계는 경험과 외부의 정보를 이용하여 필터를 이용할 시스템에 맞도록 미리 컴퓨터내에 구체화시킬 시스템 상수나 통계적인 양을 결정해 주어야함을 의미한다. 다음은 고려해야할 시스템의 상태변수를 결정하고 어떻게 필터 알고리즘을 계산할 것인가를 결정한다. 소형 컴퓨터로 구현한다는 측면에서, 필터의 트래킹 성능을 고려하여 웨이팅 요소를 온라인으로 계산할 경우에 리카치(Riccati) 방정식을 풀어낼 때, 행렬을 몇개의 부행렬(submatrix)로 나누어 계산하거나, 행렬을 수계산 후 나온 결과를 이용, 행렬 계산을 수행하지 않고 단순한 4칙 연산만을 행하는 등 가능한 계산량과 계산시간을 줄이는 방법을 강구해야 한다. 그렇게 시스템의 디자인이 끝나면 프로그램을 코딩해야 하는데 아무리 능숙한 사람이라도 코딩 후 디버깅과 에러를 발견하기 쉽도록 고급 컴퓨터 언어로서 먼저 코딩하여 프로그램을 실행시켜본 후 만족한 결과를 얻은 다음, 그 프로그램을 모체로 하여 어셈블리어나 기계어로 번역하도록 해야 한다. 마지막으로 시뮬레이터를 이용하여 알고리즘을 수행시켜서 처음에 설계했던 성능을 보이는 지 검토한다. 만족한 결과를 얻지 못하였다면 다시 시스템을 설계하여 프로그램을 코딩한 후 같은 과정을 반복해야 한다.

4.2 하드웨어의 구현

소형 컴퓨터로 트래킹 필터를 구현하기 위해서는, 트래킹 성능을 고려하여 준최적 필터의 사용이 바람직하다. 준최적 필터의 설계는 그 성능이 가능한 거의 최적 필터와 같도록 선택되어야 한다. 그러나 아무리 준최적 필터를 사용한다 할지라도 소형 컴퓨터는 자체의 여러가지 한계로 인하여, 초고속으로 데이터를 처리해야 한다는 것을 전제로 할 때 실시간 계산이 거의 불가능하다. 따라서 소형 컴퓨터를 호스트(host) 컴퓨터로 사용하고 계산 전용의 고속 디지털 신호 프로세서(digital signal processor)를 사용하는 방법이 제시된다.

다음 그림은 계산 전용의 디지털 프로세서를 사용하여 데이터를 고속으로 처리할 수 있도록 설계된 트래킹 칼만 필터의 한 예이다.

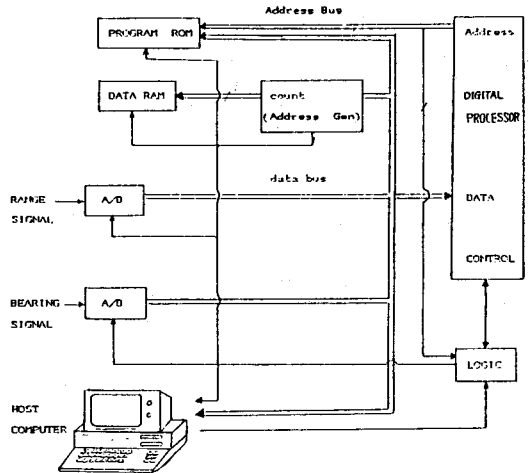


그림.8 트래킹 칼만 필터의 전체 구성도

호스트 컴퓨터와 디지털 프로세서를 연결하여 줄 논리회로(logic circuit)가 필요하며, 보다 빠른 데이터 처리와 계산을 위해 디지털 프로세서의 선택은 그림.8에서 보는 바와 같이 외장된(external) 프로그램 ROM을 사용하는 것이 바람직하고 많은 양의 데이터를 처리하기 위해서는 데이터 전용의 RAM을 두는 것이 불가피하고, 센서로부터 수집된 정보가 A/D 변환기를 통해 들어 오는 것을 계산을 위해 저장해 둘 필요가 있다. A/D 변환기의 변환 속도는 디지털 프로세서가 필터 알고리즘을 계산하는 속도와 센서의 샘플링 주파수에 따라 결정되며, 분해능은 프로세서의 단어당 비트수에 의해 결정된다. 물론 이러한 경우 필터 알고리즘과 시스템의 내역은 호스트 컴퓨터를 통하여 제공해 주어야만 한다. 따라서 트래킹 필터를 사용할 시스템이 어느 것이든지 간에 필터 알고리즘의 프로그램만 새로 코딩하여 주고 그 필터의 튜닝만 거친다면 위의 그림.8에서 보여 준 트래킹 필터를 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 디지털 프로세서의 선택은 될 수 있으면 계산 속도가 빠른 것이 유리하나 실시간 측면에서 트래킹 필터를 사용할 시스템과 필터의 트래킹 성능을 고려하여 절충해서 선택하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 Harvard Architecture를 변형하여 만들어진 TMS32010이라는 전용 디지털 신호 처리기를 사용하여 트래킹 필터를 구성하였다. TMS 32010은 명령 사이클이 빠른 뿐만 아니라 16x16 비트의 곱을 한 명령 사이클에 수행하며 프로그램 메모리와 데이터메모리가 구분되어 있어 명령의 fetch와 수행을 동시에 할 수 있는 고속 계산 전용의 디지털 프로세서이다.

5. 결 론

본 연구에서는 실시간 트래킹 칼만 필터를 설계하는 데 있어 먼저 일반적인 요구사항들을 검토하였고, 표적에 대한 모델이 결정되면 이에 따른 칼만 필터의 알고리즘을 적절히 대응시킬 기법을 다루었다.

칼만 필터링을 수행함에 있어 컴퓨터의 계산부담을 덜어 주기 위한 방법으로는 시스템 오퍼레이션에 기여도가 낮은 상호 분산 행렬의 요소를 제거하는 것이다. 선형 필터는 실제 시스템을 나타낸 모델에 대해서는 수학적으로 최적인 필터를 구성시켜 준다. 가정된 통계학적 모델은 2-3개 보다 많지 않은 주된 값으로 실제 시스템을 나타낸다. 문제는 트래킹 수행성을 감소시키지 않고 변수를 제거하는 데 있다. 시스템을 구현하는 데 있어 효율적 준 최적 필터를 구하기 위한 방법은 최적 필터내에서 정보의 주된 요소들을 실제로 통찰하여 이를 사용하는 것이다.

포탑포의 제어에 있어서는, 트래킹 필터에서 추정된 목표물의 정보가 얻어짐과 동시에 제어를 수반해야 할 포탑포의 최적 제어치를 유도하였다.

소형 컴퓨터를 이용하여 트래킹 필터를 구현할 경우에 관측된 정보를 초고속으로 처리하여야 하므로, 선택된 전용 디지털 신호 프로세서를 중심으로 프로그램 ROM 과 데이터 RAM, A/D 변환기, 논리회로 등으로써 트래킹 필터의 구현이 가능함을 제시하였다. 본 연구에서는, 작성한 시나리오에 따라 시뮬레이션한 결과 필터 알고리즘을 계산하는데 필요한 시간은 준 최적 필터를 사용할 경우에 약 100(μ sec)로서 시스템의 상태변수가 많거나 실시간을 기 존해서 생각하더라도 충분히 실시간 트래킹이 가능함을 제시할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 트래킹 필터는 실행속도가 충분히 빠르고 하아드웨어의 구성 경비가 저렴하다는 장점을 살려서 앞으로의 연구방향은 포탑포 제어를 위해 제시된 이론을 확립하여 화기제어를 위한 기초를 관련 산업체와 긴밀한 유대관계를 맺어 마련하여야 할 것이다.

6. 참 고 문 헌

1. Man Hyung Lee, "Stochastic Dynamic System Suboptimal Control with Uncertain Parameter," IEEE Trans. Aero. & Elec. Sys., Sept.1985, pp.594-600.
2. 이만형, 이혁재, "적응 비선형 필터링과 전략적 책략 이동 목표물의 추적에 관하여," 한국과학재단 최종보고서, 1986.4.
3. M.Athans, W.B.Davenport, Jr., E.R.Ducot, and R.R.Tenney, Surveillance and Target Tracking, Proceeding for the fourth MIT/ONR Work on Command-Control-Communication(C³) Problems, Oct. 1981.
4. H.Titus, Advance in Passive Target Tracking, The Conference Advances in Passive Target Tracking, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, June 1977.
5. "United States Air Force Computer, Technology Forecast and Weapon System Impact Study," (COMTEC-2000), HQ AFSC TR 78-03(three vols.), Dec.1978.
6. S.A. Andriole, G.W. Hoppole, "They're Only Human: Decision-Makers in Command and Control," March 1982, Signal, pp.45-49.
7. J.J.Marciniak, "Technology Needed for C³I Evolution," Astro. & Aeronautics, Vol.20, July 1982.
8. "Special Issue on Application of Kalman Filtering," IEEE Trans. Auto. Contl., Vol.AC-28, March 1983.
9. Man Hyung Lee, "Detection and Tracking for Maneuvering Target," 대한전기학회 학술연구발표회 논문집, 제 19 회, 1984, pp.35-37.
10. Y.T.Chan, J.B.Plant, and J.R.T.Bottomley, "A Kalman Tracker with a Simple Input Estimator," IEEE Trans. Aero. & Elec. Sys., Vol.AES-18, 1980, pp.235-240.
11. 이만형외 4인, "기동 목표물의 수학적 모델링과 칼만 필터를 이용한 실시간 추적기법의 개발," 산학협동재단 최종연구보고서, 1986. 10.