

M&S를 이용한 사격통제 시스템의 설계검증 및 성능분석에 관한 연구

윤동식^{1)*}, 김천환¹⁾, 임영택¹⁾, 배윤지¹⁾
삼성탈레스¹⁾

The performance analysis and design verification about the fire control system using Modeling and Simulation

Dong Sik Yun¹⁾, Chon Hwan Kim, Young Taek Lim, and Yoon Ji Bae

1) Samsung Thales Co., 259, Gongdan-Dong, Gumi-City, Gyoungsangbuk-Do 730-030 Korea C.P.O BOX 50

Abstract : Gun fire solution computed in ballistic computing unit (BCU) needs to be evaluated before applying in real fire. In this paper, ballistic performance analysis method is studied for reasonable prediction of hit probability with ballistics error presentation on hitting plane. Also Gun fire solution using interacting multiple model (IMM) algorithm is analyzed through proposed method.

Key Words : Fire Control System, Ballistic Computing Unit, Interacting Multiple Model

1. 서론

일반적으로 사격 통제 시스템(FCS : Fire Control System)을 운용하는 전투체계의 입장에서 초탄의 높은 명중률과 안정화된 포 구동은 매우 중요한 문제이다. 이러한 결과를 얻기 위해서는 실제 센서를 이용하여 표적을 탐지/추적하고 표적의 미래위치를 예측하고 포 명령을 산출하여 포를 구동하면서 테스트를 해야 하지만 야전에서 위와 같은 환경조건을 만족하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 그에 상응하는 방법으로 제안하는 것이 M&S(Modeling & Simulation) 이다.

M&S를 이용하여 실제와 흡사한 환경에서

시뮬레이션을 거칠 수 있다면 사전에 시스템의 문제점을 발견/수정이 가능하며 실제 상황에서의 위험도를 낮출 수 있으며 사격 시 성공률을 높일 수 있어 시간과 비용, 성능적인 면을 모두 만족시킬 수 있다. 이러한 방식은 현재 전력화 과정을 거치고 있는 차기소형고속정에 적용되어 실제 시험 사격 시 놀라운 명중률로 성능을 인정받았으며 함포의 성능을 안정화시키고 한 단계 향상된 사격 통제 시스템을 안착시키는데 성공하였다.

*교신저자 : dongsik.yun@samsung.com

2. 사격통제 시스템의 구성

2.1 상호작용 다수모델 필터

정밀 표적 추적을 위해서는 표적에 대한 정확한 동력학 모델을 필요로 하며 추적필터의 성능은 모델링의 정확성에 대해 민감한 특성을 보인다. 특히 기동이 있는 표적을 명중시키기 위해서는 추적필터를 이용하여 표적의 위치, 속도, 가속도를 정확히 추정하여 예상요격지점을 산출해야 한다. 단수모델 필터의 경우에는 모델과 시스템이 일치할 때 최적 filter가 되고, 그렇지 않을 경우에는 추정치에 바이어스가 실리거나, 공분산이 증가하거나, 추정치가 발산할 수 있다. 실제 표적의 경우 하나의 기동형태만으로 움직이지 않으며 그 목적에 따라 다양한 기동패턴을 가지게 될 것이므로 모델링의 정확도가 추정성능에 미치는 영향을 감소시키기 위해서는 달리 설정된 기동모델에 근거한 다수의 시스템 모델을 사용한 필터들을 동시에 사용하여 센서의 측정치와 필터들의 추정치를 비교하여 어떠한 기동모델이 실제 시스템을 잘 묘사하는가를 확률적으로 판단하여 필터의 추정치에 확률적 가중치를 주어 결합추정치를 얻는 상호작용 다수모델(IMM : Interacting Multiple Model) 필터 알고리즘이 적합하다.

표적 추적 필터를 구성하기 위해서는 표적의 기동모델이 필요한데, 본 논문에서는 3개의 기동모델을 구성하였다. 이러한 표적 기동모델은 표적의 운동을 정확히 묘사하며, 실시간 구현을 위하여 간단하게 모델링 하여야 한다. 기동 표적의 특성에 의해 시간 t 에서 인가된 표적의 기동입력이 충분히 작은 $\Delta\tau$ 후의 시간 $t + \Delta\tau$ 에서도 계속 표적의 운동에 영향을 미친다는 가정아래 표적의 가속도를 1차 Markov Process 로 모델링하는 Singer Model, 표적이 좌표회전(coordinate-turn) 혹은 선회기동(bank-to-turn) 한다는 가정 아래 가속도의 미분치인 jerk 항을 속도와 가속도의 함수로 모델링하여 Singer Model에 포함시키고 표적의 가속도가 deterministic acceleration과 time-correlated accelerating random process로 이루어졌다고 가정하는 Song Model, 대공 표적의 좌표회전 기동의 궤적 형태를 등속 원운동으로 간주하여

기동 모델을 전형적인 CTR(Constant Turn-Rate) 표적의 기동할 때 궤적으로부터 운동학 개념에서 표적의 기동모델을 유도한 CTR Model을 정의한다.

3. 성능분석

3.1 성능 분석 기법

본 절에서는 표적 추적필터에서 추정한 표적의 위치, 속도, 가속도 정보를 사용하여 산출한 예상요격지점의 성능 분석을 위해 사격평면을 정의한다. 또한 비행시간 이후 남아 있는 탄의 속도와 표적의 속도를 고려하여 표적과 탄의 사격평면상의 위치를 계산하고 교전환경에 따라 과녁(BullsEye)에서 방위각(Bearing) 방향, 고각(Elevation) 방향 오차를 산출하는 방법과 탄 분산도, 표적의 크기, 신관설정에 따라 사격환경을 반영하여 탄도계산의 명중률(Hit Probability)을 계산하는 방법을 제안하였다.

3.2 사격평면에서의 오차

예상요격지점에 대해 탄도계산을 수행하면 산출된 포명령으로 비파시간(TOF : Time Of Flight) 이후의 탄 위치를 계산할 수 있다. 요격평면은 탄 궤적에 수직인 평면이다. BullsEye상의 오차는 요격평면의 (0, 0)에 표적이 존재한다고 가정하고 요격평면에서 상대적 탄의 위치를 계산하는 것이다.

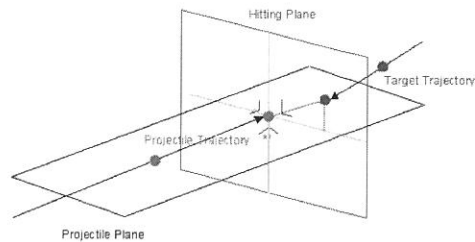


Fig. 1 요격 평면 & 탄 궤적

이때 표적 정보는 센서 측정치 정보를 3rd Curve Fitting으로 재구성하여 사용한다. TOF 이후 남아있는 탄속은 사표(Range Table)의 값을 근사화해서 구할 수 있지만 질점 운동방정

식을 수치적분법⁸으로 계산하였을 경우 적분 과정에서 최종 탄속을 수치적으로 계산할 수 있다. 비과시간 이후 탄의 위치벡터 \vec{Pp} 와 속도벡터 \vec{Pv} , 표적의 위치벡터 \vec{Tp} 와 속도벡터 \vec{Tv} 로 요격평면상의 표적과 탄의 위치를 다음과 같이 계산할 수 있다.

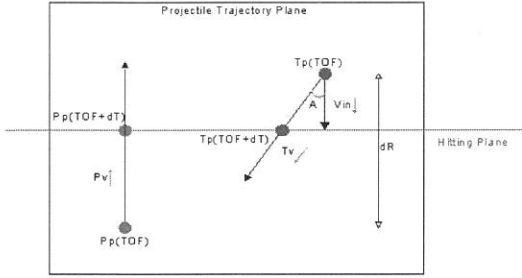


Fig. 2 Projection of Projectile Trajectory Plane

요격평면에 수직방향으로 표적이 들어오는 속도를 다음과 같이 계산한다.

$$|\vec{V}_{in}| = |\vec{Tv}| \cos A = |\vec{Tv}| \frac{\vec{Tv} \cdot \vec{Pp}}{|\vec{Tv}| |\vec{Pp}|}$$

$$= \frac{TvxPpx + TvyPpy + TvpPpz}{\sqrt{Ppx^2 + Ppy^2 + Ppz^2}}$$

Projectile direction에 대한 표적의 Range를 계산한다.

$$|\vec{Tp}| \cos A = |\vec{Tp}| \frac{\vec{Tp} \cdot \vec{Pp}}{|\vec{Tp}| |\vec{Pp}|}$$

$$= \frac{TpxPpx + TpyPpy + TpzPpz}{\sqrt{Ppx^2 + Ppy^2 + Ppz^2}}$$

ΔR 은 비과시간 이후 표적과 탄 사이의 사거리방향 거리 오차로써 Projectile Plane상에서 표적의 Range와 탄의 Range 차이로 구할 수 있다. 표적과 탄이 요격평면상에 존재하도록 하는 $\Delta Hitting Time$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta Hitting Time = \frac{\Delta R}{|\vec{V}_{in}| + |\vec{Pv}|}$$

결국 요격평면상에서 표적과 탄의 위치는 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned} Hitting Target &= \vec{Tp} + \vec{Tv} \cdot \Delta Hitting Time \\ Hitting Projectile &= \vec{Pp} + \vec{Pv} \cdot \Delta Hitting Time \end{aligned}$$

요격평면상의 표적과 탄의 위치를 구했다면 Hitting Projectile에 대한 Hitting Target의 상대적인 위치인 ΔB , ΔE 를 계산하여 BullsEye 상의 방위각 방향, 고각 방향 오차를 계산할 수 있다. 교전환경에 따라 과녁상의 오차를 구하는 방법은 다음과 같다.

3.2.1 대공 표적

ΔB , ΔE 를 계산하기 위해 요격평면상의 Hitting Projectile을 원점으로 하고 서로 직교하는 새로운 좌표축 X2, Y2, Z2를 생각할 수 있다.

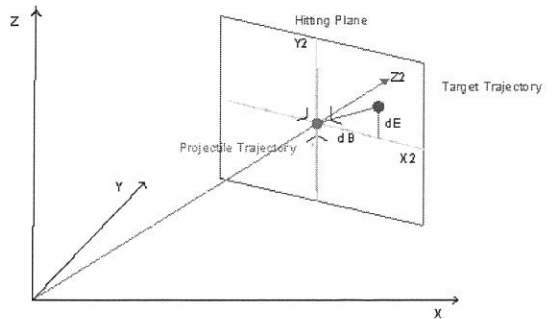


Fig. 3 ΔB , ΔE of Air Target

Projectile Vector를 (a, b, c)라고 하면 요격평면의 X2축은 (b, -a, 0) Y2축은 (ac, bc, -a2-b2) Z축은 (a, b, c)가 된다. ΔB , ΔE 를 계산하기 위해 X2, Y2, Z2를 축으로 하는 공간상의 (a, b, c)를 X, Y, Z 축의 (0, 0, 0)으로 옮기는 변환 행렬 F는 다음과 같다.

$$F(X) = -C \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} + C \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{b}{w_1} & \frac{-a}{w_1} & 0 \\ \frac{ac}{w_2} & \frac{bc}{w_2} & \frac{-a^2 - b^2}{w_2} \\ \frac{a}{w_3} & \frac{b}{w_3} & \frac{c}{w_3} \end{bmatrix}$$

$$w_1 = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$w_2 = \sqrt{(ac)^2 + (bc)^2 + (a^2 + b^2)^2}$$

$$w_3 = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

위 식의 (x, y, z)에 요격평면상의 임의의 점을 대입하면 (ΔB , ΔE , 0)을 산출할 수 있다. 정확히 요격평면상에 있는 점을 대입했을 경우 z좌표는 0이 된다.

3.2.2 대함 표적

대함 표적의 경우 요격평면은 해수면이다. ΔB , ΔE 를 계산하기 위해 요격평면상의 Hitting Projectile을 원점으로 하고 서로 직교하는 새로운 좌표축 X2, Y2를 생각할 수 있다.

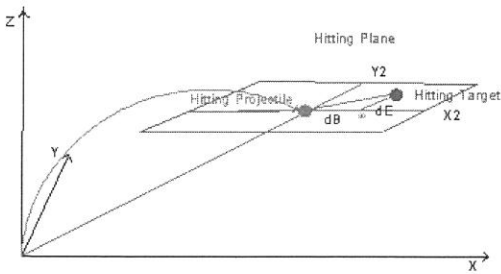


Fig. 4 ΔB , ΔE of Surface Target

Hitting Projectile Vector를 (a, b)라고 하면 요격평면의 X2축은 (b, -a), Y2축은 (a, b)가 된다. ΔB , ΔE 를 계산하기 위해 X2, Y2를 축으로 하는 공간상의 (a, b)를 X, Y 축의 (0, 0)으로 옮기는 변환은 다음과 같다.

$$F(X) = -C \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} + C \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{b}{w_1} & \frac{-a}{w_1} \\ \frac{a}{w_2} & \frac{b}{w_2} \end{bmatrix}$$

$$w_1 = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad w_2 = \sqrt{a^2 + b^2}$$

위식에 (x, y)에 요격평면상의 임의의 점을 대입하면 (ΔB , ΔE)를 산출할 수 있다.

표적 시나리오에 따라 $-\Delta B$, $-\Delta E$ 를 누적하여 나타내면 사격평면에서 표적에 대한 탄의 위치 오차 경향성을 2차원 평면에서 시각적으로 파악할 수 있다. 또한 특정 구간에서 ΔB 와 ΔE 를 누적하여 중간값(Median)을 취하는 것으로 CEP(Circular Error Probable: 원형공산오차)값을 산출할 수 있다. CEP는 예상요격지점에 대한 특정 구간에서 탄과 표적의 위치 오차 정도를 나타내는 대표값으로 추적필터와 예상요격 지점 알고리즘의 성능 분석 기준값으로 활용 가능하다. 성능 분석 결과는 시뮬레이션 결과에서 살펴보기로 한다.

3.2.3 명중률(Hit Probability)의 계산

BullsEye상의 CEP값으로 추적필터와 예상요격 지점 알고리즘의 성능분석은 가능하지만 CEP값은 실제 사격 환경을 반영하지는 않는다. 따라서 본 논문에서는 교전환경에 따라 산출한 ΔB , ΔE 를 가지고 탄분산도, 표적의 크기, 신관설정에 따라 사격환경을 반영하여 명중률을 계산하는 방법을 제안한다.

요격평면의 중심을 계산상의 탄의 위치로 보았을 때 실제 사격시의 탄은 방위각, 고각 방향으로 각각 사거리에 따라 분산도 σ_B , σ_E 를 가지는 가우시안 분포(Gaussian Distribution)를 따른다고 가정한다.

사거리에 따른 분산도 σ_B , σ_E 의 값은 탄종에 따라 사표로부터 참조한 근사치(approximation) 값을 보간(interpolation)하여 사용한다. 요격평면의 중심 (0, 0)을 탄의 위치로 두었을 때 표적의 상대적인 위치 ΔB , ΔE , 표적의 크기(Width, Height), 신관 설정 거리(Proximity)를

반영하여 명중률을 계산할 수 있다. 방위각 방향 명중률을 $H.P_B$ 라 하고 고각 방향 명중률을 $H.P_E$ 라 하고 할 때 명중률은 다음과 같다.

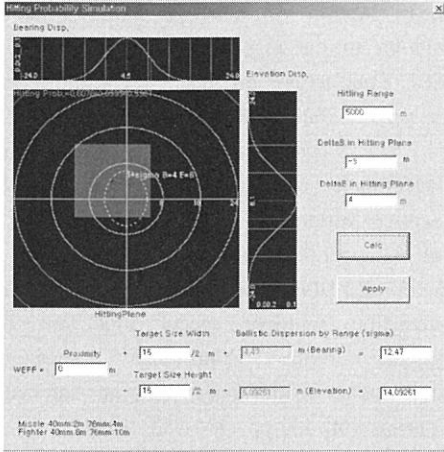


Fig. 5 Calculation of Hit Probability

$$Hit Probability = H.P_B \cdot H.P_E$$

$$H.P_B = G.P\left(\Delta B + \frac{W}{2} + Pr, \sigma_B\right) - G.P\left(\Delta B - \frac{W}{2} + Pr, \sigma_B\right)$$

$$H.P_E = G.P\left(\Delta E + \frac{H}{2} + Pr, \sigma_E\right) - G.P\left(\Delta E - \frac{H}{2} + Pr, \sigma_E\right)$$

$$G.P(x, \sigma) = GaussianProb(x, \sigma) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx$$

(Pr: Proximity, H: Height, W: Width)

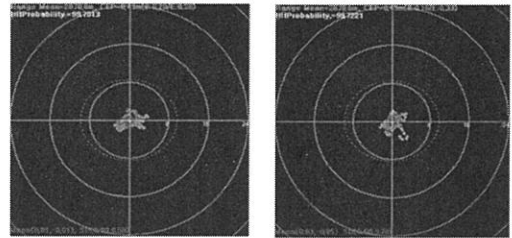
4. 실험결과

실제 사격환경의 표적정보는 센서와 표적의 특성을 반영하므로 이상적인 표적과는 차이가 있다. 함포 사격 환경에서 센서는 roll, pitch, heading의 자함 자세를 보상하여 안정화된 자함 중심의 표적정보를 주는데 이로 인해 표적 정보에 자함 자세 변화 주기로 미세잡음(Radial Periodic Noise)이 실리게 된다. 또한 대공 모의

표적의 경우 표적특성과 기류 변화에 따른 출렁임(Fluctuation)이 반영된다. 이러한 특성이 반영된 환경에서 단수모델과 상호작용 다수모델 필터의 성능을 비교해 보았으며 실제 대공사격의 결과와 시뮬레이션을 통한 결과를 비교하여 보았다.

4.1 필터 알고리즘 선택 및 튜닝

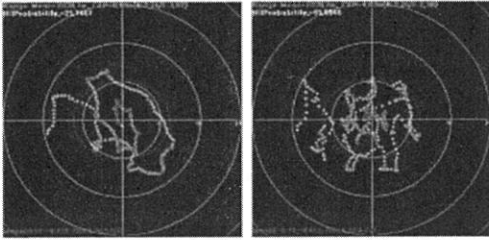
등속 직선 기동하는 이상적인 표적정보를 다음과 같이 생성한다. 초기위치 (0, 6000, 700) [m]이고 초기속력은 (-75, 0, 0) [m/s]로 등속 직선 기동을 하며 sampling time은 0.1초이다. 아래 Fig. 6은 생성한 표적 정보에 대해 Singer 단수필터와 IMM 필터로 추정하고 미래위치를 예측하여 제안한 방법으로 탄도계산 오차를 사격평면에 나타낸 결과이다. Singer 단수 필터와 IMM 필터의 성능은 각각 CEP 0.43m, 0.45m, 명중률 99.70%, 99.72%)로 유사하며 모두 우수한 성능을 나타낸다.



A. Single Filter B. IMM Filter
Fig. 6 BullsEye of Ideal Trajectory

실표적은 이상표적정보에 1/5Hz 주기로 방위각 0.01deg 고각 0.015deg의 잡음과 1/30Hz, 5m의 출렁임을 반영하여 생성한다.

자함 자세 변화 잡음과 표적 특성, 기류변화에 따른 출렁임이 반영된 표적 정보로 시뮬레이션 했을 때는 Fig. 7과 같이 CEP 4.67m, 6.10m, 명중률 25.74%, 65.09%로 Singer 단수모델 필터에 비해 IMM 필터의 성능이 우수하다는 것을 판단할 수 있다.



A. Single Filter B. IMM Filter
Fig. 7 BullsEye of Simulation Trajectory

5. 결론

본 논문에서는 실제 표적추적 및 사격 통제 시스템을 구성하기 위해선 어떤 표적추적 필터를 구성해야 최적의 결과를 도출할 수 있는지를 Modeling 과정을 통하여 결정하는 것을 보였으며, 모의 표적 데이터뿐만 아니라 실제 해상에서 획득한 표적 데이터를 이용한 Simulation 과정을 통해 표적 추적 필터를 tuning 하여 논문에서 제안한 IMM 표적추적필터를 사격 통제 시스템에 적용하였다. 이러한 과정을 거친 사격 통제 시스템은 실제 사격시의 결과를 사전 시뮬레이션을 통해 결과를 유추할 수 있었으며 다양한 환경 조건을 적용시킴으로써 시스템에 대한 안정성을 확보할 수 있었다. 향후 현재의 사격 통제 M&S 시스템을 더욱 정밀한 사격과 통제가 가능한 시스템으로 발전시켜 실제 시험 결과까지 예측할 수 있는 사격 통제 M&S 시스템으로 발전시킬 계획이다.

참고문헌

1. R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," J. Basic Eng. Trans. ASME., vol. 82D, pp.35-46, 1960.
2. A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Process, New York; McGraw-Hill, 1991.

3. D. T. Magill, "Optimal adaptive estimation of sampled stochastic process," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 10, pp. 434-439, 1965
4. R. L. Moose, An adaptive state estimation solution to the maneuvering target problem, IEEE Transactions on Automatic Control vol. 10, pp.359-362, 1988.
5. P. S. Maybeck and D. P. Halon, "Performance enhancement of multiple model adaptive estimator," IEEE Trans. on AES, vol. 31, pp.1240-1254. Oct. 1995.
6. H. A. P. Blom and Y. Bar-Shalom, "The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 33, pp. 780-783, 1988.
7. C. B. Change and M. Athans, State estimation for discrete systems with switching parameters, IEEE Trans. on AES, Vol. 14, No. 5, May 1978.
8. Normand Auger G. Preston Burns, "A Mathematical Model for digital gunfire control using numerical integration", 1980