

탄환 측정 및 추적에 의한 포 명중률 증대 알고리즘 연구

김 영 주, 이 양 원, 이 봉 기, 김 경 기

국 방 과 학 연 구 소

Gun Error Correction Algorithm with Bullet Tracking and Measurement

Young-Joo Kim, Yang-Won Lee, Bong-Ki Lee, Kyung-Ki Kim

Agency for Defense Development

ABSTRACT

To improve gun hit probability and to correct miss distance between target and bullet, It assumes that a radar tracks both the targets and bullets fired by a gun system. This papers describes an adaptive algorithm developed for processing the large number of radar measurements. The gun-order computation is enhanced by feedback from the ballistic estimator

1. 서 론

함포 사격시 주변요인에 의하여 표적과 발사된 탄 사이에는 오차거리가 발생하고 이는 포 정확도에 커다란 영향을 미치게 된다. 이러한 오차는 화기 제어 시스템 설계나 영점 사격으로 완전히 보상하기 힘들다. 특히 표적이 소형, 고속일 경우 표적에 대한 대응시간이 짧아지므로 포의 발사탄수나 오차 보상의 기회는 점점 줄어들게 된다. 본 논문에서는 위와 같은 위협 증가에 대처하기 위한 속사포를 위한 폐회로 디지털 제어에 대해서 연구하였다.

사격통제 레이다는 거리오차를 보상해 주기 위해 표적 및 방어 시스템에서 발사된 탄환을 모두 추적한다고 가정하였으며, 많은 양의 레이다 측정값을 처리하기 위해 적응 알고리즘을 사용하였다. 그리고 표적에 대한 탄도 평가 알고리즘은 다음 3부분으로 구성하여 설명하였다.

(1) 비행중에 있는 각 탄환의 레이다 관측값은 포각을 보상해 준다.

(2) 평균 알고리즘(Algorithm)은 레이다 잡음 및 탄 분산을 필터링(Filtering)하기 위해 사용한다.

(3) 실시간에서 탄환 비행계적 모델의 변수들을 갱신하기 위해 회귀 평가를 사용한다. 발사명령 계산은 탄도 평가기로부터 변환되어 보상된다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과 폐회로 사격제어 시스템은 개회로 시스템 보다 표적오차 간격은 1/5 정도 줄어들었다. 또한 폐회로 시스템의 응답시간은 1초 이하로써 첫 탄환의 표적 비행시간 5초와 비교하여 충분하였다.

2. 탄도의 유도

화기 제어기로부터 발사된 탄은 초기 탄속도 벡터와 중력방향으로 표현되는 운동 방정식으로 표시할 수 있다.

$$\dot{X}(t) = V_x(t) \tag{1}$$

$$\dot{Y}(t) = V_y(t) \tag{2}$$

$$\dot{V}_x(t) = -D(t)V_x(t) - g\sin\theta_E \tag{3}$$

$$\dot{V}_y(t) = -D(t)V_y(t) - g\cos\theta_E \tag{4}$$

여기서

$$D(t) = \frac{C_D(M, \delta)\rho(h)sV(t)}{2m}$$

$$M = \frac{V(t)}{V_*(t)}$$

$$V(t) = [V_x^2 + V_y^2]^{1/2}$$

$$X(0) = Y(0) = V_x(0) = 0$$

$$V_x(0) = V_m$$

위의 수식에 사용된 각 변수가 나타내는 의미는 다음과 같다.

- X, Y = 초기 탄속도 방향의 X, Y 좌표
- θ_E = 지평선 위쪽 X의 축의 각
- V_x, V_y = 탄의 속도
- g = 중력가속도
- C_D = 공기역학적 지연변수
- M = 탄속도(Mach)
- δ = 고도 h에 따른 공기밀도함수
- S = 탄의 기준지역
- V_0 = 음향속도
- m = 탄의 무게

폐회로 형태의 해를 구하기 위하여 식 (1)~(4)는 다음 조건에 의하여 근사할 수 있다.

- (1) 탄의 속도는 Y방향 보다 X방향의 성분이 더욱 크다고 가정한다.

$$V(t) = [V_x^2 + V_y^2]^{1/2} = V_x \quad (5)$$

- (2) 고도에 따른 공기밀도는 일정하다.

- (3) 고도에 따른 Y_{aw} 영향과 소리의 속도의 영향은 무시한다.

$$\dot{X}(t) = V_x(t) \quad (6)$$

$$\dot{Y}(t) = V_y(t) \quad (7)$$

$$\dot{V}_x(t) = -K C_D (V_x) V_x^2(t) \quad (8)$$

$$\dot{V}_y(t) = -g \cos \theta_E \quad (9)$$

여기서

$$K = \frac{\rho S}{2m} \quad (10)$$

식 (6) ~ (9)을 이용하여 X(t)에 대한 폐회로 형태의 해를 구하면 다음과 같다.

$$X(t) = \frac{V_m t}{1 + \frac{K q}{2} (V_m)^{1/2} t} \quad (11)$$

3. 단일 탄 추적 알고리즘

그림 1은 고정 사격 각도에서 X_L 방향으로 사격된 탄의 운동을 대수적인 모델을 표시하고 회귀 알고리즘을 유도하기 위한 LOS 좌표계를 표시하며 원래의

좌표계와의 관계는 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 C_2 & S_1 C_2 & S_2 \\ -C_1 S_1 & -S_1 S_2 & C_2 \\ S_1 & -C_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서

$$C_1 = \cos W_T, \quad C_2 = \cos W_E$$

$$S_1 = \sin W_T, \quad S_2 = \sin W_E$$

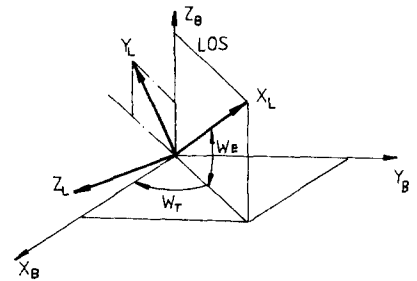


그림 1. LOS 좌표계
Fig 1. LOS Coordinate System

만약 바람의 영향이 없다고 가정한다면 탄의 운동은 LOS 평면상에 존재하고 X_L 축상에서의 운동은 식 (11)으로부터 구할 수 있다.

$$X_L(T_f) = \frac{V_m T_f}{1 + K_D (V_m)^{1/2} T_f} \quad (13)$$

여기서 T_f 는 탄의 비행시간, V_m 은 포구속도 K_D 는 대기온도에 좌우되는 상수값이다. 상태 벡터를 정의하기 위해 식 (13)를 간략히 하면 아래와 같다.

$$X_L(T_f) = \frac{a T_f}{1 + b T_f} \quad (14)$$

$$\theta^T = [a, b] \quad (15)$$

상태 벡터 및 T_f 시간 후의 탄의 X 좌표를 측정잡음 $\nu(K)$ 및 모델링 오차 $w(K)$ 를 고려하여 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\theta(K+1) = \theta(K) + w(K) \quad (16)$$

$$X_L(K) = H(K) \theta(K) + \nu(K) \quad (17)$$

여기서

$$H(K) = [T_f, -X_L(K)T_f] \quad (18)$$

$$E[V^2(K)] = R \quad (19)$$

$$E[W(K)W_T(K)] = Q \quad (20)$$

또한 K시간에서 각 변수들을 갱신하기 위한 상태 벡터는 위의 식들로부터 유도하면 아래와 같다.

$$\hat{\Theta}(K) = \Theta(K-1) + K(K)[X_L(K) - H(K)\hat{\Theta}(K-1)] \quad (21)$$

벡터 K(K)는 필터(Filter) 이득에 해당한다.

4. 다중탄 추적 알고리즘

추적 알고리즘은 폐회로 화기 제어 시스템에서 다중탄에 대한 레이다 측정치를 처리하기 위해 유도된다. 알고리즘의 목적은 탄 위치 측정값을 실시간에 이용하기 위해 탄도 변수 평가에 입력값을 발생한다. 이를 위하여 각 단계별로 나누어 설명하였다.

(1) 탄환의 레이다 관측값과 포 각도를 시간의 함수로 나타내면 표 1과 같다.

표1.
Table 1

시간	포 각도	레이다 측정값
Δt	$W_E(1), W_T(1)$	$X_1(1)$
$2\Delta t$	$W_E(2), W_T(2)$	$X_1(2), X_2(1)$
.	.	.
$n\Delta t$	$W_E(n), W_T(n)$	$X_1(n), X_2(n-1), \dots, X_n(1)$

Δt 는 연속으로 발사된 탄환 사이의 시간간격을 표시하며 ΔT_f 는 각 탄환에 대한 연속적인 레이다 관측값의 시간 간격을 표시한다. 레이다의 관측값은 포 사격과 일치될 수 있으며, 시간 Δt 내에서 여러 개가 될 수도 있다. 시간 Δt 에서 자유공간 내에는 단지 첫번째 탄환만이 존재하고, $n\Delta t$ 에서는 n개의 탄이 모두 공간내에 존재하여 관측 된다고 가정하였다.

(2) 레이다 관측값의 LOS 좌표계 변환

그림 1의 LOS 좌표계에서 각 탄환의 레이다

관측값에 대한 좌표는 아래와 같다.

R, θ_T , θ_E 는 탄환의 거리, 방위 및 고각을 나타내며

W_E 는 사격 당시 포 각도를 표시한다.

$$R_G = R \cos \theta_E \quad (22)$$

$$Z_B = R \sin \theta_E \quad (23)$$

그래서

$$X_L = R_G \cos W_E + Z_B \sin W_E \quad (24)$$

$$Y_L = R_G \sin W_E - Z_B \cos W_E \quad (25)$$

여기서 R는 $X_B - Y_B$ 축상의 탄입사거리 벡터를 표시하며 가로지르는 바라는 없다고 가정하였다.

(3) X_L 의 기준 LOS 좌표계 변환

고정된 X_L 좌표를 LOS 좌표계내에서 얻기 위하여 포구 고각과의 관계를 표현하면 아래와 같다.

$$X_L(K, 30^\circ) = X_L(K, W_E) - \Delta X(K, W_E) \quad (26)$$

우측항 $\Delta X(K, W_E)$ 는 식 (10)으로부터 미리 계산된 값이며, 본 논문에서는 X_L 좌표계를 30° 로 고정하였다.

(4) X_L 좌표계를 위한 회귀 알고리즘

표현식의 편의성을 위하여 $X_L(K, 30^\circ)$ 는 $X_L(K)$ 로 표시하고 n번째 탄환은 $X_{Ln}(K)$ 로 표현한다. 만약 레이다 잡음이 존재하지 않고 각 탄환이 동일하다고 가정 한다면 X_L 에 대한 식을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$X_{Ln}(K) = X_{Ln-1}(K) = \dots = X_{L1}(K) \quad (27)$$

위와 같은 가정 하에서 실시간 처리를 위한 회귀 알고리즘은 다음과 같이 표현된다.

$$X_{La}^{(n)}(K) = P * X_{La}^{(n-1)}(K) + (1-P)X_{Ln}(K) \quad (28)$$

여기서 $X_{La}^{(n)}(K)$ 는 비행시간 K에서 n번째 탄환의 평균 관측값을 의미하며 변수 P는 필터 변수값에 의해 선택 할 수 있는 값이다.

(5) 자료처리 알고리즘 종합

지금까지 전개한 방정식과 가정하에서 화기 제어기의 포 명령 수정을 위한 알고리즘을 종합하여

그림 2.에 나타내었다.

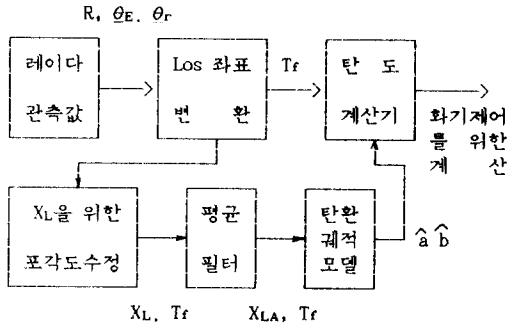


그림 2. 다중 탄환 처리 알고리즘
Fig 2. Multiple-Bullet Processing Algorithm

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 목적은 발사전 주변요인에 의한 부정확성을 가진 개회로 및 폐회로 화기 제어기의 성능을 비교하는 것이다. 시뮬레이션을 위하여 사용된 입력 변수값은 표 2에서 나타내었으며 결과는 그림 2에 나타내었다.

(1) 표적조건

표 2. 표적정보
Table 2. Target Information

입 력 변수	변 수 값
초기 표적 거리	3800 m
최종 표적 거리	200 m
표 적 고 도	50 m
표 적 속 도	450 m

(2) 레이더 조건

표 3. 레이더 정보
Table 3. Radar Information

입 력 변수	변 수 값
최소 관측 가능거리	100 m
레이더 해상도	1.524 m
거리 표준 편차	1.829 m
$\sigma_T = \sigma_E$	1 mill

(2) 포 조건

표 4. 포 정보
Table 4. Gun Information

입 력 변수	변 수 값
포 바이어 (Bias)	-120m ~ 60m
발사당 표준편차	10m
발 사 율	64/초
탄 분 산	평균 1.9 mills

그림 2.는 발사탄수와 사격시간의 함수로써 개회로 및 폐회로 탄 추적 알고리즘을 평가하여 종합 한 것이다. 폐회로 탄 추적 알고리즘은 1초 이내에 수렴 함으로써 첫번째 탄환이 표적 근처에 도달하는 시간 5.6초와 비교하여 매우 짧아 빠른 시간내에 오차간격을 줄여 나감을 알 수 있었다.

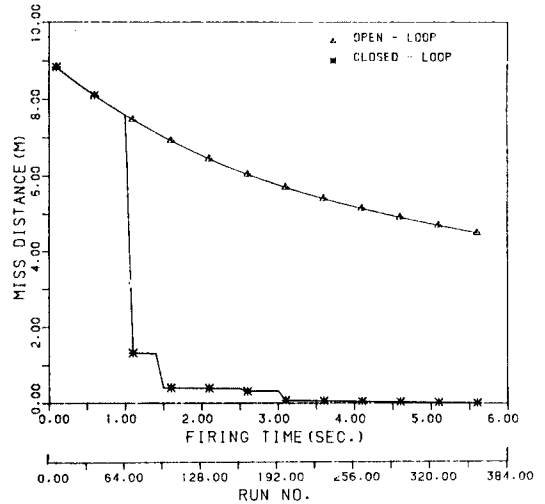


그림 2. 발사탄수 및 사격시간 대 오차간격
Fig 2. Miss Distance Vs Firing No and Time

5. 결 론

화기 제어기의 포 명령 수정을 위한 폐회로 탄환 추적에 대하여 고찰해 보았다. 결과에서 볼 수 있듯

이 제안된 방법은 포 명령계산에 필요한 변수에 대한 레이더 관측값을 이용하여 수정함으로써 빠른시간 내에 오차간격이 줄어들었다.

본 논문은 고해상도를 가진 레이더를 사용하여 관측 한다는 가정하에 시뮬레이션을 수행하였지만 기존 화기 제어 레이더의 사용이나 발사율이 증대된 포에 사용할 경우에 대한 것은 앞으로 계속 수행 되어야 할 과제이다.

6. 참고 문헌

- [1] Robert J.Corn, "An Analysis of Closed Loop Control of Gun Systems", CNA Research Contribution 185, Jan. 1972
- [2] Louis R.CERRATO and Kenneth R.PFLEGER, "A Comparison of Conventional and CLFC Hit Probabilities Against Tank Type Targets", DEP, ANA, Feb. 1973
- [3] Radhakisan S.Baheti, "Closed-Loop Bullet Tracking Algorithms for DFCS", Corporate Research and Development GEC.