

# Way-points 방식과 Event-driven 방식의 운동궤적 모델링 비교

A Comparison of the Way-points and the Event-driven Dynamic Trajectory Modeling

김 옥 휴, 윤 기 천

Ok Hyoo Kim and Ki Cheon Yoon

국방과학연구소

Agency for Defence Development

## Abstract

As a part of work to simulate electromagnetic environments for Hardware-In-the-Loop(HIL) simulation, the dynamic trajectory is modeled by the Way-points method and the Event-driven method for the aerial and the naval targets. The simulated results show that the Way-points method and the Event-driven method are appropriate to simulate a low speed and a high speed target respectively.

## I. 서론

표적(항공기, 함정)의 공간운동을 시뮬레이션 하는데 있어서 표적의 운동을 얼마나 완전하게 모델링 하느냐에 따라 컴퓨터의 계산시간이나 시스템 전체에 미치는 영향이 달라진다. 따라서 전체 시스템에 영향을 최소화시키면서 사용목적에 적합한 비행운동을 모델링 하여야 한다. 특히 항공기와 같은 경우 추력, 중력, 항공역학적인 힘(항력, 양력, 측력 등)이 작용하게 되며, 뉴우튼의 2차 법칙을 항공기의 운동에 적용하여 관성좌표계를 기준으로 힘과 모우멘트 방정식을 얻을 수 있다. 동체좌표계의 좌표변환이나 지구에 대한 항공기의 상대적 위치는 Euler각을 이용하여 계산하게 된다. 항공기와 함정표적을 동력학적으로 모델링하기 위해서는 흔히 6 DOF 모델을 사용한다. 6 DOF 모델을 이용한 시뮬레이션에서는 외부 장치로부터 어떤 측정치를 입력받아 표적의 위치, 속도, 가속도, Euler각 등을 출력하며, 사용자는 많은 모델 중

에 특수 목적에 맞는 모델로 수정하여 이용한다.[1]

본 논문에서는 단순한 6 DOF 모델을 사용하여 표적의 기동/궤적을 정의하기 위해 페루프모드의 Way-points 방식과 개방루프모드의 Event-Driven 방식을 제시한다. 페루프모드에서는 임의의 경로에 대해 선회점(Way-points) 테이블을 사용자가 정의하여 관성좌표계 상의 표적위치와 속도 데이터 테이블에 입력시킨다. 표적은 위치와 속도 테이블에 의해 운동역학적 자세를 갖고서 기동을 하며, 이때 매 순간위치에서 표적에 미치는 운동역학명령(Dynamic Commands)은 관성좌표계상의 현재의 표적 위치  $(x_T, y_T, z_T, v_T)_I$  와 다음번 선회점  $(x_{p_i}, y_{p_i}, z_{p_i}, v_{p_i})_I$  에 의해 결정된다. 개방루프모드에서는 추적체와 표적간의 조우 시작부터 경과된 시간 또는 거리의 함수관계를 갖는 어떤 사건 발생에 따라 표적의 기동이 정의한다. 이때 직선 기동, 급선회기동, "S"자 기동을 조합하여 표적의

궤적을 결정한다. 본 논문에서는 위 두 가지 방식에 대한 모델링 방법을 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 두 방식의 장단점 및 적용방안에 대해 비교 분석 하였다.

해 동체좌표계에서 관성좌표계로 변환시키는 변환행렬이다.

## II. 본 론

### 1. 항공표적 모델

#### 가. 항공기 역학 모델

추격체-표적 조우 시뮬레이션에 사용할 수 있는 항공기 모델로써 받음각과 미끄럼각을 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정한 단순 6 DOF 모델을 사용한다. 이 모델에서는 다음과 같은 8개의 상태변수를 사용하며, 이때 표적의 운동방정식은 식(1.1)과 같다. 피치, 롤, 속도, 기동부하는 시간지연을 갖는 1차계 미분방정식으로 유도된다.[2][3]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_T \\ \dot{y}_T \\ \dot{z}_T \end{bmatrix} &= [T_{B \rightarrow I}] \begin{bmatrix} v_T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \dot{\Psi}_T &= \frac{n_T \cdot g \cdot \sin(\Phi_T)}{v_T} \\ \dot{\Theta}_T &= \frac{\Theta_{T_{COM}} - \Theta_T}{\tau_\theta} \\ \dot{\Phi}_T &= \frac{\Phi_{T_{COM}} - \Phi_T}{\tau_\phi} \\ \dot{v}_T &= \frac{v_{T_{COM}} - v_T}{\tau_v} \\ \dot{n}_T &= \frac{n_{T_{COM}} - n_T}{\tau_n} \end{aligned} \quad (1.1)$$

여 기 서

$x_T, y_T, z_T$  : 관성좌표계(지구좌표계)에서 표적위치

$\Psi_T, \Theta_T, \Phi_T$  : 표적의 Euler 각 (요, 피치, 롤)

$v_T$  : 표적의 절대속도

$n_T$  : 표적의 기동부하

$[T_{B \rightarrow I}]$  : 동체좌표계  $\rightarrow$  관성좌표계 변환행렬

이다. 속도벡터는 표적의 진행방향인  $x_B$  축과 일치한다.  $[T_{B \rightarrow I}]$  는 3개의 Euler각  $\Psi, \Theta, \Phi$  에 의

### 나. 기동 및 궤적

#### (1) Way-points 방식

사용자는 선회점 테이블을 이용하여 임의의 길이만큼 원하는 표적궤적을 정의한다. 테이블 내에 관성좌표계 상의 표적위치  $(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}, v_{pi})_I$  와 원하는 표적속도( $v_{pi}$ )를 규정한다. 표적은 테이블에서 규정한 위치 및 속도와 운동역학적 자세 데이터에 의해 기동한다. 이때 매 순간 표적에 입력되는 운동역학명령은 식(1.2)와 같이 표적의 현재위치와 그 다음 선회점에 의해 결정된다.[4]

$$\begin{aligned} \Psi_{T_{COM}} &= \arctan\left(\frac{y_{pi} - y_T}{x_{pi} - x_T}\right) \\ \Theta_{T_{COM}} &= \arctan\left(-\frac{z_{pi} - z_T}{\sqrt{(x_{pi} - x_T)^2 + (y_{pi} - y_T)^2}}\right) \\ \Phi_{T_{COM}} &= \arccos\left(\frac{1}{n_T}\right) \cdot \sin(\Psi_{T_{COM}} - \Psi_T) \\ v_{T_{COM}} &= v_{pi} \\ n_{T_{COM}} &= n_{T_{MAX}} \quad \text{for } |\Psi_{T_{COM}} - \Psi_T| > \epsilon \\ &= 1 \quad \text{otherwise} \end{aligned} \quad (1.2)$$

여기서  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n_{T_{MAX}}$  는 표적의 최대 기동부하,  $\epsilon$  은 최소 기동 방위각 오차이다.

#### (2) Event-driven 방식

##### (가) 직선기동

표적은 일정한 속도와 주어진 관성방향을 따라 직선궤적으로 운동하기 때문에 운동역학명령은 식(1.3)과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \Psi_{T_{COM}} &= \Psi_T \\ \Theta_{T_{COM}} &= \Theta_T \\ \Phi_{T_{COM}} &= 0 \\ v_{T_{COM}} &= v_T \\ n_{T_{COM}} &= 1 \end{aligned} \quad (1.3)$$

(나) 급선회기동

표적은 일정한 비행속도와 일정한 부하를 갖고 주어진 방향으로 좌표선회를 수행한다. 이때 운동역학명령은 식(1.4)와 같다.

$$\begin{aligned} \Theta_{T_{COM}} &= \Theta_T \\ \Phi_{T_{COM}} &= \arccos\left(\frac{1}{n_T}\right) \cdot \text{sign}(\text{Dir}) \\ v_{T_{COM}} &= v_T \\ n_{T_{COM}} &= n_T (\leq n_{T_{MAX}}) \end{aligned} \quad (1.4)$$

여기서  $\text{sign}(\text{Dir})$ 은 선회방향으로써 시계방향이면 +1, 반시계방향이면 -1이다.

(다) 주기적인 "S" 기동

표적의 비행속도와 부하가 일정한 상태에서 표적이 규정된 주파수와 초기위상을 갖고서 주기적인 "S" 기동을 수행할 때 운동역학명령은 식(1.5)와 같다.

$$\begin{aligned} \Theta_{T_{COM}} &= \theta_T \\ \Phi_{T_{COM}} &= \arccos\left(\frac{1}{n_T}\right) \cdot \text{sign}[(\sin(2\pi f_{Dir} \cdot t + \varphi_0))] \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} v_{T_{COM}} &= v_T \\ n_{T_{COM}} &= n_T (\leq n_{T_{MAX}}) \end{aligned}$$

여 기 서

$f_{Dir}[\text{Hz}]$  : 기동주파수

$\varphi_0[\text{rad}]$  : 기동위상추이

$\theta_T[\text{rad}]$  : 원하는 표적 피치각

2. 함정표적

가. 함정 역학 모델

함정표적 역시 단순화된 6 DOF 모델과 7개의 상태변수를 사용한다. 해수면( $Z_{sea}$ ) 요동으로 인해 함정속도의 수평성분은 속도벡터  $\vec{v}_T$  를  $x_T y_T$  평면에 투영함으로써 구해지며, 함정의  $z_T$  운동방향은 시간지연을 갖는 해수면의 변동에 해

당된다. 요, 피치, 롤, 속도 역시 지연시간을 갖는 1차계 미분방정식으로 유도되며, 함정의 운동방정식은 식(2.1)과 같다.[2][3]

$$\begin{aligned} \dot{x}_T &= v_T \cos \Theta_T \cos \Psi_T \\ \dot{y}_T &= v_T \cos \Theta_T \sin \Psi_T \\ \dot{z}_T &= \frac{Z_{sea}(x_T, y_T) - z_T}{\tau_z} \\ \dot{\Psi}_T &= \frac{\Psi_{T_{COM}} - \Psi_T}{\tau_\Psi} \\ \dot{\Theta}_T &= \frac{\Theta_{T_{COM}} - \Theta_T}{\tau_\theta} \\ \dot{\Phi}_T &= \frac{\Phi_{T_{COM}} - \Phi_T}{\tau_\phi} \\ \dot{v}_T &= \frac{v_{T_{COM}} - v_T}{\tau_v} \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서 방위각에 대한 운동역학명령( $\Psi_{T_{COM}}$ )은 기동궤적을 정의할 때 결정되며, 피치와 롤 운동역학명령은 해수면에 의해 결정된다. 함정의  $z_B$  축은 함정 중심에서 해수면의 수직 방향이다.

해수면의 요동현상은 한 방향(Unidirection) 파도에 대해 평균해수면 이상의 해수면의 위치변동으로써, 식(2.2)과 같이 해수면을 모델링할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{sea}(x_T, y_T, t) &= A_{sw} \sin\left(\frac{2\pi\sigma(x_T, y_T)}{\lambda_{sw}} - \Omega_{sw} \cdot t + \alpha_{sw}\right) \\ \sigma(x_T, y_T) &= x_T \cos \gamma_{sw} + y_T \sin \gamma_{sw} \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기서 진폭  $A_{sw}$  와 파수면(Sea Wave Surface) 방향  $\gamma_{sw}$  는 시간의 변수이고  $\sigma$  표준편차를 갖는 정규분포로 가정한다.  $\Omega_{sw}$ 는 해면파의 각속도이다. 이와 같은 모델에 대한 피치각과 롤각의 운동역학명령은 식(2.3)과 같다.

$$\Theta_{T_{COM}} = \arctan \left[ A_{sw} \frac{2\pi}{\lambda_{sw}} \cos \left( \frac{2\pi \sigma(x_T, y_T)}{\lambda_{sw}} - \Omega_{sw} \cdot t + \alpha_{sw} \right) \cdot \cos(\Psi_{T_{COM}} - \gamma_{sw}) \right] \quad (2.3)$$

$$\Phi_{T_{COM}} = \arctan[\sin \Theta_{T_{COM}} \cdot \tan(\Psi_{T_{COM}} - \gamma_{sw})]$$

나. 기동 및 궤적

(1) Way-points 방식

선회점 테이블에는 관성좌표계 상의 해상 위치와 속도 데이터( $x_{p_i}, y_{p_i}, (z_{p_i}=0)$ )가 들어 있다. 함정은 운동역학명령 값에 의해 테이블 상의 위치와 속도로 기동한다.

함정표적의 운동역학명령은 그 다음 선회점에 대해 식(2.4)와 같이 결정된다.

$$\Psi_{T_{COM}} = \arctan \left( \frac{y_{p_i} - y_T}{x_{p_i} - x_T} \right) \quad (2.4)$$

$$v_{T_{COM}} = v_{p_i}$$

(2) Event-driven 모드

개방루프모드에서 표적은 일정한 운동역학 상수값에 준해 사용자가 정의한 기동을 수행한다. 기동 타입, 기간, 초기화 등이 사건에 의존하게 된다

(가) 직선기동

함정은 일정한 속도  $v_{T_{COM}} [m/sec]$ 와 방향  $\Psi_{T_{COM}} [rad]$ 으로 항해한다.

$$\begin{aligned} v_{T_{COM}} &: \text{일정} \\ \Psi_{T_{COM}} &: \text{일정} \end{aligned} \quad (2.5)$$

(나) 급선회 기동

함정은 일정한 항해속도와 일정한 접선 가속도명령을 갖고서 정해진 방향으로 급선회하여 항해한다.

$v_{T_{COM}}$  : 일정

$$\Psi_{T_{COM}} = \Psi_T + \text{sign}(Dir) \cdot (\Delta \Psi_{T_{COM}})_{MAX} \quad (2.6)$$

$\text{sign}(Dir)$  : 1(시계방향), -1(반시계방향)

(다) 주기적인 "S" 기동

주기적 기동주파수와 주기적 기동위상 추이는 일정하며, 이때 표적은 일정한 항해속도와 일정한 운동역학명령을 갖고서 "S" 기동을 한다.

$v_T$  : 일정

$$\Psi_{T_{COM}} = \Psi_T + \text{sign}[\sin(2\pi f_{Dir} \cdot t + \varphi_0)] \cdot (\Delta \Psi_{T_{COM}})_{MAX} \quad (2.7)$$

여기서  $f_{Dir}$  : 기동주파수

$\varphi_0$  : 기동위상추이

3. 표적기동 시뮬레이션

항공표적에 대한 운동방정식과 운동역학명령 모델을 사용하여 Way-points 방식과 Even-driven 방식의 표적기동 시뮬레이션을 수행하였으며, 또한 함정표적의 운동역학명령으로 작용하는 수직운동 궤적, 즉 해수면에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

가. Way-points 방식

그림1은 정의된 선회점을 운동역학명령에 의해 기동하는 Way-points 방식의 기동궤적을 나타낸다. 여기서 사용된 파라미터와 초기값은

$$\tau_\theta = 1(\text{sec}), \tau_\phi = 2(\text{sec}), \tau_v = 1(\text{sec}),$$

$$\tau_n = 10(\text{sec}), n_{T_{MAX}} = 1, v_{p_i} = 1,$$

$$n_T(0) = 1, v_T(0) = 1, \Psi_T(0) = 0,$$

$$\Phi_T(0) = 0, \Theta_T(0) = 0, \epsilon = 0.1 \text{ 이다.}$$

선회점에서 기동궤적의 회전이 기동부하에 대해 비교적 작은 곡률반경과 빠른 선회속도를 갖게 됨으로써 함정표적과 같은 기동궤적 시뮬레이션에 적합한 방식이다.

나. Event-driven 방식

그림2는 Way-points 방식과 동일 조건하에 서 시물레이션을 수행하였으며, 단 급선회기동 및 "S" 기동에서  $n_{T_{MAX}} = 1.000007$ ,  $f_{Dir}$ 은 선회점 3에서 4까지 한 파장을 사용하였다.

선회점에서 기동궤적의 회전이 기동부하에 대해 Way-points 방식 보다 큰 곡률반경과 느린 선회속도를 갖기 때문에 비교적 속도가 빠른 항공표적의 기동궤적 시물레이션에 적합하다.

다. 해수면 시물레이션

해수면 높이 3m, 해면과의 파장 20m, 초기 위상 0도에 대해 그림3은 해면과의 각속도 0(rad/s)와 해면과 전단(Wave-front)방향 0도, 그림4는 90(rad/s), 75도일 경우 해수면의 변동을 나타낸다. 동일 각속도일 때 해면과 전단방향이 클수록 해수면은 잔잔해진다.

III. 결론

본 논문은 간략화 된 6 DOF 모델을 사용하여 공간상의 운동역학적 운동을 모델링 하였으며, 이를 이용하여 Way-points 방식과 Event-driven 방식의 표적의 기동궤적을 결정한 다음, 시물레이션을 통하여 두 방식간의 장단점과 적용방안을 제시하였다. Way-points 방식은 기동부하에 대해 선회점에서 비교적 작은 곡률반경과 빠른 선회속도를 갖게 됨으로써 함정과 같은 표적의 기동궤적 시물레이션에 적합한 방식이며, 이에 비해 Event-driven 방식은 보다 큰 곡률반경과 느린 선회속도를 갖기 때문에 비교적 속도가 빠른 항공표적의 기동궤적 시물레이션에 적용될 수 있다.

참고 문헌

[1] 항공우주연구소, "비행시물레이터를 이용한 Hardware-In-The-Loop 기술 개발 연구", 1994.

[2] ADI Technical Staff, "Six-Degree-of-Freedom Missile Simulation", Applied Dynamics International, Inc. 1990.  
 [3] Lin, C.F, "Modern Navigation, Guidance, and Processing", Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1991.  
 [4] George M. Siouris, "Aerospace Avionics System," Academic Press, Inc. 1993.

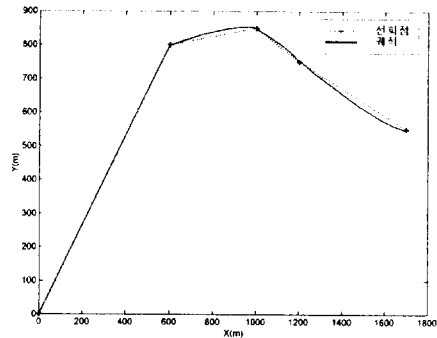


그림 1 Way-points 방식의 항공표적 궤적

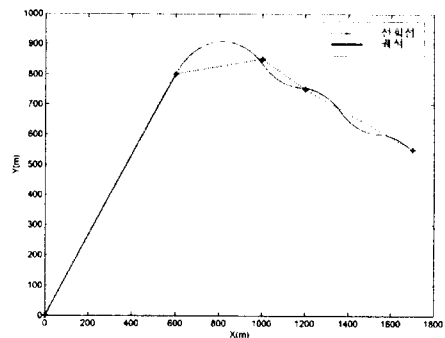


그림 2 Event-driven 방식의 항공표적 궤적

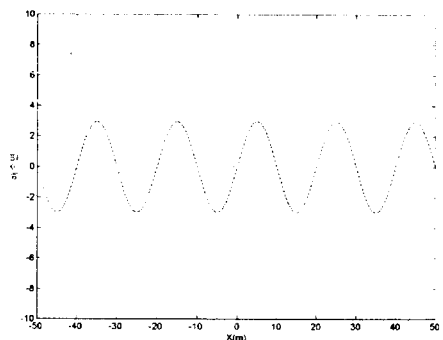


그림 3 해수면의 단면적( $\Omega_{sw}=0$ ,  $\gamma_{sw}=0$ )

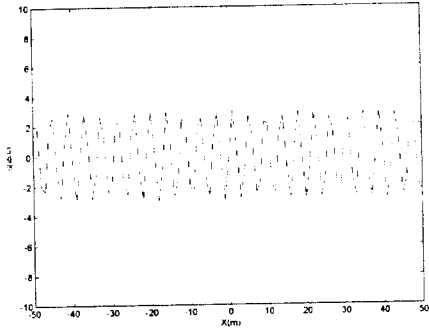


그림 4 해수면의 단면적( $\Omega_{sw}=90$ ,  $\gamma_{sw}=75$ )