

論文

표적의 기동패턴에 따른 추정 특성 분석

최재원*, 황태현**, 홍금식*, 최성린***

Analysis of Estimation Characteristics According to Target Maneuvering Patterns

Jae Weon Choi*, Tae Hyun Fang**, Keum Shik Hong* and Sung-Lin Choi***

ABSTRACT

In this paper, three kinds of maneuvering patterns (Waver, Pop-Up, and High-Diver maneuvers) are basically considered for a target motion to evaluate the estimation characteristics of the tracking filters according to the maneuvering patterns. The employed tracking filters are Interacting Multiple Model (IMM) filter, which is known as the most cost-effective estimation scheme, and other filters are stemmed from it. The simulation results show the estimation characteristics of the employed filters according to the given maneuvering patterns of a target.

초 록

본 논문에서는 유도탄과 같은 표적이 가지는 대표적인 기동패턴을 Waver 기동, Pop-Up 기동, 그리고 High-Diver 기동과 같은 3가지로 선정하고 각 기동패턴에 대한 표적추적(target tracking)을 실시한다. 표적추적을 위해서 성능과 계산량에서 가장 경제적으로 인식되고 있는 상호작용 다중모델 필터(interacting multiple model filter: IMM 필터)와 IMM 필터에서 확장된 필터를 이용한다. 각각의 기동패턴에 대한 시뮬레이션 결과를 도시하고 각 기동패턴에 따른 추적필터의 추정 특성을 분석한다.

1. 서 론

해상에서 운행 중인 함정은 위협세력으로부터 다양한 형태로 공격당할 수 있다. 특히, 위협세력이 유도탄 등과 같은 무기로써 함정을 공격하려고 할 때 함정은 레이더를 이용하여 유도탄 등의 현재 위치를 파악하고 가까운 미래의 위치를 예측함으로써 위협세력으로부터의 공격에 대처할 능력을 보유하고 있어야 한다.

표적의 위치 추정은 추적필터를 통하여 이루어진다. 표적은 효과적인 공략을 위하여 다양한 패턴의 기동을 가지므로 함정에서는 이에 대처하기 위해 기동패턴에 따른 추적필터의 위치추정 성능을 파악할 필요가 있다.

표적이 회피를 위하여 가속을 가지는 운동, 즉 기동을 하면 관심있는 상태변수에 가속도 항이 추가되기 때문에 기동표적의 추적을 위해서 Kalman 필터를 단독으로 사용하는 것은 적절하지 않다. 또한 추적필터는 표적의 운동을 포함하는 최소한의 상태변수를 포함하고 있을 때 가장 좋은 성능을 보이는 것으로 알려져 있기 때문에 표적이 기동한다는 가정 하에 설계된 Kalman 필터는 표적이 기동하지 않는 운동, 즉 등속도 운동을 하는 환경에서는 적절하지 않다[1]. 따라서 바람직한 표적추적을 위해서는 추적필터가 표적이 기동할 때는 상태변수로서 위치, 속도, 그리고 가속도를 포함해야 하고, 표적이 기동하지 않을 때는 성능향상을 위해 위치와 속도만을 상태변수

† 1999년 12월 2일 접수

* 정희원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학부 대학원

*** 국방과학연구소

로서 포함해야 한다.

대표적인 기동표적 추적필터는 크게 두가지로 분류할 수 있다. 첫째는 표적이 기동을 개시하거나 중지했을 때 이전까지의 표적 운동정보로부터 계산된 위치 예측값과 센서로부터 획득된 측정치의 차이를 관찰함으로써 표적의 운동이 바뀌었다는 것을 탐지하고 표적의 운동에 가장 적합한 운동 모델로 변환하는 방식이다. 대표적인 필터로는 Bar-Shalom 등이 제안한 가변 차원 필터(variable dimension filter)[2]와 Bogler가 제안한 입력 추정 필터(input estimation filter)[3]를 가변 차원 필터와 결합한 박 등의 가변 차원 입력 추정 필터(variable dimension with input estimation filter)[4]를 들 수 있다. 둘째로는 표적이 가질 수 있는 운동의 종류는 유한하며 표적의 실제 운동은 유한개의 운동 모델과 일치한다고 가정하고, 이와 같이 가정된 모든 운동 형태에 대하여 각 운동 형태에 따른 Kalman 필터링을 병렬로 실행하여 각각의 결과를 신뢰도에 따라 병합하는 방식이다. 대표적인 필터로는 Blom 등이 제안한 상호작용 다중모델 필터(interacting multiple model filter: IMM 필터)[5]를 들 수 있다. IMM 필터는 계산량을 최소로 하면서 성능을 최대로 한다는 문제에서 실현 가능한 최고의 절충안으로 인식되고 있다[6]. 또한 설계된 IMM 필터의 모델의 집합이 고정됨으로써 발생하는 성능 저하의 문제를 가변구조(variable structure)의 모델 집합을 이용함으로써 해결하는 연구[7]가 진행되었고, 표적의 운동이 변환될 때 기존의 IMM 필터가 표적 운동의 전환을 효과적으로 표현하지 못하여 발생하는 최대 추정오차를 줄이려는 연구[8]가 진행되었다. 이와 같이 IMM 필터의 성능 개선에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

레이더와 같은 센서는 센서 열잡음이나 대기의 동요 등에 의해서 실제로는 표적이 아닌데도 불구하고 표적같이 보이는 측정치를 수신할 수 있다. 이를 클러터(clutter) 혹은 허위경보(false alarm)라고 하며 일반적인 표적추적의 문제는 클러터를 처리하는 문제를 포함하고 있다. Bar-Shalom 등이 제안한 확률 데이터 연관 필터(probabilistic data association filter: PDA 필터)[9]는 클러터 환경에 대처하는 가장 대표적인 필터라고 할 수 있다. 클러터가 존재하는 환경 하에서 기동하는 표적을 추적하기 위해서는 기동 표적 추적 필터와 클러터 환경 대처 필터를 결합한 필터가 주로 이용된다. 특히, 상호작용 다중모델 확률 데이터 연관 필터(interacting multiple

model with probabilistic data association filter: IMMPDA 필터)[10]는 계산량에서 가장 경제적인 혼합필터(hybrid filter)로 인식되고 있다. 또한 참고문헌 [8]의 결과를 클러터 환경으로 확장시켜 IMMPDA 필터의 최대 추정오차를 감소시키는 오류 모니터링 IMMPDA 필터[11]가 제안되었다.

본 논문에서는 유도탄이 가지는 다양한 기동패턴 중에서 가장 기본이 되는 3가지의 기동패턴, 즉 Waver 기동, Pop-Up 기동, 그리고 High-Diver 기동에 대하여 각각 표적추적을 실시하고 기동패턴에 따른 각 추적필터의 추정오차를 통하여 추정 특성을 평가한다. 이때 추적필터로는 클러터가 없는 환경에서는 IMM 필터와 참고문헌 [8]의 오류 모니터링 IMM 필터를 이용하여 표적추적을 각각 실시하고, 클러터가 존재하는 환경에서는 IMMPDA 필터와 참고문헌 [11]의 오류 모니터링 IMMPDA 필터를 이용하여 표적추적을 각각 실시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 서론에 이어 2장에서는 추적의 대상이 되는 표적의 운동 방정식에 대하여 기술하고, 3장에서 정의된 운동 방정식에 기초한 IMM 필터에 대해 설명한다. 4장에서 각각의 기동패턴에 대한 특성을 기술하고, 5장에서 시뮬레이션을 위한 조건 및 환경에 대하여 서술한다. 6장에서는 시뮬레이션을 통하여 기동패턴에 따른 추정 특성을 평가하고, 마지막으로 7장에서 본 연구에 대한 결론을 맺는다.

II. 표적 운동방정식

Singer[12]는 표적의 가속도가 백색잡음(white noise)에 의해 구동된다고 보고 표적에 대한 상태방정식을 구성하였다. Singer의 운동 모델을 바탕으로 표적의 운동을 선형 이산 확률 다중 모델 운동방정식으로 나타내면 다음과 같다. 이때 다중 모델은 Houles와 Bar-Shalom[13]이 제안한 등속, 등가속, 그리고 급속가속 운동의 3모델 방식을 채택하였다.

$$x^t(k+1) = F^t x^t(k) + w^t(k) \quad (1)$$

측정방정식은 다음과 같다.

$$z(k) = Hx(k) + v(k) \quad (2)$$

여기서, $x^t(k)$ 는 시간 k 에서 표적의 운동 모델

$t(t=1, 2, 3)$ 에 대한 상태벡터이고 각 요소는 순서대로 직각좌표계에서 x-축의 위치, 속도, 가속도, y-축의 위치, 속도, 가속도, 그리고 z-축의 위치, 속도, 가속도이다. $z(k)$ 는 시간 k 에서 3차 측정 벡터이다. $v(k)$ 와 $w(k)$ 는 서로 독립적인 영평균 백색 가우시안 잡음(zero-mean white Gaussian noises)이고 각각의 공분산 행렬은 $Q(k)$ 와 $R(k)$ 로 각각의 통계적 특성은 알려져 있다고 가정한다. 센서의 샘플링 주기를 T 라고 할 때, 등속 및 등가속 운동 모델의 상태전이행렬(state transition matrix) F^1 , F^3 와 등가속 운동 모델의 측정행렬 H 는 각각 다음과 같다.

$$F^1 = \begin{bmatrix} F^1 & 0 \\ 0 & F^1 \end{bmatrix}, \quad F^3 = \begin{bmatrix} F^3 & 0 \\ 0 & F^3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, 각 요소는 다음과 같다.

$$F^1 = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F^3 = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

급속가속 운동의 상태전이행렬은 등가속 운동의 것과 동일하며 단지 공정잡음의 공분산이 등가속의 공정잡음의 공분산에 비해 매우 큰 값을 가진다.

III. IMM 필터

본 논문에서는 IMM 필터와 IMM 필터에서 확장된 필터에 대한 표적 추적 성능을 분석하므로 IMM 필터의 핵심적인 알고리즘에 대해서만 간략히 설명하기로 한다.

IMM 필터의 기본적인 가정은 표적의 운동이 가능한 유한개의 운동 모델 중의 하나이며 표적 운동 형태의 변경은 마코프 체인(Markov chain)에 의해 모델링된다는 것이다. 마코프 체인을 포함하는 표적 모델링은 다중 모델(multiple model) 기법의 확장된 형태로 볼 수 있다. 표적의 가능한 모델 가설에 따라 다수의 필터를 동시에 사용하고, 각각의 상태 추정값들을 모델에 대한 신뢰 확률에 따라 베이시안 법칙(Bayesian rule)으로 합하여 최종 추정치를 구하게 된다.

표적의 운동을 N 개의 다중모델 M_1, M_2, \dots, M_N 으로 표기하고 표적의 운동이 구간 $[k-1, k]$ 에서 모델 M_i 와 일치한다는 가설을 $M_i(k)$ 로 표기한다면 가설 $M_i(k)$ 아래에서 모델 M_i 를 사용하는 필터의 출력(추정값과 오차 공분산)과 해당 모델의 신뢰도를 나타내는 표적 모델확률은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{x}^i(k|k) = E\{x(k)|M_i(k), Z^k\} \quad (5)$$

$$P^i(k|k) = E\{[x(k) - \hat{x}^i(k|k)] \times [x(k) - \hat{x}^i(k|k)]' | M_i(k), Z^k\} \quad (6)$$

$$\mu_i(k) = p\{M_i(k)|Z^k\} \quad (7)$$

여기서 Z^k 는 시간 k 까지의 모든 측정치를 의미한다. $\mu_i(k)$ 는 모델 M_i 가 시간 k 에서 올바르다는 사건의 확률을 나타낸다. $\{\cdot\}'$ 는 $\{\cdot\}$ 의 전치행렬(transpose matrix)을 나타낸다.

알고리즘의 한 순환은 다음의 3단계로 구성된다[6].

• 단계 1: 상호 작용(interacting)

혼합확률을 이용하여 다음과 같이 각 부필터의 초기값을 구한다.

$$\hat{x}^{0i}(k-1|k-1) = \sum_{s=1}^N \hat{x}^s(k-1|k-1) \times \mu_{s|i}(k-1|k-1) \quad (8)$$

$$P^{0i}(k-1|k-1) = \sum_{s=1}^N \mu_{s|i}(k-1|k-1) \times \{P^s(k-1|k-1) + [\hat{x}^s(k-1|k-1) - \hat{x}^{0i}(k-1|k-1)] \times [\hat{x}^s(k-1|k-1) - \hat{x}^{0i}(k-1|k-1)]'\} \quad (9)$$

혼합확률 $\mu_{s|i}(k-1|k-1)$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\mu_{s|i}(k-1|k-1) = \frac{1}{c_i} \theta_{s|i} \mu_s(k-1) \quad (10)$$

여기서, $\theta_{s|i}$ 는 미리 가정된 모델 M_s 에서 모델 M_i 로의 마코프 전이확률(Markov transition probability)이며 c_i 는 정규화 상수를 나타낸다.

• 단계 2: 필터링(filtering)

각각의 부필터는 독립적으로 Kalman 필터링을 실시하여 부필터의 상태 추정값과 그것에 대응되는

오차 공분산을 구하고 공산함수(likelihood function)를 이용하여 모델 확률을 다음과 같이 계산한다.

$$\hat{x}^t(k|k-1) = F^t \hat{x}^{0t}(k-1|k-1) \quad (11)$$

$$\hat{x}^t(k|k) = \hat{x}^t(k|k-1) + G^t(k) r^t(k) \quad (12)$$

$$P^t(k|k-1) = F^t P^{0t}(k-1|k-1) (F^t)' + Q^t(k-1) \quad (13)$$

$$P^t(k|k) = [I - G^t(k) H^t] P^t(k|k-1) \quad (14)$$

(잔류오차)

$$r^t(k) = z(k) - \hat{z}^t(k|k-1) \quad (15)$$

(예상 측정치)

$$\hat{z}^t(k|k-1) = H^t \hat{x}^t(k|k-1) \quad (16)$$

(잔류오차 공분산)

$$S^t(k) = H^t P^t(k|k-1) (H^t)' + R(k) \quad (17)$$

(필터 이득)

$$G^t(k) = P^t(k|k-1) (H^t)' S^t(k)^{-1} \quad (18)$$

(공산함수)

$$\Lambda^t(k) = N(r^t(k); 0, S^t(k)) \quad (19)$$

(모델 확률)

$$\mu_t(k) = \frac{1}{c} \Lambda^t(k) \sum_{s=1}^N \Theta_{st} \mu_s(k-1) \quad (20)$$

여기서, c 는 정규화 상수이다.

● 단계 3: 결합(combination)

부필터 출력값은 모델 확률에 따라 베이시안 법칙으로 다음과 같이 결합된다.

$$\hat{x}(k|k) = \sum_{t=1}^N \hat{x}^t(k|k) \mu_t(k) \quad (21)$$

$$P(k|k) = \sum_{t=1}^N \mu_t(k) [P^t(k|k) + \{ \hat{x}^t(k|k) - \hat{x}(k|k) \} \times \{ \hat{x}^t(k|k) - \hat{x}(k|k) \}'] \quad (22)$$

IV. 표적의 기동패턴

유도탄 등과 같은 표적이 함정을 목표로 이동하는 대표적인 형태로는 Waver 기동, Pop-Up 기동 및 High-Diver 기동을 들 수 있다. Fig. 1은 이러한 기동 형태를 3차원적으로 보여주고 있다. 각각은 잠수함, 함정, 그리고 항공기에서 발사된 유도탄이 전형적으로 취하는 기동 형태이다. 위협표적의 기동 형태는 매우 다양할 수 있지만 위에서 언급한 3개의 기동패턴은 가능한 기동 가속

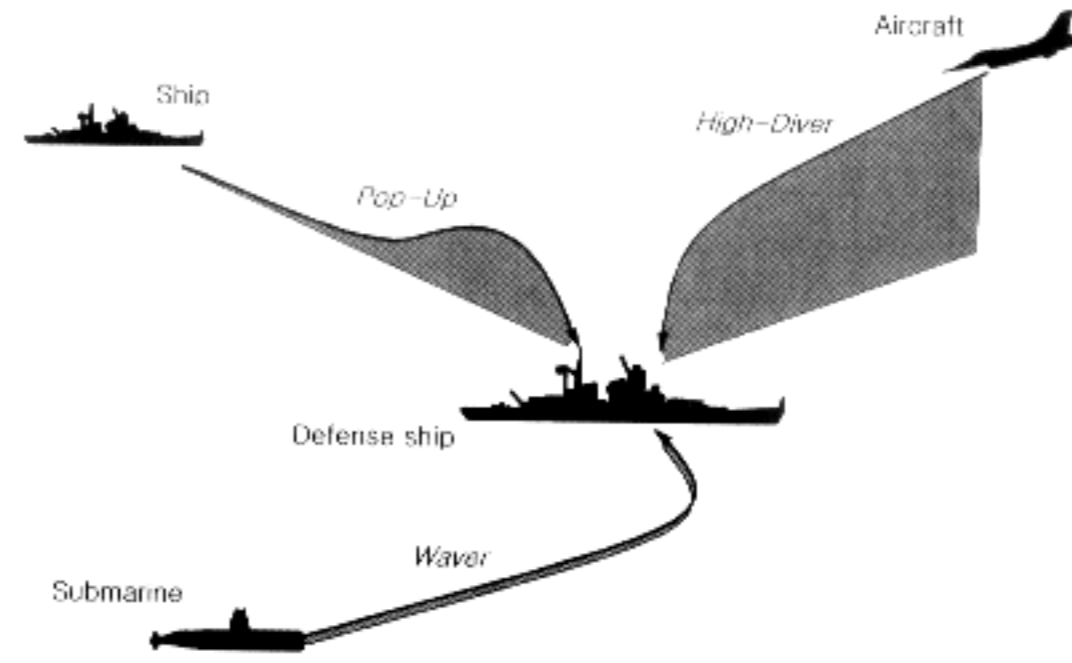


Fig. 1. Representative maneuvering patterns of a ballistic missile

의 형태를 대부분 포함하고 있기 때문에 기동패턴에 따른 추적 성능을 시험하는 표적 시나리오로 적절하다.

각 기동패턴에 따른 시뮬레이션에서 얻어진 자료를 바탕으로 하면 함정의 추적 시스템이 위협 세력에 대한 대처능력이 있는지를 판단할 수 있을 것이다. 이러한 판단은 추적 시스템의 신뢰도를 밝히는 문제이므로 매우 중요하다.

표적 추적이 행하여지는 플랫폼은 원점에 있다고 가정하고 표적은 원점을 목표로 이동하는 형태의 시나리오를 구성하였다. 시뮬레이션에 사용되는 각각의 기동 시나리오를 다음의 4.1절, 4.2절, 그리고 4.3절에서 자세히 설명한다.

4.1 Waver 기동

Waver 기동은 잠수함에서 발사된 표적이 함정을 향할 때 취하는 전형적인 기동패턴으로서 순항 중에 갑작스럽게 방향을 바꾸어 함정을 공격하는 형태를 취한다. 표적 신호의 생성을 위한 구체적인 수치는 다음과 같다.

Waver 기동의 표적 데이터는 23초 동안 발생하는 것으로 가정한다. 즉, 0.02초 간격으로 1150회 동안 진행한 표적의 데이터가 시뮬레이션에 사용된다. 표적을 추적하는 레이더는 원점에 있다고 가정하고 표적의 초기 위치는 원점으로부터 약 10 km 정도 떨어져 있다고 가정한다. Waver 기동에서는 z-축 방향의 속도나 가속은 0으로 처리된다. 따라서 z-축 방향의 초기 위치는 일정하게 유지된다. 표적 데이터 생성을 위한 초기 상태값은 직각좌표계에서 다음과 같이 설정하였다.

$$x_w(0) = [-4103 \ 354 \ 0 \ -8891 \ 354 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0]'$$

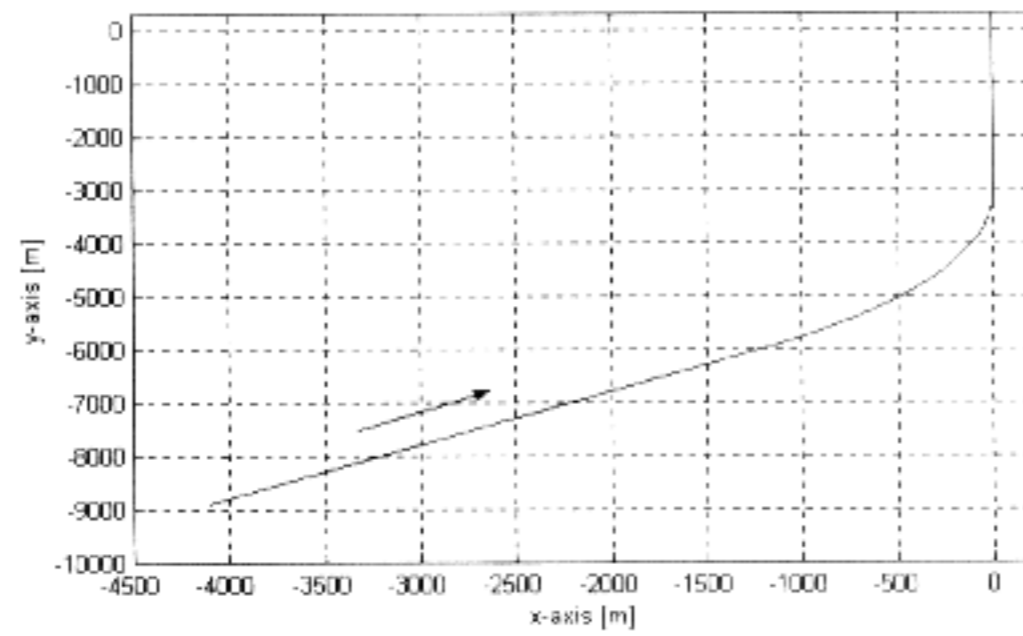


Fig. 2. Target Trajectory (Waver)

여기서, 위치, 속도, 그리고 가속도의 단위는 각각 m , m/sec , 그리고 m/sec^2 이다. 단위 없이 사용되는 모든 수치는 이와 같은 단위를 따른다.

실제 수중을 운동하는 물체가 $500 m/sec$ 속력을 가지기는 어렵지만 본 논문에서는 표적의 궤적과 가속도의 크기에 따른 추정 특성 분석에 초점을 맞추므로 이러한 상황은 고려하지 않기로 한다.

표적이 기동을 시작하여 궤적이 반경을 그리기 시작하는 시점은 8.1초이다. 8.1초-15.16초 동안 일정한 크기의 가속이 다음과 같이 주어진다.

$$a_w = [-50 \quad 20.7 \quad 0]'$$

여기서, a_w 의 요소는 순서대로 x-축, y-축, 그리고 z-축에 부과되는 가속도이다. 이러한 기동 입력 가속도는 표적이 경로를 바꾸어 회전하는 에너지로 모두 사용되었고, 표적의 전체적인 속력의 변화는 없도록 설정하였다. 표적은 약 21.12초에 원점을 통과한다.

Fig. 2는 표적이 Waver 기동할 때 표적의 궤적을 나타낸 것이다. Fig. 2는 x-y 평면에서 기동 가속이 입력되는 방향으로 표적의 궤적이 변하는 상황을 보여준다. 여기서 표적은 화살표 방향으로 이동하고 있으며 원점을 통과한다. 또한 z-축으로는 고도 $-1m$ 를 유지하고 있다.

4.2 Pop-Up 기동

Pop-Up 기동은 함정에서 발사된 표적이 함정을 공격할 때 취하는 전형적인 기동패턴이며 실제의 많은 유도탄은 Pop-Up 기동이 2개 이상 복합된 기동패턴을 취하고 있다. 표적 신호의 생성을 위한 구체적인 수치는 다음과 같다.

Pop-Up 기동의 표적 데이터는 21초 동안 발생하는 것으로 가정한다. 즉, 0.02초 간격으로 1050

회 동안 진행한 표적의 데이터가 시뮬레이션에 사용된다. 표적 데이터 생성을 위한 초기 상태값은 다음과 같이 설정하였다.

$$x_p(0) = [-8891 \quad 454 \quad 0 \quad 4103 \quad -209 \quad 0 \quad 15 \quad 0 \quad 0]'$$

Pop-Up 기동에서는 x-축이나 y-축으로는 기동 가속이 입력되지 않고 단지 z-축 방향으로만 가속이 가해진다. 또한 z-축 방향으로 2회에 걸쳐서 서로 다른 크기이면서 서로 반대 방향으로 가속이 가해진다는 점에서 Waver 기동과는 차이가 있다.

표적이 기동을 시작하여 궤적이 반경을 그리기 시작하는 시점은 11.2초이다. 표적이 기동을 시작한 후 12.56초까지는 표적을 상승시키는 가속이 가해지며 그 이후로 19초까지의 구간동안은 하강시키는 가속이 가해진다. 각각의 구간을 구간 1(P_1)과 구간 2(P_2)라고 한다면 해당 구간동안 가해진 가속은 다음과 같다.

$$a_{P_1} = [0 \quad 0 \quad 14]', \quad a_{P_2} = [0 \quad 0 \quad -6.5]'$$

표적이 최대 상승했을 때의 고도는 $55.8 m$ 이며 표적은 약 19.68초에 원점을 통과한다.

Fig. 3은 표적이 Pop-Up 기동할 때 표적의 궤적을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 x-z 평면에서 기동 가속이 입력되는 방향으로 표적의 궤적이 변하는 상황을 보여주며, Fig. 3(b)는 표적의 궤적을 3차원에서 도시한 것이다.

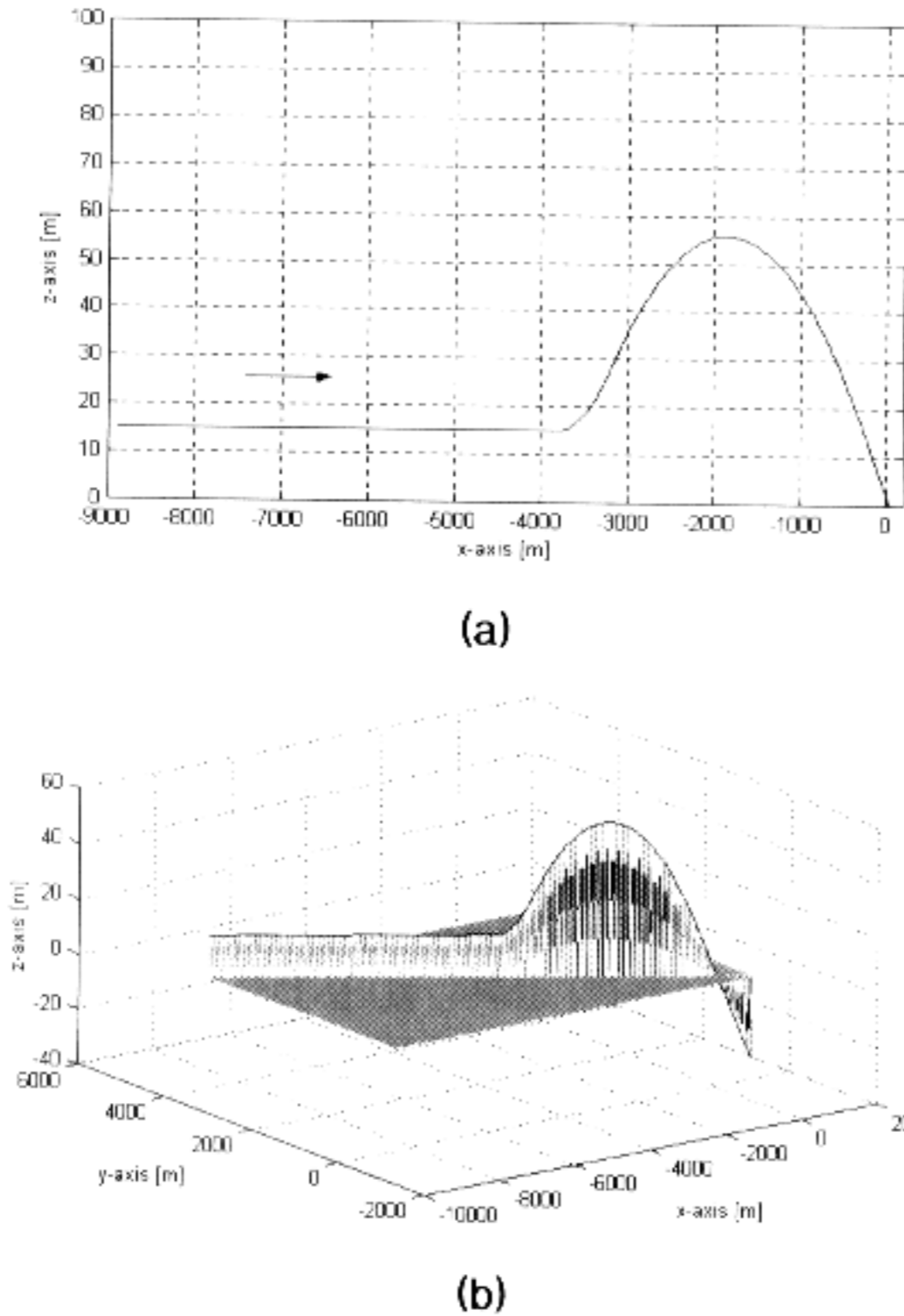
4.3 High-Diver 기동

High-Diver 기동은 항공기에서 발사된 표적이 함정 근방에서 급속도로 하강하는 형태를 취한다. 이 경우 표적 신호의 생성을 위한 구체적인 수치는 다음과 같다.

High-Diver 기동의 표적 데이터는 23초 동안 발생하는 것으로 가정한다. 즉, 0.02초 간격으로 1150회 동안 진행한 표적의 데이터가 시뮬레이션에 사용된다. 표적 데이터 생성을 위한 초기 상태값은 다음과 같이 설정되었다.

$$x_H(0) = [8891 \quad -454 \quad 0 \quad 4103 \quad -209 \quad 0 \quad 1000 \quad -10 \quad 0]'$$

Pop-Up 기동의 경우와 동일하게 x-축이나 y-축으로는 기동 가속이 입력되지 않고 단지 z-축 방향으로만 가속이 가해진다. 그러나 z-축 방향



(a)

(b)

Fig. 3. Target Trajectory (Pop-Up)

으로 1회의 가속이 가해진다는 점에서 Pop-Up 기동과는 차이가 있다. 또한 모든 방향으로 초기 속도를 가진다는 점에서 Waver 기동과도 차이가 있다.

표적이 초기 속도에 의해 -z-축 방향으로 서서히 하강하다가 -z-축 방향의 가속 입력에 의해 빠른 속도로 하강하는 구간은 12.8초-19초 사이이다. 이 구간동안 가해진 가속은 다음과 같다.

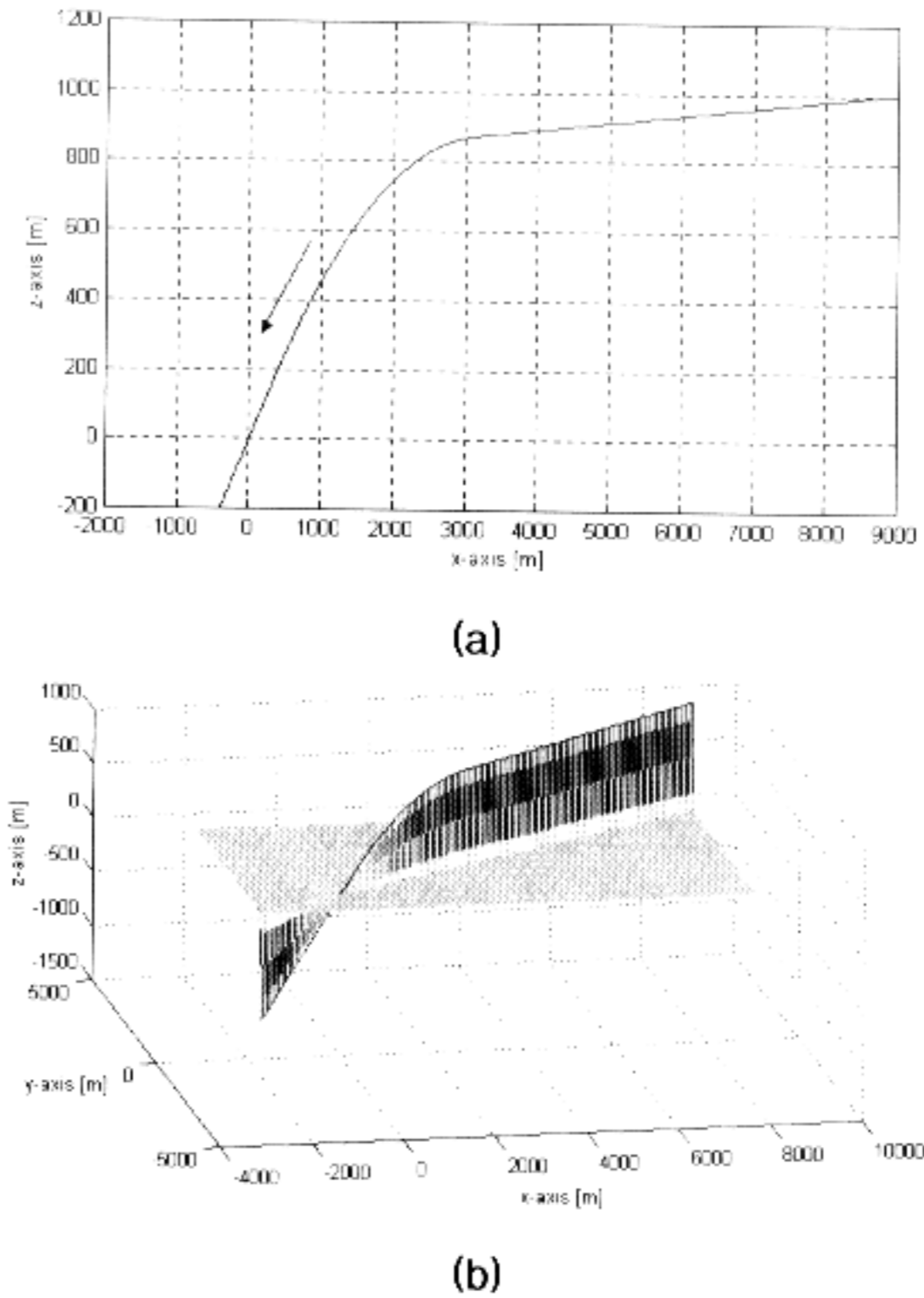
$$a_H = [0 \quad 0 \quad -35]'$$

표적은 약 19.58초에 원점을 통과한다.

Fig. 4는 표적이 High-Diver 기동할 때 표적의 궤적을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 x-z 평면에서 기동 가속이 입력되는 방향으로 표적의 궤적이 변하는 상황을 보여주며, Fig. 4(b)는 표적의 궤적을 3차원에서 나타낸 것이다.

V. 시뮬레이션 조건 및 환경

표적의 기동패턴에 따른 효과적인 성능분석을 위하여 3차원 공간에서 이동하는 단일 표적을 고려한다. 표적의 운동은 Singer의 운동 모델[12]을



(a)

(b)

Fig. 4. Target trajectory (High-Diver)

따른다고 가정하며 추적필터의 성능은 추정 오차의 RMS(root mean square)의 시간 응답을 통하여 평가한다. 모든 시뮬레이션 결과는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하여 구해진다. 표적의 기동패턴에 따른 성능분석에 초점을 맞추며 추적필터가 필요 이상으로 복잡해지는 것을 막기 위하여 표적의 초기궤적은 형성되어 있다고 가정한다. 따라서 추적필터의 초기값을 실제 표적이 가지는 상태값의 근방의 값을 가지도록 설정한다.

표적 추적에 사용되는 추적필터들로는 클러터가 없는 환경에서는 IMM 필터와 최대 추정 오차를 감소시키는 참고문헌 [8]에 기술된 오류 모니터링 및 회복 기법을 이용한 IMM 필터를 이용한 기동표적 추적필터이다. 단순한 표적을 위하여 각각을 IMM 필터와 오류 모니터링 IMM 필터라고 명명하기로 한다. 또한 클러터 환경 하에서는 IMPDA 필터와 오류 모니터링 및 회복 기법을 이용한 IMPDA 필터[11]가 사용된다. 앞의 경우와 유사하게 각각을 IMPDA 필터와 오류 모니터링 IMPDA 필터로 명명하기로 한다.

IMM 필터에서 기동표적을 추적하기 위하여 사용하는 모델은 3모델 방식이며 각각은 등속 운동모델(M_1), 급속가속 운동모델(M_2), 그리고 등

Table 1. Model transition probabilities

$k \backslash k-1$	M_1	M_2	M_3
M_1	0.85	0.15	0
M_2	0.33	0.34	0.33
M_3	0	0.15	0.85

가속 운동모델(M_3)이다.

급속가속 운동모델은 등가속 운동모델과 시스템행렬은 동일하지만 분산이 큰 공정잡음을 가진다. 모델 M_1 은 표준편차 $2m/s^2$ 의 공정잡음을 가지며, 모델 M_2 는 표준편차 $10m/s^2$ 의 공정잡음을 가진다. 그리고 모델 M_3 은 표준 편차 $4m/s^2$ 의 공정잡음을 가진다. 각 모델간의 마코프 전이확률은 Table 1에서와 같이 가정한다.

샘플링 주기 T 는 0.5초로 하였고 오류 탐지를 위한 윈도우 길이는 참고문헌 [8]과 [11]에서와 같이 2로 설정하였다. 측정잡음 공분산 행렬은 다음과 같이 설정하였다.

$$R = \begin{bmatrix} 12^2 & 3^2 & 3^2 \\ 3^2 & 12^2 & 3^2 \\ 3^2 & 3^2 & 12^2 \end{bmatrix}$$

클러스터 환경 하에서 고려할 때, 클러스터의 발생 개수는 평균이 1입방 킬로미터당 33개가 발생하는 Poisson 분포를 가지며 탐지구간에서 균일 분포(uniform distribution)하도록 발생시켰다. 표적 탐지확률(detection probability)은 0.98로 설정하였고 표적에서 유래한 측정치가 수신되지 않는 사건의 발생은 시뮬레이션이 행해지는 전체 시간대에서 균일 분포하도록 하였다. 표적에서 유래한 올바른 측정치가 유효화 영역 내에 있을 확률은 1로 설정하였으며 측정치 유효화 게이트(validated gate)는 6으로 설정하였다.

VI. 시뮬레이션 결과 및 기동패턴에 따른 추정 특성 분석

본 장에서는 4장에서 언급한 3개의 기동패턴에 대하여 4종류의 필터(IMM 필터; 오류 모니터링 IMM 필터; IMM-PDA 필터; 오류 모니터링 IMM-PDA 필터)의 추정오차를 각각 도시하고 고찰한다. 이 중에서 IMM-PDA 필터와 오류 모니터

링 IMM-PDA 필터는 클러스터 환경을 가정한 경우이다. 동일한 조건 하에서 100회의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 시행한 결과를 도시한다.

모든 시뮬레이션 결과 선도의 세로축은 RMS 추정오차를 나타내며 가로축은 시간을 나타낸다. 시뮬레이션 결과인 위치 추정오차와 속도 추정오차를 동일한 공간에 도시하였으며, 결과 선도의 점선은 위치 추정오차를 나타내며 실선은 속도 추정오차를 나타낸다.

표적의 기동이 추적필터의 추정성능에 미치는 영향을 가시적으로 확인하기 위해 기동 가속이 가해지는 시점과 중지되는 시점(Waver 기동과 High-Diver 기동의 경우) 또는 기동 가속의 크기가 변경되는 시점(Pop-Up 기동의 경우)은 수직 점선으로 표시하여 나타내었다.

Fig. 5는 표적이 Waver 기동할 때, 각각 IMM 필터, 오류 모니터링 IMM 필터, IMM-PDA 필터, 그리고 오류 모니터링 IMM-PDA 필터를 이용한 추정값의 추정오차를 도시한 것이다. Fig. 5(a)에서는 표적에 기동 가속이 가해진 이후로 추정오차가 급격히 증가함을 볼 수 있다. 기동이 가해진 이후로 추정오차는 일정한 구간동안 급격히 증가하지만 IMM 필터가 표적의 기동에 적응하여 내부의 지배적인 운동모델이 등가속 운동이 되면 오차가 감소하기 시작한다. 표적이 기동을 중지하면 기동을 시작할 때와 동일한 상황이 발생한다. 즉, 지배적인 운동모델이 등속 운동이 될 때까지 추정오차가 증가한다. 본 시뮬레이션에 사용된 Waver 기동은 현실적인 면을 고려하여 길지 않은 기동 구간을 가지도록 설계되었기 때문에 기동이 시작되고 중지되는 시점에서의 오차가 명확히 구분되지 않는다. 실제로 충분히 긴 구간동안 기동 가속이 가해지면 기동에 적응한 IMM 필터의 등가속 추정오차는 등속 운동에서의 추정오차의 수준보다는 조금 높지만 일정한 한계이하로 제한된다.

Fig. 5(b)는 표적 측정치가 클러스터 환경 하에서 측정된다고 가정하고 클러스터를 처리할 수 있는 IMM-PDA 필터를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 그림의 표시형식은 Fig. 5(a)와 동일하다. 추정오차는 전반적으로 클러스터가 없다고 가정한 경우보다 크게 나타나고 있으며, 특히 주목할 사항은 추적필터가 기동에 늦게 적응함으로써 인하여 증가된 추정오차가 표적이 기동을 중지하는 시점까지 추정오차가 지속되고 있다는 점이다. 클러스터 환경은 보다 일반적인 표적추적 환경이므로 이러한 정보가 더욱 신뢰성이 있다. 현실적인 표적추적은 다양한 가속이 지속적으로 가해

지므로 표적을 유실할 확률은 기동 직후에 매우 높다.

Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)는 각각 오류 모니터링 IMM 필터와 오류 모니터링 IMMPDA 필터를 이용한 시뮬레이션 결과 선도이다. 전반적인 기동 적응 성능은 기존의 IMM 필터 및 IMMPDA 필터와 유사하지만 최대 추정오차의 크기가 많이 개선된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 표적이 Pop-Up 기동을 할 때, 각각 IMM 필터, 오류 모니터링 IMM 필터, IMMPDA 필터, 그리고 오류 모니터링 IMMPDA 필터를 이용한 추정값의 추정오차를 도시한 것이다. 짧은 구간동안 기동 가속의 크기와 방향이 변함으로 인하여 표적에 적용된 가속의 크기에 비해 큰 추정오차가 발생함을 알 수 있다. 특히, Fig. 6(a)의 위치 추정오차에 대한 선도에서 최대 추정오차가 약 15 m까지 상승하는 것을 볼 수 있다. Pop-Up 기동에 의해 표적이 해수면에서 약 56 m 정도까지 상승한다는 것을 고려할 때(Fig. 3 참조), 15 m의 추정오차는 매우 크다고 할 수 있다. 현실적으로 클러터 환경이 더욱 일반적이므로 Fig. 6(b)에서와 같이 최대 추정오차는 더욱 증가할 수 있다. Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)의 결과와 같이 개선된 형태의 추적필터라도 추정오차의 감소는 거의 없는 것으로 보인다. 이것은 오류 모니터링 IMM 필터와 오류 모니터링 IMMPDA 필터가 높은 수준의 기동 가속이 가해지는 경우에 최대 추정오차를 감소시키는 성질 때문이다.

Pop-Up 기동의 추정오차는 레이더가 설치된 플랫폼 근방에서 기동을 변경하는 형상이므로 추적필터가 표적의 기동에 적응하여 추정오차를 감소시키기 전에 표적이 플랫폼에 도달하게 된다. 이러한 Pop-Up 기동의 특성 때문에, 많은 유도탄이 Pop-Up 기동을 포함하고 있다.

Fig. 7은 표적이 High-Diver 기동을 할 때, IMM 필터, 오류 모니터링 IMM 필터, IMMPDA 필터, 그리고 오류 모니터링 IMMPDA 필터를 이용한 추정값의 추정오차를 각각 나타낸다. 1회의 기동이 발생한다는 점에서 Waver 기동과 유사하며 시뮬레이션 결과도 유사한 양상을 가진다. 뿐만 아니라 Fig. 7의 결과는 Fig. 5의 결과와 거의 동일한 응답특성을 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 레이더를 이용하여 측정치를 수신할 때 직접적으로 표적의 3차원 위치가 측정된다고 가정하였기 때문이다.

Fig. 7(a)는 표적이 플랫폼 근방의 상공에서 가속을 가지고 빠른 속도로 하강할 때 나타나는 필터의 추정오차를 나타낸 것으로서 표적이 플랫폼

에 도달할 때 필터의 추정오차는 높게 나타난다. 이러한 결과는 Pop-Up 기동의 결과와 유사하므로 표적이 플랫폼 근방에서 기동할 경우 플랫폼은 추정오차가 큰 상태로 표적과 조우하게 된다는 결론을 내릴 수 있다. Fig. 7(b)는 표적이 클러터 환경 하에서 기동한다고 가정한 경우의 결과 선도이다. 위치 추정오차가 크게 증가하고 있음을 알 수 있으며 특히 기동이 정지된 이후에 추정오차가 다시 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7(c)와 Fig. 7(d)는 각각 오류 모니터링 IMM 필터와 오류 모니터링 IMMPDA 필터를 이용한 표적추적 결과 선도이다. Pop-Up 기동과 유사하게 추정오차의 개선이 두드러지지 않다.

VII. 결 론

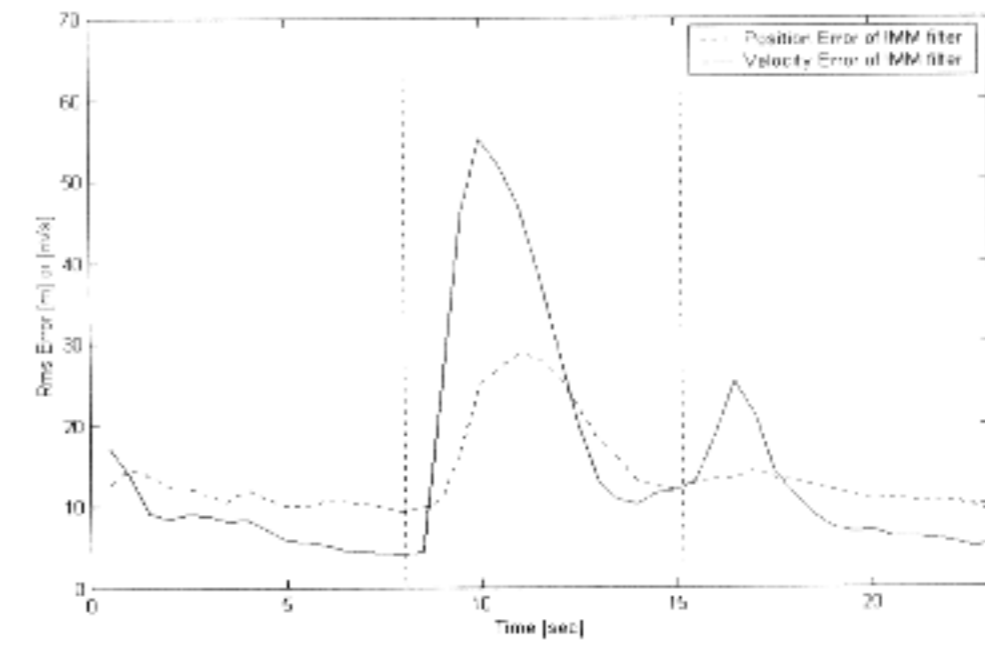
본 논문에서는 대표적인 표적의 기동패턴인 Waver 기동, Pop-Up 기동, 그리고 High-Diver 기동에 대하여 성능과 계산량의 측면에서 가장 경제적인 혼합필터로 인식되고 있는 IMM 필터와 IMMPDA 필터를 이용하여 표적추적 성능을 분석하였다. 또한 오류 모니터링 IMM 필터와 오류 모니터링 IMMPDA 필터에 대한 결과도 동시에 분석하였다.

표적추적에 대한 추정오차는 가해진 가속의 크기에 비하여 Pop-Up 기동이 가장 크게 발생하며 이것은 연속적이며 서로 상이한 두 종류의 가속 때문에 발생한다. Waver 기동의 경우는 가해진 기동이 크기 때문에 추정오차가 크게 나타났지만 기동이 정지한 후에 표적이 진행하는 동안 충분히 감소하였다. High-Diver 기동의 경우는 표적이 플랫폼의 근방에서 기동을 개시하고 중지함으로써 추정오차가 큰 상태로 플랫폼에 도달하는 특성을 보여주었다.

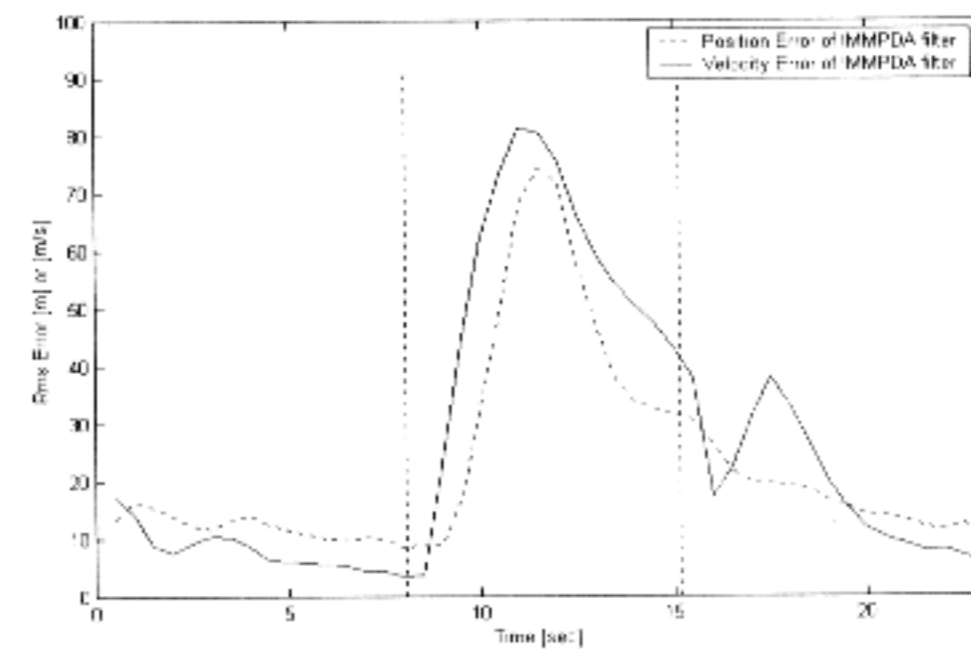
참고문헌

1. Bar-Shalom, Y., "Tracking Methods in a Multitarget Environment," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-23, No. 4, August 1978, pp. 618-626.
2. Bar-Shalom, Y., and Birmiwal, K., "Variable Dimension Filter for Maneuvering Target Tracking," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-18, No. 5, September 1982, pp. 621-629.

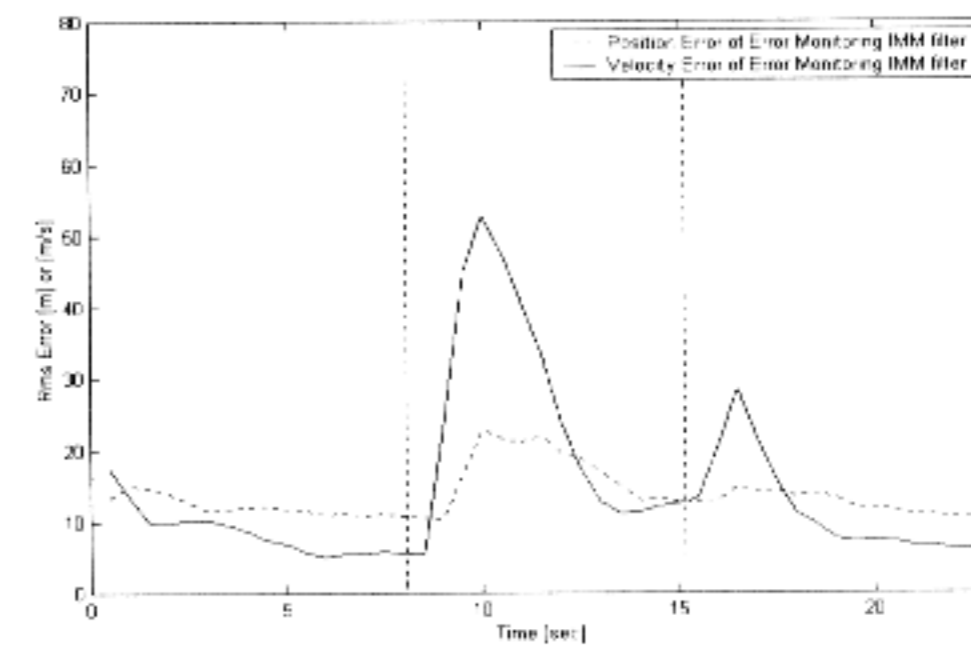
3. Bogler, P. L., "Tracking a Maneuvering Target Using Input Estimation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No. 3, May 1987, pp. 298-310.
4. Park, Y. H., Seo, J. H., and Lee, J. G., "Tracking Using the Variable Dimension Filter with Input Estimation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-31, No. 1, January 1995, pp. 399-408.
5. Blom, H. A. P., and Bar-Shalom, Y., "The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-33, No. 8, August 1988, pp. 780-783.
6. Mazor, E., Averbuch, A., Bar-Shalom, Y., and Dayan, J., "Interacting Multiple Model Methods in Target Tracking: A Survey," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-34, No. 1, January 1998, pp. 103-123.
7. Li, X. R., and Bar-Shalom, Y., "Multiple-Model Estimation with Variable Structure," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-41, No. 4, April 1996, pp. 478-493.
8. 최재원, 황태현, 홍금식, "퍼셉션넷의 오류 모니터링 및 회복 기법을 이용한 기동표적 추적," 한국항공우주학회지, 제27권, 제1호, 1999년 2월, pp. 49-59.
9. Bar-Shalom, Y., and Fortmann, T., *Tracking and Data Association*, Academic Press, 1988.
10. Bar-Shalom, Y., *Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances*, Artech House, 1992.
11. 최재원, 황태현, 홍금식, "오류 모니터링 및 회복 기법을 이용한 클러터 환경 하에서 기동표적 추적," 한국항공우주학회지, 제27권, 제5호, 1999년 8월, pp. 90-101.
12. Singer, R. A., "Estimation Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-6, No. 4, July 1970, pp. 473-483.
13. Houles, A., and Bar-Shalom, Y., "Multisensor Tracking of a Maneuvering Target in Clutter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-25, No. 2, March 1989, pp. 176-188.



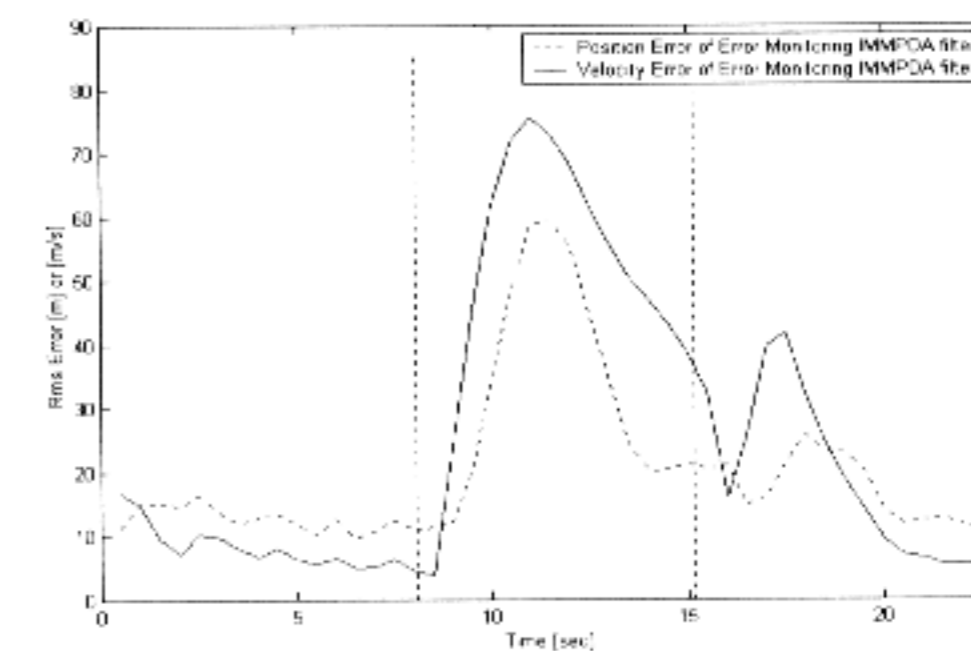
(a) IMM filter



(b) IMMPDA filter

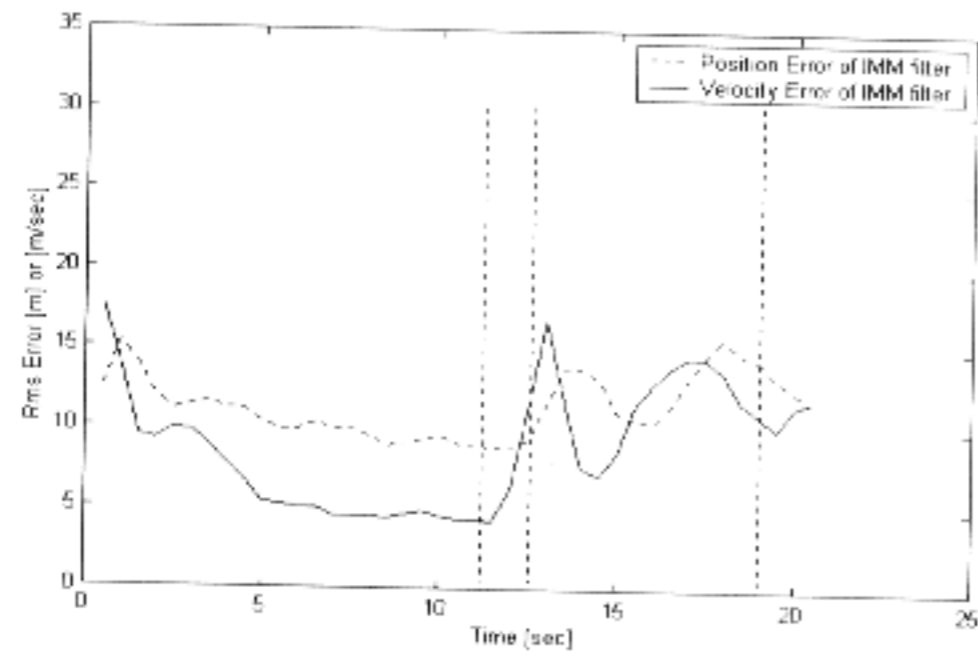


(c) Error monitoring IMM filter

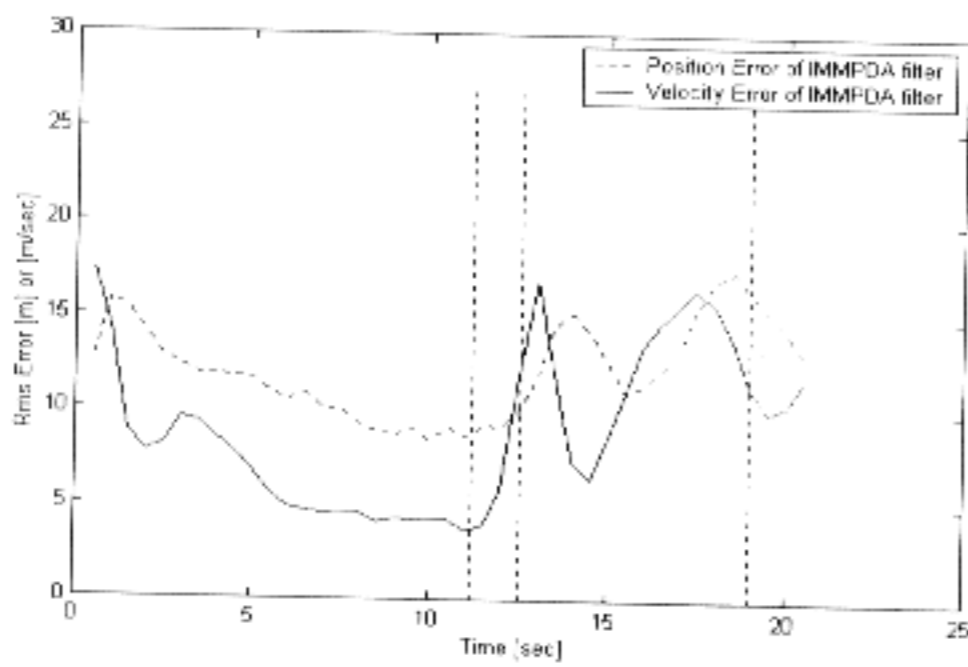


(d) Error monitoring IMMPDA filter

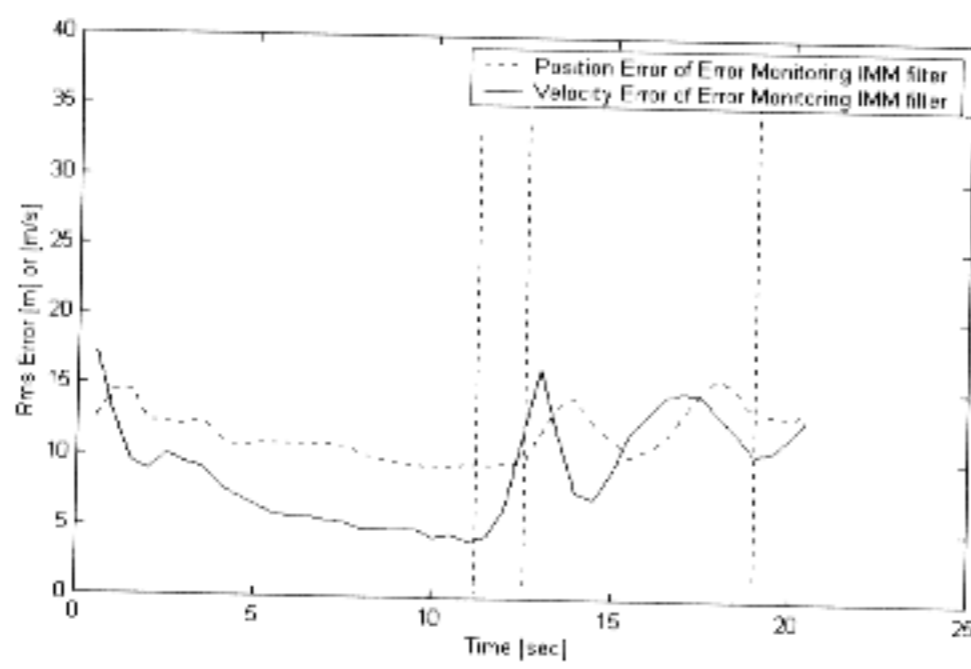
Fig. 5. Tracking errors in Waver maneuvering



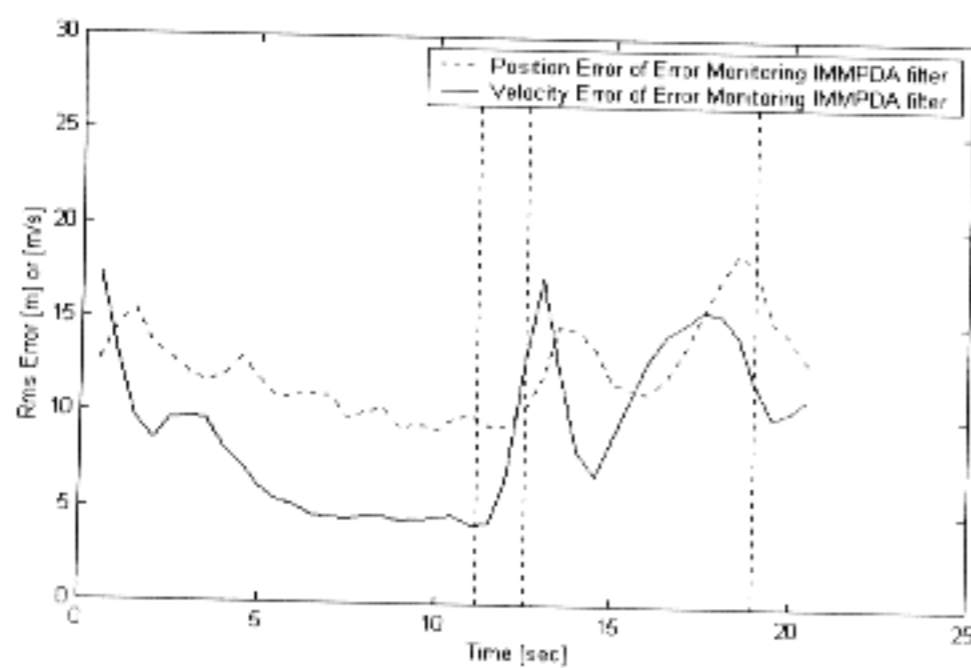
(a) IMM filter



(b) IMPDA filter

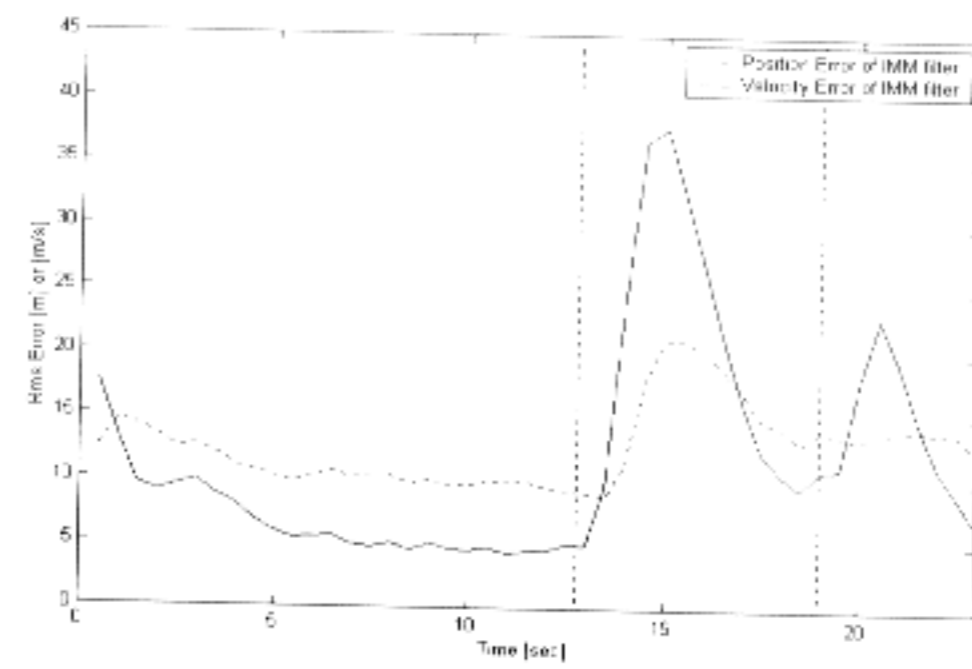


(c) Error monitoring IMM filter

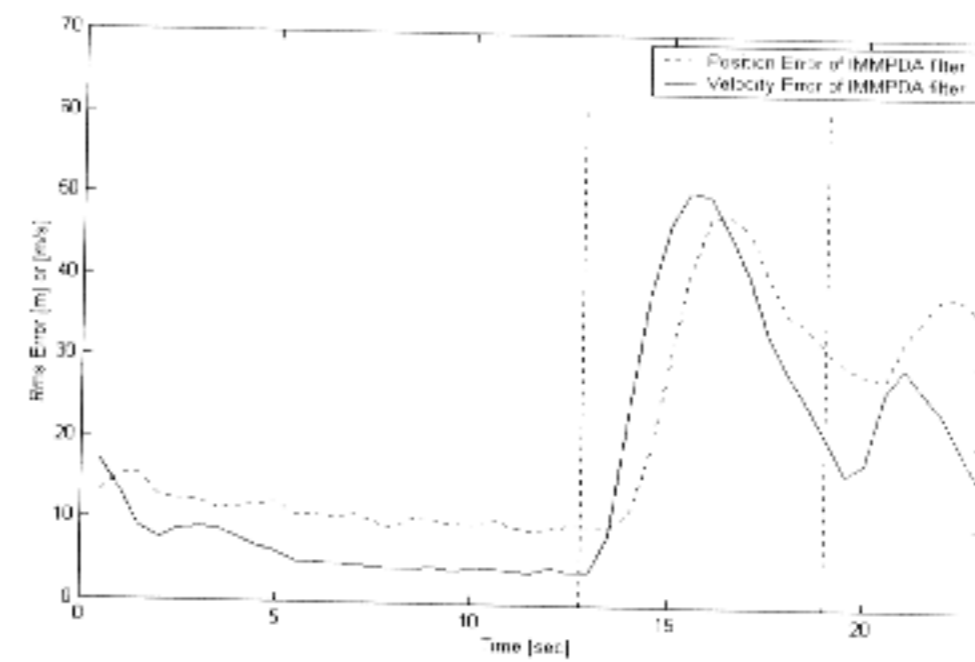


(d) Error monitoring IMPDA filter

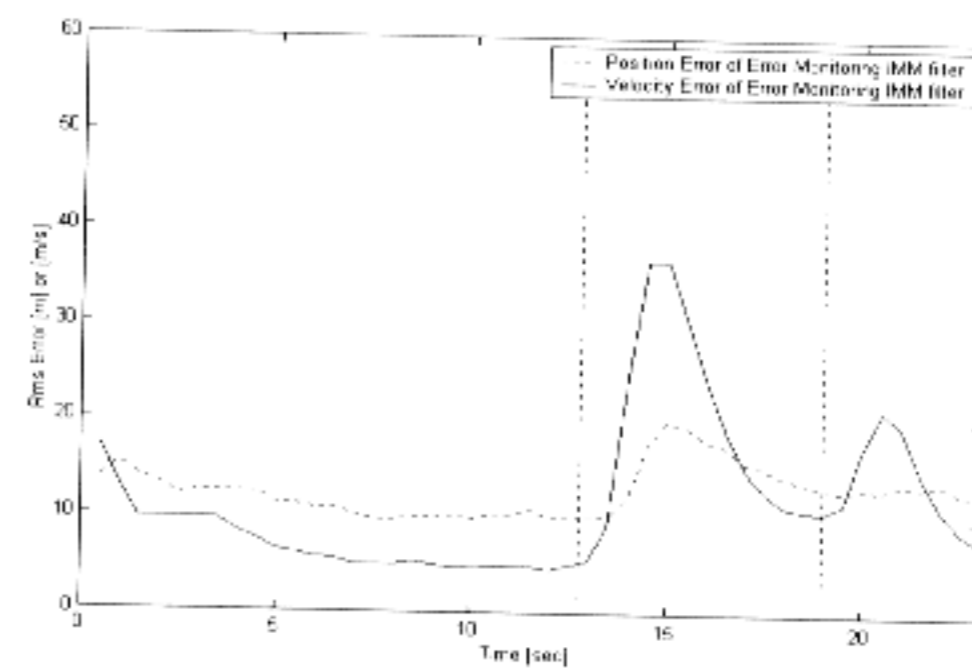
Fig. 6. Tracking errors in Pop-Up maneuvering



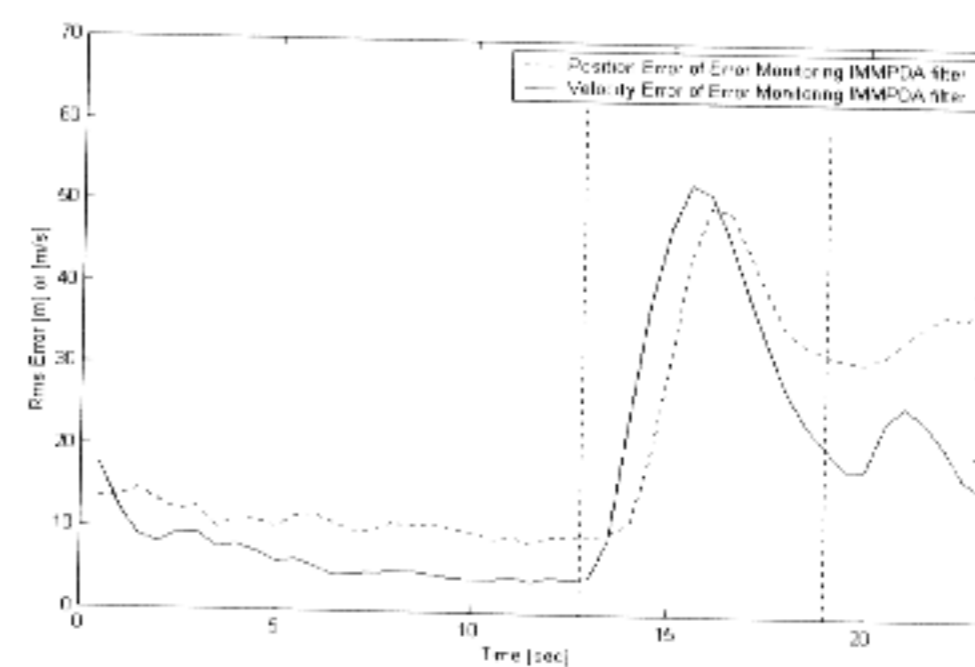
(a) IMM filter



(b) IMPDA filter



(c) Error monitoring IMM filter



(d) Error monitoring IMPDA filter

Fig. 7. Tracking errors in High-Diver maneuvering