

## 論文

## 다중 레이더 추적을 위한 IMM 모드 천이 확률의 동적 결정

전대근\*, 은연주\*, 고현\*, 염찬홍\*

## Dynamic Determination of IMM Mode Transition Probability for Multi-Radar Tracking

Dae-Keun Jeon\*, Yeonju Eun\*, Hyun Ko\*, Chan-Hong Yeom\*

## ABSTRACT

A method is presented of dynamic determination of mode transition probability for IMM in order to improve the accuracy performance of maneuvering target tracking for air traffic control surveillance processing system under multiple radar environment. It is shown that dynamic determination of mode transition probability based on the time intervals between the data input from multiple radars gives the optimized performance in terms of position estimation accuracy.

**Key Words** : Radar(레이더), Mode Transition Probability(모드 천이 확률), Target(표적) Tracking(추적), Performance(성능)

## 1. 서 론

레이더에 의해 탐지되는 기동 표적 추적 문제는 기동 모드의 불확실성과 시스템의 비선형성으로 인해 최적 성능을 보장하지 못한다. 이를 위해 제안된 방법이 시스템의 연속적인 상태와 이산적인 상태를 동시에 추정하는 하이브리드 추정 기법이다. IMM (Interacting Multiple Model) 기법은 1980년 중반에 H. A. P. Blom[1]이 제안한 이후 다양한 연구 분야에서 널리 응용되고 있는 대표적인 하이브리드 추정 기법이다.

IMM 알고리즘을 활용한 기동 표적 추적은 X. Rong Li[2] 등이 항공기 추적에 적용한 이래 항공관제용 감시자료 처리시스템의 표적 추적에도 적극 활용되고 있는데, 기존 단일 모델 기반 칼만 필터가 다수의 항공기 비행 모드를 추정할 수 없는 반면 IMM은 항공기 비행 모드에 적합한

등속 모델(CV, Constant Velocity), 선회 모델(CT, Constant Turn) 등을 이용하여, 위치, 속도 정확도를 향상시켰기 때문이다.[3]

항공관제용 항적 추적기의 성능 요구사항으로는 등속도 운동 시 추정 오차 감소, 기동 시 측정 값 대비 낮은 최고(Peak) 추정 오차, 빠른 기동 탐지에 의한 정확한 비행 모드 지시 등이 있는데, 이를 위해서는 모든 비행 모드를 고려한 항공기 운동 모델, 시스템 잡음 및 측정 잡음과 같은 모델 파라미터, 모드 천이 확률 등을 최적화하여야 한다.[4]

모델 및 파라미터 최적화를 통한 IMM 추정기의 성능 향상과 관련한 연구로서, 비행 모드, 시스템 잡음 등에 대한 연구[2], 측정 잡음에 대한 연구[5] 등이 수행된 바 있다. 모드 천이 확률을 최적화하기 위한 방법으로는 Sojourn Time을 이용한 동적 모드 천이 확률 계산[6]이 대표적인데, 이 방법은 각 모드의 평균 Sojourn Time을 선형적으로 설정하여야 하는 등의 문제가 있어서, 실제 운용 중인 대부분의 감시자료 처리시스템에서 모드 천이 확률은 고정된 값을 사용하는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 다중 레이더 환경에서 레이더 자료의 입력이 불규칙적인 점에 착안하여, IMM

† 2010년 3월 3일 접수~2010년 3월 26일 심사완료

\* 한국항공우주연구원

연락처, E-mail : bigroot@kari.re.kr

대전광역시 유성구 과학로 115

필터의 모드 천이 확률을 동적으로 결정하여 다중 레이더 추적 성능을 최적화할 수 있는 단순하면서도 실제적인 방법을 제안한다. 본 연구에서는 국내 환경에서의 적용성 제고를 위해 신불도 레이더에서 녹화된 김포 공항 진입 단일 항적의 자료를 참조하여, 항공기 궤적을 모델링하였으며 이로부터 세 개의 가상 레이더에서의 거리, 방위 각 자료를 모의 생성하였다. 레이더 측정 잡음은 Eurocontrol 감시 센서 요구도[7]를 기준으로 모의하여 반영하였으며, 레이더의 시스템 바이어스는 없는 것으로 가정하였다. 기동 표적 추적을 위해 IMM 알고리즘을 사용하였으며, 다중 레이더 추적을 위해서는 True Multi-Radar Tracking 방식[8]을 사용하였다.

본 논문은 2장 1절에서 IMM 알고리즘 개요에 대해 기술하고, 2장 2절에서 다중 레이더 추적 과정에서 모드 천이 확률을 동적으로 결정해야 할 필요성과 결정 방법에 대해 기술하였다. 2장 3절에서는 시뮬레이션 및 결과를 정리하였으며, 결론을 3장에 요약하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 IMM 알고리즘

IMM은 혼합(Mixing), 필터링(Filtering), 융합(Combination)의 3가지 단계가 반복적(Recursive)으로 처리되는 구조를 가진다. IMM 필터는 시스템이 갖는 모드의 개수만큼 필터를 생성하여 각 필터에서 추정된 모드 확률을 가중치로 하는 상태추정치를 계산하는 과정을 반복한다. 즉,  $r$ 개의 모드에 대해  $r$ 개의 필터를 생성하여 현재의 기동 모드를 가장 잘 표현하는 모드 확률을 가중치로 하여 상태와 공분산 추정치를 계산한다.

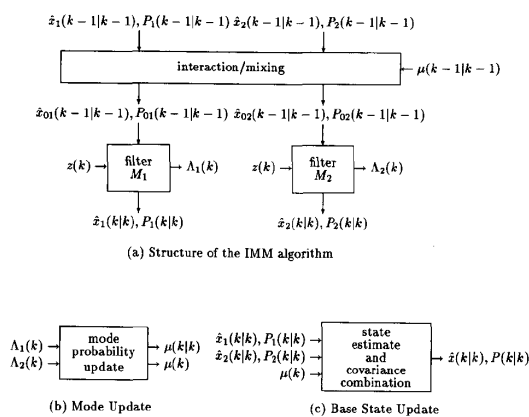


Fig. 1. IMM 알고리즘[2]

측정값과 시스템 모델에 영향을 받는 가중치는 기동 모드에 따라 매 시간 변화하게 된다. Fig. 1은 IMM 알고리즘의 한 사이클을 나타내고 있다.

IMM 알고리즘의 1단계는 혼합 확률(Mixing Probability) 계산 과정으로, 이전 단계에서 계산된 모드 확률에 Markov 모드 천이 확률을 곱하여 계산한다.

$$\mu_{ij} = \pi_{ij}\mu_i(k-1)/\bar{\mu}_j, \quad \bar{\mu}_j = \sum_i \pi_{ij}\mu_i(k-1) \quad (1)$$

여기서  $\pi_{ij}$ 는  $k-1$ 번째 스텝에서  $i$  모드였던 것이  $k$ 번째 스텝에서  $j$  모드로 변환 확률 정보를 나타내는 Markov 모드 천이 확률 행렬을 의미하며,  $\mu_i(k-1)$ 는  $k-1$ 에서  $i$  모드일 확률을 나타낸다. 혼합 확률을 가중치로 하여 필터의 입력 값으로 사용할 새로운 상태변수와 공분산을 결정한다. 다음 식에서  $x$ 와  $P$ 는 각각 상태변수와 공분산을 나타낸다.

$$\hat{x}_{0j}(k-1|k-1) = \sum_i \hat{x}_i(k-1|k-1)\mu_{ij} \quad (2)$$

$$P_{0j}(k-1|k-1) = \sum_i P_i(k-1|k-1)\mu_{ij} + \sum_i X_j X_j^T \mu_{ij}$$

$$\text{where } X_j := \hat{x}_i(k-1|k-1) - \hat{x}_{0j}(k-1|k-1)$$

두 번째 단계는 필터링으로, 각 모드별로 최적의 상태와 공분산 추정 값을 계산하고, 사용된 모델의 정확도를 의미하는 모드 공산 함수(Mode Likelihood Function)를 결정하게 된다. 먼저 시스템의 운동 모델에 의한 추정 단계와 측정값을 이용한 갱신 단계를 반복적으로 수행하여 최적의 추정 값을 추정한다. 추정 단계는 다음 식에 의해 이루어진다.

$$\hat{x}_j(k|k-1) = F_j \hat{x}_{0j}(k-1|k-1) + \Gamma_j \bar{v}_j(k-1) \quad (3)$$

$$P_j(k|k-1) = F_j P_{0j}(k-1|k-1) F_j^T + \Gamma_j Q_j(k-1) \Gamma_j^T$$

여기서  $F_j$ 는 각 모드의 상태 천이 행렬,  $\Gamma_j$ 는 잡음 계인,  $\bar{v}_j$ 는 프로세스 잡음 평균값,  $Q_j$ 는 프로세스 잡음 공분산을 의미한다. 측정 값이 들어오면 필터는 다음 식을 이용하여 상태값과 공분산을 갱신한다.

$$\hat{x}_j(k|k) = \hat{x}_j(k|k-1) + K_j r_j \quad (4)$$

$$P_j(k|k) = P_j(k|k-1) - K_j S_j K_j^T$$

여기서  $r_j$ 는 잔차로서 측정 값과 시스템 추정 값의 차이이다.  $S_j$ 는 잔차의 공분산이며  $K_j$ 는 칼

만 계인을 나타낸다.

계산된 잔차와 잔차의 공분산은 식 (5)와 같이 공산 함수를 계산하기 위한 입력값으로 사용된다. 단,  $N[r_j; a, b]$ 는 평균이  $a$ 이고 분산이  $b$ 인 가우시안 랜덤 변수  $r_j$ 의 공산 함수를 의미한다.

$$A_j = N[r_j; 0, S_j] = \frac{1}{|2\pi S_j|} e^{-0.5 r_j^T S_j^{-1} r_j} \quad (5)$$

IMM의 세 번째 단계에서는 앞 단계에서 계산된 공산 함수를 가중치로 하여 다음 식과 같이 모드 확률을 추정한다.

$$\mu_j(k) = \frac{\bar{\mu}_j A_j}{\sum_j \bar{\mu}_j A_j}, \quad \bar{\mu}_j = \sum_i \pi_{ij} \mu_i(k-1) \quad (6)$$

식 (4)에서 계산된 각 필터의 상태 및 공분산 추정 값과 식 (6)의 모드 확률을 이용하여 최종적인 융합 과정을 식 (7)과 같이 거치게 되며, 이때 계산되는 값이 IMM 알고리즘의 최종적인 출력이 된다.

$$\begin{aligned} x(k|k) &= \sum_j \hat{x}_j(k|k) \mu_j \\ P(k|k) &= \sum_j \mu_j [P_j(k|k) + [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)] [\hat{x}_j(k|k) - \hat{x}(k|k)]^T] \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.2 다중 레이더 vs. 모드 천이 확률

Markov 모드 천이 확률  $\pi_{ij}$ 는 2.1절에서 기술한 바와 같이  $k-1$ 번째 스텝에서  $i$  모드였던 것이  $k$ 번째 스텝에서  $j$  모드로 변할 확률 정보로서, 식 8과 같이 표현된다.

$$\pi_{ij} = \{PM_j(k) | M_i(k-1)\} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{11} & \cdots & p_{1j} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \cdots & p_{ij} \end{pmatrix} \quad (8)$$

비행 모드, 시스템 잡음 등과 같은 다른 설계 파라미터와 대비하여 볼 때, 모드 천이 확률은 IMM 알고리즘의 성능에 미치는 영향이 상대적으로 크지 않으므로[4], 모드 천이 확률에 대해서는 대부분의 추적기에서 고정된 값을 사용하는 것으로 알려져 있다.

그러나 항공관제용 감시자료 처리시스템이 기반하고 있는 다중 레이더 환경에서는, 레이더의 개수에 따라 평균 샘플링 시간이 달라지는 것은 물론, 레이더 위치, 안테나 회전각, 회전 주기, 탐

탐지율(Probability of Detection)이 서로 다르기 때문에, 모든 레이더의 타겟 보고를 일괄적으로 항적 추적에 사용하는 True Multi-Radar Tracking 방법을 사용할 경우, 모드 천이 확률은 중요한 파라미터가 된다. 즉,  $n$ 개의 레이더를 가정할 경우, 타겟이 보고되는 시간 간격 즉 샘플링 시간은 한 개 레이더를 사용하는 경우 대비, 평균  $1/n$ 배로 감소하게 될 것이므로, 모드 천이 확률 행렬에서 동일한 모드를 유지할 확률  $p_{ii}$ 는 그에 맞게 증가하여야 한다. 또한 다중 레이더는 서로 다른 레이더 위치, 안테나 회전각, 회전 주기, 탐지율을 가지고 있음에 따라 샘플링 시간이 일정하지 않으므로, 모드 천이 확률을 동적으로 변경하는 것이 타당하다.

본 연구에서는 다중 레이더로부터 데이터가 입력되는 시간 간격의 함수로 모드 천이 확률을 동적으로 결정한다. 이를 위해 먼저 단일 레이더 환경에서 샘플링 시간에 따른 최적 모드 확률 행렬을 시뮬레이션을 통해 추출하고, 이를 토대로 샘플링 시간에 따라 변하는 동적 모드 천이 확률 행렬을 정의한다. 최종적으로 세 개의 가상 레이더 환경에서 동적 모드 천이 확률을 사용하였을 경우에 대한 성능 영향을 검토한다.

## 2.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위해 신불도 레이더에서 녹화된 김포 공항 진입 단일 항적의 자료를 참조하여, 항공기 궤적을 모델링하였으며, 이로부터 표 1에 정의된 레이더 A, B, C로부터의 센서 자료를 모의 생성하였다.

Table 3. 레이더 파라미터

레이더	위치(km)	안테나 회전주기	안테나 초기회전각	탐지율 ( $P_d$ )
A	(0, 0)	10초	0°	1.0
B	(35, 15)	12초	30°	1.0
C	(30, -15)	12초	240°	0.5

먼저 기준 항공기 궤적을 등속 비행, 선회 비행 등의 총 10개 Segment로 구분하여 모델링하였으며(Talbe 2 참조), 이로부터 레이더 A 위치를 원점으로 하는 기준 궤적을 얻었다. 기준 궤적은 레이더 회전 시간을 고려하여 안테나 위치와 표적의 위치가 일치할 때의 시간, 직교 좌표계 기준 위치의 형태로 추출하였다. 이 때 속력은 90m/s로 고정된 것으로 가정하였다.

Table 4. 기준 궤적 모델링

Segment	시작시간 (sec)	지속시간 (sec)	비행모드	$\omega$ (°/s)
1	0	330	CV	0.0
2	330	63	CT	1.5
3	393	120	CV	0.0
4	513	57	CT	-0.25
5	570	105	CV	0.0
6	675	43	CT	-2.0
7	718	122	CV	0.0
8	840	23	CT	-2.5
9	863	70	CT	-0.5
10	933	86	CV	0.0

각 레이더에서의 센서 자료 생성을 위해, 직교 좌표계 기준 궤적을 극좌표 기준 값으로 좌표 변환을 수행한 후, 거리 및 방위각 기준의 측정 잡음을 반영하였다. 레이더측정잡음은 Eurocontrol 감시센서요구도( $\sigma_R = 70m$ ,  $\sigma_\psi = 0.08^\circ$ )[7]를 기준으로 모의하였으며, 각 레이더의 시스템 바이어스는 없는 것으로 가정하였다. 생성된 센서 자료는 필터링을 위해 다시 직교 좌표계 기준으로 변환하였다.

기동 표적 추적을 위해 IMM 알고리즘을 사용하였으며, 1개의 등속 모델(CV, Constant Velocity)과 두 개의 고정 선회율을 가지는 선회 모델(CT, Constant Turn)로 비행 모델을 구성하였다. 선회 모델의 경우 모델의 비선형성, 우수한 위치/속도 추정 등을 고려하여 Extended Kalman Filter(EKF)를 사용하는 것이 일반적이지만[2][9][10], EKF는 선회율 추정 정확도가 설계 변수에 너무 민감하게 반응하고, 기동 초기에 진동하는 문제가 있으므로[6][11], 모드 천이 확률의 영향을 효율적으로 파악하기 위해 고정 선회율( $\pm 3 \text{ deg/sec}$ )에 기반한 2개의 모델을 사용하였다.

IMM 필터에 포함된 CV 모델, CT 모델은 각각 WNA(White Noise Acceleration) 모델에 기반한 Nearly Constant Velocity Model, Nearly Constant Turn 모델로서 상태방정식은 각각 식 9, 식 10과 같다.

$$x_{CV}(k) = F_{CV}x_{CV}(k-1) + \Gamma v_{CV}(k-1) \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_{CV}(k-1) + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & T \end{bmatrix} v_{CV}(k-1)$$

$$x_{CT}(k) = F_{CT}x_{CT}(k-1) + \Gamma v_{CT}(k-1) \quad (10)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin\omega T}{\omega} & 0 & -\frac{1-\cos\omega T}{\omega} \\ 0 & \cos\omega T & 0 & -\sin\omega T \\ 0 & \frac{1-\cos\omega T}{\omega} & 1 & \sin\omega T \\ 0 & \sin\omega T & 0 & \cos\omega T \end{bmatrix} x_{CT}(k-1) + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}T^2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & T \end{bmatrix} v_{CT}(k-1)$$

여기서 상태벡터  $x_{CV}$ ,  $x_{CT}$ 는  $[\xi \dot{\xi} \eta \dot{\eta}]^T$  ( $\xi$  및  $\eta$ 는 수평 평면에서의 직교 좌표),  $T$ 는 샘플링 주기,  $v_{CV}$ ,  $v_{CT}$ 는 작은 가속도, 난류, 바람 변화 등을 모델링하기 위해 사용되는 평균 값 0인 백색 잡음으로서, 각각 식 11, 12과 같이 공분산 행렬  $Q_{CV}$ ,  $Q_{CT}$ 를 가지도록 하였다

$$Q_{CV} = \Gamma \sigma_{v_{CV}}^2 \Gamma^T \quad (11)$$

$$Q_{CT} = \Gamma \sigma_{v_{CT}}^2 \Gamma^T \quad (12)$$

여기서  $\sigma_{v_{CV}}$ ,  $\sigma_{v_{CT}}$ 는 각 모델의 전형적인 값인  $0.1 \text{ m/s}^2$ ,  $0.5 \text{ m/s}^2$ [4]으로 설정하였다.

관측 방정식은 식 13과 같이 표현되는데,  $w(k)$ 는 측정 잡음을 의미한다.

$$z(k) = Hx(k) + w(k) \quad (13)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x(k) + w(k)$$

모드 천이 확률 행렬  $\pi_{ij}$ 은 식 14과 같이 정의하였다. 여기서 동일 모드를 지속할 확률  $p_{ii}$ 는 변경 가능하도록 설정하였으며, 편의를 위해  $p_{11} = p_{22} = p_{33}$ 로 설정하였다.

$$\pi_{ij} = \begin{pmatrix} p_{11} & 0.5(1-p_{11}) & 0.5(1-p_{11}) \\ 1-p_{22} & p_{22} & 0 \\ 1-p_{33} & 0 & p_{33} \end{pmatrix} \quad (14)$$

먼저, IMM 필터의 확인을 위해  $p_{11} = 0.95$ 인 경우에 대해 기동 표적 추적을 수행하였다. 표적 추적에 앞서 센서 오차 모의에 사용된 측정 잡음은 극좌표계 기준이므로, 직교 좌표계 기준 추적을 위해 측정 잡음 분산을 변환(Covariance of the Unbiased Conversion)[4]하여 적용하였다. Fig. 2는 기준 궤적(True), 모의 센서 자료(Measured), 다중 레이더 추적 결과(Estimated)를

보여준다. Fig. 2로부터 불규칙적으로 입력되고 있는 다중 레이더 자료에 대해, 기동 모드에서도 정확한 추정이 이루어지고 있음을 정성적으로 확인할 수 있다.

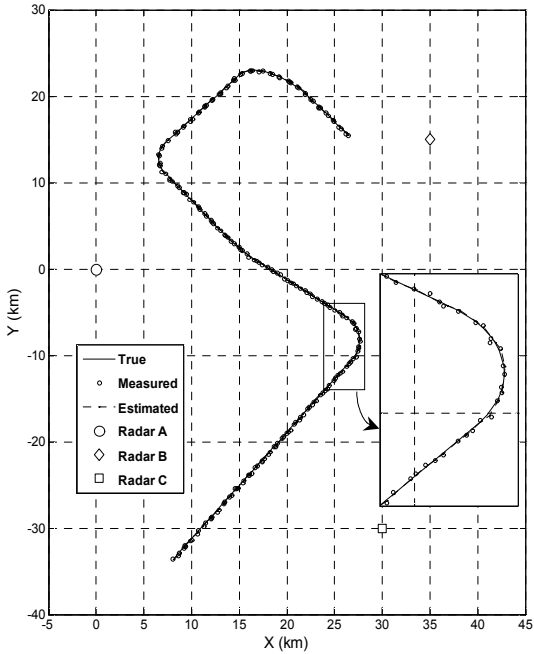


Fig. 2 IMM 필터에 의한 다중 레이더 추적

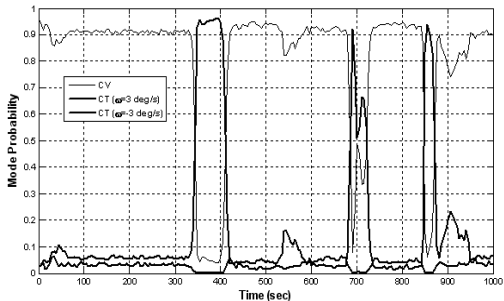


Fig. 3 모드 확률

Fig. 3은 모드 확률(100회 Monte Carlo 시뮬레이션)을 보여 주는 것으로서, 기동 발생(330초, 513초, 675초, 840초) 및 크기에 따른 모드 변경 또는 혼합이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

두 번째로, 모델 파라미터로서  $p_{ii}$  설정에 따른 추적 정확도 분석을 위해 서로 다른  $p_{ii}$  값을 IMM 모델에 고정적으로 입력하여, 그에 따른 RMS 오차(100회 Monte Carlo 시뮬레이션)를 분석하였다. 단,  $p_{ii}$ 는 자료 입력 간격에 의존하므로, 단일 레이더(레이더 A) 환경에서 레이더 안

테나 회전 주기를 달리하여 그 영향을 살펴보았다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, 레이더 안테나 회전 주기( $T$ )가 짧아질수록 추적 정확도는 높아지며, 최적  $p_{ii}$ 는 증가한다. 최적  $p_{ii}$ 가 증가하는 이유는 자료 갱신 간격이 짧을수록 이전 모드를 유지할 확률이 높기 때문이다.

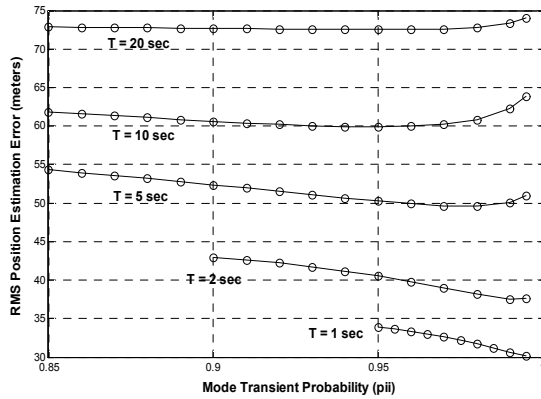


Fig. 4 최적 모드 천이 확률

안테나 회전 주기 즉 레이더 자료 샘플링 주기에 따른 최적  $p_{ii}$  자료로부터 식 15과 같이  $T$ 를 독립 변수로 하는 1차 함수 형태로  $p_{ii}$ 를 재정의하였다.

$$p_{ii} = \min(0.995, 1.0019 - 0.005T) \tag{15}$$

마지막으로, 식 15을 식 14에 적용하여 레이더 자료 갱신 시간 간격에 따라 동적으로 모드 천이 확률 행렬을 구성하였으며, 그에 따른 기동 표적 추적을 수행하였다. Fig. 5는 모드 천이 확률을 고정하여 적용한 경우(Static  $p_{ii}$ )와 동적으로 결정한 경우(Dynamic  $p_{ii}$ )에 대한 RMS 위치 오차를 보여 주는데, 매 스텝 모드 천이 확률을 자료 갱신 시간에 따라 동적으로 변경하였을 경우 최적의 성능을 보임을 확인할 수 있다.

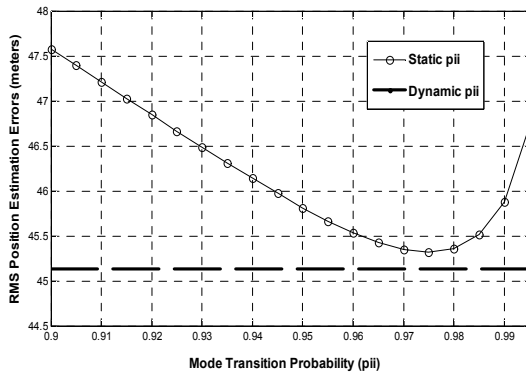


Fig. 5 모드 천이 확률에 따른 위치 오차 비교

### 3. 결 론

다중 레이더 환경 하의 항공관제용 감시자료 처리시스템의 기동 표적 추적 성능 향상을 위해, IMM 필터의 모드 변환 확률을 동적으로 결정하는 방법을 제시하였다.

다중 레이더 추적 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 다중 레이더로부터 입력되는 자료의 갱신 시간 간격을 매 스텝 모드 천이 확률에 반영하였을 경우 최적의 성능을 보임을 확인하였다.

### 후기

본 연구는 국토해양부 항공신진화사업 “항공관제용 통합정보처리시스템 개발”에 의해 연구비 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) H.A.P. Blom, “An Efficient Filter for Abruptly Changing Systems,” Proceedings of 23rd Conference on Decision and Control, Las Vegas, NV, December 1984.
- 2) X. Rong Li and Yaakov Bar-Shalom, “Design of Interacting Multiple Model Algorithm for Air Traffic Control Tracking,” IEEE Transactions on Control Systems

Technology, Vol. 1, No. 3, September 1993.

- 3) H. Wang, T. Kirubarajan, and Y. Bar-Shalom, “Precision Large Scale Air Traffic Surveillance Using IMM/Assignment Estimators,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 35, No. 1, January 1999.

- 4) Yaakov Bar-Shalom, X. Rong Li, and Thiagalingam Kirubarajan, “Estimation with Applications to Tracking and Navigation,” A Wiley-Interscience Publication, 2001.

- 5) R. W. Osborne, III, Y. Bar-Shalom, and T. Kirubarajan, “Radar Measurement Noise Variance Estimation with Several Targets of Opportunity,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 44, No. 3, July 2008.

- 6) Yaakov Bar-Shalom and Xiao-Rong Li, “Multitarget-Multisensor Tracking : Principles and Techniques,” YBS Publishing, 1995.

- 7) “Eurocontrol Standard Document for Radar Surveillance in En-Route Airspace and Major Terminal Areas,” SUR.ET1.ST01.1000-STD-01-01, March 1997.

- 8) John Shaw, “Surveillance Data Processing Systems,” QinetiQ, 2006.

- 9) P. Vacher, I. Barret, and M. Gauvrit, “Design of a Tracking Algorithm for an Advanced ATC System,” in Y. Bar-Shalom, Editor, “Multitarget-Multisensor Tracking : Applications and Advances,” Volume II, Artech House, 1990.

- 10) H.A.P. Blom, Rene A. Hogendoorn, and Bas A. van Doorn, “Design of a Multisensor Tracking System for Advanced Air Traffic Control,” in Y. Bar-Shalom, Editor, “Multitarget-Multisensor Tracking : Applications and Advances,” Volume II, Artech House, 1990.

- 11) Inseok Hwang, “Air Traffic Surveillance and Control Using Hybrid Estimation and Protocol-Based Conflict Resolution,” Ph.D. Dissertation, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 2003.