

# 전술객체 위치 모의 및 추적을 위한 필터링 알고리즘 연구

김석권<sup>1†</sup> · 진승리<sup>1</sup> · 손재원<sup>1</sup> · 박동조<sup>1</sup>

## Filtering Algorithms for Position Evaluation and Tracking of Tactical Objects

Seokkwon Kim · Seung-Ri Jin · Jae-Won Son · Dong-Jo Park

### ABSTRACT

Positions of tactical objects are represented as Time, Space and Position Information(TSPI) in modeling and simulations(M&S). The format and required information record for TSPI is investigated by referring the TSPI object model of the Test and Training Enabling Architecture(TENA), which has been developed by the United States Department of Defense. The most sophisticated tactical data link, Link-16 has a Precise Participant Location and Information (PPLI) message. We study the data format for exchanging TSPI data based on the PPLI message. To evaluate and track positions of tactical objects, we consider the Kalman filter for linear systems, and the extended Kalman filter and the unscented Kalman filter for nonlinear systems. Based on motion equations of a ballistic missile, the tracking performance for the trajectory of the ballistic missile is simulated by the unscented Kalman filter.

**Key words** : Time, Space and position information(TSPI), Link-16, Kalman filter, Ballistic missile

### 요약

모델링 시뮬레이션에서 전술객체의 위치는 시공간 위치 정보(Time, Space and Position Information, TSPI)로 표현된다. 미 국방성에서 시험, 훈련, 평가 시스템을 연동하기 위해 개발한 TENA(Test and Training Enabling Architecture)의 TSPI 객체 모델을 참고하여 시공간 위치 정보의 형태 및 정보 기록 소요를 도출하였다. 전술 데이터 링크(Tactical Data Link, TDL) 중 가장 정교한 링크 16(Link-16)의 PPLI(Precise Participant Location and Identification) 메시지를 통해 시공간 위치 정보의 교환 방식에 대해 알아보았다. 객체 위치 모의 및 추적을 위한 필터링 알고리즘으로 선형 시스템을 위한 칼만 필터 및 비선형 시스템을 위한 확장형 칼만 필터와 unscented 칼만 필터를 소개한다. 운동 방정식을 이용하여 탄도 미사일의 궤적을 모델링한 후에, unscented 칼만 필터로 추정된 탄도 미사일의 궤적 추적 성능을 시뮬레이션 하였다.

**주요어** : 시공간 위치 정보, 링크-16, 칼만 필터, 탄도 미사일

## 1. 서론

합성 환경/실험 체계 전술객체 표현 기술 연구는 전술 객체의 위치를 실시간으로 탐지·추적하고 이를 가상현실 내에서 모의하기 위한 기초/기반 기술 확보를 목적으로 한다. 합성 환경 내에서 객체 위치는 TSPI(Time, Space

and Position Information)로 표현된다. TSPI 개념은 합성 환경으로 들어오는 모든 TSPI 정보를 통합하여 일괄적으로 관리 및 표현할 수 있도록 설계해야 한다. 보다 효과적인 설계를 위해서 미 국방성에서 시험, 훈련, 평가 시스템을 연동하기 위해 개발한 TENA(Test and Training Enabling Architecture)의 TSPI 객체 모델을 참고하였다.

전술 데이터(tactical data)는 전술적 수준의 작전을 계획하고 수행하기 위해 요구하거나 우군의 즉각 조치가 필요한 긴박한 위협에 관련된 자료를 의미한다. 이러한 전술 데이터는 전장 공간의 환경 및 물리적 특성에 관련된 자료, 적의 취약성 식별 및 표적 설정을 위해 필요한 자료, 우군 세력에 대한 위협 및 위협 진행 관련 자료, 피아 전력/배치 정보, 피아 해상/공중 항적 정보, 무기/센서 상태,

\* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.(UD080042AD)

접수일(2010년 9월 30일), 심사일(1차 : 2010년 11월 4일), 게재 확정일(2010년 11월 12일)

<sup>1)</sup> 한국과학기술원 전기및전자공학과

주 저 자 : 김석권

교신저자 : 김석권

E-mail: seokkwon@kaist.ac.kr

표적 정보, 식별 자료, 항법 자료 등을 포함한다. 전술 데이터 링크(tactical data link) 표준안 중의 하나인 링크 16(Link-16)의 PPLI(Precise Participant Location and Identification) 메시지는 전술 데이터 링크 참여자의 위치와 적어 시별 정보를 제공하고 위치 정보의 정확성을 개선한다. PPLI 메시지의 정보 및 이를 이용한 상대항법에 대해 알아본다.

운동하고 있는 객체의 지나간 궤적이나 현재 위치를 알기 위한 방법으로 센서의 측정을 통하거나 수학적 모델을 이용하는 방법이 있다. 만약 측정과 수학적 모델이 완벽하다면 그 물체의 궤적과 현재 위치를 정확하게 알 수 있지만, 실제로는 측정 오차와 수학적 모델의 불확실성이 항상 존재하므로 정확한 실제 위치는 알 수 없다. 칼만 필터(Kalman filter)는 수학적인 운동 모델과 관측 모델을 통해 현재 상태와 측정값을 예측(prediction)한 후, 현재의 실제 관측 값을 통해 현재 상태를 수정(correction)한다. 선형 시스템을 위한 칼만 필터 및 비선형 시스템을 위한 확장형 칼만 필터와 Unscented 칼만 필터를 소개한다.

지구상에서의 탄도 비행은 지구의 중심에 초점을 둔 타원 궤적을 형성한다. 탄도 미사일의 궤적 추적은 탄도 미사일 방어 시스템(Ballistic Missile Defense, BMD) 구축에 있어서 필수적인 요소이다. 탄도 미사일의 궤적 추적에 사용하는 레이더는 고유의 신호 특성은 물론 탄도탄의 거리 및 Radar Cross Section(RCS)에 따라 그 정보가 크게 오염되어 있다. 따라서 추적 정밀도를 향상하기 위해서는 추적 필터를 구성해야 한다. 탄도 미사일의 운동 방정식과 레이더의 측정 방정식이 비선형이므로 확장형 칼만 필터 또는 Unscented 칼만 필터, 파티클 필터(particle filter)와 같은 비선형 필터가 필요하다. 미분 방정식 형태인 탄도 미사일의 운동 방정식을 살펴보고, 여기에 Unscented 칼만 필터를 적용하여 탄도 미사일의 궤적 추적을 시뮬레이션 한다.

## 2. 시공간 위치 정보(TSPI) 표현

TSPI 정보는 그 묘사 방법이 서로 다르기 때문에 합성 환경에서 전술객체를 모의하기 위하여 사전에 설계한 형태로 변환해야 한다. 시험, 훈련, 평가 시스템을 개발하는데 있어 지리적으로 넓은 지역의 지상, 해상, 공중 영역의 위치 정보 데이터는 군사 작전에 필수적이다. 위치 정보 데이터의 상호 운용성(interoperability)과 재사용성(reusability)을 확보하기 위해 1998년 미 국방성(Department

of Defense, DoD)의 CTEIP(Central Test and Evaluation Investment Program)의 FI(Foundation Initiative) 2010 프로젝트에서 TENA 개발을 진행하였다<sup>[1]</sup>. FI 2010의 TENA는 분산된 위치 정보 데이터의 상호 운용, 재사용 및 구성성(composability)을 목표로 전장 환경 및 가상 환경을 표현하기 위한 기술적인 청사진이 되었다.

### 2.1 TENA의 구조와 공통 하부 구조

저장소(repository)는 분산된 컴퓨팅 환경 내에 흩어져 있는 각종 데이터와 객체 모델, 응용 시스템 개발에 관련된 정보를 모아 서로 공유할 수 있는 데이터 저장소로 4단으로 나뉜다. 첫째 단 ‘Raw information’, 둘째 단 ‘Organization & Unification’, 셋째 단 ‘Presentation’, 그리고 넷째 단은 ‘Repository access’이다. 첫째 단에 위치한 데이터베이스에는 별도의 데이터 처리를 하지 않은 미가공 데이터를 저장한다. 각각의 데이터베이스와 연결된 데이터베이스 서버는 어떤 방법으로 미가공 데이터를 저장할 지 결정한다. 데이터베이스 서버는 관계형(relational), 다중 매체(multi-media), 객체 지향형(object-oriented) 등의 데이터 저장 방식을 지원한다. 둘째 단에 위치한 ‘Federated Broker’는 데이터베이스에 제공할 데이터를 일관성

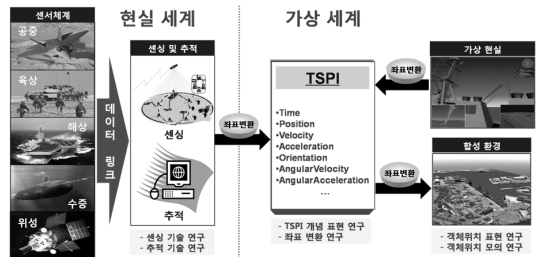


그림 1. 합성 환경에서 TSPI 표현

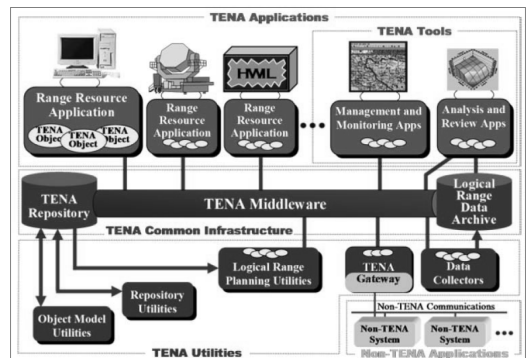


그림 2. TENA의 구조

있게 구성하기 위해 다른 ‘Federated Broker’에 통신을 하여 처리한 데이터를 데이터베이스 서버에 제공한다.

TENA 미들웨어는 분산된 컴퓨팅 환경에서 응용 시스템 간에 실시간으로 데이터 교환을 지원한다. 또한, 미들웨어는 서로 다른 기종의 하드웨어나 프로토콜, 통신 환경 등을 연결하여 응용 프로그램과 그 프로그램을 운영하는 환경 간에 원만한 통신이 이루어질 수 있도록 한다. 미들웨어 API(Application Programming Interface)는 범위 자원 응용 프로그램간의 통신에 이용되는 논리 범위 객체 모델(Logical Range Object Model, LROM)과 논리 범위 데이터를 관리한다. 또한, API는 미들웨어와 범위 자원 응용 프로그램간의 호출 함수를 알려 주는 콜백(callback)을 제공한다.

논리 범위 데이터 보관소(Logical Range Data Archive, LRDA)는 시나리오 데이터와 일련의 사건 동안 수집한 데이터와 요약 정보를 기록하고 보존한다. 논리 범위 데이터 보관소는 지역(local) 데이터 보관소, 공용(public) 데이터 보관소, 데이터 보관소 인덱스 서버로 구성되어 있다. 미들웨어를 통해 전달 받은 지역 데이터는 지역 데이터 보관소에 저장하고, 논리 범위 객체 모델의 데이터는 공용 데이터 보관소에 저장한다. 데이터 인덱스는 데이터 보관소 인덱스 서버에 저장한다.

### 2.2 TENA의 TSPI 객체 모델

TENA의 구조에서 응용 시스템간에 데이터를 주고받을 때 데이터의 표준 형태를 정의한 객체 모델(object model)이 있다. TENA 객체 모델 중 하나인 TSPI 객체 모델은 시간, 위치, 속도, 가속도, 방위(orientation), 각속도(angular velocity), 각가속도(angular acceleration) 등의 객체 모델의 합으로 구성되어 있다. 위치 정보는 좌표계에 따라 달라지므로 물체의 위치를 표현하기 위한 위치 객체 모델에서 WGS-84(World Geodetic System 84)와 같은 ORM(Object Reference Model)을 설정하여 좌표계를 결정한 후 좌표 정보를 나타낸다. TSPI 객체 모델을 구성하는 객체 모델 중 시간 및 위치의 종류 및 세부 종류, 속성 및 속성 타입을 표 1에 정리하였다.

## 3. 링크 16(Link-16)의 PPLI 메시지

전술 데이터 링크는 미군의 전술 디지털 정보 링크(Tactical Digital Information Link, TADIL)라는 용어와 혼용하여 사용하고 있으며, 디지털 정보 전송에 적합한 표준 통신 링크이다<sup>21)</sup>. 전술 데이터 링크는 전술 정보 교

표 1. TSPI 객체 모델 중 시간 및 위치 객체 모델

종류	세부 종류	속성	속성 타입
시간	GPS 시간	weekNumber	long
		timeOfWeek	double
		rollover Count	unsigned long
	Unix 시간	seconds	long
		nanoseconds	long
	국제 표준 시간	seconds	long
nanoseconds		long	
theDate		unsigned long	
위치	지심 위치	x, y, z	double
	측지 위치	위도	double
		경도	double
		고도	double
	동복상 위치	x, y, z	double
	구면 접평면 위치	방위각	double
		고도각	double
거리		double	

환을 위한 단일 또는 다중 네트워크 구조와 다중 통신 매체를 통해 두 가지 이상의 지휘통제 및 무기체계를 연동한다. 전술 데이터 링크는 전술 데이터를 송신 및 수신할 목적으로 C4I(Command, Control, Communications, Computers and Intelligence) 체계를 연결하는 링크로서 전술 C4I 체계들 간에 실시간/근실시간으로 정보교환을 지원한다. 전술 데이터 링크는 다음과 같은 네 가지 요소로 구성된다.

- 통신장비 및 매개체 등을 형성하는 물리적 하드웨어 또는 장비
- 데이터 처리기
- 메시지 표준(예: 메시지 포맷, 데이터 요소)
- 디지털 정보의 단말기 간 전송, 승인, 사용을 허용하는 운용절차

최근 선진국은 전투기, 탱크, 군함 등과 같은 플랫폼 중심전에서 네트워크 중심전(Network Centric Warfare, NCW)에 초점을 맞추어 군사 혁신을 수행하고 있다. 현대전에서 승패의 주요 결정 요소는 플랫폼의 민첩성 또는 보유 무기의 사거리가 아니라 적보다 더 나은 공동 상황 인식(Situation Awareness, SA)을 획득, 유지하는 능력이다. 이러한 능력을 획득, 활용하여 정보 우위를 기반으로 전

쟁을 수행하는 것이 네트워크 중심전의 개념이다. 네트워크 중심전에서 센서 체계(Intelligence, Surveillance and Reconnaissance, ISR), C4I 체계, 정밀타격체계의 정밀 유도 무기(Precision-Guided Munitions, PGM)가 네트워크를 통하여 상황 인식을 공유, 협동 교전 및 정밀 타격을 수행하여 효과적인 전쟁을 수행한다.

전술 데이터 링크는 미국, 이스라엘, 스웨덴, 프랑스 등의 여러 선진 국가와 북대서양 조약기구(North Atlantic Treaty Organization, NATO) 등의 군사 동맹에서 개발하여 사용 중에 있다. 자국 고유의 전술 데이터 링크 규격 및 시스템을 제정하여 사용하고 있으나 미군을 중심으로 한 연합군의 합동작전을 위하여 전술 데이터 링크간 연동을 위해 추가 개발을 진행하고 있는 상황이다.

미국의 전술 데이터 링크 표준안 중의 하나인 링크 16은 링크 11에 없었던 PPLI 메시지를 지원한다<sup>[3]</sup>. PPLI 메시지는 전술 데이터 링크 참여자들의 위치와 적어식별 정보를 제공하고 위치 정보의 정확성을 개선한다. PPLI 메시지가 포함하고 있는 정보는 다음 표 2에 정리하였다. 단, JU(Joint Unit)는 전술 정보 분배 체계(Joint Tactical Information Distribution System, JTIDS)를 뜻하며 전술 데이터 링크에 참여하는 플랫폼이 하나의 JU이다.

링크 16은 PPLI 메시지의 도착 시간(Time of Arrival, ToA) 측정을 통한 상대 항법(relative navigation) 기능이 있다. 전술 데이터 링크 참여자가 위성 항법 장치(Global Positioning System, GPS)를 통해 위치 정보를 얻을 수 없고 관성 항법 장치(Inertial Navigation System, INS)에

표 2. PPLI 메시지의 정보

PPLI 메시지 정보	의미
위치	위치 좌표와 정확도를 제공
JU 신분 증명	네트워크 접속을 위한 암호화 절차 수행
플랫폼 종류	전투기, 폭격기 등
플랫폼 임무	CAP(Combat Air Control)
JU 네트워크 상태표시	시간 정확도, 중계 상태, 네트워크 참여 상태, 네트워크 참여그룹 전송 통제를 위한 네트 통제
적어 식별 코드	세 가지 모드가 있음 : 적군, 아군, 중립
비상 상태	비상 상태를 전송할 수 있음
비상 탈출 상태 표시	플랫폼이 항공기인 경우 비상 탈출 시 자동으로 전송
지휘부와 비행 리더 표시	지휘 통제(C2, Command and Control) JU와 비 지휘통제 JU를 나타냄
공중 체공 표시	항공기의 지상과 공중 체공을 구분

의존하는 경우 PPLI 메시지를 이용한 상대 항법으로 위치 오차를 줄일 수 있다.

## 4. 추적 필터 알고리즘

일반적으로 움직이는 물체의 위치 측정과 수학적 모델의 불확실성으로 정확한 실제 위치는 알 수 없다. 칼만 필터는 위너(Wiener) 필터의 특수한 경우로서 순환적 최소 평균자승(recursive minimum mean square) 추정 문제의 해를 구하는 필터이다.

### 4.1 칼만 필터

선형 동적 시스템이 있을 경우, 상태 변수(state variable)로 칼만 필터를 수식화할 수 있고 상태 변수는 시스템의 정보를 포함한다. 칼만 필터의 주요 기능은 과거의 여파 추정치(filtered estimates)와 새로이 입력된 현재의 측정치가 주어졌을 때 현재 상태에 대한 여파 추정치와 미래 상태에 대한 예측 추정치(predicted estimates)를 찾는 것이다<sup>[4,5]</sup>. 그러나 추정을 위한 입력 데이터는 잡음 성분이 추가되므로 올바른 여파 추정 및 예측을 위해서는 적절한 모델링이 필요하다. 칼만 필터는 일반적으로 상태 방정식(state equation)과 측정 방정식(measurement equation)으로 모델링된다.

선형 동적 시스템에서 상태 방정식과 측정 방정식은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= F_k x_k + G_k w_k \\ z_k &= H_k x_k + v_k \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $x_k$ 와  $z_k$ 는 각각 이산 시간  $k$ 에서의 상태 벡터와 측정 벡터이다. 칼만 필터 알고리즘은 다음과 같은 가정과 조건들이 필요하다. 단,  $E$ 는 평균(expectation)을 뜻한다.

- $E[w_k] = 0, E[w_k w_k^T] = Q_k, E[w_k w_j^T] = 0$  for  $k \neq j$

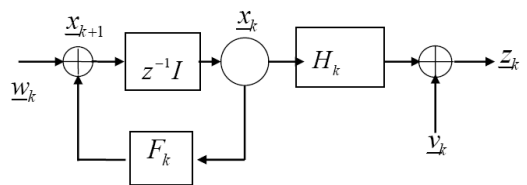


그림 3. 선형 동적 시스템의 블록도

- $E[v_k] = 0$ ,  $E[v_k v_k^T] \equiv R_k$ ,  $E[v_k v_j^T] = 0$  for  $k \neq j$
- $E[w_k v_j^T] = 0$  for any  $k, j$
- $E[(x_0 - \bar{x}_0)w_k] = 0$  for any  $k$ ,  $E[x_0] = \bar{x}_0$ ,  
 $E[x_0 x_0^T] \equiv P_0$
- $w_k, v_k, x_0$ 는 가우시안(Gaussian) 확률 밀도 함수(Probability Density Function, PDF)를 따른다.
- $w_k, v_k$ 는 각각 상태 방정식과 측정 방정식의 잡음 성분이다.

칼만 필터는  $F_k, G_k, H_k, Q_k, \bar{x}_0, P_0$ 를 알고 있고 입력에 순차적 측정값  $Z(k) = (z_1, z_2, \dots, z_k)$ 가 들어온다고 가정했을 때, 순환적으로 최소 분산 추정값(minimum variance estimates)을 구한다. 여파 추정치와 예측 추정치는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{klk} &\equiv E[x_k | Z(k)] \\ x_{klk-1} &\equiv E[x_k | Z(k-1)] \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식들과 여러 가지 조건, 가정들로부터 구한 칼만 필터 알고리즘은 그림 4와 같다.

상태 벡터  $x_k$ 의 크기가  $M \times 1$ 이고 측정 벡터  $z_k$ 의 크기가  $N \times 1$  일 때 칼만 필터를 구성하는 행렬의 크기는 다음과 같다.

- 상태 벡터 공분산  $P_{klk}, P_{klk-1}$ :  $M \times M$
- 칼만 이득  $K_k$ :  $M \times N$
- 상태 잡음 공분산  $Q_k$ :  $M \times M$
- 측정 잡음 공분산  $R_k$ :  $N \times N$

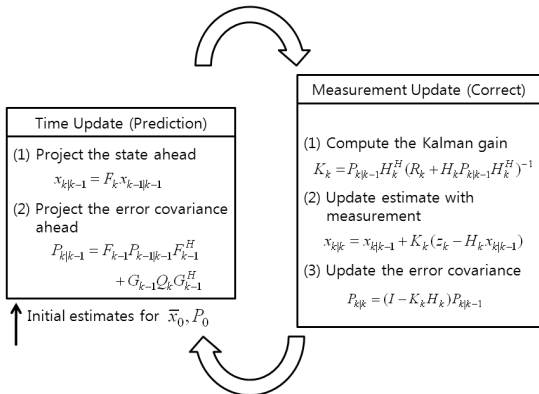


그림 4. 칼만 필터 알고리즘

#### 4.2 확장형 칼만 필터

칼만 필터는 상태 방정식과 측정 방정식이 선형인 경우에 적용할 수 있다. 확장형(extended) 칼만 필터는 상태 방정식 또는 측정 방정식이 비선형인 경우에 방정식을 선형화하여 칼만 필터 알고리즘을 적용한 필터이다<sup>[4,5]</sup>. 비선형 동적 시스템에서 상태 방정식과 측정 방정식은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f_k(x_k) + G_k w_k \\ z_k &= h_k(x_k) + v_k \end{aligned} \quad (3)$$

상태 방정식과 측정 방정식을  $x_{klk}$ 에 대해 자코비안(Jacobian) 행렬을 이용하여 선형화하면 상태 업데이트 행렬  $F_k$ 와 측정 행렬  $H_k$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_k &\approx \nabla f_k | x_{klk} \\ H_k &\approx \nabla h_k | x_{klk-1} \end{aligned} \quad (4)$$

확장형 칼만 필터는 비선형 방정식을 선형 방정식으로 근사화에 바탕을 두었다. 칼만 필터는 선형 시스템에서 최소평균 자승오차(Minimum Mean Square Error, MMSE) 필터 알고리즘이지만, 확장형 칼만 필터는 비선형 시스템에서 최소평균 자승오차 필터 알고리즘이 아니라는 것에 유의해야 한다. 일반적으로 비선형 시스템에서는 최소 평균 자승 오차 필터 알고리즘은 존재하지 않는다. 만약 비선형 방정식의 선형 근사화 오류가 크다면, 확장형 칼만 필터의 성능은 떨어진다는 단점이 있다. 또한 선형화 과정에서 자코비안 행렬의 계산량이 복잡한 경우가 있다. 선형화한 상태 방정식과 측정 방정식을 이용한 확장형 칼

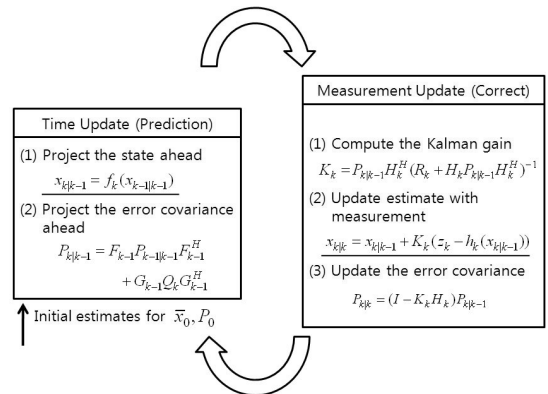


그림 5. 확장형 칼만 필터 알고리즘

만 필터 알고리즘은 다음 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 그림 4와 비교하여 다른 부분은 밑줄로 표시하였다.

### 4.3 Unscented 칼만 필터

확장형 칼만 필터의 근사화 문제점을 해결하기 위해 다량의 난수를 발생하여 추정값을 구하는 파티클 필터 알고리즘이 제시되었다. 하지만 파티클 필터 알고리즘은 다량의 난수를 발생하여 계산하는 알고리즘으로서 복잡도가 크며 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. Unscented 칼만 필터는 확장형 칼만 필터의 선형 근사화 문제점과 파티클 필터의 복잡도 문제를 해결하기 위해 고안한 필터 알고리즘이다<sup>6)</sup>. Unscented 칼만 필터는 다량의 난수를 발생하여 추정값을 구하지 않고 unscented 변환에 기초하여 분산점(sigma point)이라고 하는 몇 개의 지점을 이용하여 추정값을 구한다. 그리하여 unscented 칼만 필터는 선형 근사화를 이용하지 않으면서 복잡도가 크지 않은 알고리즘이라고 할 수 있다.

#### 4.3.1 Unscented 변환(UT)

상태 변수  $x$ 에 대한 실제 값은 알려져 있지 않고 그것의 평균  $\bar{x}$ 와 공분산  $P_x$ 가 주어졌을 때, 상태 변수  $y$ 는  $y=f(x)$ 라는 비선형 모델로 정의된다고 하자. 이런 경우에  $y$ 의 평균과 공분산은 unscented 변환(Unscented Transformation, UT)을 이용하여 추정할 수 있다. unscented 변환은 선형 모델의 선형 근사화 없이 상태 변수  $x$ 의 평균  $\bar{x}$ 의 분산점을 이용하는 변환 방식이다.

상태 변수  $x$ 의 차원(dimension)이  $L$ 인 경우, unscented 변환에서  $2L+1$ 개의 분산점을 얻는 방법은 다음과 같다.

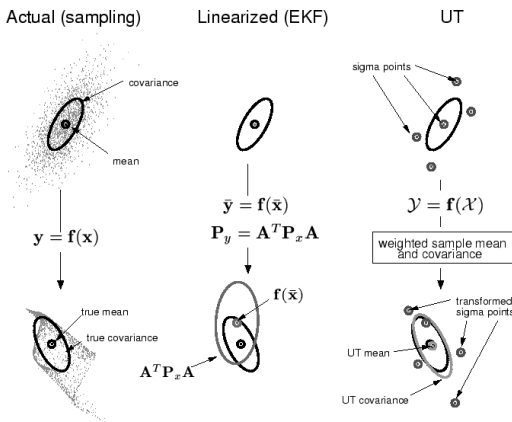


그림 6. Unscented 변환(UT)과 선형 변환의 비교

$$\begin{aligned} X_0 &= \bar{x} \\ X_i &= \bar{x} + (\sqrt{(L+\kappa)P_x})_i, \quad i=1, \dots, L \\ X_i &= \bar{x} - (\sqrt{(L+\kappa)P_x})_{i-L}, \quad i=L+1, \dots, 2L \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서  $\kappa$ 는 분산점의 크기와 가중치(weight)를 결정하는 매개 변수이다.  $(\sqrt{(L+\kappa)P_x})_i$ 는  $(\sqrt{(L+\kappa)P_x})$ 의  $i$ 번째 열(column)이며 평균과 분산점 사이의 거리를 의미한다. 각각의 분산점에 대한 가중치는 다음과 같다.

$$W_0 = \frac{\kappa}{L+\kappa}, W_i = \frac{1}{2(L+\kappa)}, \quad i=1, \dots, 2L \quad (6)$$

#### 4.3.2 Scaled unscented 변환(SUT)

Unscented 변환에서 평균과 분산점 사이의 거리  $(\sqrt{(L+\kappa)P_x})_i$ 는 상태 변수  $x$ 의 차원  $L$ 이 증가할수록 커진다. 그리고  $\kappa$ 가  $(L+\kappa) < 0$ 이면  $(L+\kappa)P_x$ 가 음반정(negative definite) 행렬이 되어 행렬의 제곱근이 존재하지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 scaled unscented 변환(scaled unscented transformation, SUT)이 고안되었다.

분산점이 평균  $\bar{x}$  근처에 위치하기 위해 크기 조정 매개 변수  $\alpha$ 를 이용하여 다음과 같이 새로운 분산점  $X'_i$ 을 정의할 수 있다.

$$X'_i = X_0 + \alpha(X_i - X_0) \quad (7)$$

단,  $\alpha$ 는 양의 값을 갖는 임의의 작은 값이다. UT와 SUT는 3차항 이상의 고차항을 무시하고 테일러 전개를 하여 공분산을 추정하였다. 이러한 고차항의 영향을 고려하기 위해 매개 변수  $\beta$ 를 이용한다. 만약  $x$ 가 가우시안 분포를 따른다면,  $\beta=2$ 가 최적의 값으로 알려졌다. 매개 변수  $\beta$ 는  $x$ 의 분포에 따라 달라진다. 매개 변수  $\lambda = \alpha^2(L+\kappa) - L$ 로 정의하면 SUT의 분산점을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_0 &= \bar{x} \\ X_i &= \bar{x} + (\sqrt{(L+\lambda)P_x})_i, \quad i=1, \dots, L \\ X_i &= \bar{x} - (\sqrt{(L+\lambda)P_x})_{i-L}, \quad i=L+1, \dots, 2L \end{aligned} \quad (8)$$

평균을 계산할 때의 가중치는  $W_i^{(m)}$ , 공분산을 계산할 때의 가중치는  $W_i^{(c)}$ 로 나타내었을 때 그 값은 다음과 같다.

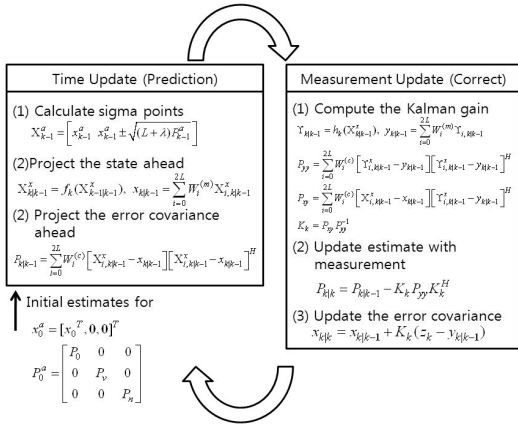


그림 7. Unscented 칼만 필터 알고리즘

$$W_0^{(m)} = \lambda / (L + \lambda)$$

$$W_0^{(c)} = \lambda / (L + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = 1 / \{2(L + \lambda)\}, i = 1, \dots, 2L$$
(9)

분산점과 가중치를 이용하여 비선형 모델  $y = f(x)$ 의 평균과 공분산을 추정하면 다음과 같다.

$$Y_i = f(X_i)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} Y_i$$

$$P_y = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} (Y_i - \bar{y})(Y_i - \bar{y})^H$$
(10)

### 4.3.3 Unscented 칼만 필터(UKF)

SUT를 이용하여 unscented 칼만 필터(unscented Kalman filter, UKF)를 다음 그림 7과 같이 구성할 수 있다.

## 5. 탄도 미사일 궤적 생성과 추적

탄도 미사일은 지구의 중심에 초점을 둔 타원 궤적을 형성하며 수식적으로 표현이 가능하다. 탄도 미사일의 운동 방정식을 살펴보고, UKF를 적용하여 탄도 미사일의 위치를 추적하는 방법에 대해 알아보고자 한다.

### 5.1 탄도 미사일의 운동 방정식

탄도 미사일의 상태는 위치와 속도로 주어지며, 상태 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$X = [V_T \ \gamma_T \ \psi_T \ r_T \ \theta_T \ \phi_T]$$
(11)

여기서 탄도 미사일의 위치는 지구 중심으로부터의 거리  $r_T$ , 경도  $\theta_T$ , 위도  $\phi_T$ 로 나타낸다. 속도는 탄도 미사일의 중심에 위치한 동북상(East North Up, ENU) 좌표계에서 속력  $V_T$ , 비행 경로각  $\gamma_T$ , 방위각  $\psi_T$ 로 나타낸다.

탄도 미사일에 추력(thrust)과 공력(aerodynamic force)이 작용하지 않는다는 가정을 한다면, 탄도 미사일은 케플러 제 2법칙에 의하여 타원 궤적을 따라 비행한다. 이런 경우에 지구를 완전 구체로 가정하면, 지구의 자전을 고려한 탄도 미사일의 운동 방정식은 다음과 같이 여섯 개의 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다<sup>7,8)</sup>.

$$\frac{dV_T}{dt} = \omega^2 r_T \cos \phi_T (\sin \gamma_T \cos \phi_T - \cos \gamma_T \sin \psi_T \sin \phi_T) - g \sin \gamma_T + v_r$$

$$\frac{d\gamma_T}{dt} = -\frac{g}{V_T} \cos \gamma_T + \frac{V_T}{r_T} \cos \gamma_T + 2\omega \cos \psi_T \cos \phi_T + \frac{r_T \omega^2}{V_T} \cos \phi_T (\cos \gamma_T \cos \phi_T + \sin \gamma_T \sin \psi_T \sin \phi_T) + v_\gamma$$

$$\frac{d\psi_T}{dt} = -\frac{V_T}{r_T} \cos \gamma_T \cos \psi_T \tan \phi_T + 2\omega (\tan \gamma_T \sin \psi_T \cos \phi_T - \sin \phi_T) - \frac{r_T \omega^2}{V_T \cos \gamma_T}$$

$$\frac{dr_T}{dt} = V_T \sin \gamma_T + v_r$$

$$\frac{d\theta_T}{dt} = \frac{V_T \cos \gamma_T \cos \psi_T}{r_T \cos \phi_T} + v_\theta$$

$$\frac{d\phi_T}{dt} = \frac{V_T \cos \gamma_T \sin \psi_T}{r_T} + v_\phi$$
(12)

여기서  $g$ 는 중력 상수,  $\omega$ 는 지구 자전속도,  $v_r, v_\gamma, v_\psi, v_r, v_\theta, v_\phi$ 는 각 상태의 연산 잡음을 의미한다.

### 5.2 탄도 미사일의 측정 모델

탄도 미사일의 위치 정보는 측지 좌표계(geodetic coordinates)의 위도, 경도 및 고도 정보로 나타낼 수 있다. 측지 좌표계로 나타낸 위치 정보를 좌표계 변환 기법을 통해 지구중심 지구고정 좌표계로 변환할 수 있다. 지구중심 지구고정 좌표계는 원점이 지구 중심이고, 자전하고 있는 지구에 좌표계를 고정시킨 지구 중심 좌표계이다. 좌표계의 기준 평면은 지구 적도면이며, 기준축  $X$ 는 그리니치 자오선과 일치한다. 기준축  $Y$ 는 그리니치 자오선으로부터 동쪽으로 90도 방향이고, 기준축  $Z$ 는 지구 자전축 방향이다. 이산 시간  $k$ 에서 지구중심 지구고정 좌표계 나타낸 탄도 미사일의 위치는  $(X_{bm_k}, Y_{bm_k}, Z_{bm_k})$ 로 나타

낸다. 레이더의 위치는  $(X_r, Y_r, Z_r)$ 로 나타낸다.

탄도 미사일 위치를 레이더가 측정할 때, 레이더에 대한 탄도 미사일의 상대 위치는 지역 좌표계(local coordinates)로 나타낼 수 있다. 만약 구면 접평면 좌표계를 이용한다면, 이산 시간  $k$ 에서 탄도 미사일의 상대 위치는 레이더와 탄도 미사일의 거리  $R_k$ , 방위각(azimuth angle)  $A_k$ 와 고도각(elevation angle)  $E_k$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R_k &= \sqrt{(X_{bm_k} - X_r)^2 + (Y_{bm_k} - Y_r)^2 + (Z_{bm_k} - Z_r)^2} + v_R \\ A_k &= \tan^{-1} \left( \frac{Y_{bm_k} - Y_r}{X_{bm_k} - X_r} \right) + v_A \\ E_k &= \tan^{-1} \left( \frac{Z_{bm_k} - Z_r}{\sqrt{(X_{bm_k} - X_r)^2 + (Y_{bm_k} - Y_r)^2}} \right) + v_E \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $v_R, v_A, v_E$ 는 측정 잡음을 나타낸다.

### 5.3 탄도 미사일의 궤도 추적 시뮬레이션

탄도 미사일의 운동 방정식과 레이더의 측정값을 기반으로 탄도 미사일의 위치를 추정할 수 있다. 초기 상태 추정 오차의 분산은 다음과 같이 설정하였다.

$$[\sigma_{V_0}^2, \sigma_{\gamma_0}^2, \sigma_{\psi_0}^2, \sigma_{r_0}^2, \sigma_{\theta_0}^2, \sigma_{\phi_0}^2] = [20^2, 1^2, 1^2, 100^2, 0.1^2, 0.1^2]$$

단,  $\sigma_{V_0}^2$ 의 단위는  $[m/s]^2$ ,  $[\sigma_{\gamma_0}^2, \sigma_{\psi_0}^2, \sigma_{\theta_0}^2, \sigma_{\phi_0}^2]$ 의 단위는  $[deg]^2$ ,  $\sigma_{r_0}^2$ 의 단위는  $[m]^2$ 이다. 운동 방정식의 잡음 분산은 다음과 같이 설정하였다.

$$[\sigma_{V_1}^2, \sigma_{\gamma_1}^2, \sigma_{\psi_1}^2, \sigma_{r_1}^2, \sigma_{\theta_1}^2, \sigma_{\phi_1}^2] = [(10^{-1})^2, 5^2, 5^2, 10^2, 1^2, 1^2]$$

위치 추정 오차를 줄이기 위해 두 개 이상의 레이더를 이용할 수 있다. 이런 경우에는 데이터 융합(data fusion) 과정을 이용하여 각각의 레이더 측정값을 처리해야 한다. 레이더가 Unscented 칼만 필터를 이용해 추정한 탄도 미사일의 위치 정보를 융합 센터(fusion center)로 전송한다면, 융합 센터는 각각의 레이더가 추정한 위치 정보에 가중치를 주는 일련의 데이터 융합 과정을 거쳐 탄도 미사일의 위치 추정 정확도를 높일 수 있다.

레이더의 개수  $K=3$ 인 경우, 레이더 측정 방식의 잡음 분산은 다음과 같이 설정하였다.

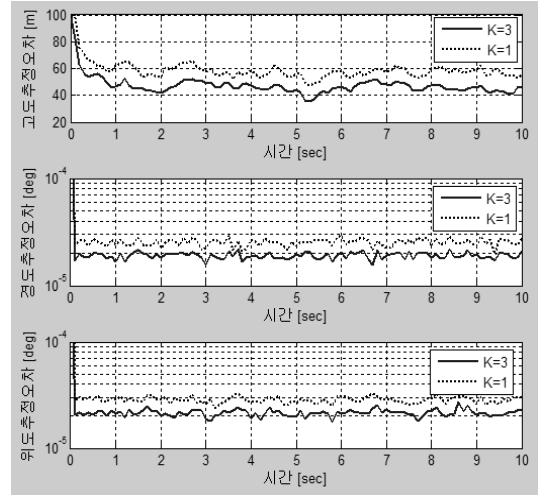


그림 8. 탄도 미사일 위치 추정 오차

$$\begin{aligned} [\sigma_{R_1}^2, \sigma_{A_1}^2, \sigma_{E_1}^2] &= [10^2, (10^{-3})^2, (10^{-3})^2] \\ [\sigma_{R_2}^2, \sigma_{A_2}^2, \sigma_{E_2}^2] &= 2[\sigma_{R_1}^2, \sigma_{A_1}^2, \sigma_{E_1}^2] \\ [\sigma_{R_3}^2, \sigma_{A_3}^2, \sigma_{E_3}^2] &= 2^2[\sigma_{R_1}^2, \sigma_{A_1}^2, \sigma_{E_1}^2] \end{aligned}$$

만약 레이더에서 추정한 위치 정보가 링크 16을 통해 융합 센터로 전송된다면 레이더 측정 방식의 잡음 분산에 따른 위치 품질(Position Quality, PQ) 정보가 PPLI 메시지와 함께 전송될 것이다. 측정 방정식이 식 (13)과 같이 비선형인 경우 최적의 가중치를 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 비선형성이 크지 않다고 가정하였을 때, 잡음 분산에 반비례하는 가중치를 인가하는 방식인 최량선형비편향추정(Best Linear Unbiased Estimation, BLUE)을 고려할 수 있다<sup>[10,11]</sup>. 최량선형비편향추정을 이용해 가중치를 인가했을 경우의 위치 추정 오차와 잡음 분산이 가장 작은 첫 번째 레이더의 위치 추정 오차를 비교하였다. 추정 오차는 RMSE(Root Mean Square Error) 방식으로 다음과 같이 계산하였다.

$$x_{RMSE}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{x(k) - x_{nk}\}^2} \quad (14)$$

여기서  $N$ 은 시뮬레이션의 반복 횟수이다. 100회 반복 실험을 통해 데이터 융합 기법에 따른 unscented 칼만 필터의 RMSE를 시뮬레이션 하였다.



## 6. 결 론

합성 환경에서 전술객체 위치 표현을 위한 TSPI 데이터의 변수 및 데이터 타입 등을 연구하기 위해 TENA의 TSPI 객체 모델을 참고하였다. 데이터링크를 통한 전술객체의 위치정보 전송을 연구하기 위해 전술데이터링크 표준 중의 하나인 링크 16의 PPLI 메시지의 특성을 알아보았다. 움직이는 전술객체의 위치 추적을 위해 칼만 필터, 확장형 칼만 필터, unscented 칼만 필터 등을 알아보았다. 지능형 고속 운동체의 일종인 탄도 미사일의 위치를 추적하기 위해 탄도 미사일의 운동 방정식의 운동 방정식과 레이더의 측정 방정식을 모델링 하였다. 비선형 시스템을 위한 unscented 칼만 필터와 데이터 융합 기법을 이용하여 레이더의 개수에 따른 탄도 미사일의 고도, 경도, 위도 추정 오차를 시뮬레이션 하였다.

## 참 고 문 헌

1. URL “<https://www.tena-sda.org>”
2. 전병욱, 김의순, “한국군 전술데이터링크 체계 구축을 위한 제언,” 국방정책연구, 61, pp. 167-190, 2003년 가을.
3. 김상순, “Link 16 핵심 기능인 PPLI 메시지의 의미와 사용,” 월간 군사저널, pp. 132-143, 2008년 10월.
4. S. Haykin, Adaptive filter theory, 4th Ed., Prentice Hall, 2002.
5. S. Haykin, Kalman filtering and neural networks, Wiley, 2001.
6. S.J. Julier and J.K. Uhlmann, “Unscented filtering and nonlinear estimation,” Proceedings of the IEEE, vol. 92, no. 3, pp. 401-422, Mar. 2004.
7. 백정호, 박상영, 박은서, 최규홍, 임형철, 박종욱, “확장칼만필터와 UNSCENTED 칼만 필터를 이용한 우주발사체의 실시간 궤적추정,” 한국우주과학회지, 22(4), pp. 501-512, 2005년 12월.
8. 박상혁, 윤중섭, 유창경, “Unscented Kalman Filter를 이용한 탄도 미사일 추적,” 제어·로봇·시스템학회 논문지, 14(9), pp. 898-903, 2008년 9월.
9. B. Saulson and K. Chang, “Comparison of nonlinear estimation for ballistic missile tracking,” Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, vol. 5096, pp. 13-24. Oct. 2003.
10. J.-J. Xiao, A. Ribeiro, Z.-Q. Luo, and G.B. Giannakis, “Distributed compression-estimation using wireless sensor networks,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 23, no. 4, pp. 27-41. Jul. 2006.
11. S. M. Kay, Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory, Prentice Hall, 1993.



**김 석 권** (seokkwon@kaist.ac.kr)

2005 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 학사  
2008 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사  
2008~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, Communication Systems



**진 승 리** (seungri@kaist.ac.kr)

2007 부산대학교 전자전기통신공학부 학사  
2009 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사  
2009~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, Communication Systems



**손 재 원** (sonjaewon@kaist.ac.kr)

2009 부산대학교 전자전기통신공학부 학사  
2009~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 영상처리



**박 동 조** (djpark@ee.kaist.ac.kr)

1976 서울대학교 전자공학과 학사  
1981 University of California, Los Angeles 전자공학과 석사  
1984 University of California, Los Angeles 전자공학과 박사  
1985~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 교수

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, Communication Systems, 영상처리