

# 전술객체 위치 모의를 위한 데이터 융합 및 추적 회피 시뮬레이션

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

## Data Fusion and Pursuit-Evasion Simulations for Position Evaluation of Tactical Objects

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

### ABSTRACT

The aim of the study on the tactical object representation techniques in synthetic environment is on acquiring fundamental techniques for detection and tracking of tactical objects, and evaluating the strategic situation in the virtual ground. In order to acquire these techniques, there need the tactical objects' position tracking and evaluation, and an inter-sharing technique between tactical models. In this paper, we study the algorithms on the sensor data fusion and coordinate conversion, proportional navigation guidance(PNG), and pursuit-evasion technique for engineering and higher level models. Additionally, we simulate the position evaluation of tactical objects using the pursuit and evasion maneuvers between a submarine and a torpedo.

**Key words** : Data fusion, JDL data fusion process, Coordinate conversion, PNG(Proportional Navigation Guidance)

### 요약

합성 환경/실험 체계 전술객체 표현 기술 연구는 전술객체들의 위치를 실시간으로 탐지·추적하고 이를 가상현실 내에서 모의하기 위한 기반 기술을 확보하는 것을 목적으로 한다. 이를 위한 기술로써 전술객체 위치 추적 및 모의 기술, 모델 간 공유 기술에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 우선 센서 데이터 융합과 좌표계 통일을 위한 알고리즘을 연구하였고, 추적자의 유도 방식인 PNG(Proportional Navigation Guidance)를 적용한 추적 기술, 공학급 및 상급 모델의 회피 알고리즘을 적용한 회피 기술을 연구하였다. 또한, 잠수함과 어뢰의 추적 회피 시뮬레이션을 통해 전술객체의 위치 모의를 연구하였다.

**주요어** : 데이터 융합, JDL 데이터 융합 처리 단계, 좌표계 변환, 비례 항법 유도

## 1. 서론

본 논문은 모델링 및 시뮬레이션(Modeling and Simulation, M&S)에서 시공간 위치 정보 형태(Time, Space and Position Information, TSPI)로 표현된 전술객체의 위치를 모의하기 위한 데이터 융합의 과정을 잠수함과 어뢰의 추적 회피 시뮬레이션을 통해 연구하였다.

합성 환경/실험 체계 전술객체 표현 기술 연구는 전술객체들의 위치를 실시간으로 탐지·추적하고 이를 가상현실 내에서 모의하기 위한 기초 기술을 확보하는 것을 목적으로 한다. 특히 전술객체의 위치 모의를 위해서는 현실세계에 있는 전술객체의 위치를 획득하기 위한 센싱 기술 및 센싱 오차를 보정해주는 추적 기술에 대한 연구뿐만 아니라 다양한 좌표계를 사용하는 센서들로부터 입력되는 전술객체의 위치 정보를 융합하여 높은 신뢰도의 위치 정보를 제공할 수 있어야 하므로, 이를 위한 다중 센서 데이터 융합 및 안정적인 좌표계 변환 알고리즘에 대한 연구가 필수적이다<sup>1,6)</sup>. 가상세계에 있는 전술객체의 위치를 모의하기 위해서는 전술객체의 움직임을 모사할 수 있는 다양한 운동방정식에 대한 연구가 역시 필요하다. 또한 실제 전술객체들은 위치 정보에 기초하여 추적과 회피

\* 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 저자 : 진승리

교신저자 : 진승리

E-mail: seungri@kaist.ac.kr

에 해당하는 전술 기동을 수행하므로, 데이터 융합과 좌표 변환의 안정성을 평가하기 위한 추적 회피 시뮬레이션 연구 또한 필수적이다.

본 논문에서는 잠수함과 어뢰의 추적 회피 시뮬레이션을 통해 전술객체의 위치 모의를 연구하였다. 우선 센서 데이터 융합과 좌표계 통일을 위한 알고리즘을 연구하였고, 추적자의 유도 방식인 PNG(Proportional Navigation Guidance)를 적용한 추적 기술, 공학급 및 상급 모델의 회피 알고리즘을 적용한 회피 기술을 연구하였다. 또한 기만기가 포함된 잠수함과 어뢰의 추적 회피 시뮬레이션을 이용하여 전술객체의 위치 모의와 추적 회피 알고리즘 간의 정확성을 보였다.

## 2. 본 론

### 2.1 센서 데이터 융합

데이터 융합, 특히 다중 센서로부터의 데이터 융합은 능동 혹은 수동 센서로부터 오는 정보나 데이터를 합성하거나 결합하는 과정을 말한다. 지금까지 다중 센서 데이터 융합(Multi Sensor Data Fusion) 방법에 대한 연구가 다양한 분야에서 수행되고 있다<sup>1-2)</sup>. 이런 방법은 크게 측정값 융합 방법과 상태 융합 방법으로 나눌 수 있다.

일반적으로 사용하는 측정값 융합 방법은 센서로부터의 측정값들을 단순히 합쳐서 차원이 증가된 벡터로 만드는 방법과 각각의 센서로부터 입력되는 측정값에 가중치를 주어 하나의 측정치로 융합하는 방법이 있다. 가중치를 고려한 측정값 융합 방법은 계산량이 적은 장점을 가지고 있으며, 같은 종류의 센서를 여러 개 사용하는 시스템에 적합하다. 반면, 단순히 측정값을 합쳐서 계산하는 측정값 융합 방법은 상대적으로 우수한 성능을 가지는 서로 다른 종류의 센서를 사용하는 시스템에 적합하다.

상태 융합 방법으로는 기존의 상태 벡터 융합 방법과 수정된 상태 벡터 융합 방법이 있다. 이 방법은 각각의 센서에서 칼만 필터를 이용해서 추정한 상태 추정값을 융합하여 새로운 상태 추정값을 얻는 방식이다.

다중 센서 데이터 융합에 관한 문제는 전반적인 모델을 설정하고 시스템이 설정되어 진행되어야 할 필요가 있다. 이런 이유에서 데이터 융합을 위한 모델들을 설정하는 연구가 진행되어 왔다<sup>1-2)</sup>.

대표적인 데이터 융합 모델의 하나로, 미국 JDL(Joint Directors of Laboratories)에서 제안한 정보 융합 처리 모델을 들 수 있다. JDL에서 제안한 데이터 융합 처리 모델은 처리(processing) 단계와 데이터베이스(DB)로 나누어

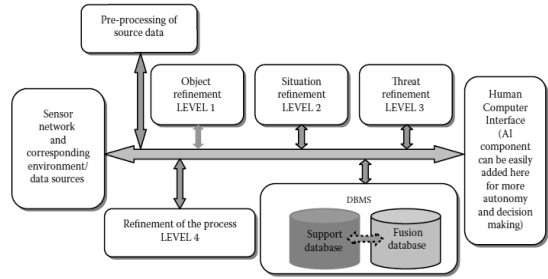


그림 1. JDL 데이터 융합 처리 모델

진다. 그림 1에서 자세한 단계를 확인할 수 있다. 각각의 단계는 서로 연결되어 순차적으로 진행된다.

위에서 보인 JDL 데이터 융합 처리 모델은 기능적으로 데이터 융합 모델들의 일반적인 사용에도 가능하도록 즉, 다양한 분야에 응용될 수 있도록 정의되었다. 이를 위해 센서 네트워크와 HCI(Human-Computer Interface)로 구성되는 신호 처리 과정과 성능 평가 과정을 나누어 놓았다. 각각의 처리 단계를 살펴보자.

첫 번째 단계는 source pre-processing 단계이다. 이 단계에서는 신호 처리 알고리즘과 탐지 이론 등을 이용하여 센서에서 수신한 신호에서 정보를 추출한다. 예를 들어 배열 자료 처리(array data processing)를 이용하여 레이더 신호 정보로부터 표적의 위치와 속도를 추정하는 것을 들 수 있다.

두 번째는 object refinement 단계이다. 이 단계에서는 객체의 위치, 파라미터 정보와 식별 정보를 알아내기 때문에 추정, 표적 추적 및 패턴 인식과 같은 많은 작업들이 행해진다. 이 단계에서 하게 되는 기능들을 크게 4가지로 분류하여 정리할 수 있다.

- Data alignment: 좌표계 변환, 단위 통일
- Data/object correlation:
  - ex) Nearest Neighbor
- Position/kinematics & attribute estimation:
  - ex) Kalman filter
- Object identity estimation:
  - ex) Pattern recognition

세 번째는 situation refinement 단계이다. 이 단계에서는 객체 정보를 이용하여 현재 상황을 기술한다. 예를 들어 세 대의 탱크가 동쪽으로 이동한다는 사실을 기술하는 것을 들 수 있다. 이것은 매우 복잡한 과정이므로 다음과 같은 processing function으로 구성된다.

- Object aggregation
- Event/activity interpretation
- Contextual interpretation

마지막 단계는 threat refinement 단계이다. 이 단계에서는 현재 상황으로부터 미래의 위협 정보를 판단하는 과정을 진행한다. situation refinement 단계와 마찬가지로 다음과 같은 processing function으로 구성된다.

- Aggregate force estimation
- Intent prediction
- Multi-perspective assessment

위에서 살펴본 바와 같이 JDL 모델은 데이터베이스를 기초로 관리되는 시스템으로서 모니터링, 평가, 추가, 업데이트 그리고 정보의 제공을 담당하는 데이터 융합 과정이다. 본 논문에서는 이런 JDL 모델에서 object refinement 단계에 대해 연구하였다. 즉, 전술객체의 위치를 모의하기 위해서 우선 다양한 센서로부터 얻은 정보들의 좌표계를 통일시키고, 좌표 변환된 데이터를 이용해서 전술객체의 위치를 추정하고 추적하여 모의하는 방향으로 연구를 진행하였다. 이런 일련의 과정을 잠수함과 어뢰의 추적 회피 게임으로 모델링하고 시뮬레이션 하였다.

## 2.2 좌표계 상호 변환 알고리즘 연구

전술객체의 추적 회피 알고리즘을 구현하려면 해당 객체들의 위치, 속도 등의 정보들을 정확하게 나타낼 수 있어야 한다. 하지만 모델링 및 시뮬레이션에서 시공간 위치 정보 형태로 표현되는 전술객체의 위치는 절대좌표계가 없어서 상황에 따라 다양한 좌표계가 사용되므로 이들 사이의 속도가 빠르고 신뢰도가 높은 좌표 변환 알고리즘이 필요하다<sup>6)</sup>.

예를 들어, 동일한 WGS-84 지구타원체 모델을 사용한다고 하더라도 측지좌표계(geodetic coordinate)로 위치가 서술된 지상 관측자가 전술객체의 위치를 동북상 좌표계(East-North-Up coordinate, ENU)로 표현한 경우 전술객체의 위치 파악을 위해서는 동북상 좌표계에서 측지좌표계로의 변환이 요구된다. 두 좌표계 사이의 변환은 지구중심 지구고정 좌표계를 이용하여 이루어지는데, 완전 구체가 아닌 지구의 물리적인 제한조건으로 인해 지구중심 지구고정 좌표계에서 측지좌표계로의 변환이 유일하게 정의되지 않으므로, 수치해석적 방법과 근사적 방법 등 다양한 접근법들이 연구되고 있다<sup>4)</sup>.

뿐만 아니라, 지도에서 사용하는 직교좌표계 역시 횡

메르카토르(Transverse Mercator, TM) 투영법과 UTM (Universal Transverse Mercator) 투영법을 함께 사용하고 있으므로 위치 표현을 위한 좌표계 간의 상호 변환 알고리즘이 필수적으로 요구됨을 알 수 있다<sup>8)</sup>.

본 논문에서는 지구중심 지구고정 좌표계에서 측지좌표계로의 다양한 변환 기법들에 대한 변환 오차 및 수행 시간 등을 이용하여 전반적인 성능을 비교, 분석하고 모델링 및 시뮬레이션의 목적에 대한 적합성을 조사하였다. 또한, 직교좌표계와의 좌표 변환 알고리즘에서 변환 안정성을 함께 고려하였다.

### 2.2.1 지구중심 지구고정 좌표계와 측지좌표계 간의 변환 알고리즘

지구중심 지구고정 좌표계와 측지좌표계 사이의 변환 관계가 정의되기 위해서는 먼저 기준이 되는 지구타원체 모델과 그에 기반한 측지좌표계가 요구된다. 지금까지 개발된 지구타원체 모델로는 WGS-84, Bessel 1841 등 다양하지만 이중에서도 WGS-84(World Geodetic System 1984)는 미 국방부 산하 National Imagery and Mapping Agency(NIMA)에서 개발한 좌표계로서 최근에는 전 세계적인 표준 지구타원체 모델로 자주 이용되고 있다. 이외에 Bessel 1841 지구타원체 모델은 우리나라와 일본 등지를 기준으로 지구를 모델링한 것으로 많이 사용되었으나 2007년부터는 국립지리원(현 국토지리정보원)에서도 WGS-84 지구타원체 모델을 사용하고 있다<sup>9)</sup>.

아래의 그림 2는 WGS-84 지구타원체 모델과 기준 좌표계 프레임을 나타낸 그림이다. 지구중심 지구고정 좌표계와 측지좌표계, 그리고 동북상 좌표계에 대한 자세한 설명은 참고문헌<sup>7)</sup>로 대신한다.

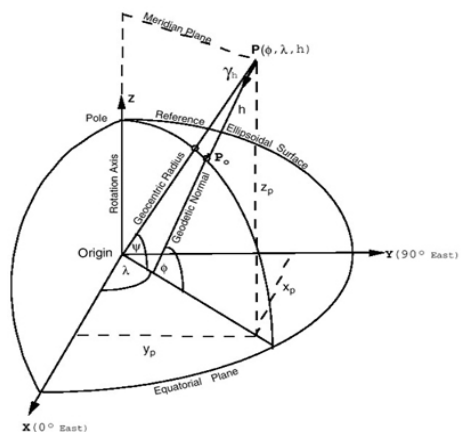


그림 2. 기준 좌표계 프레임

좌표변환을 설명하기 위해 그림 2에 점 P 를 표시하였다. 해당 점의 위치는 측지좌표계에서는  $(\phi, \lambda, h)$  즉, 위도, 경도 및 고도로 표현되며, 지구중심 지구고정 좌표계에서는  $(x_p, y_p, z_p)$ 로 표현된다. 측지좌표계에서 지구중심 지구고정 좌표계로의 변환관계는 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} x &= (R+h)\cos\phi\cos\lambda, \\ y &= (R+h)\cos\phi\sin\lambda, \\ z &= (R+h-e^2R)\sin\phi, \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{여기서 } R = \frac{a}{(1-e^2\sin^2\phi)^{1/2}}$$

위 식에서 사용된 파라미터들은 다음의 표 1에 사용되는 지구타원체 모델별로 정리하였다.

측지좌표계에서 지구중심 지구고정 좌표계로의 변환관계는 식 (1)과 같이 알려져 있다. 하지만 지구타원체 모델은 지구가 완전구체가 아니라는 물리적인 제한조건으로 인해 모유선(prime vertical)의 곡률반경이 위도에 의존하므로<sup>[4]</sup> 지구중심 지구고정 좌표계에서 측지좌표계로의 변환관계는 명확한 형태로 정리되지 않게 된다. 경도에 대해서만 다음의 식 (2)와 같은 간단한 관계식이 알려져 있다.

$$\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \tag{2}$$

위도 ( $\phi$ )와 경도( $h$ )를 주어진 좌표  $(x, y, z)$ 로부터 구하는 알고리즘들은 반복법과 근사법으로 나누어진다<sup>[4]</sup>. 반복법은 반복루프를 이용하여 근사적으로 위도와 경도를 구하는 방법으로, Borkowski, Fukushima, Seemkooei 등의 방법들이 있다. 반면에 근사법은 알려진  $(x, y, z)$ 와  $(\phi, h)$  사이의 관계식에 근사화 조건을 적용하여 해를 구하는 기법들로, Heikkinen, Borkowski, Zhu 등의 방법이 있다. 각각의 알고리즘에 대해서는 참고문헌<sup>[5-7]</sup>에 자세하게 정리되어 있다. 반복법을 사용하면 계산시간이 얼마나 걸릴지에 대한 예측이 어려운 단점이 있고, 근사법은 일련의 관계식을 통해 한 번의 알고리즘 수행으로 값을 찾아낸다 는 특징이 있다.

실제 좌표 변환 알고리즘들을 구현하여 실험, 분석한 내용은<sup>[6]</sup>에 자세하게 소개되어 있다. 위 실험들을 살펴보면 반복법 중에서는 Fukushima의 알고리즘이 위도에서 3.7777e-06의 오차, Seemkooei의 알고리즘이 고도에서 3.3214e-04의 오차를 나타내어 비교적 큰 오차를 발생

표 1. 지구타원체 모델의 매개변수

구분	Bessel 1841	WGS-84
장반경( $a$ )	6377397.155	6378137
단반경( $b$ )	6356078.963	6356752.314
편평도( $f$ )	0.00334277318	0.003352810665
제1이심율( $e^2$ )	6.674372227e-3	6.694379990e-3
제2이심율( $e'^2$ )	6.719218795e-3	6.739496742e-3

시켰으며, 평균 수행 시간에서는 Borkowski의 반복법이 5.800937초로 가장 긴 수행 시간을 나타내었다. 근사법은 평균 오차와 평균 수행 시간 면에서는 모두 반복법의 경우보다 더 좋은 성능을 보였으나 실제로는 좌표 변환의 대상 영역이 특정한 영역으로 한정되기 때문에 우수한 평균 성능만으로 근사법이 더 좋은 알고리즘이라고 단정할 수는 없다. 다만 반복법은 반복 수행의 종료 시점을 예측하기 어려우므로 실제 시스템에 적용하기 위해서는 근사법이 더 적합하다고 생각된다. 그리고 근사법 사이에도 변환 결과의 정확성과 수행 시간 사이에 trade-off 관계가 있기 때문에 시스템의 목적에 따라 적합한 변환 알고리즘이 선택되어야 할 것이다.

### 2.2.2 직교좌표계 간의 변환 알고리즘 소개

우리나라에서 많이 사용되는 대표적인 직교좌표계로는 TM 좌표계와 UTM 좌표계를 들 수 있다<sup>[8]</sup>. 두 가지 모두 지표면 상의 위치를 2차원 직교좌표계로 투영하여 나타낸 것인데, UTM 투영법은 적도를 횡축, 자오선을 종축으로 하고 회전타원체인 지구를 경도 6°씩 총 60개의 구역(종대, column)으로 나누고 각 종대마다 자오선과 적도의 교점을 원점으로 하여 원통도법인 할선 횡 메르카토르 투영법(secant transverse Mercator projection)으로 등각 투영하는 방식이다. 각 종대는 서경 180° 자오선에서 동쪽으로 6° 간격으로 1부터 60까지 구역번호(zone)를 붙인다. 종대에서 위도는 남북 80°까지만 포함시키며 8° 간격으로 20구역(row)으로 나누어 C(남위 80° ~ 남위 72°)에서 X(북위 72° ~ 북위 80°)까지 (단, I와 O는 제외) 알파벳 문자로 표시한다. 따라서 종대 및 횡대는 결국 경도 6° x 위도 8° 크기의 직사각형 구역으로 구분된다.

UTM 좌표계에서 거리좌표는 미터 단위[m]로 표시하며 종좌표에서는 N(North)을, 횡좌표에서는 E(East)를 붙인다. 각 종대마다 좌표원점의 값을 북반구에서 횡좌표

500,000E, 종좌표 0N(남반구에서는 10,000,000N)으로 주면 북반구에서 종좌표는 적도에서 0N, 북위 80°에서 10,000,000N이고, 남반구에서는 남위 80°에서 적도까지의 거리는 10,000,000m로 나타난다. 북위 80°와 남위 80°간 전 지역의 지도는 UTM 좌표계로 표시하며 북위 80° 이북과 남위 80° 이남의 양극지역은 국제극심입체좌표(UPS)로 표시함으로써 전 세계를 일관된 좌표계로 나타낼 수 있다. 우리나라의 경우 UTM 좌표 구역은 동서방향으로 51, 52 구역 및 남북방향으로 S, T 구역에 속한다. 51 구역의 경우 중앙 자오선은 동경 123°이며 52 구역은 동경 129°가 된다. 또한 북위 32°에서 북위 40° 구역은 S로 표기하며 북위 40°에서 북위 48°까지는 T 구역으로 표시한다.

TM 투영법은 우리나라에 가장 적합하도록 세부조정을 한 변형 투영법으로 볼 수 있다. 우리나라 전역에 4개의 원점(X=0, Y=0)이 정해져 있고, X축은 원점의 자오선에 접하고 진북방향을 양의 방향으로, Y축은 원점의 평행권에 접하고 있고 진동방향을 양의 방향으로 한다. X축의 자오선 호장은 1.0000(축척계수  $m_x=1.0000$ ), Y축의 축척계수  $m$ 은 다음 식 (3)과 같다.

$$m_y = m_0 \left\{ 1 + \sin^2 \lambda \cos^2 \phi \left( 1 + \frac{n^2}{2} \right) + \sin^4 \lambda \cos^4 \phi \frac{5-4n^2}{24} \right\} \quad (3)$$

여기서,  $\sin \lambda$ 는 원점에서의 경도차,  $t = \tan \phi$ ,  $n^2 = e^2 \cos^2 \phi$ ,  $e^2$ 은 제2이심율이고 프레임을 기준하여 도형 등각 조건에 의하여 측지좌표계와 직교좌표계 사이의 좌표 변환이 행하여진다.

다음의 표 2는 TM 좌표계에서 원점, X, Y를 입력받아 측지좌표계의 위도( $\phi$ ), 경도( $\lambda$ )로 좌표 변환하는 알고리즘이다. 표 3은 UTM 좌표계에서 zone, N, E를 입력받아 측지좌표계의 위도( $\phi$ ), 경도( $\lambda$ )로 좌표 변환하는 알고리즘이다<sup>8)</sup>.

역방향으로의 좌표 변환은 위 알고리즘들을 응용하여 구할 수 있으며, TM 좌표계와 UTM 좌표계 사이의 좌표 변환은 측지좌표계를 매개로 하여 구성한다. 위의 좌표 변환 알고리즘은 변환 오차가 각도(°)의 경우에는  $1e-05 \sim 1e-14$  수준, 거리(m)의 경우에는  $1e+00 \sim 1e-05$  수준으로 매우 작아, 그 안정성을 확인할 수 있었다.

표 2. TM 좌표계에서 측지좌표계의 좌표 변환

Switch(원점)	
Case(서부원점)	$\Delta X = 500000, \Delta Y = 200000, \lambda_0 = +125^\circ$
Case(중부원점)	$\Delta X = 500000, \Delta Y = 200000, \lambda_0 = +127^\circ$
Case(동부원점)	$\Delta X = 500000, \Delta Y = 200000, \lambda_0 = +129^\circ$
Case(극동원점)	$\Delta X = 500000, \Delta Y = 200000, \lambda_0 = +131^\circ$
Case(제주원점)	$\Delta X = 550000, \Delta Y = 200000, \lambda_0 = +127^\circ$
$\phi_0 = +38^\circ, k_0 = 1.0$	
$M_0 = a \left\{ \left( 1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256} \right) \phi_0 - \left( \frac{3e^2}{8} + \frac{3e^4}{32} + \frac{45e^6}{1024} \right) \sin 2\phi_0 + \left( \frac{15e^4}{256} + \frac{45e^6}{1024} \right) \sin 4\phi_0 - \frac{35e^6}{3072} \sin 6\phi_0 \right\}$	
$M = M_0 + \frac{X - \Delta X}{k_0}$	
$\mu_1 = \frac{M}{a \left( 1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256} \right)}$	
$e_1 = \frac{1 - \sqrt{1 - e^2}}{1 + \sqrt{1 - e^2}}$	
$\phi_1 = \mu_1 + \left( \frac{3e_1}{2} - \frac{27e_1^3}{32} \right) \sin 2\mu_1 + \left( \frac{21e_1^2}{16} - \frac{55e_1^4}{32} \right) \sin 4\mu_1 + \left( \frac{151e_1^3}{96} \right) \sin 6\mu_1 + \left( \frac{1097e_1^4}{512} \right) \sin 8\mu_1$	
$R_1 = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \phi_1)^{3/2}}$	
$C_1 = e^2 \cos^2 \phi_1$	
$T_1 = \tan^2 \phi_1$	
$N_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi_1}}$	
$D = \frac{Y - \Delta Y}{N_1 k_0}$	
$\phi = \phi_1 - \frac{N_1 \tan \phi_1}{R_1} \left[ \frac{D^2}{2} - \frac{D^4}{24} (5 + 3T_1 + 10C_1 - 4C_1^2 - 9e^{12}) + \frac{D^6}{720} (61 + 90T_1 + 298C_1 + 45T_1^2 - 252e^{12} - 3C_1^2) \right]$	
$\lambda = \lambda_0 + \frac{1}{\cos \phi_1} \left[ D - \frac{D^3}{6} (1 + 2T_1 + C_1) + \frac{D^5}{120} (5 - 2C_1 + 28T_1 - 3C_1^2 + 8e^{12} + 24T_1^2) \right]$	

**표 3.** UTM 좌표계에서 측지좌표계로의 좌표 변환

Switch(위치)

Case(북반구)

$$\phi_d = N$$

Case(남반구)

$$\phi_d = 10000000 - N$$

If (zone < 31)

$$\text{zone}_{\text{central}_{lon}} = 6 \times \text{zone} - 183$$

else

$$\text{zone}_{\text{central}_{lon}} = 3$$

$$k_0 = 0.9996$$

$$\text{arc} = \frac{\phi_d}{k_0}$$

$$\mu = \frac{\text{arc}}{a \left( 1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256} \right)}$$

$$e_i = \frac{1 - \sqrt{1 - e^2}}{1 + \sqrt{1 - e^2}}$$

$$c_a = \frac{3e_i}{2} - \frac{27e_i^3}{32}$$

$$c_b = \frac{21e_i^2}{16} - \frac{55e_i^4}{32}$$

$$c_{cc} = \frac{151e_i^3}{96}$$

$$c_d = \frac{1097e_i^4}{512}$$

$$\phi = \mu + c_a \sin 2\mu + c_b \sin 4\mu + c_{cc} \sin 6\mu + c_d \sin 8\mu$$

$$n_0 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

$$r_0 = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}}$$

$$H_2 = 500000 - E$$

$$d_{d_0} = \frac{H_2}{n_0 k_0}$$

$$t_0 = \tan^2 \phi$$

$$e_i' = \frac{e^2}{1 - e^2}$$

$$Q_0 = e_i' \cos^2 \phi$$

$$f_1 = \frac{n_0}{r_0} \tan \phi$$

$$f_2 = \frac{d_{d_0}^2}{2}$$

$$f_3 = \frac{d_{d_0}^4 (5 + 3t_0 + 10Q_0 - 4Q_0^2 - 9e_i')}{24}$$

$$f_4 = \frac{d_{d_0}^6 (61 + 90t_0 + 298Q_0 + 45t_0^2 - 252e_i' - 3Q_0^2)}{720}$$

$$\text{lof}_1 = d_{d_0}$$

$$\text{lof}_2 = \frac{d_{d_0}^3 (1 + 2t_0 + Q_0)}{6}$$

$$\text{lof}_3 = \frac{d_{d_0}^5 (5 - 2Q_0 + 28t_0 - 3Q_0^2 + 8e_i' + 24t_0^2)}{120}$$

$$H_{20} = \frac{\text{lof}_1 - \text{lof}_2 + \text{lof}_3}{\cos \phi}$$

$$D_{\text{long}_{dec}} = H_{20} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\phi = \left\{ \phi - f_1 (f_2 + f_3 + f_4) \right\} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\lambda = \text{zone}_{\text{central}_{lon}} - D_{\text{long}_{dec}}$$

**2.3 잠수함과 어뢰의 추적 회피 시뮬레이션**

전술객체의 위치 모의 및 추적의 정확도를 시뮬레이션을 통해 보이기 위해 잠수함과 어뢰의 추적-회피 게임(Pursuit-Evasion Game)을 설정하고 구현해 보았다. 잠수함이 기만기(decoy)를 가지고 있을 때에는 기만기를 발사해서 어뢰로부터의 추적을 회피하는 구동을 하게 된다. 이런 시나리오를 가지는 상황에서 추적과 회피에 관한 알고리즘을 제시하고 그때의 전술객체의 위치를 정확하게 모의하는 것이 본 실험의 목표이다.

시뮬레이션에 앞서서 몇 가지 가정을 통해 시나리오를 정리하였다.

- 최대 회전 각속도와 속력이 제한이 있을 때를 가정.
- 회피자의 회전 각속도는 추적자에 비해 크다고 가정.
- 기만기의 생존 시간이 정해져 있다고 가정.

**2.3.1 PNG(Proportional Navigation Guidance)**

잠수함과 어뢰의 추적 회피 알고리즘에서 가장 중요한 부분은 추적자(어뢰)의 유도 방식이다. 본 논문에서는 비례 항법 유도(PNG, Proportional Navigation Guidance)를 적용해서 어뢰가 잠수함을 추적하도록 하였다.

비례 항법 유도는 미사일과 표적 사이의 LOS(Line Of Sight) rate와 상호 접근 속도(closing velocity)에 비례하는 가속도를 LOS에 수직인 방향으로 미사일에 인가하여 LOS rate를 0으로 즉, LOS angle을 일정하게 유지하는 식으로 미사일을 유도한다. 여기서 LOS rate는 LOS angle λ의 단위 시간당 변화율이다. 그림 3은 비례 항법 유도,

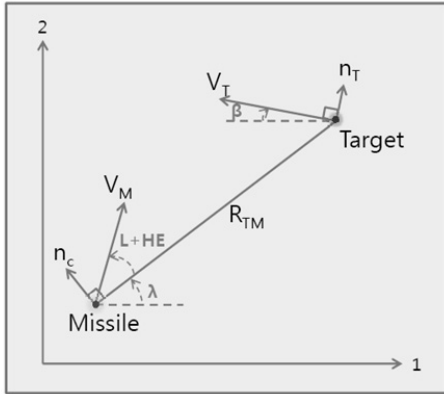


그림 3. 비례 항법 유도(PNG)

즉 PNG 유도 방법은 아래 그림과 같이 LOS에 수직한 방향으로 가속도를 인가함으로써 추적자를 유도하는 방법이다.

이 때 인가된 가속도의 크기는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$n_c = N' V_c \dot{\lambda} \quad (4)$$

where  $n_c$  : the acceleration command (in  $m/s^2$ )

$N'$  : the effective navigation ratio (unitless)

$V_c$  : missile-target closing velocity (in  $m/s$ )

$\dot{\lambda}$  : LOS rate (in  $rad/s$ )

다음의 표 4에서 비례 항법 유도에 사용되는 파라미터들과 알고리즘에 대해 설명하였다.

### 2.3.2 회피 알고리즘

잠수함과 어뢰의 추적 회피 알고리즘에서 어뢰는 PNG 알고리즘으로 잠수함을 추적한다. 잠수함에서는 어뢰의 공격으로부터 회피하려는 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 잠수함이 유한한 생존시간을 가지는 기만기를 보유하고 있다고 가정하였다. 이런 상황에서 어떻게 회피 기동을 하는지는 다음 그림 4에서 확인할 수 있다.

시나리오를 정리해보면, 우선 적군 잠수함이 아군 잠수함을 발견하면 어뢰를 발사하고 어뢰는 PNG에 따라 아군 잠수함을 추적한다. 아군 잠수함은 어뢰의 존재를 확인함과 동시에 어뢰의 진행방향에 수직인 방향으로 기만기를 발사하고 그 반대방향으로 회피기동을 한다. 이 때 기만기의 소음이 잠수함에 비해 크기 때문에 어뢰는 잠수함 대신 기만기를 추적하게 된다.

표 4. 비례 항법 유도

#### Parameters

$V_M$  : the magnitude of velocity of missile

$V_T$  : the magnitude of velocity of target

$n_c$  : the magnitude of acceleration of missile

$n_T$  : the magnitude of acceleration of target

$V_C$  : the closing velocity

$L$  : the missile lead angle

$HE$  : the heading error

$\lambda$  : the LOS angle

$R_{TM}$  : the length of LOS

#### Algorithm

(1) 초기화

$$\bar{R}_{TM} = \bar{R}_T - \bar{R}_M, \quad \bar{V}_{TM} = \bar{V}_T - \bar{V}_M$$

(2) LOS rate

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{R_{TM2}}{R_{TM1}} \right), \quad \dot{\lambda} = \frac{R_{TM1} V_{TM2} - R_{TM2} V_{TM1}}{|\bar{R}_{TM}|^2}$$

(3) Closing velocity

$$V_c = -\dot{R}_{TM} = -\frac{R_{TM1} V_{TM1} + R_{TM2} V_{TM2}}{|\bar{R}_{TM}|}$$

(4) Acceleration

$$a_{M1} = -n_c \sin \lambda$$

$$n_c = N' V_c \dot{\lambda}, \quad a_{M2} = n_c \cos \lambda$$

(5) Leading angle

$$L = \sin^{-1} \left( \frac{V_T \sin(\beta + \lambda)}{V_M} \right)$$

$$V_{M1}(0) = V_M \cos(L + HE + \lambda)$$

where  $V_{M2}(0) = V_M \sin(L + HE + \lambda)$

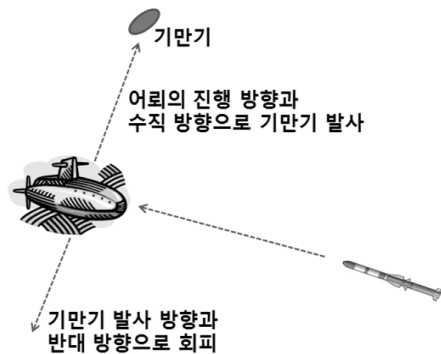


그림 4. 잠수함의 회피 기동

### 2.3.3 시뮬레이션 결과

앞서 언급한대로 본 논문에서는 기만기를 가지는 잠수함과 어뢰의 추적 회피 시뮬레이션을 통해 전술객체의 위치를 모의하였다. 추적과 회피에 관한 알고리즘들은 앞서 설명된 기법이 적용되었으며 시뮬레이션을 통해 확인할 사항은 추적이 얼마나 정확하게 이루어지는가 하는 것과 예측을 통한 회피가 잘 이루어지느냐 하는 것이다.

여기서는 기만기의 개수와 기만기의 생존 시간(lifetime)에 따른 잠수함과 어뢰의 추적 회피 시뮬레이션을 구현하였다. 즉, 어뢰가 발사되어 잠수함을 추적할 때 잠수함이 발사하는 기만기의 개수와 생존시간이 회피 성공 확률에 얼마나 영향을 주는 지를 확인하였다. 시뮬레이션을 통해 정확한 추적이 이루어진다면 전술객체의 위치 모의도 자연스럽게 같이 평가될 수 있다.

#### (1) 기만기 개수가 하나이고 수명이 무제한일 때

기만기의 개수와 생존 시간에 따른 가장 간단한 시뮬레이션 경우이다. 이때는 잠수함이 어뢰를 발견하였을 때 기만기를 어뢰의 진행방향과 수직으로 발사하고 기만기 반대방향으로 회피 기동을 하게 된다. 기만기는 생존 시간이 무제한이라고 하였기 때문에 어뢰와의 충돌이 일어나기 전에는 진행방향으로 계속 움직인다. 본 시뮬레이션의 가정으로부터 어뢰의 속도가 빠르기 때문에 어뢰는 기만기와 충돌을 하게 된다. 다음의 그림 5는 이런 결과를 잘 보여주고 있다.

#### (2) 기만기 개수가 다수이고 수명이 제한적일 때

다음으로 다수의 기만기가 사용가능하고 기만기의 생존 시간이 유한할 경우에 대한 실험 결과를 살펴보았다. 이 경우는 앞선 경우보다 현실적인 환경을 고려한 것으로 기만기의 개수와 생존 시간에 따라 어뢰의 추적 경로와 정확도가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 그림 6에서는 기만기의 개수가 2개이고 기만기의 생존시간이 임의의 시간으로 정해졌을 경우에 나타나는 추적 회피 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 어뢰는 최초 잠수함을 추적하다가 기만기가 발사되는 순간, 기만기를 추적하게 된다. 하지만 첫 번째 발사된 기만기의 생존 시간이 종료되면 두 번째 발사된 기만기를 재추적한다. 결국, 기만기를 추적하다가 잠수함과 의 거리가 멀어져서 잠수함 추적이 실패하게 되는 것을 확인할 수 있다.

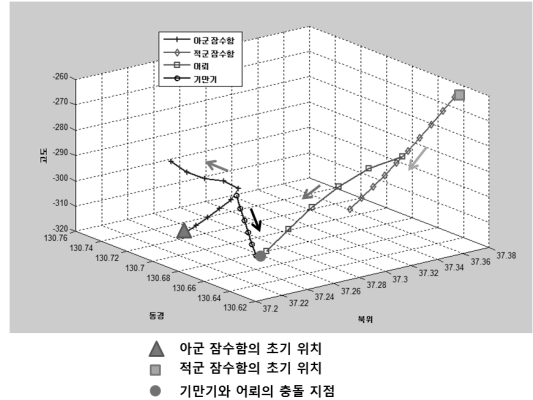


그림 5. 잠수함과 어뢰의 추적 회피 게임 (기만기 1개이고 수명이 무제한일 경우)

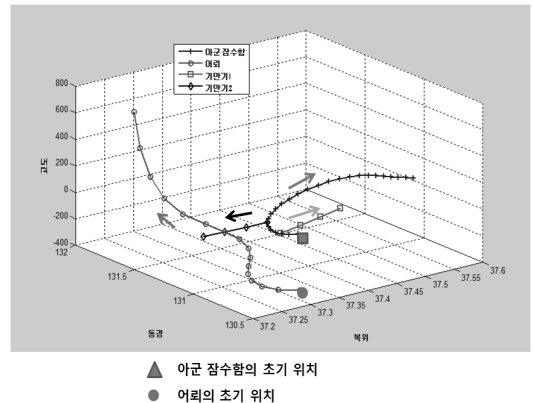


그림 6. 잠수함과 어뢰의 추적 회피 게임 (기만기 2개이고 수명이 제한적일 경우)

## 3. 결론

본 논문에서는 전술객체의 모의를 위한 데이터 융합 기법과 잠수함과 어뢰 사이의 추적 회피 시뮬레이션을 수행하였다. 데이터 융합 단계를 위해 센서에서 습득된 위치정보들 간의 여러 가지 좌표변환을 연구하고 성능을 평가하였다. 실제 지도상에서의 좌표와 측정되는 전술객체의 위치정보 사이에도 안정적인 좌표변환이 이루어지기 위해서는 기준타원체 모델에 대한 정확한 이해를 바탕으로 좌표변환을 수행해야 함을 알 수 있었다. 또한, 잠수함과 어뢰의 추적 회피 알고리즘을 적용해서 전술객체의 위치를 모의하였다. 시뮬레이션 결과 추적과 회피 알고리즘이 잘 동작함을 알 수 있었고 기만기의 개수와 생존시간의 변화에 따른 실험 결과의 영향도 확인할 수 있었다.



## 참 고 문 헌

1. D.L. Hall and S.A.H. McMullen, *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*, 2nd Edition, Artech House.
2. J.R. Rao, *Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB*, CRC Press.
3. T. Fukushima, "Fast Transform from Geocentric to Geodetic Coordinates," *Journal of Geodesy*, vol. 73, pp. 603-610, 1999.
4. R.H. Rapp, "Geometric Geodesy- Part 1, Department of Geodetic Science and Surveying", The Ohio State University, Columbus, OH, 1989.
5. J. Zhu., "Conversion of Earth-centered Earth-fixed coordinates to geodetic coordinates," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 957-961, 1994.
6. R. Burch, "A Comparison of Methods used in Rectangular to Geodetic Coordinate Transformations," *ACSM Annual Conference and Technology Exhibition*, Orlando, FL, April 21-26, 2006.
7. 최원철, 손재원, 김석권, 박동조, "지구중심 지구고정좌표계에서 측지좌표계로의 변환 오차에 대한 연구," 한국군사과학기술학회 종합학술대회 2009년 8월.
8. "공공측량성과 세계측지계 전환 기술지침서", 건설교통부 국토지리정보원, 2006년 5월.
9. "Department of Defense, World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationship with Local Geodetic Systems," TR8350.2, NIMA, Third Edition, July 1997.



**진 승 리** (seungri@kaist.ac.kr)

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

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, Communication Systems



**김 석 권** (seokkwon@kaist.ac.kr)

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

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, Communication Systems



**손 재 원** (sonjaewon@kaist.ac.kr)

2009년 부산대학교 전자전기통신공학부 학사  
2009년~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 영상처리



**박 동 조** (djpark@ee.kaist.ac.kr)

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

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, Communication Systems, 영상처리