

지형참조항법시스템의 발전 동향

본고는 국내외의 지형참조항법시스템 관련 기술의 발전 동향을 살펴보고자 한다. 지형참조항법은 국외에서 1940년대부터 그 필요성이 대두된 학문으로 잠수정, 군용 전투기 등 다양한 분야에서 주로 군사목적으로 연구가 진행되었다. 1950년 ATRAN의 개발을 시작으로 1990년대 PTAN 지형참조항법기술까지 발전되어 무인기뿐만 아닌 Tomahawk 같은 유도무기에도 그 활용 범위를 넓혀가고 있다. 하지만 하드웨어적인 제약과 GPS의 발달로 관련 연구가 주춤하였으나 컴퓨터 기술의 발달, 지형 측정센서의 정확도 향상과 더불어 GPS 교란 가능성 등이 부각되면서 최근 다시 관성항법시스템(INS)을 보조하는 대체 항법으로서 주목받고 있다. 주로 다중 측정치를 이용하는 방법과 비선형 필터를 이용하여 항법해 성능을 향상시키거나 병렬 다중필터를 이용하여 항법해의 신뢰성을 향상시키는 방향으로 연구가 진행 중이다. 그리고 다양한 지구물리데이터와 통합한 데이터 베이스기반 복합항법 기술로 발전하고 있다.

■ 유영민, 유명종, 박찬국*
(서울대학교)

I. 서론

유도미사일, 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle), 무인 잠수정(AUV, Autonomous Unmanned Vehicle)과 같이 자율적으로 임무를 수행하는 시스템은 정확한 항법시스템이 필수적이다. 따라서 항체의 항법성능을 향상시키고 더욱 신뢰도 높은 항법해를 제공하기 위한 다양한 기법이 그 동안 제시되어 왔다. 항법은 기준좌표계에 대하여 항체의 위치, 속도, 자세 등을 결정하는 것을 의미하며, 대부분의 항법시스템은 추측항법(dead reckoning)방식과 위치결정(position fixing)방식을 기반으로 한다 [1]. 추측항법 방식에서 대표적인 INS (Inertial Navigation System)는 외부 장치의 도움 없이 독립적 운용이 가능하지만 오차가 누적되는 단점이 존재하는 반면, GPS (Global Positioning System)와 같이 전파를 이용한 위치결정 방식은 오차가 누적되지 않는 장점이 있으나 항법해 갱신률이 추측항법에 비해 낮으며 독립적으로 운용되지 못한다. 이러한 상호보완적인 관계를 이용하여 그동안 두 방식을 결합한 INS/GPS 결합항법시스템이 사용되어 왔다.

최근들어 GPS와 같은 전파항법시스템이 적의 의도적인 간섭

이나 전파 교란에 의해 그 역할을 하지 못하거나, GPS 신호를 수신할 수 없는 환경에서 사용가능한 대체 항법시스템이 주목받고 있다. 이 가운데 지형참조항법(TRN, Terrain Referenced Navigation) 시스템이 GPS를 대체하는 항법 기술로 주목받고 있다. 사실 TRN 기술은 순항 미사일, 군용 전투기, 잠수정, 미지의 환경에서의 무인항공기 운용 등 주로 군사목적으로 1940년대부터 특히 70~80년대에 대부분의 선진국에서 이미 많은 연구가 이루어졌다. 하지만 하드웨어와 센서 정확도의 한계, GPS의 발달로 관심이 줄어들다가 최근 다시 관련 하드웨어와 센서의 발달로 GPS를 대체하는 위치결정 방식으로 주목받고 있다. 특히 지형고도 정보를 이용한 지형 충돌 예측 시스템(PGCAS, Predictive Ground Collision Avoidance System)은 항체의 생존성을 높일 수 있기 때문에, TRN 기술은 새로운 전환점을 맞이하고 있다[2].

TRN은 위치결정방식의 한 종류로 항체가 위치한 곳에서 지형 고도값을 측정하여 기 구축된 데이터베이스(DB, Data Base)로부터 추출한 지형 고도값과 비교하여 위치를 추정하는 방식이다. TRN은 때 때로 TAN(Terrain Aided Navigation), TAINS (Terrain Aided INS), TCN (Terrain Contour Navigation),

TCM (Terrain Contour Matching) 등으로 불리고, 우리나라 말로 지형등고선대조항법, 지형대조항법 등으로 불리기도 한다. TAN, TAINS는 지형참조항법을 GPS와 같이 INS를 보조하는 항법수단의 관점에서 주로 언급하였고, TRN, TCN, TCM은 지형의 특징을 정합하는 관점에서 주로 언급하였지만, 최근에는 지형을 이용한 항법 기술의 이름을 TRN으로 통칭하는 경향이 있다.

TRN은 기압고도계로 측정된 항체의 고도에서 레이더고도계 등으로 측정된 지상 고도를 뺀 값, 즉, 측정된 지형 고도값을 추측항법 방식으로 획득한 위치 주변의 디지털 지형 고도 데이터(DTED, Digital Terrain Elevation Data)와 비교하여 항체의 위치해를 제공하는 시스템이기 때문에, INS와 같은 추측항법 장치를 기본으로 탑재해야 한다. 수중에서는 육상에서와 달리 수심 지형 지도를 만들고 그 DB로부터 얻어지는 예상 해저(seafloor)로부터의 고도값과 음파센서(sonar beam, sonar sensor)를 통해 측정되는 해저로부터의 고도값을 비교하는 방식으로 육상의 경우와 DB 및 측정센서만 다르고 사용되는 알고리즘은 유사하다.

TRN 시스템의 핵심은 그림 1처럼 지형고도 DB, 지형고도 측정센서, TRN 알고리즘이다[3]. DB의 해상도와 정확도, 측정센서의 정확도 등은 TRN의 항법해 성능과 직접적으로 관련되며 TRN 알고리즘은 향상된 정확도와 신뢰도 높은 항법해를 제공하는 방향으로 연구되어 왔다. 최근에는 고성능 컴퓨터와 대용량 저장공간, 밀리-라디안(milli-radian) 단위의 빔폭과 다중 빔을 갖는 레이저 센서와 1m 해상도의 디지털 지도 획득이 가능하며, 이전 TRN 기술의 한계를 벗어날 수 있는 가능성을 보이고 있다[2].

본 고에서는 TRN의 중요 기술들을 살펴보고 선진국을 중심으로 상용화된 TRN 시스템들과 기술 현황을 공개된 문헌을 바탕으로 살펴본 후, 수행 중인 몇 가지 최근 연구 동향과 추후 연구되어야 할 분야에 대하여 간략히 언급하고자 한다.

II. TRN 시스템 중요 기술

1. 지형고도 DB 모델링

지형고도 DB의 공간 해상도(spatial resolution)와 정확도는 항법성능과 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 해상도가 높을수록 항법해의 오차는 줄어든다. 하지만 초기의 TRN 시스템은 DB 저장공간의 한계 때문에 항체에 탑재할 수 있는 지형고도 DB를 임무 경로 중 특정 지역에 한정하였고, 특징점 정합 기법을

사용하는 TRN의 경우 해상도가 증가하면 요구되는 계산량과 저장공간이 기하급수적으로 증가하기 때문에, 해상도 또한 수백 미터 수준이었다. 따라서 TRN으로 GPS를 대체할 수준의 정확한 항법해를 얻을 수 없었다. 그러나 고성능 CPU와 대용량 메모리 사용이 가능해지면서 기존에 개발된 TRN 시스템에도 고해상도의 DB를 탑재하여 성능을 지속적으로 개선시키고 있다[2].

지형고도 DB의 형태는 DTED와 같이 격자형태의 디지털화된 자료가 될 수도 있고, 방사기저함수 또는 푸리에급수를 통하여 구면조화함수나 평면조화함수 모델로 표현되는 해석적 형태가 될 수 있다. 격자형태의 지형고도 DB는 DB의 시작과 끝 지점을 알고 있다면 일정한 위도, 경도의 간격으로 고도값만을 디지털화하기 때문에 이용하기 쉽고 위치정보없이 원하는 정확도로 고도 데이터만을 저장하면 된다. 하지만 정확도와 공간 해상도가 높아질수록 기하급수적으로 많은 저장공간을 필요로 하는 단점이 있다. 표 2는 DTED 공간 해상도 레벨에 따라 요구되는 저장공간을 나타낸다[4]. 따라서 격자형태로 디지털화된 지형 DB를 TRN에 활용하기 위해서는 정확도 분석 및 해상도 재조정 기법 등에 대한 기술이 중요하다. 만약 디지털화된 지형 DB의 해상도가 낮으면 INS로 추정된 항체의 위치에서 지형 고도값을 근처 격자점의 DB로부터 추정해야 한다. 이와 관련된 기술은 영상처리 분야 등에서 해상도를 재조정하는 알고리즘과 유사하기 때문에 많은 연구가 되어 왔으며 일반적으로 2중 선형보간법(bilinear interpolation) 등의 내삽기법을 이용하고 있다[5]. 현재 국외의 NASA, USGS 등에서 이미 지구 전체를 대상으로 한 지형고도 DB(DTED)화 작업이 진행 중에 있다. 이 중 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)은 대표적인 지형고도 DB 중 하나로 국내에서도 제한된 해상도로 사용이 가능하다[6].

이와 달리 해석적 형태의 DB는 고른 분포 및 정밀도를 가지는 지형 고도값을 이용하여 선택한 기저함수를 표현하는 계수를 추정하는 방법으로 지형고도 DB를 수학적으로 모델링한 것이다. 모델링을 통하여 계수가 결정되면 어느 위치에서라도 지형 고도값을 해석적으로 계산할 수 있다. 이때 항체는 계수값만을 메모리에 저장하면 되기 때문에 격자형태의 DB보다 용량면에서 유리할 수 있을 뿐만 아니라 모든 위치에서의 고도값 뿐만 아니라 고도값의 편미분을 해석적으로 계산할 수 있다. 이는 필터 기반의 TRN 알고리즘에서 유용하게 사용될 수 있다[7]. 평면 푸리에급수 기반의 모델링에 비하여 방사기저함수를 이용하는 방법이 고주파 성분의 표현 및 지역적인 고도 자료 추가에 따른

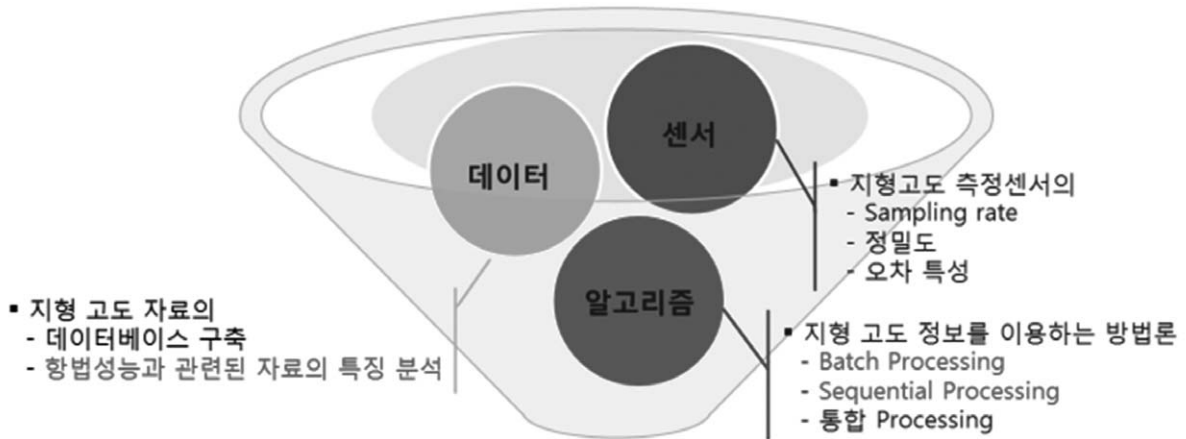


그림 1. TRN의 중요 기술 3요소.

표 1. DTED 레벨에 따른 요구 저장공간.

	Area (km ²)	DTED 1 (3arcsec)	DTED 2 (1arcsec)	DTED 3 (0.3arcsec)	DTED 4 (0.1arcsec)
영국	244,820	58MB	525MB	5GB	43GB
미국	9,826,630	2,342MB	21,081MB	190GB	1,708GB

모델의 갱신 등에 효율적이라는 장점이 있으나, 질점의 수와 배치, 깊이에 따라 모델링 결과가 민감하게 나타난다는 단점이 있다[3,8].

2. 지형고도 측정센서 및 하드웨어

지형고도 DB를 구축하기 위하여 지형이나 수심을 측정하는 방법은 육상일 경우 사람이 직접 휴대용 장비로 측정하거나 해상일 경우 선박에서 음향측심기를 이용하는 방법이 있다. 하지만 사람의 접근이 불가능하거나, 수심이 깊은 지역에서는 위성에서 측정한 중력장을 이용하여 지형고도나 수심을 예측하는 방식을 사용한다[9].

DB를 구축하는 것이 목적이 아니고, 운항중인 항체에서 실시간으로 지형고도를 측정하기 위해서는 그림 2에서처럼 두 가지 종류의 고도 센서가 필요하다. 기압고도계는 평균 해수면으로부터 항체까지의 높이를 측정하기 위한 센서로 주변 공기의 압력을 측정한 후 기준 대기 모델을 적용하여 환산하는 방법을 이용하고 약 5~10m의 정확도를 갖는 것으로 알려져 있다. 가장 대표적인 모델은 Kollsman사의 AAU-31/A 또는 AAU-34/A 모델로 약 6m의 정확도를 나타낸다[3]. TRN의 항법성능에 가장 큰 영향을 미치는 센서는 지형과 항체까지의 고도를 측정하는 고도계이다. 이때 사용되는 레이더 또는 전파고도계는 기압고도계에 비하여 상대적으로 높은 정밀도를 갖는 것으로 알려져 있다.

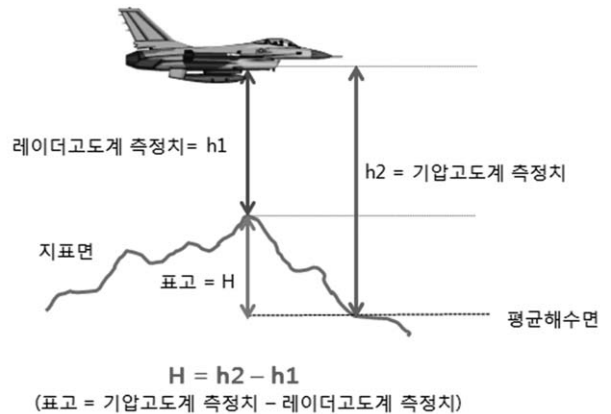


그림 2. 고도계로부터 지형고도 측정.

지형과 항체까지의 고도는 레이더고도계로부터 항체의 아래 방향으로 전파신호를 발신한 후 수신되는 시간을 환산하여 결정된다. 일반적으로 발신되는 레이더 빔의 폭이 넓기 때문에 고도가 높아짐에 따라 지상에서의 전파 도달 영역이 넓고 영역 내의 지형이 많은 변화를 나타내므로 고도와 자세, 항체 하부의 건물이나 숲의 형태에 따라 오차가 커진다는 특징이 있다. 최근에는 SAR (Synthetic Aperture Radar), ALS (Airborne Laser Scanners) 등의 고성능 센서가 개발되었다. 현재까지는 가격이 비싼 단점이 있지만 가까운 미래에 대중화될 것으로 생각된다[2].

앞서 언급한 것처럼 수심 TRN은 지상 TRN과 측정센서가 다르다. 이때 사용되는 센서에는 음향측심기, 압력심도계가 있다. 그림 3과 같이 음향측심기는 음파(sonar)를 해저로 쏘아 반사되는 시간을 계산하여 수심을 측정하는 센서로 잠수정과 해저지형과의 거리를 측정하고, 압력심도계는 해수면(MSL, Mean Sea Level)으로부터 잠수정의 심도를 측정한다. 즉, 음향측심기와 압력심도계는 각각 레이더고도계와 기압고도계와 같은 역할을

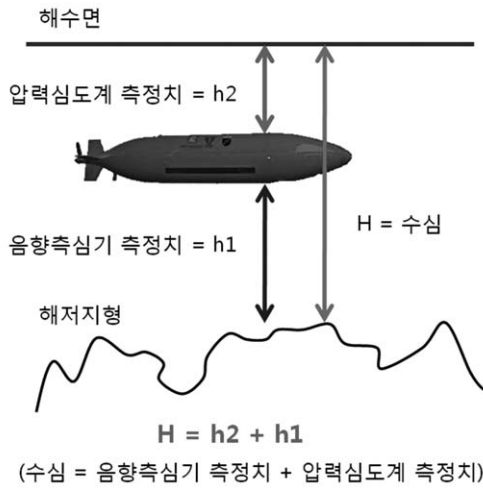


그림 3. 음향측심기 압력심도계를 이용한 수심 측정.

한다[9]. 음향측심기는 음파 발생 방식에 따라 단일빔(single beam)과 멀티빔(multi beam)으로 구분되는데, 이 점이 현재까지 상용화된 지상 TRN과 다른 점으로 멀티빔을 이용하게 되면 측정시마다 잠수정 하부 영역의 데이터를 측정할 수 있기 때문에 영역기반의 상관관계 기법을 적용할 수 있다[10]. 음향측심기는 천해용(심도 0~200m)과 심해용(200m~)으로 심도에 따라 구분된다. 천해용 멀티빔에는 노르웨이 Kongsberg 사의 EM 시리즈(EM-300, EM-3000 등)가 대표적으로 활용되며, 심해용 멀티빔 센서에는 미국 Reson 사의 SeaBat-7125를 많이 이용한다. 압력심도계 센서에는 Paroscientific Inc.의 8000 시리즈 모델을 많이 활용하며, 오차는 약 0.01% 정도로 알려져 있다[3].

3. TRN 알고리즘

측정된 지형 고도값과 DB로부터 추정된 고도값을 비교하여 항법해를 계산할 때 비교하는 방식에 따라 다양한 TRN 기법이 존재한다. 우선 비교하는 알고리즘에 따라 상관관계 기법과 상태변수 추정 필터를 이용한 기법 등으로 나눌 수 있다. 이때 상관관계 기법은 측정된 지형 고도값과 DB로부터 예상 위치에서의 고도값을 추출하여 상관관계를 분석하여 항체의 위치만 갱신하는 것이고, 상태변수 추정 필터를 이용한 기법은 측정된 지형 고도값과 DB로부터 추정된 고도값의 차이를 측정치로 이용하여 항체의 위치, 속도 또는 INS 바이어스 오차 등의 상태변수를 추정하는 기법이다. 이때 확장 칼만 필터(EKF, Extended Kalman Filter)를 사용하는 것이 일반적이며 다양한 비선형 필터링 기법을 적용하는 연구도 활발히 수행되고 있다. 또한 최근에는 상관관계 기법과 필터를 이용한 기법을 혼합하여 사용하기

도 한다. 다음으로 측정치 누적 사용 여부에 따라 일괄처리(batch processing)방식과 순차처리(sequential processing)방식으로 나뉜다[1]. 일괄처리방식은 일정시간 동안 측정된 지형 고도값을 모은 후 상관관계 기법 등을 이용하여 특정 주기마다 비교하여 항법해를 갱신하는 방식이다. 반면에 순차처리방식은 지형 고도값을 측정할 때마다 비교하는 방식으로 주로 필터를 이용하여 연속적인 항법해를 제공한다. 하지만 1회 측정시에도 항체를 기준으로 다중의 지형 고도값을 측정할 수 있기 때문에 순차처리방식에서도 상관관계 기법을 적용할 수 있다. 또한 최근에는 이러한 구분의 제약없이 이 두 방식을 다양하게 혼합하는 하이브리드(hybrid) 방식이 연구되고 있다.

일반적으로 TRN은 두 가지 모드로 운용된다. 하나는 초기화(acquisition) 모드이고 다른 하나는 추적(tracking) 모드이다. 초기화 모드는 현재 비행체의 초기 위치를 추정하는 모드로 GPS 위치 정보를 사용하여 초기치를 구하고 바로 추적모드로 전환할 수 있지만, GPS 재밍(jamming) 등의 상황에서도 일정 시간동안 비행하면서 지형 고도값을 샘플링하여 지형 DB와 비교를 통해 GPS 정보없이도 일정수준의 INS 초기치를 제공하는 것을 목적으로 한다. 따라서 초기화 모드에서는 센서 측정치를 일정 시간 동안 모아서 처리하는 일괄처리방식이나 초기치를 여러 곳으로 가정한 MMAE 필터 뱅크(bank)와 같은 병렬필터를 주로 사용한다. 한편, 추적 모드는 상태변수 추정 필터 등을 이용하여 지형고도 측정치가 입력될 때마다 항체의 위치를 추정할 수 있다. 일반적으로 측정된 지형 고도값은 DB로 추출한 고도값과 차이가 있고, 이 값의 차이는 수평, 수직 방향 위치 오차로 유도되는 것으로 수평, 수직 방향의 위치를 보정함으로써 더욱 정확한 위치를 추정할 수 있다. TRN에 사용되는 대표 알고리즘으로는 확장형 칼만 필터(EKF, Extended Kalman Filter), 베이저안 추정 기법(Bayesian Estimation)에 기반한 점 질량 필터(PMF, Point Mass Filter), 파티클 필터(PF, Particle Filter) 등이 있다. 각각의 필터는 서로 장단점을 가지고 있으며 임무 상황에 따라 필터를 선택하고 적용하면 된다. 과거에는 CPU 성능의 한계로 적은 계산으로도 실시간으로 위치를 추정할 수 있는 EKF가 주로 사용되었다. 하지만 근래에는 CPU의 발전과 함께 계산량이 많지만 비선형, 비 정규분포 모델에 적합한 비선형 필터의 적용이 이루어지는 추세이다. 이 외에 미로(lost) 모드라고 하여 초기화 모드와 추적 모드가 아닌 경우로 INS 단독으로 운항하는 모드도 존재한다. 이 경우 조종사가 현재 위치를 대강 알고 있는 경우 수동으로 위치를 입력하여 다시 초기화 모드로 진입할 수 있다[11].

Ⅲ. TRN 시스템의 기술 현황

1. 국외 기술 현황

TRN 시스템은 초기에 개발된 시스템을 꾸준히 개량하여 그 성능을 향상시켜 오고 있으며, 탑재하는 무기체계나 센서, 지형 DB 해상도에 따라 같은 시스템이라도 구현방법이나 알고리즘 특성이 약간씩 다른 변종 시스템이 많다고 알려져 있다. 본 절에서는 그 중에서 대표적으로 상용화된 TRN 시스템의 간략한 특징과 성능, 그리고 탑재된 무기 체계에 대하여 언급하고자 한다.

TRN 시스템 중에서 최초로 자동화된 TRN 시스템은 ATRAN (Automatic Terrain Recognition And Navigation)으로 1947년 Wright Air Development Center의 후원으로 Goodyear Aerospace Corporation에 의해 연구되었다. 군용에서 AN/DPQ-4라는 이름으로 불리었으며 1950년대와 1960년대에 걸쳐 TM-61B MATADOR와 그 후속 모델, 그리고 TM-76A MACE 라는 미사일에 사용되었다. ATRAN은 X-밴드 단펄스 비 코히어런트 스캐닝 레이더(X-band short-pulsed non-coherent scanning radar) 센서를 사용하여 레이더 이미지를 얻었고 35mm 필름에 저장된 기준 지형 영상과 비교해 항법 정보를 보정하였다. Army Map Service에 의해 250,000:1의 3차원 레이더 지형도가 제작되면서 ATRAN은 약 305m의 항법 정확도를 가지게 되었다[12].

TRN 중에서 가장 잘 알려진 TERCOM (TERrain COntour Matching)은 1960년대부터 미국에서 순항 미사일의 INS를 보정하기 위한 유도시스템으로 개발되었다. TERCOM은 ATRAN과 달리 항체에 저장된 디지털 지형도와 비행 중 얻어진 지형 고도 측정치를 일정량 수집한 프로파일(profile)을 비교하여 위치를 추정하는 시스템이다. TERCOM은 데이터를 일정량 모아서 한꺼번에 처리하는 방식인 일괄처리방식 TRN으로 항공기의 위치를 추정하기 위해 데이터를 수집하기 위한 시간이 필요하게 되며 얼마간의 시간 간격을 두고 위치 추정값을 갱신한다. 그리고 이 시간 동안 항체의 속도와 자세변화가 없다고 가정한다. 이 시스템에서 지형 고도 측정치는 기압고도계로 측정된 항공기의 절대고도와 레이더고도계에서 얻어진 고도의 차를 이용하였다. TERCOM 시스템의 개략도는 그림 4과 같다[13]. 최적의 추정값을 찾기 위해 TERCOM은 상관관계 기법으로 MAD (Mean Absolute Difference) 방식 또는 MSD (Mean Squared Difference) 방식을 사용하는데, 비행하는 지형의 특징에 따라 다르지만, 약 3~6km 정도 비행을 하면서 모아진 데이터를 사용해 추정을 하게 된다[14].

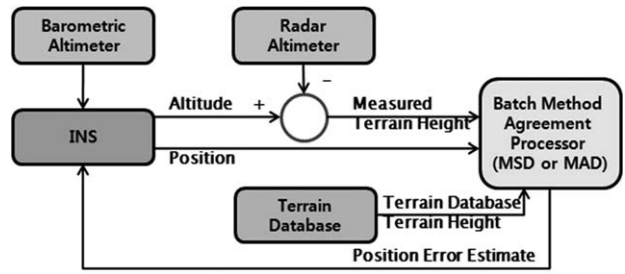


그림 4. TERCOM 시스템 블록도.

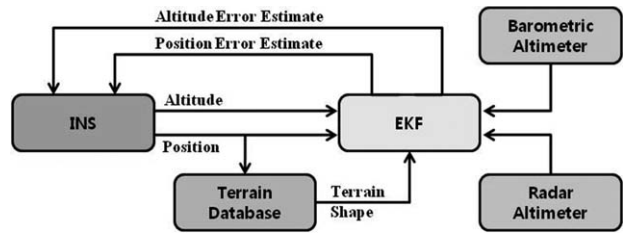


그림 5. SITAN 시스템 블록도.

Block II TLAM (Tomahawk Land Attack Missile)과 같은 순항 미사일에 TERCOM이 사용되었으며, 약 30.5m의 CEP (Circular Error Probability)를 가지는 성능을 보였다[15]. 이후 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 지도의 구축과 디지털 영상처리 기술의 개발로 TERCOM 시스템의 성능은 지속적으로 향상되어 TLAM-C 순항 미사일의 경우는 종말유도단계에서 TERCOM과 DSMAC (Digital Scene-Mapping Area Correlator)를 결합하여 10m CEP의 정확도를 보였다[16]. 최근 2007년 까지도 TERCOM은 고해상도의 지형 DB와 더 강건한 상관관계 기법을 구현하여 Tomahawk 미사일에 적용한 것으로 알려져 있다[17].

SITAN (Sandia Inertial Terrain Aided Navigation)은 1970년대에 Sandia 연구실에서 개발되었으며 TERCOM과 비슷한 방식을 채택하고 있다. 하지만 TERCOM과 다르게 지형 데이터를 처리하는 방식에서 차이를 보이고 있는데 TERCOM의 경우 일정량의 데이터를 모아서 한꺼번에 처리하는 방식을 취하고 있는 반면, SITAN은 연속적으로 얻어진 지형 데이터를 그 즉시 처리하는 방식을 취하고 있다. 이러한 방식을 순차처리라 하며 SITAN의 경우 EKF에 의해 구현되었다[18,19]. 이때 필터의 측정치로 레이더고도계와 기압고도계에서 얻어진 고도 차이, 즉 지형고도 측정치와 항체에서 추정된 위치의 지형 DB에서 얻어진 고도값 차이를 사용한다. 그리고 측정행렬은 INS의 위치오차와 측정치간의 선형화 관계를 이용하여 항체의 추정위치에서 지형의 경위도 방향으로의 기울기로 구성된다. SITAN 시스템의 블록도는 그림 5와 같다[17].

1977년에 시뮬레이션을 통해 SITAN 시스템의 정확도가 19m CEP를 가진다고 입증되었으며, 1986년부터 1987년에 걸쳐 AFTI (Advanced Fighter Technology Integration)/SITAN이라는 시스템으로 개량되어 F-16에 장착된 후 비행시험을 통해 75m CEP의 정확도를 가진다는 것이 확인 되었다[20]. SITAN은 INS 위치에서 주위의 지형을 선형화하기 때문에 초기 가정된 위치에 큰 오차가 포함되어 있을 경우 잘못된 지형 기울기 추정으로 인해 알고리즘이 발산하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 몇 가지 방법이 적용되었는데[11,19,21], 대표적인 방법이 모드를 나눠서 수행하는 방법이다. 즉 비행 초기에는 초기화 모드로 운용하고 어느정도 수렴하면 추적 모드로 운용한다. 초기화 모드에서 사용되는 대표 방식은 초기 가정된 위치의 주위에 칼만필터 뱅크를 구성함으로써 초기 가정된 위치가 큰 오차를 포함하더라도 주위의 칼만필터 뱅크를 통해 그 오차에 의한 알고리즘 발산을 막는 것이다[11]. 그 밖에 SITAN은 헬리콥터에 적용하기 위해 HELI (Helicopter)/SITAN이라는 이름으로도 개량되었으며 실제 비행시험을 통해 그 성능이 입증 되었다[22].

SPARTAN (StockPot Algorithm Robust Terrain Aided Navigation)은 1985년 영국의 GEC Avionics에 의해서 개발되었다. 이 시스템은 앞서 소개한 SITAN과 유사하지만 Bayesian 추정 방식에 의해 항공기 위치를 추정한다는 다른 점이 있다. 또한 의사일괄처리(pseudo-batch processing)이라는 방식을 채택하여 다른 시스템들 보다 적은 양의 데이터를 수집해서 추정값을 계산한다. TERCOM에서는 수집된 지형 데이터를 MAD나 MSD 방법을 이용하여 최적의 추정값을 산출해 내는 반면에 SPARTAN의 경우는 확률 분포함수를 통해 최적의 추정값을 산출한다[23]. SPARTAN의 경우 지형 데이터의 선형화를 거치지 않기 때문에 초기에 가정된 항체의 위치가 큰 오차를 포함하고 있는 경우에도 적절한 추정을 할 수 있는 것으로 알려져 있다[24]. 알고리즘을 더욱 개량한 후 AFTI/F16을 이용한 비행시험도 성공적이었고, 영국의 Tomado 항공기에 장착되기로 하였지만, SPARTAN을 개발한 GEC Avionics가 BAE system에 합병되면서 상용화 되지는 않았고 추후 TERPROM (TERrain PROFILE Matching) 개발에 적용되었다[2].

TERPROM은 BAE system에 의해 개발되었고 2009년 당시에 전세계 5000대 이상의 항공기에 장착된 만큼 가장 많은 항공기에서 사용되고 있다. A-10, C-130, C-17, Eurofighter Typhoon, F-16, Harrier, Jaguar, Mirage 2000, Tornado 등에 사용되었으며, 헬리콥터의 경우 SH-60B에 장착하여 비행시험을 하였다. TERPROM은 전술급 INS와 DTED 레벨 2의 DB를 탑재하고 있고, 표준편

차 10~25m의 수평위치 정확도를 가지는 것으로 알려져 있으며 탑재된 항공기 종류에 따라 여러 가지 개량된 시스템이 개발되었다[4]. 하지만 군에서 사용되는 목적으로 개발되어 알고리즘에 관한 자세한 사항이 공개되어있지 않은 실정이다. 다만 TERPROM은 두 개의 모드를 가지고 있는 것으로 알려져 있다[25]. 그 중 한 모드는 batch 모드이다. Batch 모드에서 TERCOM은 지형 데이터를 수집하여 초기 가정위치를 계산한다. 다른 한 모드는 single-shot 모드이다. 이 모드에서는 SITAN과 같이 칼만 필터를 이용하여 지형 데이터를 선형화하고 항체의 위치를 추정하게 된다. TERPROM은 INS와 지형 DB 오차를 모두 보정할 수 있기 때문에, 좀 더 정확하고 의미있는 레이더고도계 정보가 없거나 평지 위를 비행하더라도 수분간 정확한 항법해를 제공한다고 알려져 있다. TERPROM은 최근까지 성능을 개량해오고 있으며, TRN 기능 뿐만 아니라, PGCAS, ATAC (Advanced Terrain Avoidance Cueing), OWWC (Obstruction & Wires Warning and Cueing), Air to Ground Ranging, TAD (Terrain Awareness Display) 기능을 가진다고 알려져 있다[4].

PTAN (Precision Terrain Aided Navigation)은 Honeywell에 의해 개발 되었으며 C 밴드의 레이더고도계에 기반한 TRN시스템이다. PTAN은 DTED 레벨 4의 DB를 탑재하고 있으며, 정확도는 항체의 고도가 5,000ft 이하일 경우 3m CEP이며 30,000ft 이하일 경우 30m CEP 이다[26]. 이러한 성능은 SAR 고도계를 사용함으로써 얻어진 것으로 알려져 있다[27]. PTAN은 Tomahawk 순항 미사일에 적용되었으며 지상충돌예측 시스템인 EGPWS (Enhanced Ground Proximity Warning System)과 GCAS (Ground Collision Avoidance System), FLOD (Forward Looking Obstacle Detection)에 사용되었다. 마지막으로 지금까지 언급한 TRN 시스템을 표 2에 요약하였다[28].

수십 TRN은 1990년대 초부터 선진국에서 본격적인 연구가 시작되었다 [29]. 트랜스폰더(transponder)와 INS를 이용한 항법의 정밀성으로 인해 TRN의 필요성이 늦게 대두되었으나 현재는 AUV의 항법 알고리즘으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 실제로 노르웨이 국방 연구소(FFI, Norwegian Defence Research Establishment)는 1997년에 TRN 기술 중 하나인 SITAN 알고리즘을 잠수정에 맞게 적용하여 수십 TRN을 개발하였다. 또한 2001년에는 도플러 속도 센서(DVL, Doppler Velocity Log system)를 추가하여 TRIN (Terrain Referenced Integrated Navigation) 알고리즘을 개발한 후, NATO의 무인잠수정 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다. 그리고 실시간 잠수정 위치 추정을 위하여 그림 5와 같은 TenP 알고리즘(Terrain Navigation Processor)을 설계하여

표 2. TRN 시스템 현황 요약표.

TAN System	Terrain Sensor	Period of Use	Application	Accuracy (CEP)
ATRAN	X-Band Short-Pulsed scanning radar	1950's ~ 1960's	MACE Cruise missile	305m
TERCOM	C-Band Downward looking radar altimeter	1970's ~ Present	Tomahawk cruise missile	30.5m
SITAN	C-Band Downward looking radar altimeter	1970's ~ 1980's	Prototype trials on aircraft	19 ~75m
SPARTAN	C-Band Downward looking radar altimeter	1980's	Prototype trials on aircraft	Unpublished
TERPROM	C-Band Downward looking radar altimeter	1980's ~ Present	Aircraft and cruise missile	10~25m
PTAN	Interferometric C-Band Downward looking radar altimeter	1990's - Present	Tomahawk Cruise missile	3m or 30m CEP

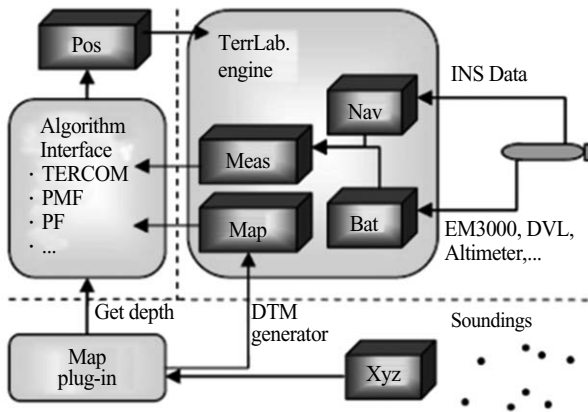


그림 6. TeerP 블록도.



그림 7. HUGIN AUV.

그림 7과 같이 노르웨이가 보유한 무인 잠수정(HUGIN)의 항법 시스템에 적용하였다[30,31,32]. 스웨덴에서도 멀티빔 음향측심기(multi-beam echo-sounder)를 탑재한 자국의 AUV62F 잠수정을 이용하여 수심 TRN을 수행한 바 있다[33].

2. 국내 기술 현황

국내에서도 2000년대 후반부터 서울대학교, 서울시립대학교, 한국과학기술원 등에서 국방과학연구소 등과 함께 기초연구 수준으로 앞서 제시한 국외의 TRN 관련 알고리즘을 구현하고 성능을 분석한 연구사례가 존재한다[3,8,34,35,36,37,38,39].

한편, 국토지리정보원에서는 등고선 등 국내 수치지도(digital map)를 지속적으로 제작하고 있으며 현재 2.0 버전까지 제작되었다[6]. 또한 서울시립대학교에서는 우리나라 지형 DB 뿐만 아니라 중력이상, 중력구배 DB 등도 모델링화하는 작업을 수행하고 있다[8]. 서울대학교와 한국과학기술원 등에서는 기존 SITAN 알고리즘이 갖는 단점을 보완하기 위하여 TRN에 적합한 비선형 필터링 기법을 개발하고 있으며[38], 지형 데이터뿐만 아니라 다른 지구물리 데이터를 항법에 적용하고자 하는 연구를 활발히 수행 중이다[40].

수심 TRN 기술 또한 국내에서는 아직 연구 결과가 미비한 실정이다. 무인 잠수정 기술은 1993년에 대우조선이 러시아의 IMTP로부터 6,000m급 AUV 기술을 도입하는 등 AUV 개발에 필요한 요소기술을 확보하였으나, 수심 TRN이 아닌 관성항법 장치, 도플러 센서 등을 활용한 추측 항법 알고리즘을 위치 추정에 사용하였다. 한편, 국내 해저지형 DB (bathymetric chart)는 국립해양조사원에서 해도(nautical chart)의 일종으로 구분되는 특수도(miscellaneous chart)의 일환으로 제작되고 있으며, 수심 TRN은 기존 육상에서의 TRN 알고리즘과 큰 차이점이 없으므로 관련 알고리즘 연구는 진행 중이라고 생각할 수 있다.

IV. TRN 시스템의 연구 동향

1. 유사성 판별 알고리즘의 성능 향상

측정된 지형 고도값과 DB로 추출한 고도값의 상관성을 분석하는 TERCOM과 같은 일괄처리방식의 TRN에서 주로 사용되는 유사성 판별 알고리즘으로는 MAD와 MSD가 있다. 두 알고리즘의 차이는 명칭에 잘 나타나있듯이 MAD는 측정 프로파일의 각 측정치와 후보 프로파일 각각의 지형 고도값의 차이에 절대값을 취한 후 평균값을 구하는 것이고, MSD는 차이 값에 제곱을 취한 후 평균값을 구한다. 그림 8에서처럼 항체가 실제 운

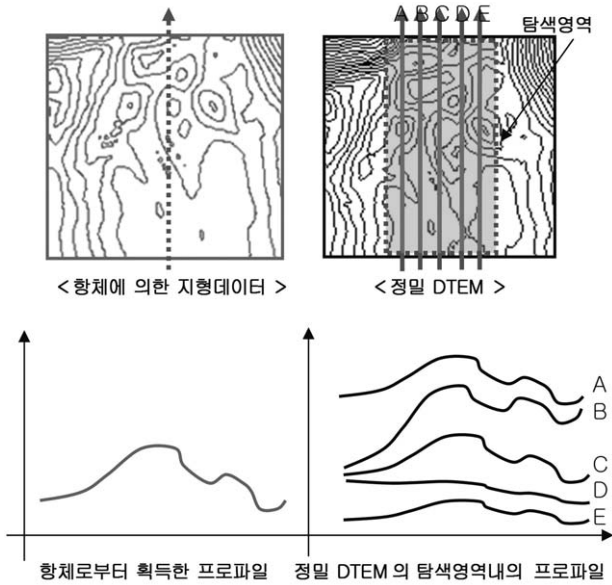


그림 8. 유사성 분석 방법.

향하는 궤적에서 측정된 지형고도 샘플들을 위치해 갱신간격에 해당하는 시간 동안 저장한 후, 향체에 탑재된 DB로부터 A, B, C, D, E의 등고선 샘플을 추출하여 유사성 판별 알고리즘으로 가장 작은 MAD 또는 MSD 값을 갖는 프로파일을 선택하여 해당 위치로 향체의 위치를 보정하는 방법이다. 이때 다수의 후보 프로파일에 대하여 유사성을 확인하는 절차가 필요하기 때문에 초기에는 연산량을 고려하여 MAD, MSD와 같은 간단한 판별 알고리즘을 적용하여 왔으나, 유사 프로파일이 많을 경우 잘못된 프로파일로 정합하는 오보정의 단점이 있었다. 따라서 최근에는 CPU의 성능향상과 더불어 영상처리 분야에서 두 영상을 정합할 때 사용되는 복잡한 알고리즘[41]이나 후보프로파일의 통계적 분석[36] 등을 적용하여 오보정을 방지하는 알고리즘이 연구되고 있다. 또한 고도계를 이용하여 지형고도를 측정할 때 발생하게 되는 센서오차에 의한 영향 중에서 레이더고도계의 환산계수 오차에 의한 영향을 줄이기 위하여 지형고도 샘플들이 아닌 이웃한 지형고도 샘플의 기울기 값을 MAD 알고리즘에 적용하여 레이더고도계 환산계수 오차에 의한 영향을 감소시킬 수 있는 알고리즘 연구[34]와 고도계 바이어스 오차에 의한 영향을 줄이기 위해 프로파일들의 평균 고도를 뺀 값을 비교하는 알고리즘 등이 제시되고 있다[42].

2. 지형의 특징 정량화 및 사전 경로 계획

유사성 판별 알고리즘에서도 알 수 있듯이 유사한 지형이 반복되는 경우 측정된 지형 고도값과 DB로 추출한 고도값의 유

사성을 판별하여 특정 프로파일을 선택할 때 오보정의 가능성이 높아지면서 향체가 발산할 가능성이 높아진다. 이는 상관분석 기법을 적용하는 TRN 뿐만 아니라 상태변수 추정 필터를 이용하는 TRN에서도 마찬가지이다. 주로 평지에서나 지형이 반복적으로 나타나는 곳에서처럼 향체가 운항하는 부분의 지형을 주변의 지형과 구분지을 수 없을 때 이러한 가능성이 높게 발생한다. 따라서 이러한 지형의 특징을 정량화하기 위하여 지형험준도라는 용어가 사용되어 왔다. 하지만 지형험준도라는 용어는 다양한 학문분야에서 응용목적에 따라 다르게 정의되고 다른 의미로 사용되고 있다. 일반적으로 지형험준도는 경사, 사면의 지역적인 변화, 고도의 지역편차, 평면에 피팅(fitting)한 후 발생하는 잔차의 지역적인 변화 등으로 정의되고 있다. 이것들은 TRN 시스템의 항법성능, 자율 이동 로봇의 경로 계획, 야생 동물의 이동 등을 연구하는데 척도로 사용될 수 있다. 예를 들어, 자율 이동 로봇의 경우 평지에 가까울수록 이동성이 향상되지만, TRN에서는 일반적으로 지형의 고도 변화가 크고 독특한 지형일수록 성능이 우수해진다고 알려져 있다 [37,43,44]. 지형험준도는 TRN을 수행할 때, 오보정을 방지하기 위하여 항법해를 갱신하는 시점을 향체가 운항하는 지역에 따라 결정짓게 하는 중요한 요소 중의 하나로 받아들여지고 있다 [14,43].

실제 항공기나 미사일에 장착된 TERCOM 시스템에서 지형험준도 지수를 어떻게 활용하였는지에 대한 자세한 정보는 문헌상으로 나타나있지 않지만, 지형험준도 지수 σ_T 와 σ_Z 에 관한 정의는 (1), (2)와 같이 알려져 있다.

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2} \quad (1)$$

여기서 H_i 는 측정된 지형고도 샘플, N 은 측정 샘플의 총 개수, $\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$ 는 평균고도이다. 즉, σ_T 는 지형 고도의 표준편차로서 고도 변화의 밀접한 상관관계가 있는 것을 알 수 있다.

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2} \quad (2)$$

여기서 $\bar{D} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} D_i$ 는 지형 고도의 이웃한 샘플간의 차이 값의 평균으로 σ_Z 도 σ_T 와 같이 지형 고도의 변화와 밀접한 상관관계가 있으며, 지형험준도를 직접적으로 나타내는 지수일 뿐만 아니라, 지형의 고유성도 나타내며, TERCOM 방식의 항법

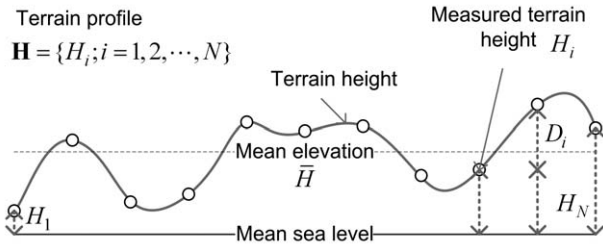


그림 9. 지형 측정 프로파일 예.

성능을 나타내는 지표로 알려져 있다. 그림 9은 지형협준도 지수를 정의할 때 사용한 변수들을 알기 쉽게 나타낸 것이다.

앞서 지형협준도의 정의가 응용목적에 따라 다르게 정의된다고 하였는데, TRN에서도 사용되는 알고리즘에 따라 다양한 지형협준도 지수를 정의하고 있다[37,44,45]. 이는 같은 지형협준도 지수라고 하더라도 항법 알고리즘에 따라 항법성과 직접적인 상관관계가 다를 수 있기 때문이다[37]. 예를 들어, 베이저안 추정 기법을 이용하는 PMF는 (3)과 같은 지형협준도 지수가 높을수록 항법성과 비례한다고 알려져 있다[45]. (3)에서 나타낸 식은 σ_z 와 유사한 협준도지수로 지형의 구배값의 평균을 나타내는 지수이다. 하지만 SITAN에서는 오차가 포함된 INS 위치에서 지형 기술키를 추정하기 때문에 지형 변화가 너무 급격하면 오히려 항법성능이 낮아진다고 알려져 있다[1].

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\nabla h(x_i)\|^2} \quad (3)$$

또한 상태변수 추정 필터 기법의 경우 반복적 추정 필터의 특성상 현재의 측정치뿐만 아니라 과거의 측정치에 의한 상태 정보가 현재 측정치에 모두 포함되어 있기 때문에 단순히 현재의 지형 측정치에만 항법성능이 영향을 받지 않게 된다. 때문에 (3)의 지수와 항법성능이 정확하게 일치하지는 않는다. PMF는 측정치 갱신시 측정치를 기준으로 유사고도가 존재하는 지형에 대한 우도 확률밀도함수(likelihood probability density function)와 사전(a priori) 확률밀도함수의 중첩곱(convolution)으로 사후(a posteriori) 확률밀도함수가 계산된다[45,46]. 따라서 사후 확률밀도함수의 분포가 좁을수록 정확한 항법해를 나타낸다. 여기서 우도 확률밀도함수의 분포는 지형의 분포와 유사하기 때문에 지형협준도와 관련된 특징이 우도 확률밀도함수에 내재된다. 하지만 과거 측정치들에 의해 결정되는 사전 확률밀도함수는 현재의 지형 특징으로는 나타낼 수 없기 때문에 근래에는 지형의 특징을 정량화하기 보다는 TRN 알고리즘에 특화되어 해당 알고리즘의 항법성과 밀접한 관련이 있는 성능지수를 정량

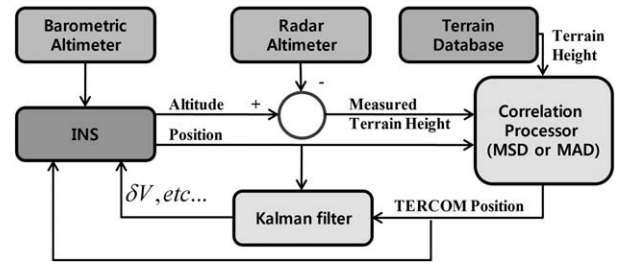


그림 10. TRN/INS 결합항법시스템 블록도.

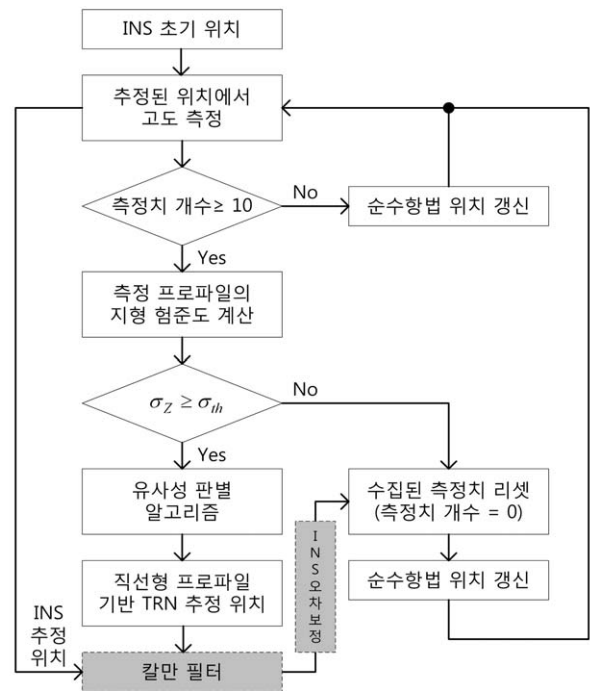


그림 11. 직선형 프로파일 기반 TRN/INS 결합항법 알고리즘.

화하는 연구가 수행되고 있다[37].

이러한 성능지수는 항법해를 선택적으로 갱신시키거나 또한 임무 전에 DB를 통해 지형협준도를 계산할 수 있으므로, 임무 목적에 맞는 항법성능 향상을 위해 운항 경로를 미리 계획할 때 이용 수도 있다[47,48].

3. 비선형 필터링 및 INS/TRN 기법 연구

앞서 3.1절에서 SITAN과 같이 EKF를 이용하는 TRN은 INS 위치에서 주위의 지형을 선형화하기 때문에 초기 INS 위치에 큰 오차가 포함되어 있을 경우 알고리즘이 발산하게 되는 문제점을 언급하였다. 따라서, 초기 위치 오차 등의 오차 요인에 대한 발산 가능성 등 기존에 개발된 항법 알고리즘의 단점을 개선하고 좀 더 강한 필터를 만드는 데 주안점을 두고 비선형 필터

링에 대한 연구를 수행하고 있다[38].

최근 십 여 년간 주로 연구된 PF, UKF (Uncented Kalman 등의 준최적(sub optimal) 비선형 필터링 알고리즘이 TRN에 적용되어 발표되고 있다. 하지만 현재까지 EKF를 제외하고 공개된 문헌상, 비선형 필터링 기법 중 실제 적용되어 성능이 검증된 필터링 기법으로는 N. Bergman이 제안한 PMF가 유일하다[32,45]. PMF는 초기 오차가 큰 경우에도 모드 변경 없이 한 가지 알고리즘으로 적용이 가능하기 때문에 실제 시스템에 응용하기에 효과적일 것으로 생각된다. 그렇지만 N. Bergman이 제안한 PMF도 구체적으로 구현하는데 있어서 명확하게 기술되지 않은 부분이 존재하고, 한계점이 존재한다. PMF는 INS의 위치만 갱신하는 알고리즘이기 때문에 항체의 초기자세 오차나 관성 센서 바이어스 오차 등에 의한 INS 발산을 막지 못하므로 장시간 항법을 수행하게 되면 결국 발산할 수밖에 없다. 이것은 위치만 갱신하는 모든 TRN 시스템에서 마찬가지 결과이다. 따라서, 그림 10~11과 같이 이러한 방식의 TRN 기법과 INS를 결합하여 INS의 위치 오차뿐만 아니라 속도, 자세, 센서 바이어스 오차 등을 보정하는 TRN/INS 결합 기법에 관한 연구도 수행되고 있다[35,38].

4. 기타 연구 전망

현재 우리나라 전역에 대한 지형자료가 구축되었고, 전세계 중 일부 지역에 대하여 공간 해상도가 약 1m 정도인 DTED 레벨 1이 구축되었다. 하지만 그 용량이 수백~수천 GB에 이르기 때문에 지형의 공간 주파수적 특징(평지, 산악)과 임무 목적에 맞게 해상도를 재조정하는 기법이 요구되고 있다. 따라서 이러한 데이터로부터 특정 임무 영역의 DB를 가능한 정확하게 수학적으로 모델링하는 연구 등도 앞으로 수행되어야 할 것이다.

국내에서는 수심 지형 참조와 관련된 연구가 미비한 실정이다. 특히, 수심 지형지도(해저지도) 제작은 수심이라는 특성으로 인해 지상에 비해 DB의 제작이 어렵다. 그러나 수심지형은 학술뿐 아니라 상업, 군사와 같이 많은 분야의 기초자료가 되므로 해저지도 DB 확충이 필요하다. 또한 육상에 비해 상대적으로 평탄한 지형에서도 영역기반 측정치 등을 이용해 동작할 수 있는 적합한 필터링 알고리즘 연구가 필요하다.

추후에는 비용이 저렴한 비군사적 목적의 UAV나 AUV에 TRN을 적용하기 위하여 MEMS INS를 TRN과 결합하는 연구도 필요하다.

앞서 제시된 TRN 알고리즘은 지형고도 DB를 중력(중력이상/구배), 지자기(지자기이상/구배), 기타 지형정보(영상 등) 등과

같은 다른 DB로 변경하여 적용할 수 있다. 물론 사용하는 DB의 해상도나 정확도, 힘준도 등에 따라 세부 알고리즘의 수정과 최적화는 필요하다. 그리고 장시간 정밀항법을 유지하고, 은닉항법 및 자율항법이 요구하는 항법시스템을 위해 다양한 DB를 동시에 사용하는 연구로 확장될 것이다[3,6,9].

하지만 무엇보다도 이러한 지형 DB 기반 참조항법을 수행하기 위해서는 관련 지구물리자료를 측정하기 위한 센서의 성능 향상이 중요하다. 선진국의 경우 중력구배계를 비롯하여 실제적으로 항체에 탑재할 수 있는 크기이면서 실시간 측정이 가능한 지구물리 측정센서를 개발하고 지속적으로 성능을 개선하여 오고 있다[49]. 하지만 그 전략적 특성상 우리나라가 이와 관련된 고성능의 센서를 구입하는 것이 불가능할 수 있으므로 국내에서도 알고리즘 개발 뿐만 아니라 자체적으로 정밀 센서의 개발이 시급하다고 할 수 있다.

Ⅶ. 결론

TRN은 국외에서 1940년대부터 그 필요성이 대두된 학문으로 미사일, 잠수정, 전투기 등 다양한 분야에서 주로 군사목적으로 연구가 진행되었다. 1950년 ATRAN의 개발을 시작으로 1990년대 PTAN 기술까지 상용화가 되었고, 지속적으로 성능을 개량하여 왔다. 최근에는 관련 하드웨어, 센서의 발달과 고해상도 DB 구축으로 인해 GPS를 대체할 수 있는 정밀항법 가능성을 열어두고 있다. 하지만 현재 국내에서는 TRN에 대한 연구가 시작단계에 있다. 우리나라처럼 실제로 적국에 의한 GPS 전파방해가 발생하는 상황에서 TRN은 GPS를 대체하는 보조항법시스템으로 연구가 시급한 분야이며 지속적인 연구가 필요하다. 국내에서 TRN과 관련한 기술의 발전 및 확산을 위해서는, 기존 TRN 시스템의 신뢰성 및 정확도 향상을 위한 알고리즘 기술 개발과 국내지형 DB 구축 및 모델링이 필수적이다. 무엇보다 지형고도를 정확하고 정밀하게 측정하기 위한 센서의 개발이 중요하다. 즉, TRN의 중요 기술은 지형고도 DB 모델링, 지형고도 측정센서, TRN 알고리즘 3요소로 정리할 수 있고, 지속적인 실험을 통하여 실제에서 부딪히는 문제를 개선하는 것이 중요하다. 따라서, 대학의 연구실뿐만 아니라 연구소, 기업체 등에서 동시에 3가지 요소의 개발을 유기적으로 수행해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청/국방과학연구소 '09 착수 기초연구사

업 지능형 데이터베이스 기반 항법 기술 과제의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과임.

참고문헌

- [1] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech house, 2008.
- [2] D. Vaman, "TRN History, Trends and The Unused Potential," *DASC 2012*, pp. 1A3-1 - 1A3-16, October 2012.
- [3] 권재현, 박찬국, 방효충, 지능형 데이터베이스 기반 항법기술에 관한 연구, 1단계 최종보고서, 서울시립대학교, 2011.
- [4] N. Wilkinson, T. Brooks, and A. Price, "Latest developments of the TERPROM® digital terrain system 2009," *Joint Navigation Conference*, June 2009.
- [5] D. Kidner, M. Dorey, and D. Smith, "What's the point? interpolation and extrapolation with a regular grid DEM," Fourth International Conference on GeoComputation, Fredericksburg, VA, USA. July 1999.
- [6] 권재현, 박찬국, 방효충, 지능형 데이터베이스 기반 항법기술에 관한 연구, 기술현황분석보고서, 서울시립대학교, 2009.
- [7] Z. Wang, S. Bian, "A local geopotential model for implementation of underwater passive navigation," *Progress in Natural Science*, vol. 18, no. 9, pp.1139-1145, 2008.
- [8] 이지선, 권재현, 유명중, "중력모델링과 중력참조항법에의 적용," 한국측량학회지, vol. 29, no. 5, pp. 543-550, 2011.
- [9] 권재현, 박찬국, 방효충, 지능형 데이터베이스 기반 항법기술에 관한 연구, 1단계 중간보고서, 서울시립대학교, 2010.
- [10] I. Nygren, M. Jansson, "Terrain navigation for underwater vehicles using the correlator method," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 906-915, July 2004.
- [11] McGuffin, T. John, "Terrain referenced navigation-adaptive filter distribution," *U.S. Patent*, no. 5,331,562, July 1994.
- [12] R. F. Koch, D. C. Evans, "ATRAN terrain sensing guidance-The grand-daddy system," *SPIE Mtg, Image Processing for Missile Guidance*, vol. 238, pp. 2-9, 1980.
- [13] C. A. Baird, M. R. Abramson, "A comparison of several digital map-aided navigation techniques," *In proceedings of the PLANS*, pp. 286-293, Nov. 1984.
- [14] G. M. Siouris, *Missile Guidance and Control Systems*, Springer-Verlag, New York, 2003.
- [15] J. L. Campbell, M. U. de Haag, F. van Graas, "Terrain referenced precision approach guidance," *In proceedings of the ION NTM*, January 2005.
- [16] T. M. Laur, S. L. LLanso, *Encyclopedia of Modern U.S. Military Weapons*, The Army Times Publishing Company with Berkley Publishing Group, New York, 1995.
- [17] F. W. Riedel, S. M. Hall, J. D. Barton, J. P. Christ, B. K. Funk, T. D. Milnes, and D. R. Stark, "Guidance and navigation in the global engagement department," *Johns Hopkins APL Technical Digest*, vol. 29, no. 2, pp. 118-132.
- [18] G. L. Mealy, W. Tang, "Application of multiple model estimation to a recursive terrain height correlation system," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 28, no. 3, pp. 323-331, March 1983.
- [19] L. D. Hostetler, R. D. Andreas, "Nonlinear-K alman filtering techniques for terrain-aided navigation," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 28, no. 3, pp. 315-323, March 1983.
- [20] D. D. Boozer, J. R. Fellerhoff, "SITAN test results in the AFTI/F-16 aircraft," *Journal of The Institute of Navigation*, vol. 35, no. 2, pp. 161-176, 1988.
- [21] P. J. Yu, Z. Chen, and J. C. Hung, "Performance evaluation of six terrain stochastic linearization techniques for TAN," *In proceedings of the NAECON 91*, pp. 382-388, May 1991.
- [22] J. Hollowell, "HELI/SITAN: A terrain referenced navigation algorithm for helicopters," *In proceedings of the PLANS*, pp. 616-625, March 1990.
- [23] A. R. Runnalls, "Apparatus incorporating recursive estimator," *U.S. Patent*, no. 4,786,908, Nov. 1988.
- [24] A. R. Runnalls, "A bayesian approach to terrain contour navigation," *AGARD Guidance and Control Panel 40th Symposium*, May 1985.
- [25] A. Robins, "Recent developments in the TERPROM integrated navigation system," *In proceedings of the ION 44th Annual Meeting*, June 1998.
- [26] Honeywell, "Precision terrain aided navigation (PTAN)," Honeywell Brochure, 2005.
- [27] S. H. Thomas, L. D. Almsted, "Method and systems for interferometric cross track phase calibration," *U.S. Patent*, no. 7,417,586. Aug. 2008.
- [28] J. L. Campbell, *Application of Airborne Laser Scanner - Aerial*

- Navigation, Ph. D. dissertation, The Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, 2006.
- [29] O. Bergem, *Bathymetric Navigation of Autonomous Underwater Vehicles using a Multibeam Sonar and a Kalman Filter with Relative Measurement Covariance Matrices*, University of Trondheim, Doctoral Dissertation, 1993.
- [30] P. E. Hagen, N. Størkersen, K. Vestgård, P. Kartvedt, and G. Sten, "Operational military use of the HUGIN AUV in Norway," *Proceedings from UDT Europe*, 2003.
- [31] B. Jalving, M. Mandt, O. K. Hagan, and F. Pöhner, "Terrain referenced navigation of AUVs and submarines using multibeam Echo Sounders", *In Proceedings from UDT Europe*, 2004.
- [32] K. B. Anonsen and O. K. Hagen, "An analysis of real-time terrain aided navigation results from a HUGIN AUV," *proceedings of the OCEANS*, pp. 1-9, September 2010.
- [33] J. Carlstorm, I. Nygren, "Terrain navigation of the swedish AUV62F vehicle", *International Symposium on Unmanned Untethered Submersible*, Aug. 2005.
- [34] 이선민, 유영민, 이원희, 이달호, 박찬국, "기울기 프로파일을 이용한 일괄처리 방식 지형참조항법의 성능 개선," 제어.로봇.시스템학회 논문지, 제18권, 4호, pp. 384-390, 2012.
- [35] Y. M. Yoo, W. H. Lee, S. M. Lee, C. G. Park, and J. H. Kwon, "Improvement of TERCOM aided inertial navigation system by velocity correction," *In proceedings of the PLNAS*, pp. 1082-1087, April 2012.
- [36] W. H. Lee, Y. M. Yoo, S. M. Lee, C. G. Park, "Improvement of batch processed TRN considering MAD statistics," *In proceedings of the AIAA GNC*, 2012.
- [37] 이선민, PMF기반 지형참조항법 시스템의 항법 성능과 지형간의 상관지수 분석, 서울대학교 석사학위 논문, 2012.
- [38] S. H. Mock, M. C. Choi, H. C. Bang, "Performance comparison of nonlinear estimation techniques in terrain referenced navigation," *In proceedings of the ICCAS 2011*, pp.1245-1250, 2011.
- [39] 유영민, 이선민, 권재현, 유명중, 박찬국, "지형 협준도를 고려한 프로파일 기반 지형참조항법과 관성항법의 결합 알고리즘," 제어.로봇.시스템학회 논문지, vol. 19, no. 2, pp. 131-139, 2013.
- [40] 유영민, 박찬국, "중력이상을 이용한 INS 결합항법 시스템의 성능 분석," 국방과학연구소 창설 40주년 기념 종합학술대회, pp. 295-298, Oct. 2010.
- [41] K. D. Wang, L. Yan, W. Deng, J. H. Zhang, "Research on iterative closest contour point for underwater terrain-aided navigation," *Lecture Notes in Computer Science 4109*, Springer-Verlag, pp.252-260, 2006.
- [42] J. Metzger, O. Meister, G. F. Trommer, F. Tumbärgel, and B. Taddiken, "Adaptations of a comparison technique for terrain navigation," *Aerospace Science and Technology*, vol. 9. No. 6, pp. 553-560, 2005.
- [43] W. Mark, Jr. Cannon, *TERCOM Performance: Analysis and Simulation*, Technical Report AMRL-TR-73-130, Wright-Patterson AFB, Ohio, June 1974.
- [44] H. Feng, L. Yan, Z. L. Deng, and K. D. Wang, "Data map characteristic in aided navigation," *In proceedings of the PLANS*, pp. 771-774, April 2004.
- [45] N. Bergman, *Recursive Bayesian Estimation: Navigation and Tracking Application*, Department of Electrical Engineering, Linköping University, Doctoral Dissertation 579, 1999.
- [46] M. Šimandl, J. Kralovec, and T. Soderström, "Advanced point-mass method for nonlinear state estimation," *Automatica*, vol. 42, no. 7, pp.1133-1145, 2006.
- [47] A. Bar-Gill, P. Ben-Ezra, and I. Y. Bar-Itzhack, "Improvement of terrain-aided navigation via trajectory optimization," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 2, no. 4, pp. 336-342, 1994.
- [48] S. Paris, S. J. P. Le Cadre, "Planning for terrain-aided navigation," *In proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion*, vol. 2, pp. 1007-1014, July 2002.
- [49] J. A. Richeson, *Gravity gradiometer aided inertial navigation within Non-GNSS environments*, Ph.D. thesis, University of Maryland, 2008.

◎ 저 자 약 력



유영민

- 2005년 광운대학교 정보제어공학과 졸업.
- 2005년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석박사통합과정 재학중.
- 관심분야 : 항법, 칼만필터, 비선형필터, 센서융합, 데이터베이스 기반 복합항법시스템



유명중

- 1987년 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업.
- 1990년 동 대학원 졸업(공학석사).
- 2002년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박사).
- 1990년~현재 국방과학연구소 책임연구원.
- 관심분야 : 강인필터 및 적응필터링 기법, 항법시스템 개발.



박찬국

- 1985년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업.
- 1987년 동 대학원 졸업(공학석사).
- 1993년 동 대학원 졸업(공학박사).
- 1993년 서울대학교 제어계측신기술연구센터 Post Doc.
- 1994년~2002년 광운대학교 정보제어공학과 조교수/부교수.
- 1998년 미국 UCLA 기계항공공학과 방문연구원.
- 2003년~현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수/교수.
- 2005년~2009년 공공기술연구회 기획평가위원.
- 2009년 미국 Georgia Tech 방문연구원.
- 2009년~2011년 국방과학연구소 연구개발자문위원.
- 관심분야 : INS/GPS 결합 알고리즘, MEMS IMU 응용 시스템 개발, 영상항법시스템, USN을 이용한 Ubiquitous Positioning, 필터링 기법, 인공위성의 FDIR 기법.