지형 험준도를 고려한 프로파일 기반 지형참조항법과 관성항법의 결합 알고리즘

Profile-based TRN/INS Integration Algorithm Considering Terrain Roughness

유 영 민, 이 선 민, 권 재 현, 유 명 종, 박 찬 국*
(Young Min Yoo¹, Sun Min Lee¹, Jay Hyun Kwon², Myeong Jong Yu³, and Chan Gook Park¹)

¹Seoul National University

²University of Seoul

³Agency for Defense Development

Abstract: In recent years alternative navigation system such as a DBRN (Data-Base Referenced Navigation) system using geophysical information is getting attention in the military navigation systems in advanced countries. Specifically TRN (Terrain Referenced Navigation) algorithm research is important because TRN system is a practical DBRN application in South Korea at present time. This paper presents an integrated navigation algorithm that combines a linear profile-based TRN and INS (Inertial Navigation System). We propose a correlation analysis method between TRN performance and terrain roughness index. Then we propose a conditional position update scheme that utilizes the position output of the conventional linear profile type TRN depending on the terrain roughness index. Performance of the proposed algorithm is verified through Monte Carlo computer simulations using the actual terrain database. The results show that the TRN/INS integrated algorithm, even when the initial INS error is present, overcomes the shortcomings of linear profile-based TRN and improves navigation performance.

Keywords: TRN, INS, TRN/INS integrated system, DBRN, terrain roughness, batch processed TRN, TERCOM

I. 서론

관성항법시스템(INS: Inertial Navigation System)은 외부장치의 도움없이 독립적으로 운용이 가능하고, 단시간 운용하는 동안 정밀한 항법해를 제공할 수 있는 장점이 있다. 하지만 가속도계와 자이로 출력력을 적분하기 때문에 초기값 설정 오차, 항법 방정식 계산 오차, 센서 측정치 오차에 의해 시간이 지남에 따라 항법해 오차가 누적되는 단점이 있다.

비행체에 탑재되는 군용항법시스템은 장시간 운용하는 동안 고정밀 고신뢰성의 항법데이터를 제공하기 위하여 INS와 상호보완 특성을 갖는 다양한 센서를 복합적으로 사용하는 방법으로 발전해왔다. 특히 선진국에서는 1950년대부터 꾸준히 레이더고도계 또는 중력구배계를 이용한 지형, 중력 참조항법을 연구하여 왔다[1,2]. 이 중에서 지형참조항법(TRN: Terrain Reference Navigation)의 경우 많은 연구가 수행되었고, 다양한 무기체계에 탑재되어있으나 구체적인 알고리즘은 문헌으로 공개되어 있지 않은 실정이다[2]. 이후 칼만필터가 소개되고 1980년대에 GPS (GPS: Global Positioning System)를 사용하기 시작하면서부터 INS/GPS 결합항법 알고리즘에 관한

연구가 주로 이루어져왔다[3].

2000년대 중반부터는 GPS와 같은 전파항법이 근본적으로 적의 의도적인 전파 간섭이나 교란에 취약하다는 단점과 수중(underwater)에서 사용이 불가능하다는 단점이 부각되었다. 이러한 이유로 선진국 등은 GPS를 사용할 수 없는 환경에서 GPS를 대체할 수 있는 항법시스템에 관한 연구를 활발히 수행 중이다. 특히 지형 정보뿐만 아니라 다른 지구물리 정보를 이용하기 위하여 중력구배나 지자기 등을 정밀하게 측정하거나 항법에 이용할 수 있는 방법들에 대한 연구를 재시작하였다[4-7].

TRN에 필요한 레이더고도계는 중력구배계나 지자기센서에 비해 많은 연구가 수행되었기 때문에 이를 이용한 TRN 알고리즘의 개발은 무기체계에 바로 적용이 가능하다. 뿐만 아니라 TRN 알고리즘은 수중 지형 또는 다른 지구물리 정보를 이용한 항법시스템에 유사하게 적용될 수 있다. 따라서 향후 지구물리 정보를 복합적으로 이용할 수 있는 센서 등의 하드웨어 조건이 만족될 때를 대비하여 이에 근간이 되는 지형참조항법 알고리즘에 대한 연구가 필수적이다.

직선형 프로파일 기반 방식의 TRN은 GPS와 같은 위치 결정방식으로 위치 정보만 제공한다. 여기서 TRN은 특정주기로 일정량의 지형 고도값을 측정하는 동안 비행체의 측정주기 간 이동거리를 대략적으로 알 수 있어야 하므로 INS와 같은 추측항법 시스템 등과 독립적으로 운용할 수 없다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 INS는 시간에 따라 위치오차가 증가하기 때문에 INS의 오차를 보정하지 않으면 결국 TRN의 항법해는 오보정을 하고 발산할 수 있다[8]. 따라서 INS와

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 12. 3., 수정: 2012. 12. 26., 채택확정: 2012. 12. 31.

유영민, 이선민, 박찬국: 서울대학교 기계항공공학부/자동차시스템공동연구소(ASRI) (ym0903@snu.ac.kr/sunmin2@snu.ac.kr/chanpark@snu.ac.kr)

권재현: 서울시립대학교(jkwon@uos.ac.kr)

유명종: 국방과학연구소(mjyu@add.re.kr)

※ 본 연구는 방위사업청/국방과학연구소 '09 착수 기초연구사업 지원형 데이터베이스 기반 항법 기술 과제의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과임.

TRN을 함께 이용하는 항법시스템에서 INS의 오차를 보정하기 위하여 INS의 위치해와 TRN의 위치해를 결합할 때 칼만 필터를 이용하는 방법 등이 제안되었다[9]. 하지만 TRN의 위치해는 평탄한 지형에서 고도계 측정오차 등에 의해 오차가 크게 발생할 수 있고, 평탄하지 않더라도 유사한 지형에서 오보정이 자주 발생한다고 알려져 있다[10,11]. 따라서 오보정이 발생하게 되면 TRN 위치해에 큰 오차가 포함되게 되고, 이를 INS 위치해와 결합하게 되면 칼만 필터의 측정치 오차가 크게 증가하여 결국 INS 오차를 제대로 보정하지 못하고 더 증가시킬 수 있다.

본 논문에서는 TRN의 위치해가 오보정이 아니라고 생각할 수 있는 위치에서 칼만 필터의 측정치 갱신을 이용하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 II 장에서는 일괄처리방식의 직선형 프로파일 기반 TRN 알고리즘을 소개하고 지형 험준도 지수를 이용한 직선형 프로파일 기반 TRN 위치해의 조건적 갱신 기법을 제안한다. 그리고 III 장에서는 시간에 따라 누적되는 INS의 오차를 효과적으로 보정하기 위하여 TRN과 INS의 위치해를 칼만 필터를 이용하여 결합하는 방법을 제안하고, 이때 가관측한 상태변수를 선택적으로 갱신하는 방법을 사용한다. IV 장에서는 시뮬레이션을 통한 알고리즘의 성능 검증 결과에 대하여 서술하고 마지막으로 V 장에서는 결론으로 마무리하고자 한다.

II. 직선형 프로파일 기반 TRN

1. 기존 직선형 프로파일 기반 TRN 위치해 결정 기법

TRN은 비행체가 실제 위치한 곳에서 기압고도계와 레이더고도계 등을 이용하여 지형 고도값을 측정하고, 기 구축된 지형고도 데이터베이스(DB: Data-Base)로부터 추정된 위치에서의 지형 고도값을 추출한 후 이 두 지형 고도값을 비교하여 위치를 갱신하는 방법이다. 두 지형 고도값을 비교하는 방식에 따라 다양한 TRN 알고리즘이 존재하며, 대표적으로 일정시간 동안 측정 데이터를 모은 후 비교하는 일괄처리방식과 매 측정시마다 비교하는 순차처리방식으로 나뉜다. 또한 최근에는 이 두 방식을 다양하게 혼합하는 방식이 연구되고 있다[2,3].

직선형 프로파일 기반 TRN 항법의 대표적인 예로 TERCOM (TERrain COntour Matching)을 들 수 있다. 이때 직선형 프로파일을 생성하는 기법은 그림 1과 같다. 항체가 지형고도를 측정하는 방법은 기압고도계와 INS로부터 얻어진 해수면으로부터의 고도와 레이더고도계가 측정한 항체에서 지면까지의 거리의 차를 통하여 지형고도를 측정하게 된다[12]. 여기서 측정된 고도는 곧바로 항체의 위치보정을 위하여 사용되는 것이 아니라 일정한 갱신주기 동안에 모아진 지형고도 샘플 정보를 일괄적으로 계산하여 처리하게 된다. 여기서 모아진 지형고도 샘플의 집합을 프로파일(profile)이라고 부르며, 프로파일 내에서 각각의 측정 지형 고도값은 지형고도를 샘플링하는 간격동안 이동한 항체의 거리만큼의 간격을 가지고 프로파일을 구성하게 된다. 이를 측정 프로파일이라고 부른다.

항체가 갱신주기 동안에 측정한 지형고도 프로파일은 항체에 탑재된 지형고도 DB와 유사성 판별 알고리즘을 거쳐 항체의 위치를 계산하게 되고, 계산된 값을 통해 항체의 위

그림 1. 측정 및 후보 프로파일의 예.

Fig. 1. Example of candidate and measured profile.

치를 보정하게 된다. DB로부터 항체의 위치를 추정하기 위해서 전체적인 DB를 이용하는 것이 아니라, 그림 1에서처럼 INS를 통해 추정한 항체의 마지막 위치로부터 일정범위 내에 해당하는 DB 영역만 이용한다. 유사성 판별 알고리즘의 연산에서는 DB 영역으로부터 지형고도 샘플들을 추출하여 기준행렬을 만들고, 기준행렬로부터 지형고도 후보 프로파일들을 생성한다. 후보 프로파일의 크기 및 샘플링 간격은 측정 프로파일의 샘플링 간격 및 길이와 같다.

지형고도 후보 프로파일은 기준행렬에서 각 지형 고도값의 위치를 현재 항체의 위치라고 가정할 수 있는 모든 지점의 위치로부터 측정한 개수만큼을 하나의 프로파일로 구성하여 행렬의 순서에 맞게 여러 후보 프로파일들을 생성한다. 마지막으로 측정 프로파일과 DB로부터 생성한 후보 프로파일의 유사성 판별 알고리즘을 거쳐 가장 유사한 후보 프로파일의 최종 위치로 항체의 위치를 갱신할 수 있게 된다[13].

본 논문에서 사용한 유사성 판별 알고리즘은 MAD (Mean Absolute Difference) 기법으로 식 (1)과 같다[12].

$$MAD_{n,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |h_{meas}(i) - h_{DB}(n+i-1, m)| \quad (1)$$

$$P_{MAD} = P\left(\arg \min_{n,m} MAD_{n,m}\right)$$

여기서 h_{meas} 는 지형고도의 측정값이며, h_{DB} 는 DB로부터 추출한 지형고도값이다. 그리고, $MAD_{n,m}$ 는 그림 1에서 나타난 기준행렬의 원소 (n, m) 을 끝점으로 하는 후보 프로파일과 기준 프로파일의 MAD 결과값이다. (n, m) 은 항체가 갱신하는 시점에서 참조하는 후보 프로파일의 행과 열을 나타낸다. 첨자 i 는 측정 프로파일 내의 측정치 순번을 나타내며 기준행렬에서 추출한 후보 프로파일의 순번에도 해당된다. N 은 한 프로파일에서 측정한 지형고도 데이터의 개수를 나타내며 TRN의 위치해 출력주기와의 연관된다.

2. 직선형 프로파일 기반 TRN 위치해의 조건적 갱신 기법

직선형 프로파일 기반 TRN에서 결정된 위치해는 앞서 설

명한 바와 같이 MAD와 같은 유사성 판별 기법에 의해 선정된 후보 프로파일의 최종위치이다. 하지만, 그림 1에서 나타난 기준행렬이 평지이거나 가로 또는 세로 축으로 유사한 고도 프로파일이 존재한다면, 측정 프로파일과 유사한 후보 프로파일이 다수 존재하게 된다. 이때 고도계와 지형고도 DB의 오차로 인해 MAD 계산결과 실제 궤적에서 생성한 측정 프로파일과 다른 위치의 후보 프로파일이 선택된다면 오보정이 발생하게 된다.

실제 항공기나 미사일에 장착된 TERCOM에서는 지형의 유사성을 판단하기 위하여 식 (2), (3)에서 정의한 지형의 험준도 지수를 이용한다고 알려져 있다[12].

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

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2} \quad (3)$$

여기서 H_i 는 지형 샘플의 고도이고, $D_i = H_{i+1} - H_i$, $\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$, $\bar{D} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} D_i$ 이다. 즉, σ_T 는 지형 고도 샘플의 표준편차를 의미고, σ_Z 는 연속된 두 지형 고도 샘플 차이의 표준편차이다. 이와 같은 지형 험준도 지수는 지형 고도의 변화와 밀접한 상관관계가 있다. 하지만 지형 험준도 지수값 크기에 따른 구체적인 TRN 작동 방법은 언급된 문헌이 없으며, 부분적으로 몇 가지 특정 지형에 대한 지형 험준도 지수값과 그 지역에서 수행한 TRN 결과만 비교하여 높은 험준도 지수를 갖는 지형일수록 항법 성능이 우수하다고만 알려져 있는 실정이다[11].

본 논문에서는 그림 2와 같이 앞서 제시한 지형 험준도 지수값이 특정값 이상일 경우 직선형 프로파일 기반 TRN 위치해를 조건적으로 갱신하는 알고리즘을 제안한다. 특히 두 가지 지형 험준도 중에서 항법 성능과 가장 상관관계가 큰

지수를 찾는 방법과 TRN 위치해 갱신 여부를 결정짓는 지형 험준도 지수의 문턱치 σ_{th} 를 결정짓는 방법을 제안한다.

3. 지형 험준도 지수와 TRN 항법 성능간의 상관관계 분석기법

먼저 두 가지 지형 험준도 지수와 TRN 항법 성능간의 상관관계를 분석하기 위하여 그림 3에서 제시한 영역과 같이 평지와 산악지형이 다양하게 나타나는 지역을 선정한다. 그림에서 밝은색으로 나타난 부분일수록 산악지형과 같이 높은 지형을 의미한다. 본 논문에서 사용한 지형고도 DB는 행렬 형태이며, 한반도 일부 지역에 대한 정보를 갖고 있으며, 해상도는 $3arcsec \times 3arcsec$ 으로 격자간격은 약 92.7 m에 해당한다. 그리고 다른 오차요소를 제거하기 위하여 항체는 매초마다 DB의 격자 위를 비행한다고 가정한다. 즉, 사용된 DB의 격자간격이 $3arcsec$ 이므로, 대략 92.7 m/s의 속도를 가지고 북쪽으로 비행하는 경우이다. 지형 험준도 지수와 항법 성능간의 상관관계를 계산하기 위하여 INS 위치에 일정한 초기 오차를 가정한다. 10초간 항체가 비행하면서 10개의 지형고도 측정치 샘플을 획득한다고 가정하고, 측정 프로파일의 지형 험준도 σ_T 와 σ_Z 를 계산한다. 이때 유사성 판별 알고리즘으로 가장 적합한 후보 프로파일을 결정하고, 이로부터 갱신된 위치의 오차와 지형 험준도 지수를 DB화 한다.

본 논문에서는 그림 3의 전 영역에 대하여 위와 같은 DB를 구축하기 위하여 INS 초기 위치만 다르게 하고, 초기 INS 위치 오차를 대략 DB 해상도의 절반인 50 m로 하고, 기타 모든 초기 조건을 같게 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 초기 위치는 경위도 (127.5 deg, 36 deg) 부터 경도 0.02 deg, 위도 30arcsec 간격으로 증가시켰다. 6120번의 시험 결과를 획득하여 분석한 결과 σ_Z 는 5~55 사이의 값을 나타냈고, σ_T 는 5~100 사이의 값을 나타냈다. 그림 4와 5는 각각 연속적 크기로 나타난 험준도 지수 σ_T 와 σ_Z 를 정수 구간별로 쪼개어 해당 값을 갖는 지형의 히스토그램을 막대그래프로 표시한 것이다. 또한 지형 험준도 지수 σ_T , σ_Z 와 항법 위치오차 사이의 관계는 각각 그림 6, 7과 같이 나타났다. 여기서 실선은 해당 험준도 지수값을 가진 경우의 항법 위치오차 평균을 나타내고, 점선은 평균값±표준편차를 나타낸 것이고, 그림을 보면 알 수 있듯이 대체적으로 두 지형 험준도 지수 모두 클수록 위치오차 평균과 표준편차가 줄어드는 것을 알 수 있다.

그림 2. 직선형 프로파일 기반 TRN 위치해의 조건적 갱신.
Fig. 2. Selective update of linear profile-based TRN position output.

그림 3. 시험 지역의 지형 고도 DB.
Fig. 3. Terrain height database of test area.

그림 4. 지형 험준도 지수 σ_T 와 해당 지형 횃수.

Fig. 4. Corresponding terrain number of terrain roughness index σ_T .

그림 5. 지형 험준도 지수 σ_Z 와 해당 지형 횃수.

Fig. 5. Corresponding terrain number of terrain roughness index σ_Z .

그림 6. 지형 험준도 지수 σ_T 와 항법 위치오차 간의 관계.

Fig. 6. Relationship between terrain roughness index σ_T and navigation position error.

본 논문에서는 TRN 위치해 갱신 여부를 결정짓는 지형 험준도 지수의 문턱치 σ_{th} 를 결정짓기 위해 위치오차 평균값 더하기 표준편차의 값이 초기 INS 오차인 50 m를 넘지 않는 것을 만족하는 최소의 지수값을 이용한다. 즉, 그림 6에서는

그림 7. 지형 험준도 지수 σ_Z 와 항법 위치오차 간의 관계.

Fig. 7. Relationship between terrain roughness index σ_Z and navigation position error.

지형 험준도 σ_T 를 사용하는 경우 σ_{th} 는 33, 그림 7에서 σ_Z 를 사용하는 경우 σ_{th} 는 19이다. 다음으로 두 가지 지형 험준도 지수 모두 항법 성능과 상관관계가 나타나는 것으로 보인다. 이 중에서 항법 성능과 가장 상관관계가 큰 지수를 찾는 방법을 제안한다. 첫번째 문턱치를 넘는 지형의 횃수를 들 수 있다. σ_T 를 사용하는 경우 σ_{th} 를 넘는 지형의 횃수가 전체 지형 횃수 중에 차지하는 비율은 41.98 % 이고, σ_Z 를 사용하는 경우 σ_{th} 를 넘는 지형의 비율은 42.29 %이다. 평균적으로 이 비율이 높을수록 TRN으로 위치 갱신 가용율이 높은 장점이 있다. 다음으로 만약 가용한 지형의 비율도 비슷하다면 지형 험준도 지수값이 큰 지점에서 표준편차 오차가 수렴하는 정도를 살펴볼 수 있다. σ_T 의 경우 문턱치 이상에서 표준편차 오차가 50 m 이내이긴 하지만 오차의 기복이 심하므로 안정적인 항법해를 제공한다고 볼 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 이와 같은 방법에 근거하여 두 가지 지형 험준도 중에서 항법 성능과 가장 상관관계가 큰 지수로 σ_Z 를 선택한다.

III. 직선형 프로파일 기반 TRN/INS 결합항법

1. 직선형 프로파일 기반 TRN/INS 알고리즘

기존 TERCOM과 같은 직선형 프로파일 기반 TRN 알고리즘의 단점은 충분히 험준한 지형에서라도 INS의 위치오차만 보정할 뿐 INS의 속도, 자세, 센서 오차 등은 보정하지 않는다는 점이다. 따라서 시간이 지남에 따라 속도오차나 자세오차가 누적되어 있는 상황에서는 측정 프로파일과 지형 DB로부터 획득한 후보 프로파일들이 서로 평행하지 않고 어긋나게 되고, 후보 프로파일과 측정 프로파일의 지리적 상관관계가 현저히 낮아진다. 결국 이와 같은 상황에서 반복적으로 가장 작은 MAD 값을 갖는 후보 프로파일의 마지막 지점으로 위치를 보정할 경우 위치해는 발산할 가능성이 있다[8,9].

본 논문에서는 INS의 오차를 보정하기 위하여 INS의 위치해와 TRN의 위치해를 결합할 때 칼만필터를 이용하는 방법을 제안한다. 하지만 2.2절 그림 6, 7에서 제시한 것과 같이 TRN의 위치해는 지형 험준도 지수값이 작을수록 오보정이 자주 그리고 크게 발생할 수 있다. 이때 오보정이 발생하게

되면 TRN 위치해에 큰 오차가 포함되게 되고, 이를 INS 위치해와 결합하게 되면 칼만필터의 측정치 오차가 크게 증가하여 결국 INS 오차를 제대로 보정하지 못하고 더 증가시킬 수 있다. 따라서 충분히 안정적인 TRN 위치해를 획득했다고 가정할 수 있는 경우에 TRN과 INS의 위치해를 칼만필터를 이용하여 결합하고, 칼만필터의 가관측성을 분석하여 가관측한 상태변수를 선택적으로 갱신하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 그림 8과 같으며, 2.1절에서 제시한 직선형 프로파일 기반 TRN 위치해의 조건적 갱신 알고리즘에 칼만필터가 추가되고, 가관측한 INS 상태변수의 오차보정을 수행하는 블록이 추가된 형태이다.

2. 칼만 필터 모델

본 논문에서는 제안한 직선형 프로파일 기반 TRN/INS 결합 방법은 GPS/INS 약결합 방법과 유사하다. 단지 여기서 GPS의 위치해를 이용하는 것이 아니라, TRN의 경위도 위치해와 기압고도계의 고도 출력을 이용하는 것이 다를 뿐이다. 본 논문에서 사용된 칼만필터의 시스템 모델은 15차 스트랩다운(strap down) INS 오차모델이며 상태방정식은 식 (4)와 같다[14].

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + w(t) \quad (4)$$

여기서 $x = [x_f \ x_a]^T$ 이고, x_f 는 3축 위치, 속도, 자세 오차이고, x_a 는 3축 가속도계 자이로 바이어스 오차이다. w 는 공정잡음으로 영평균 백색 가우시안(Gaussian)이다.

칼만필터의 측정치는 직선형 프로파일 기반 TRN의 위치와 INS 수평 위치의 차분값과 기압고도계와 INS의 수직 위치 차분 값으로 식 (5)와 같으며 측정치식은 식 (6)과 같다.

$$z_k = \begin{bmatrix} L_k^{INS} - L_k^{TRN} \\ l_k^{INS} - l_k^{TRN} \\ h_k^{INS} - h_k^{Baro} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (6)$$

여기서 $H_k = [I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3}]$ 이고, v 는 측정잡음으로 영평균 백색 가우시안이다.

일반적으로 가관측성이란 입력 및 출력 기록을 기반으로 시스템의 상태변수를 재구성할 수 있는 성질이다. 완전 가관측한 상태에서 항법 오차를 나타내는 상태 변수의 추정 가능 여부는 공정잡음이나 측정잡음의 크기에 달려있지만, 항법 시스템이 가관측하지 않은 경우에는 매우 작은 공정잡음과 측정잡음을 가져도 정확한 추정이 불가능하게 된다[15,16]. 즉, 칼만필터는 가관측한 상태변수만 추정가능하다고 알려져 있다. 앞서 제시한 칼만필터 모델에서와 같은 경우에는 항체가 북쪽이나 동쪽으로 등속 직선 운동을 하는 경우 위치오차는 칼만필터의 측정치이므로 가관측하며, 위치오차의 미분치와 곡률변경, 항법좌표계에 대한 지구 회전각속도 등과 같은 변수들이 알려진 값이기 때문에 속도 오차는 가관측하다고 알려져 있다. 또한 가관측 분석 방법에 의하면 가속도계 z축 바이어스도 가관측하다고 알려져 있다[9,14]. 따라서, 본 논문에서는 항체가 북쪽으로 등속 직선 운동을 한다고 가정하고 INS에서 3축의 위치, 속도 오차와 가속도계 z축 바이어스 오차를 보정하는 선택적 보정 방법을 이용한다. 이때 항체가 북쪽으로 등속 직선 운동을 하지 않더라도, 해당 동작 상태에 따라 가관측한 상태변수를 보정하면 된다.

IV. 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 조건

제안한 직선형 프로파일 기반 TRN/INS 결합항법 알고리즘의 성능 향상을 보이기 위하여 직선형 프로파일 기반 TRN 알고리즘을 단독으로 사용하는 경우와 TRN 위치해의 조건적 갱신 알고리즘을 적용한 경우 그리고 TRN/INS 결합항법 알고리즘의 항법 성능 결과를 비교하고자 다음과 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 항체는 고도 5 km에서 북쪽 방향으로 92.7 m/s 속도로 등속 직선 운동한다고 가정하였다. 레이더고도계의 샘플링 시간 간격은 1초, TRN 항법해 갱신 간격은 10초로 결정하였다. 즉, 10개의 지형고도를 측정할 때마다 항체의 위치를 보정하는 일괄처리방식이며, 유사성 판별 알고리즘으로는 MAD를 사용하였다. 또한 항체에 탑재된 지형고도 DB는 2절에서 제시한 것과 같다. 탑재된 IMU는 표 1에서와 같은 전술급이며, 설정한 궤적에 따라 관성센서 데이터를 모의로 생성하였다. 기압고도계, 레이더고도계, DB 오차는 각각 5 m 표준편차를 갖는 영평균 백색 가우시안 잡음으로 선정하였다.

직선형 프로파일 기반 TRN 알고리즘을 단독으로 사용하는 경우와 TRN 위치해의 조건적 갱신 알고리즘을 적용한 경우에 대하여 비행 지역을 변경해가며 51회 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 수행하였다. 매회 비행 시간은 총 1200초이며 위도 36 deg에서 북쪽 방향으로 1 deg 이동한 것이다. 비행 시작 위치는 (127.5 deg, 36 deg) 부터 (128.5 deg, 36

그림 8. 직선형 프로파일 기반 TRN/INS 결합항법 알고리즘.

Fig. 8. Linear profile-based TRN/INS integrated navigation algorithm.

deg)로 0.02 deg씩 동쪽으로 이동하였다. 이때 INS 초기오차에 위에서 제시한 센서오차와 경도 방향 위치오차 100 m를 포함하였다.

직선형 프로파일 기반 TRN 조건적 갱신 알고리즘을 적용하더라도 초기 INS 오차에 따라서 위치오차가 누적된다면 3절에서 언급한 것처럼 시간이 지남에 따라 측정 프로파일과 지형 DB로부터 획득한 후보 프로파일들의 지리적 상관관계가 현저히 낮아지고 오보정 횟수가 증가하면서 오차가 크게 발생할 수 있다. 칼만필터를 이용하여 TRN과 INS를 결합하여 INS 오차를 보정한 후 오차가 감소하는 것을 보이기 위해 위와 마찬가지로 51회 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 다만 위의 실험조건에서 INS 초기오차와 센서오차 이외에 속도와 자세 초기오차를 다음 식 (7)과 같이 가정하였다. 그리고, 칼만필터의 초기오차 공분산, 공정잡음 공분산, 측정잡음 공분산은 각각 식 (8), (9), (10)과 같이 설정하였다.

$$\begin{bmatrix} \delta V \\ \delta \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1m/s & 1m/s & 1m/s \\ 0.01deg & 0.01deg & 0.05deg \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P(0) = & diag \left[\left(\frac{100}{(R_0 + h) \cos L} m \right)^2, \left(\frac{100}{(R_0 + h)} m \right)^2, (100m)^2, \right. \\ & (1m/s)^2, (1m/s)^2, (1m/s)^2, \\ & (0.01deg)^2, (0.01deg)^2, (0.05deg)^2, \\ & (25\mu g)^2, (25\mu g)^2, (25\mu g)^2, \\ & \left. (0.003deg/hr)^2, (0.003deg/hr)^2, (0.003deg/hr)^2 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$Q = G \bar{Q} G^T \quad (9)$$

여기서

$$G = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi & -\sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{0}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \phi, \theta, \psi$$

은 각각 항체의 롤, 피치, 요각이고,

$$\bar{Q} = diag \left[(25\mu g)^2, (25\mu g)^2, (25\mu g)^2, \right. \\ \left. (0.003deg/hr)^2, (0.003deg/hr)^2, (0.003deg/hr)^2 \right]$$

이다.

$$R = diag \left[\left(\frac{1}{(R_0 + h) \cos L} m \right)^2, \left(\frac{1}{(R_0 + h)} m \right)^2, (10m)^2 \right] \quad (10)$$

표 1. IMU 센서 오차 사양.

Table 1. IMU sensor error specification.

센서	오차	사양
가속도계	바이어스	25 μg
	*VRW	5 $\mu g/hr$
자이로	바이어스	0.003 deg/hr
	*ARW	0.0015 deg/ $\sqrt{hr}$

*VRW: Velocity Random Walk

*ARW: Angular Random Walk

표 2. 직선형 프로파일 기반 TRN 알고리즘 수평 거리오차.

Table 2. Horizontal distance errors of linear profile-based TRN Algorithm.

	기준	$\sigma_T \geq 33$	$\sigma_Z \geq 19$
평균(m)	3212	13.71	12.15
표준편차(m)	6339	38.74	37.29

2. 직선형 프로파일 기반 TRN 조건적 갱신 기법 결과

직선형 프로파일 기반 TRN 알고리즘을 단독으로 사용하는 경우와 TRN 위치해의 조건적 갱신 알고리즘을 적용한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 위 표 2에 나타내었다. 표 2에서 볼 수 있듯이 기존의 직선형 프로파일 기반 TRN의 위치해를 지형 험준도에 상관없이 이용하는 경우보다 지형 험준도를 이용하여 조건적으로 위치해를 갱신하게 되면 오차가 크게 줄어든다. 이는 2절에서 설명한 것처럼 σ_T 나 σ_Z 와 같은 지형 험준도 지수값이 높을수록 TRN 항법해의 위치오차가 줄어들기 때문이다. 또한 지형 험준도 지수 중에서도 σ_T 를 이용하는 경우보다 σ_Z 를 이용하는 경우가 미약하지만 오차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 σ_T 를 이용한 것보다 σ_Z 를 이용할 경우 σ_m 를 넘는 지형의 비율이 0.31 % 높은 것에서 알 수 있듯이 항법 초기에 운항한 지형에서 지형 험준도 지수로 σ_T 를 이용할 경우에는 갱신 조건을 만족하지 못해 INS 순수항법을 수행했지만, σ_Z 를 이용할 경우에는 갱신 조건을 만족하였기 때문에 INS 순수항법을 수행하지 않고, TRN 항법해로 위치해를 보정하였기 때문이다.

시뮬레이션 결과를 자세히 살펴보기 위해 시작위치(128.4deg, 36deg)인 지점에서 120초간 진행한 일부 결과를 그

그림 9. 기존 직선형 프로파일 기반 TRN 결과.

Fig. 9. Result of conventional linear profile-based TRN algorithm.

림 9, 10, 11에 나타내었다. 그림 9는 기존의 지형 험준도를 적용하지 않은 결과로 오보정이 발생하여 항법오차의 편차가 매 갱신시점마다 큰 것을 볼 수 있다. 다음 그림 10은 지형 험준도 지수로 σ_T 를 이용한 것으로 초기 80초까지는 갱신 기준을 만족하지 못하여 순수항법으로 갱신하다가 90초 시점에 정보정을 수행한 것이며 그림 11은 σ_Z 를 이용한 것으로 첫 갱신 시점부터 정보정을 한 것을 볼 수 있다.

그림 10. 직선형 프로파일 기반 TRN에서 지형 험준도 지수 σ_T 를 이용한 조건적 갱신 기법 결과.

Fig. 10. Result of conditional linear profile-based TRN algorithm using terrain roughness σ_T .

그림 11. 직선형 프로파일 기반 TRN에서 지형 험준도 지수 σ_Z 를 이용한 조건적 갱신 기법 결과.

Fig. 11. Result of conditional linear profile-based TRN algorithm using terrain roughness σ_Z .

표 3. 직선형 프로파일 기반 TRN에서 지형 험준도 지수 σ_Z 를 이용한 조건적 갱신 알고리즘 수행 거리오차.

Table 3. Horizontal distance errors of conditional linear profile-based TRN algorithm using terrain roughness σ_Z .

	$\sigma_Z \geq 17$	$\sigma_Z \geq 19$	$\sigma_Z \geq 21$
평균(m)	55.45	12.15	12.81
표준편차(m)	369.85	37.29	28.62

표 3은 지형 험준도 지수 σ_Z 를 이용하여 TRN 위치해의 조건적 갱신 알고리즘을 적용할 때 앞서 계산된 문턱치 전후의 값을 적용하여 몬테카를로 시뮬레이션 수행 결과를 나타낸 것이다. 지형 험준도 지수 σ_Z 값이 17 이상일 때 갱신을 하게 되면 오보정이 포함되어 위치오차가 증가하고, σ_Z 값이 21 이상일 때 갱신을 수행하게 되면, σ_Z 값이 19~21 사이일 때 보정을 하지 않고 INS 순수항법만 수행하기 때문에 거리 오차 평균이 약간 증가하는 것을 볼 수 있다. 다만 INS 순수항법의 횟수가 증가하여 표준편차는 줄어들었다.

3. 직선형 프로파일 기반 TRN/INS 결합항법 결과

지형 험준도 지수 σ_Z 를 이용한 직선형 프로파일 기반 TRN 조건적 갱신 알고리즘과 TRN/INS 결합항법 알고리즘 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4에서 볼 수 있듯이 직선형 프로파일 기반 TRN 조건적 갱신 알고리즘만 수행한 결과보다 INS와 칼만필터로 결합한 경우의 성능이 우수함을 알 수 있다. 이는 그림 12, 13에서 보듯이 조건적 갱신만 적용하는 경우 조건을 만족하지 않게 되면, INS 순수항법으로만 위치해를 갱신하기 때문에 시간이 증가하게 되면 INS 오차에 의해 그대로 조건적 갱신 알고리즘의 항법 오차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면에 칼만필터를 이용하게 되면 그림 14, 15에서 보듯이 속도오차와, 가속도계 z축 바이어스 오차가 보정되기 때문에 시간이 지나더라도 INS 위치오차가 크게 증가하지 않기 때문에 σ_Z 가 조건을 만족하지 못해 평평한 지역에서 INS 순수항법만으로 위치를 갱신하더라도 오차가 크게 발생하지 않는다.

표 4. 직선형 프로파일 기반 TRN/INS 알고리즘 수행 거리 오차.

Table 4. Horizontal distance errors of linear profile-based TRN/INS integrated algorithm.

	TRN	TRN/INS
평균(m)	60.71	45.52
표준편차(m)	95.86	37.26

그림 12. 평탄한 지역을 비행하는 제곱에서 TRN 결과.

Fig. 12. Result of conditional linear profile-based TRN algorithm on a flat terrain.

그림 13. 평탄한 지역을 비행하는 궤적에서 TRN/INS 결과.
Fig. 13. Result of conditional linear profile-based TRN/INS integrated algorithm on a flat terrain.

그림 14. 직선형 프로파일 기반 TRN/INS의 가속도 바이어스 오차 추정 결과.
Fig. 14. Estimation result of accelerometer bias of linear profile-based TRN/INS algorithm.

그림 15. 직선형 프로파일 기반 TRN/INS의 속도오차 추정 결과.
Fig. 15. Estimation result of velocity error of linear profile-based TRN/INS algorithm.

V. 결론

본 논문에서는 직선형 프로파일 기반 TRN 알고리즘을 소개하고 지형의 유사성에 따라 오차가 커지는 단점을 보완하기 위하여 지형 험준도 지수를 이용한 조건적 TRN 위치해 갱신 기법을 제시하였다. 이때 기존에 알려진 지형 험준도 지수를 실제 직선형 프로파일 기반 TRN에 이용할 수 있도록 기준치를 설정하는 방법과 항법 성능에 더 비례하는 험준도 지수를 판별하는 기법을 제안하고 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

또한 시간에 따라 누적되는 INS의 오차를 효과적으로 보정하기 위하여 지형 험준도 σ_z 크기에 따라 조건적으로 갱신된 TRN과 INS의 위치해를 칼만필터의 측정치로 이용하여 결합하는 방법을 제안하였으며, 이때 가관측한 상태변수를 선택적으로 갱신하는 방법을 사용하였다. 시뮬레이션을 통한 알고리즘의 성능 검증 결과 시간이 지나더라도 INS 위치오차가 크게 증가하지 않기 때문에 σ_z 가 조건을 만족하지 못한 평탄한 지역에서도 INS 순수항법만으로 위치를 갱신하더라도 결합하지 않은 경우에 비해 오차가 크게 발생하지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] J. A. Richeson, "Gravity gradiometer aided inertial navigation within Non-GNSS environments," Ph.D. thesis, University of Maryland, 2008.
- [2] A. K. Vadlanmani, "Performance improvement methods for terrain database integrity monitors and terrain referenced navigation," M. S. thesis, Ohio University, 2004.
- [3] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech house, 2008.
- [4] C. Jekeli, "Precision free-inertial navigation with gravity compensation by an onboard gradiometer," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 29, no. 3, pp. 704-713, May-June 2006.
- [5] G. W. Biedermann, "Gravity Tests, Differential Accelerometer and Interleaved Clocks with Cold Atom Interferometers," Ph.D. thesis, Stanford University, Nov. 2007.
- [6] J. Kwon and C. Jekeli, "Gravity requirements for compensation of ultra-precise inertial navigation," *The Journal of Navigation*, no. 58, pp. 479-492, 2005.
- [7] F. Goldenberg, "Geomagnetic navigation beyond the magnetic compass," *PLANS*, San Diego, California, pp. 684-694, Apr. 2006.
- [8] Y. M. Yoo, W. H. Lee, S. M. Lee, C. G. Park, and D. H. Lee, "Performance analysis of TERCOM system due to velocity error," *Proceeding of KSAS Autumn Annual Meeting (in Korean)*, pp. 1069-1074, Pyeongchang Gangwon, Nov. 2011.
- [9] 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," *PLANS, Myrtle Beach, South Carolina*, pp. 1082-1087, Apr. 2012.
- [10] A. J. Henley, "Terrain aided navigation - current status, techniques for flat terrain and reference data requirements," *PLANS*, Las Vegas, Nevada, pp. 608-615, Mar. 1990.
- [11] V. Ekütekin, "Navigation and control studies on cruise missiles," Ph.D. dissertation, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2007.

- [12] G. M. Siouris, *Missile Guidance and Control Systems*, Springer-Verlag, New York, 2003.
- [13] S. M. Lee, Y. M. Yoo, W. H. Lee, D. H. Lee, and C. G. Park, "Performance improvement of TRN batch processing using the slope profile," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 4, pp. 384-390, 2012.
- [14] Y. M. Yoo, J. G. Park, D. H. Lee, and C. G. Park, "A theoretical approach to observability analysis of the SDINS/GPS in maneuvering with horizontal constant," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 1-10, 2012.
- [15] I. Y. Bar-Itzhack and N. Bermoant, "Control theoretic approach to inertial navigation systems," *Journal of Guidance*, vol. 1, no. 2, pp. 237-245, 1998.
- [16] G. H. Won, T. L. Song, D. S. Kim, I. H. Seo, and G. H. Hwang, "A study of observability analysis and data fusion for bias estimation in a multi-radar system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 8, pp. 783-789, 2012.

유영민

2005년 광운대학교 정보제어공학과 졸업. 2005년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석박사과정 재학중. 관심분야는 항법, Kalman filter, nonlinear filter, sensor fusion, 데이터베이스 기반 복합항법시스템.

이선민

2010년 세종대학교 항공우주공학과 졸업. 2010년~2012년 서울대학교 대학원 기계항공공학부 졸업(공학석사). 관심분야는 항법 및 데이터베이스 기반 복합항법시스템.

권재현

1992년 서울대학교 지구과학교육과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(교육학석사). 2000년 오하이오주립대학교 졸업(이학박사). 2000년~2001년 오하이오주립대학교 Post Doc. 2002년~2004년 세종대학교 지구정보공학과 조교수. 2005년~현재 서울시립대학교 부교수/교수. 관심분야는 정밀위성측위 알고리즘, 측위/자세 센서융합, 정밀 항법, 지각 및 해수면 변화분석.

유명종

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

박찬국

1985년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년 서울대학교 제어계측신기술 연구센터 Post Doc. 1994년~2002년 광운대학교 정보제어공학과 조교수/부교수.

1998년 미국 UCLA 기계항공공학과 방문연구원. 1994년~2003년 서울대학교 자동제어특화연구센터 책임연구원. 2003년~현재 서울대학교 기계항공공학부 부교수/교수. 관심분야는 INS/GPS 결합 알고리즘, MEMS IMU 응용 시스템 개발, 영상항법시스템, USN을 이용한 Ubiquitous Positioning, 필터링 기법, FDIR 시스템.