

기울기 프로파일을 이용한 일괄처리 방식 지형참조항법의 성능 개선

Performance Improvement of TRN Batch Processing Using the Slope Profile

이 선 민, 유 영 민, 이 원 희, 이 달 호, 박 찬 국*
(Sun Min Lee¹, Young Min Yoo¹, Won Hee Lee¹, Dal Ho Lee², and Chan Gook Park¹)

¹Seoul National University

²Gachon University

Abstract: In this paper, we analyzed the navigation error of TERCOM (TErrain COntour Matching), which is TRN (Terrain Referenced Navigation) batch processing, caused by scale factor error of radar altimeter and proved the possibility of false position fix when we use the TERCOM's feature matching algorithm. Based on these, we proposed the new TRN batch processing algorithm using the slope measurements of terrain. The proposed technique measures on periodic changes in the slope of the terrain elevation profile, and these measurements are used in the feature matching algorithm. By using the slope of terrain data, the impact of scale factor errors can be compensated. By simulation, we verified improved outcome using this approach compared to the result using the conventional method.

Keywords: TRN, TERCOM, MAD, DTED, INS, batch processing

I. 서론

관성항법시스템(INS: Inertial Navigation System)은 외부장치의 도움 없이 독립적으로 운용이 가능한 항법시스템으로써, 다양한 항법응용분야에서 기본적인 요소로 사용되고 있다. 관성항법시스템에서 항법해를 계산하는 방식은 이전 위치로부터 현재 위치를 추측하는 추측항법(dead reckoning) 방식으로 가속도계와 자이로 출력을 적분하여 위치를 찾는 방법이다[1]. 그렇기 때문에 센서의 잡음과 바이어스, 항법해의 초기 오차의 영향에 의해 시간에 따라 항법오차가 급격히 증가한다는 단점이 있다[2]. 이와 같은 단점을 극복하기 위해 사용되는 시스템 중에 대표적인 것이 위치결정 방식의 위성항법시스템(GPS: Global Positioning System)이다. GPS는 다수의 인공위성을 활용하여 항체의 항법정보를 획득하는 시스템으로 항법오차가 발산하지 않고 일정범위 안에서 결정되는 것이 특징이나, 갱신률이 낮으며 독립적인 운용이 불가능하다는 단점이 있다[3]. 그래서 시스템의 상호보완적인 관계를 바탕으로 결합된 형태의 항법시스템인 INS/GPS 통합항법이 개발되었고 많은 곳에서 활용되고 있

다. 하지만 군용 항법시스템에서는 GPS의 단점으로 인하여 INS/GPS 통합항법이 운영되는데 제약적인 환경이 존재하게 된다. 이는 GPS가 적의 의도적인 간섭이나 신호교란에 취약하다는 단점 때문이다[4]. 그래서 군용 항법시스템에서는 독립적으로 운용될 수 있는 대체항법의 필요성이 대두되었고, 대표적으로 활용되는 것이 지형참조항법(TRN: Terrain Referenced Navigation)으로 여러 선진국에서는 이미 많은 연구를 수행하고 있다.

TRN은 위치결정방식의 한 종류로 사람이 위치한 곳 주변의 지형물과 지도에 나타난 대표적인 지형물을 비교하여 위치나 방향을 추정하는 것과 같이 항체가 위치한 곳에서 지형 고도값을 측정하여 기 구축된 데이터베이스(DB: Data Base)로부터 추정한 위치에서의 지형 고도값과 비교하여 위치를 갱신하는 방식이다. TRN은 1950년대 초반부터 연구가 시작되었으며, 크게 일괄처리방식과 순차처리방식, 그리고 혼합방식으로 나눌 수 있다. 측정된 고도값을 일정주기 동안 수집하여 처리하는 일괄처리방식의 대표적인 알고리즘으로는 TERCOM을 들 수 있으며, 본 논문에서는 TERCOM의 성능 향상 방법을 제안하고자 한다.

일반적으로 알려진 바와 같이 TERCOM은 항체가 실제 운항하는 궤적에서 측정된 지형고도 샘플들을 위치해 갱신 간격에 해당하는 시간동안 저장한 후, 항체에 탑재된 DB 정보와의 MAD (Mean Absolute Difference)나 MSD (Mean Squared Difference)와 같은 유사성 판별 알고리즘을 거쳐 자신의 위치를 갱신하게 된다[5].

본 논문에서는 TERCOM의 항법해 결과에 영향을 미칠 수 있는 오차요소 중 고도계를 이용하여 지형고도를 측정

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 10. 21., 수정: 2011. 12. 7., 채택확정: 2012. 1. 31.
이선민, 유영민, 이원희, 박찬국: 서울대학교 기계항공공학부/자동화시스템공동연구소(ASRI)
(sunmin2@snu.ac.kr/ym0903@snu.ac.kr/clever212@snu.ac.kr/chanpark@snu.ac.kr)

이달호: 가천대학교 전자공학과(dhlee@gachon.ac.kr)

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

할 때 발생하게 되는 센서오차에 의한 영향에 주목하였고, 발생된 오차에 의하여 알고리즘이 어떤 영향을 받게 되는지 분석하였다. 지형고도를 측정하면서 발생하는 오차는 기압고도계와 레이더고도계의 영향을 모두 받게 되지만, 본 논문에서는 가장 큰 영향을 미치는 레이더고도계의 환산계수 오차에 의한 영향에 대해 살펴보았다. 그리고 지형고도 샘플들이 아닌 이웃한 지형고도 샘플의 기울기 값들을 MAD 알고리즘에 적용하여 레이더고도계 환산계수 오차에 의한 영향을 감소시킬 수 있는 알고리즘을 제시한다. 마지막으로, TERCOM은 많은 분야에서 실용화가 되었지만 주로 군용에서 사용되어 온 항법시스템이기 때문에 자세한 구동원리나 운용방법, 성능 등은 잘 알려져 있지 않은 실정이다. 그리하여 문헌상에 알려진 정보를 기반으로 기존 TERCOM과 최대한 유사한 일괄처리방식의 알고리즘 시뮬레이션 프로그램을 구현하였으며, 이를 바탕으로 기존 TERCOM의 항법성능과 본 논문에서 새롭게 제안한 지형고도 샘플의 기울기를 이용한 TERCOM 알고리즘의 항법성능을 비교 분석하였다.

II. TERCOM 알고리즘

1. 기본적인 TERCOM 알고리즘

TERCOM은 대표적인 일괄처리방식의 알고리즘으로 전체적인 시스템 구성은 그림 1과 같다. TERCOM은 항체가 측정된 지형고도 정보와 DB로부터 추출한 지형고도 정보를 비교함으로써 자신의 위치를 갱신한다. 항체가 지형고도를 측정하는 방법은 기압고도계와 INS로부터 얻어진 해수면으로부터의 고도와 레이더고도계가 측정된 항체에서 지면까지의 거리의 차를 통하여 지형고도를 측정하게 된다. 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 지형고도값은 지형고도를 샘플링하는 간격동안 이동한 항체의 거리만큼의 간격을 가지고 프로파일을 구성하게 된다. 이를 측정 프로파일이라고 부른다.

항체가 갱신주기 동안에 측정된 지형고도 프로파일은 항체에 탑재된 지형고도 DB와 유사성 판별 알고리즘을 거쳐 항체의 위치를 계산하게 되고, 계산된 값을 통해 항체의 위치를 보정하게 된다. DB로부터 항체의 위치를 추정하기 위해서 전체적인 DB를 이용하는 것이 아니라, 그림 2에서

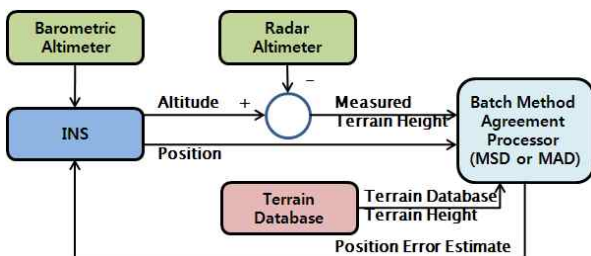


그림 1. TERCOM의 개략도.
Fig. 1. Block diagram of TERCOM.

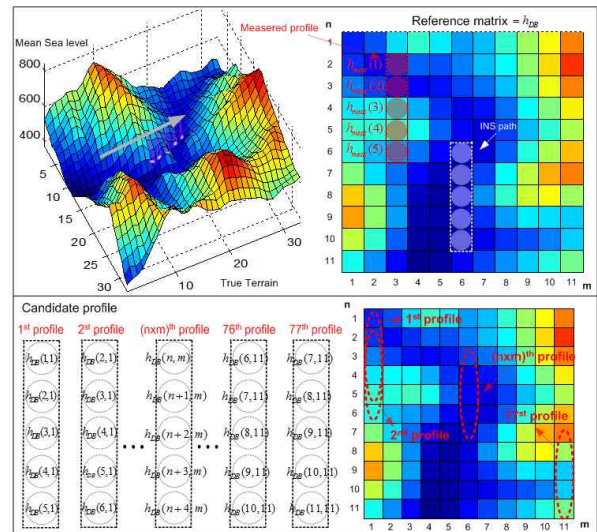


그림 2. 측정 및 후보 프로파일의 생성 예.
Fig. 2. Example of generate candidate and measured profile.

를 통해 추정된 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[5]. 후보 프로파일의 크기 및 샘플링 간격은 측정 프로파일의 샘플링 간격 및 길이와 같다.

지형고도 후보 프로파일은 기준행렬에서 각 지형고도값의 위치를 현재 항체의 위치라고 가정할 수 있는 모든 지점의 위치로부터 측정된 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.

2. 유사성 판별 알고리즘

TERCOM에서 사용되는 대표적인 유사성 판별 알고리즘으로는 식 (1), (2)에서와 같이 MAD와 MSD가 있다.

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

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

$$MSD_{n,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{h_{meas}(i) - h_{DB}(n+i-1, m)\}^2 \quad (2)$$

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

여기서 $MAD_{n,m}$, $MSD_{n,m}$ 는 각각 그림 2에서 나타낸 기준행렬(reference matrix)의 원소 (n, m) 을 끝점으로 하는 후보 프로파일과 기준 프로파일의 MAD, MSD 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 순

번에도 해당된다. N 은 한 프로파일에서 측정된 지형고도 데이터의 개수를 나타내며 TERCOM의 갱신주기와도 연관된다.

두 알고리즘의 차이는 명칭에 잘 나타나있듯이 MAD는 측정 프로파일의 각 측정치와 후보 프로파일 각각의 지형고도값의 차이에 절대값을 취한 후 평균값을 구하는 것이고, MSD는 차이 값에 제곱을 취한 후 평균값을 구한다. TERCOM은 다수의 후보 프로파일에 대하여 유사성을 확인하는 절차가 필요하기 때문에 간단한 판별 알고리즘을 적용하는 것이 연산량을 줄일 수 있을 것이라 생각되며, MAD나 MSD 알고리즘과 같은 방식이 적용하기에 간단하고 연산과정에서 큰 부담이 없어 TERCOM에 적합한 알고리즘이라 볼 수 있다. 그리고 공통적으로 결과값이 0에 가까울수록 실제 항체가 운항한 궤적인 참인 프로파일을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 가장 작은 MAD나 MSD 값을 갖는 후보 프로파일의 최종 위치인 P_{MAD} , P_{MSD} 으로 항체의 위치를 갱신한다. 두 알고리즘의 결과는 동일한 환경에 대하여 시뮬레이션을 적용했을 경우, 항법해 보정 결과는 크게 차이가 나지 않으며 많은 후보 프로파일에 대해 유사성 판별 알고리즘을 계산하기 때문에 연산량이 상대적으로 적은 MAD를 주로 사용하게 된다[6].

III. 레이더고도계 오차에 의한 오보정

1. 레이더고도계의 환산계수오차

TERCOM과 같이 지구물리정보 DB를 이용하는 DB 기반 복합 항법 시스템에서는 필수적으로 참조하고자 하는 지구물리정보를 측정하는 센서가 탑재된다. TERCOM에서는 지형정보를 참조하며 그림 1에서 나타냈듯이 지형고도를 측정하기 위해서 기압고도계와 레이더고도계가 사용된다. 그러므로 알고리즘의 신뢰성도 중요하지만 탑재된 고도계의 정확도 또한 TERCOM의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있는 것을 예상할 수 있다. 일반적으로 지형고도를 측정할 때 사용되는 전파고도계 또는 레이더고도계에는 랜덤오차와 환산계수오차가 존재하며, 그 크기는 랜덤오차와 같은 경우에는 약 2ft, 환산계수오차는 1~3 %의 오차가 존재하는 것으로 알려져 있다[7]. 고도계에 의해 발생하는 지형고도 오차에 의해 항체가 실제 운항한 즉, 참인 후보 프로파일이나 잘못된 후보 프로파일을 선정하게 되는 오보정이 발생할 수 있다. 랜덤오차와 같은 경우에는 그 크기가 작아 지형을 판별할 때 오보정을 일으키는 가능성이 낮지만 환산계수오차는 고도에 따라 달라지며 그 크기 또한 랜덤오차에 비해 상대적으로 크게 나타나서 TERCOM의 성능을 떨어뜨리는 요소로 작용된다. 본 절에서는 레이더고도계의 환산계수오차가 MAD 결과값에 미치는 영향을 분석해 보고자 한다.

2. MAD 계산값 오차 분석

지형고도의 측정값은 지형의 표고(orthometric height)를 의미하며, 기압고도계 측정치에서 레이더고도계 측정치를 빼서 계산할 수 있으며, 고도계 오차를 고려하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 레이더고도계의 환산계수를 제외한 오차성분들을 모두 무시하였으며, 기압고도계의 오차

성분 또한 모두 무시하였다.

$$h_{meas} = \bar{h}_{baro} - (\bar{h}_{radar} + \delta h_{radar}) \quad (3)$$

여기서 h_{meas} 는 지형고도의 측정값이며 \bar{h}_{baro} 는 평균해수면으로부터 항체까지의 거리 즉 항체의 표고의 참 값이고, \bar{h}_{radar} 는 항체에 수직인 아래방향으로 항체와 지형까지의 최단거리 즉, 항체의 표고에서 지형의 표고를 뺀 참 값이다. 그리고 δh_{radar} 는 레이더고도계 환산계수오차에 의한 레이더고도계 오차를 나타내며 식 (4)와 같다.

$$\delta h_{radar} = \delta S_r \cdot \bar{h}_{radar} = \delta S_r \cdot (\bar{h}_{baro} - \bar{h}_{DB}) \quad (4)$$

여기서 δS_r 은 환산계수오차를 말하며, \bar{h}_{DB} 는 DB로부터 추출한 지형의 표고의 참값이다.

환산계수오차에 의해 발생한 δh_{radar} 는 유사성 판별 알고리즘을 계산하는 과정에서 MAD 잔여값에 남겨져 오보정을 발생시키게 된다. 그 영향을 유사성 판별 알고리즘 중 MAD에서 수식적인 전개를 통하여 살펴보고자 한다. MAD 알고리즘인 식 (1)에 오차가 포함된 측정 프로파일의 고도값인 식 (3)를 대입하면 아래와 같다.

$$MAD_{n,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \bar{h}_{baro}(i) - (\bar{h}_{radar}(i) + \delta h_{radar}(i)) - h_{DB}(n+i,m) \right| \quad (5)$$

$$\begin{aligned} h_{DB}(n+i,m) &= \bar{h}_{DB}(i) + \delta h_{DB}(n+i,m) \\ &= \bar{h}_{baro}(i) - \bar{h}_{radar}(i) + \delta h_{DB}(n+i,m) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} MAD_{n,m} &= \frac{1}{2} \left\{ \left| \bar{h}_{baro}(1) - (\bar{h}_{radar}(1) + \delta h_{radar}(1)) - h_{DB}(n+1,m) \right| \right. \\ &\quad \left. + \left| \bar{h}_{baro}(2) - (\bar{h}_{radar}(2) + \delta h_{radar}(2)) - h_{DB}(n+2,m) \right| \right\} \\ &= \frac{|\delta h_{radar}(2) - \delta h_{DB}(n+1,m)| + |\delta h_{radar}(2) - \delta h_{DB}(n+2,m)|}{2} \\ &= \frac{|\delta h_{radar}(1) + \delta h_{DB}(n+1,m)| + |\delta h_{radar}(2) + \delta h_{DB}(n+2,m)|}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $h_{DB}(n+i,m)$ 는 항체에 탑재된 지형고도 DB에서 (n,m) 을 끝점으로 가지는 후보 프로파일의 i 번째 고도값을 의미하며, 식 (6)과 같이 기압고도계와 레이더고도계의 값이 포함된 식으로 표현할 수 있다. 식 (6)에 나타난 $\bar{h}_{DB}(i)$ 는 후보 프로파일 중 항체가 측정된 프로파일과 일치하는 참인 프로파일의 i 번째 측정값에 해당한다. 이 값에 더해지는 $\delta h_{DB}(n+i,m)$ 는 참인 프로파일과의 연산이 아닐 때 남게 되는 DB값과의 차이 값을 의미한다.

측정치 개수가 2개일 때를 가정하고, 식 (5)를 다시 전개하면 식 (7)과 같이 정리할 수 있으며, 이를 통해서 환산계수오차가 MAD 알고리즘에 미치는 영향을 살펴볼 수 있다. 만약 식 (5)에서 레이더고도계 환산계수오차가 존재하지 않는다고 가정하고, 참인 프로파일에 대한 MAD 연산을 하게 되면 $\delta h_{radar}(1)$ 과 $\delta h_{DB}(n+1,m)$ 는 0 값이 되고, 두 번

째 측정치에 대해서도 동일한 결과가 나오게 되어 MAD 결과값에 오차가 포함되지 않는다. 하지만 참인 프로파일이라 하더라도 환산계수오차가 존재하게 되면 절대값 안의 $\delta h_{DB}(n+i, m)$ 값은 0이 되지만 $\delta h_{radar}(i)$ 는 환산계수오차값으로 남겨지게 된다. 두 번의 고도 측정을 통하여 포함된 오차가 절대값에 의해 그대로 더해지게 되어 MAD 결과에 잔여값으로 남겨지게 된다. 정리하면 오차가 존재하는 경우 MAD 잔여값은 최소한 각 측정치의 레이더고도계 오차들의 총합에 해당하는 값을 가지게 된다.

오차가 포함될 때 오보정이 발생하는 이유는 참값이 아닌 다른 후보 프로파일에 대해 계산하는 경우, 측정된 프로파일과의 고도차에 의해서 $\delta h_{DB}(n+i, m)$ 가 존재하게 되고 환산계수오차와 더해진 결과가 된다. 여기서 $\delta h_{DB}(n+i, m)$ 는 후보 프로파일에 따라 달라지게 되며 환산계수오차와 반대가 되는 부호가 나타나는 경우가 생기게 될 때 참인 프로파일을 선택하는 경우보다 더 낮은 MAD 값을 가질 수도 있게 된다. MAD 알고리즘은 낮은 MAD 값의 경우를 참이라고 판단하므로 결국 오보정이 발생하게 된다.

식 (7)을 통하여 측정치가 2개 이상인 일반적인 상황에서의 결과를 유추할 수 있으며, 측정치의 개수에 따라 개별적으로 더해진 후 평균을 구하는 형태가 된다.

IV. 기울기 프로파일을 이용한 항법 성능 개선

1. 성능 향상을 위한 기울기 프로파일 생성 조건

레이더 고도계의 환산계수오차에 의한 지형고도 측정오차가 측정하는 크기에 따라 상대적인 값을 가지므로 기울기 값을 이용하는 방식이 유효한 효과를 나타내기 위해서는 다음 그림 3, 4와 같은 가정을 전제로 한다.

첫 번째, 지형고도 기울기 프로파일을 유효하게 적용될 수 있는 경우는 항체가 지형과의 높이를 일정하게 유지하며 운항하는 경우로 그림 3에 표현하였다. 이렇게 일정한 높이를 유지하며 비행하는 경우에는 레이더고도계의 측정치가 일정하게 되어 바이어스처럼 같은 크기의 고도오차를 가지게 되며, 본 논문에서 제시한 기울기 프로파일 생성방식을 통하여 오차를 보정할 수 있는 조건을 만족하게 된다.

두 번째, 각 샘플링 시간에서 측정된 지형고도의 높이 차이가 존재하더라도, 현재 항체의 고도가 충분히 높은 경우이다. 이 경우 지형고도 높이 차이에 의한 오차는 레이더 고도계 환산계수오차에 의한 지형고도 오차의 크기에 비하여 무시할 수 있을 정도의 작은 크기를 가지기 때문에 기울기 프로파일 방식을 적용할 수 있는 조건을 충족하게 된다. 예를 들어, 그림 4와 같이 항체가 5 km 상공을 비행하고 있을 때 발생하는 환산계수오차의 차이를 계산해보면 식 (8)과 같은 결과가 나온다. 차이 값의 크기는 랜덤오차의 크기보다도 작은 값을 가지며, 측정하는 지형고도값의 크기에 비해서 무시할 수 있는 정도의 값을 가진다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \delta h_{radar}(1) - \delta h_{radar}(2) \\ &= 50 - 49.9 \\ &= 0.1m \end{aligned} \tag{8}$$

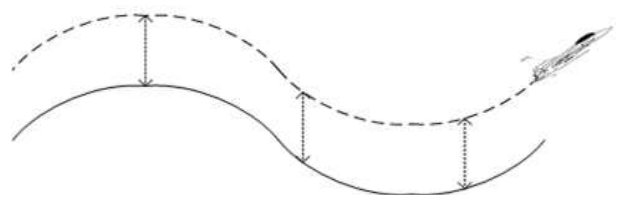


그림 3. 항체가 지형과의 간격을 일정하게 유지하는 경우.

Fig. 3. Aircraft keep the distance from terrain.

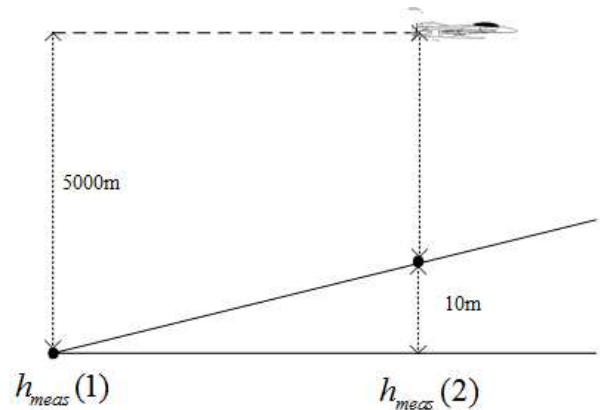


그림 4. 비행고도가 높아 측정오차의 차이를 무시할 수 있는 경우.

Fig. 4. Ignore the measurement difference due to the high altitude flight.

2. 지형고도 기울기를 이용한 프로파일 생성

레이더 고도계의 환산계수오차에 의해 발생하는 오차를 상쇄시키기 위하여 본 논문에서 제안하고자 하는 방식은 단순히 측정된 고도값을 이용하는 것이 아니라 지형의 기울기 값을 계산하여 유사성 판별 알고리즘에 적용하는 것이다. 본 논문에서 적용한 기울기 프로파일 방식은 식 (9)와 같이 측정간격 L 에 대한 고도 변화 값을 계산한 것이다. 측정 프로파일과 비교하기 위해서는 DB로부터 생성하는 후보 프로파일 또한 같은 방식으로 기울기 값을 이용하여 나타내었으며, 각각 $h_{meas}^{slope}(n+i, m)$ 와 $h_{DB}^{slope}(n+i, m)$ 로 표현하였다.

$$\begin{aligned} h_{meas}^{slope}(n+i, m) &= \frac{1}{L} \left[\left\{ \bar{h}_{baro}(i+1) - \left(\bar{h}_{radar}(i+1) + \delta h_{radar}(i+1) \right) \right\} \right. \\ &\quad \left. - \left\{ \bar{h}_{baro}(i) - \left(\bar{h}_{radar}(i) + \delta h_{radar}(i) \right) \right\} \right] \tag{9} \\ h_{DB}^{slope}(n+i, m) &= \frac{h_{DB}(n+i+1, m) - h_{DB}(n+i, m)}{L} \end{aligned}$$

식 (9)에서 정의한 기울기 프로파일을 MAD 알고리즘에 적용하면 식 (10)와 같이 표현되며, 기존 방식에 대한 이론적 분석과 마찬가지로 측정치가 2개가 존재할 때의 MAD 연산 값을 계산해보면 식 (11)과 같은 결과가 나타난다.

$$MAD_{n, m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| h_{meas}^{slope}(i) - h_{DB}^{slope}(n+i-1, m) \right| \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 MAD_{n,m} &= \frac{1}{L} \left[\left| \left(\bar{h}_{baro}(2) - \left(\bar{h}_{radar}(2) + \delta h_{radar}(2) \right) \right) - h_{DB}(n+2, m) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \left(\bar{h}_{baro}(1) - \left(\bar{h}_{radar}(1) + \delta h_{radar}(1) \right) \right) + h_{DB}(n+1, m) \right| \right] \\
 &= \frac{\left| \delta h_{radar}(1) - \delta h_{radar}(2) + \delta h_{DB}(n+1, m) - \delta h_{DB}(n+2, m) \right|}{L} \quad (11) \\
 &= \frac{\left| \varepsilon + \delta h_{DB}(n+1, m) - \delta h_{DB}(n+2, m) \right|}{L}
 \end{aligned}$$

식 (11)에서 ε 은 두 측정치에서 얻어진 레이더고도계 환산계수오차에 의한 고도오차의 차이 값을 나타낸다. 이 값은 그림 3에서와 같은 경우로 고도 측정치의 크기에 비해 무시할 수 있을 정도로 작은 크기를 가지므로 0이라고 가정한다. 따라서 지형고도 기울기 프로파일 방식을 적용하게 되면, 식 (11)의 결과와 같이 두 지형고도 측정치의 오차가 상쇄되는 효과가 발생한다. 즉, MAD 값이 가장 낮은 후보 프로파일을 선택할 때, 환산계수오차의 영향 없이 참인 프로파일을 결정할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 보정효과는 기압고도계 또는 DB 정보를 구축할 때에 발생할 수 있는 바이어스 오차에 의한 영향을 상쇄시키는 것에 대해서도 같은 방식으로 적용될 수 있다. 그리고 식 (7)과 식 (11)에서 샘플의 개수를 2보다 큰 수로 증가시키더라도 같은 효과를 갖는 것을 확인하였다.

V. 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 환경

지형고도의 기울기 값을 이용한 새로운 방식의 프로파일 생성 기법의 성능 검증을 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 항체는 TERCOM의 기본 제약조건에 맞게 북쪽 방향으로 등속직선운동을 하는 경우이며, 고도계의 샘플링 시간 간격은 1초, TERCOM의 항법해 갱신간격은 10초로 결정하였다. 즉, 10개의 지형고도를 측정할 때마다 항체의 위치를 보정하는 일괄처리방식이며, 유사성 판별 알고리즘으로는 MAD를 사용하였다. 또한 항체에 탑재된 DB는 행렬 형태로써, 우리나라의 일부 지역에 대한 정보를 갖고 있으며, 해상도는 $3[\text{arcsec}] \times 3[\text{arcsec}]$ 으로 격자간격은 약 92.7 m에 해당한다. 그리고 다른 오차요소를 제거하기 위하여 항체는 DB의 격자 위를 비행한다고 가정하였다. 즉, 사용된 DB의 격자간격이 $3[\text{arcsec}]$ 이므로, 대략 185.4 m/s의 속도를 가지고 북쪽으로 비행하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

TERCOM 알고리즘은 항체가 운항하는 지역의 지형 험준도에 따라 항법성능이 달라진다고 알려져 있으며, 평평한 지대보다 산악지대와 같이 주변의 지형과는 다른 독특한 특성을 가지는 지형일수록 좋은 항법성능이 나온다고 알려져 있다[3]. 따라서 본 논문에서는 항체가 운항하는 지역으로 독특한 지형을 가진 지리산 자락에서 시뮬레이션을 수행하였다. 탑재된 IMU는 표 1에서와 같은 HG1700급을 탑재하였으며, 설정한 궤적에 따라 관성센서 데이터를 모의로 생성하였다. 항체의 속도는 668 km/h, 운항 고도는 5 km로 설정하였다. 지형고도 측정센서의 오차는 레이더 고도계의 환산계수오차만 존재하는 것으로 가정하였다.

표 1. IMU 센서 오차 사양.

Table 1. IMU sensor error specification.

센서	오차	사양
가속도계	바이어스	1 mg
	*VRW	$0.22 \text{ m/s} / \sqrt{\text{hr}}$
자이로	바이어스	1 deg/hr
	*ARW	$0.125 \text{ deg} / \sqrt{\text{hr}}$

*VRW: Velocity Random Walk

*ARW: Angular Random Walk

2. 시뮬레이션 결과 비교

레이더고도계 환산계수오차에 의한 영향을 살펴보기 위하여, 먼저 기존의 TERCOM 방식인 고도 프로파일을 이용하여 위치보정을 하는 경우에 대해 환산계수오차의 유무에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 표 2에서 나타나는 것과 같이 환산계수오차가 존재하는 경우에는 항법해의 수평거리오차가 14.71 m에서 790.34 m로 크게 늘어나는 것을 볼 수 있으며, 오보정을 또한 0 %에서 100 %로 잘못된 프로파일을 선택할 확률이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 또한 표 2를 통해서 환산계수오차가 존재하는 경우에 기존의 TERCOM 방식과 제안한 방식의 결과를 비교하여 나타내었다. 기존의 방식인 지형고도 프로파일을 이용하는 경우와 달리 수평거리오차가 14.73 m로 환산계수오차가 없는 수준에서의 결과인 14.71 m와 유사한 결과를 보이고 있다. 또한 오보정율도 환산계수오차가 존재하지 않는 경우의 수준으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 두 시뮬레이션의 경우에 오보정이 없는데 위치 오차가 존재하는 이유는 TERCOM과 같은 일괄처리방식의 알고리즘은 일정시간 측정치를 수집하는 시간이 있으며, 본 시뮬레이션에서는 10초 간격으로 설정되어있다. 따라서 발생한 오차는 측정치를 수집하는 10초 동안에 누적된 순수 INS 오차에 의해 나타나는 것이다.

시뮬레이션 결과는 그림 5를 통해서도 확인할 수 있다. 환산계수오차가 존재하는 경우에 기존의 방법을 이용하여 위치를 갱신하게 되면 참 궤적인 실선을 크게 벗어나 수평거리오차가 커지는 것을 확인할 수 있으며, 순수 INS의 결과보다 오히려 저하되는 것을 확인할 수 있다. 반면에 레이더고도계 환산계수오차가 존재하는 경우 제안한 방식을 이용하여 위치를 갱신한 결과는 그림 6을 통하여 확인할 수 있다. 기존의 방식과는 달리 항체가 참 궤적을 벗어나지 않

표 2. 환산계수오차 유무에 따른 항법 결과 비교표.

Table 2. Simulation result with the scale factor error exists or not.

프로파일 생성 방식		고도	고도	기울기
오차 존재 유무		무	유	유
위도 오차 [m]	평균	2.52	855.84	2.55
	표준편차	2.89	1063.19	2.91
경도 오차 [m]	평균	21.09	543.87	21.13
	표준편차	28.68	652.41	28.67
수평거리 오차 [m]	평균	14.71	790.34	14.73
	표준편차	15.35	635.33	15.35
오보정율 [%]		0	100	0

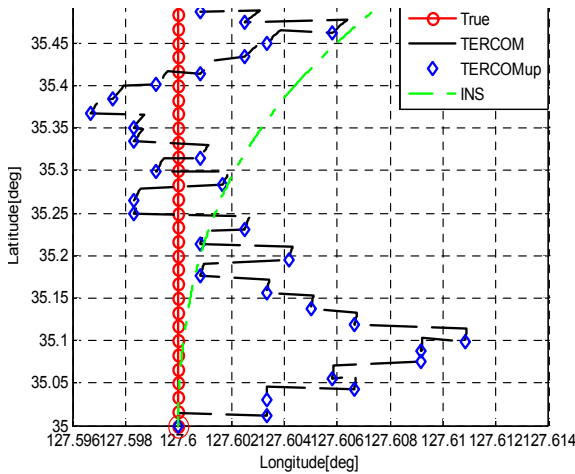


그림 5. 환산계수 오차가 존재하는 경우의 기존의 TERCOM 시뮬레이션 결과.

Fig. 5. Simulation result of original TERCOM with scale factor.

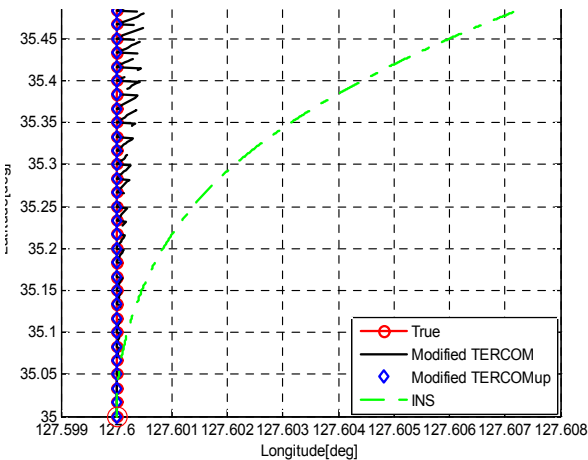


그림 6. 환산계수 오차가 존재하는 경우 제한한 TERCOM 시뮬레이션 결과.

Fig. 6. Simulation result of Advanced TERCOM with scale factor error.

고 안정적으로 위치를 갱신하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 레이더고도계 환산계수오차가 존재하는 경우에 항체가 실제 운항한 궤적에서 측정된 프로파일과 지형 DB에서 참 위치에 해당하는 지형고도 프로파일, 그리고, 가장 낮은 MAD 값을 나타내어 최종적으로 선택된 항체가 참이라고 추정된 프로파일을 겹쳐서 나타낸 것이다. 그림 7에서 TRUE profile은 항체가 생성한 후보 프로파일 중 실제 항체의 위치와 가장 가까운 곳에 위치한 참인 프로파일을 뜻하며 환산계수오차가 없는 상태에서 측정된 고도 프로파일과 가장 유사한 결과 값을 갖게 된다.

Meas profile은 항체가 측정된 프로파일을 나타내며, 그림 7에서는 환산계수오차가 존재하는 상태에서 측정된 프로파일이다. 참인 프로파일과 비교했을 때, 전체적인 프로파일의 형태는 유사하나 전체적으로 고도값이 바이어스 된 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그래프에 나타난 Select profile은 MAD 알고리즘에 의하여 참이라고 인식한 프로파

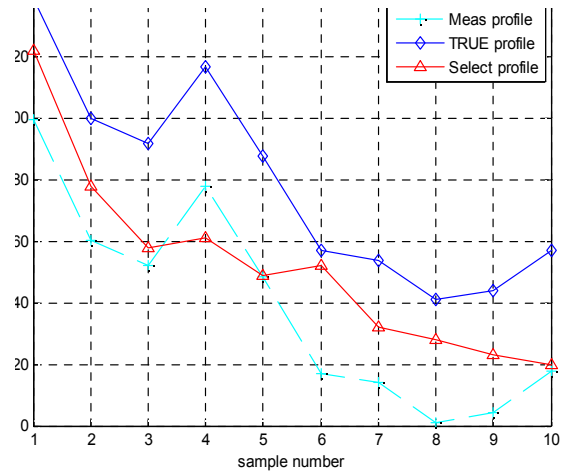


그림 7. 환산계수 오차가 존재하는 경우 기존 TERCOM의 고도 측정 값.

Fig. 7. Terrain altitude measurements of the original TERCOM with scale factor error.

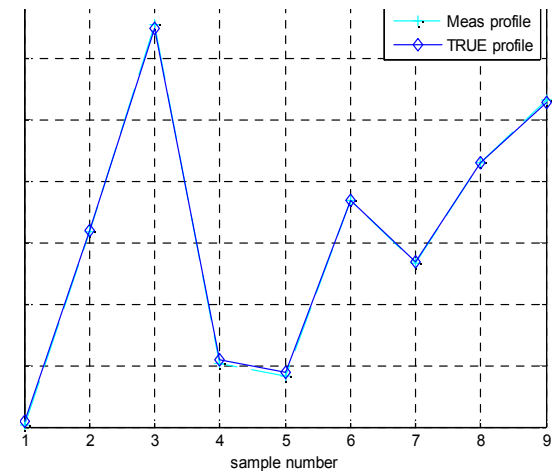


그림 8. 환산계수 오차가 존재하는 경우의 기울기 프로파일.

Fig. 8. Terrain slope measurements with scale factor error.

일을 나타내며, 이 그래프상에서는 TRUE profile을 선택한 경우이므로 환산계수오차로 인해 오보정을 한 것이다.

이와 같은 현상을 보정하기 위하여 본 논문에서 제안한 지형고도의 기울기 프로파일을 이용하게 되면 결과는 그림 8과 같이 나타나게 된다. 그림 8을 살펴보면, 고도 프로파일을 이용하는 경우와는 다르게 환산계수오차가 상쇄된 상태로 나타나기 때문에 측정된 프로파일과 선택한 프로파일의 형태가 일치된 결과를 보이고 있다. 즉, 기울기 프로파일을 이용함으로써 환산계수오차에 의한 영향을 상쇄할 수 있었고, 그 결과 참인 프로파일을 선택하여 전체적인 항법해의 신뢰도 및 성능향상을 가져올 수 있음을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 지형참조항법의 대표적인 일괄처리방식의 알고리즘인 TERCOM에서 지형고도 측정 시 사용하는 센서인 레이더고도계의 환산계수오차로 인해 발생하는 지형고

도 측정오차가 TERCOM의 성능에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였으며, 분석을 통하여 유사성 판별 알고리즘의 특성에 의해 각 측정치의 오차가 모두 더해지는 형태로 나타나 항법성능에 심각한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

이 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 유사성 정합 방식을 계산 할 때, 측정된 고도값을 이용하는 것이 아니라 고도측정값의 기울기를 유사성 정합 방식에서 이용하였다.

그 결과 기존의 고도 프로파일을 이용하는 방식과 달리 기울기 프로파일을 사용하게 되는 경우, 각 측정에서 발생한 환산계수오차가 서로 상쇄되는 효과가 나타나는 것을 수식적인 전개를 통하여 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과를 통해서도 기존의 방식과 비교해서 개선된 결과가 나타나는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] C. G. Park, J. G. Lee, and H. W. Park, "Inertial navigation system technology," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 3, no. 2, pp. 52-57, 1999.
- [2] E. Bekir, Introduction to Modern Navigation Systems,

World Scientific Publishing Company, pp. 75-76, 2007.

- [3] K. J. Kim, C. G. Park, M. J. Yu, and Y. B. Park, "A performance comparison of extended and unscented Kalman filters for INS/GPS tightly coupled approach," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 12, no. 8, pp. 780-788, Aug. 2006.
- [4] P. D. Groves, Principles of GNSS Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Artech House, 2008.
- [5] G. M. Siouris, Missile Guidance and Control Systems, Springer-Verlag New York, Inc., pp. 551-576, 2003.
- [6] VEDAT EKÜTEKİN, "Navigation and Control Studies on Cruise Missiles," Ph.D. dissertation, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2007.
- [7] K. J. Yoo, H. W. Park, and Y. H. Kim, "Radar altimeter measurement error analysis according to terrain and antenna beam width," *Proc. of KSAS Spring Annual meeting 2011*, PP. 190-193, Apr. 2011.



이 선 민

2010년 세종대학교 항공우주공학과 졸업. 2010년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 항법 및 데이터베이스 기반 복합항법시스템.



유 영 민

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



이 원 희

2007년 건국대학교 기계항공공학부 졸업. 2007년~현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정 재학중. 관심분야는 관성항법시스템 및 FDIR 알고리즘 개발.



이 달 호

1982년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과 졸업. 1985년 동 대학원 졸업(공학석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박사). 1992년~현재 가천대학교 전자공학과 교수. 1998년 미국 USC 방문연구원. 관심분야는 시스템 식별, 필터링 기법, INS 응용, Data hiding.



박 찬 국

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. 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.