

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(7), 629-639(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.7.629

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

영역기반 지형 험준도 지수를 이용한 달착륙선의 일괄처리방식 지형상대항법 성능분석

구평모, 박영범, 박찬국*

Performance Analysis of Batch Process Terrain Relative Navigation Using Area based Terrain Roughness Index for Lunar Lander

Pyung-Mo Ku, Young-Bum Park and Chan-Gook Park*

Department of Mechanical and Aerospace Engineering/ASRI
Seoul National University

ABSTRACT

Batch process TRN(Terrain Relative Navigation) using an altimeter is a technique to correct position by correlating a series of periodically measured terrain height profile and terrain height candidate profile of the DEM(Digital Elevation Map). However, it is generally known that the performance of TRN is degraded when measured terrain height profile and terrain height candidate profiles of the DEM are similar at hill or repetitive terrain. In this paper, area based terrain slope roughness index[11] is applied and area based terrain curvature roughness index which can detect similarity of terrain in ROI(Region Of Interest) is proposed to overcome this problem. Applying terrain roughness indexes to terrain relative navigation system of lunar lander, it is shown that TRN using area based terrain roughness results in improved performance compared to conventional trajectory based method through simulation.

초 록

지형상대항법은 측정된 지형고도와 DEM(Digital Elevation Map)의 지형고도의 비교를 통해 위치보정이 이루어지는 시스템이다. 하지만 지형상대항법은 언덕과 같은 반복되는 지형과 같이 측정된 지형고도 프로파일과 후보 지형고도 프로파일이 유사할 때 다른 지형으로 오보정을 유발 할 수 있는 단점을 가지고 있어 항법 성능이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 관심영역 안에 주변 지형의 유사한 정도를 판단하는 영역기반 지형 기울기 험준도 지수를 적용하였고[11], 영역기반 지형 곡률 험준도 지수를 제안하였다. 제안한 지형 험준도 지수의 성능 검증을 위하여 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수와 영역기반 지형 험준도 지수를 달착륙선의 지형상대항법에 적용한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수를 고려하였을 때 보다 영역기반 지형 험준도 지수를 고려하였을 때 지형상대항법 성능이 개선됨을 확인하였다.

Key Words : TRN(지형상대항법), Roughness Index(험준도 지수), False Position Fix(오보정)

† Received : February 5, 2016 Revised : May 27, 2016 Accepted : June 29, 2016

* Corresponding author, E-mail : chanpark@snu.ac.kr

I. 서론

달착륙선의 착륙 단계는 크게 달 궤도 단계, 천이 궤도 단계 그리고 동력하강 단계로 구성된다. 달 궤도 단계는 달착륙선이 약 100 km 원형 궤도에 있을 때 시작 되고 궤도 이탈할 준비가 될 때 달 궤도 단계를 마친다. 천이 궤도 단계는 원형 궤도를 이탈하면서 진행 되고 달착륙선이 감속을 시작하게 될 때 마치게 된다. 동력 하강 단계에서는 달착륙선의 연착륙을 위해 관성센서, 별 추적기, 고도계, 카메라, Lidar, 속도계 등 여러 센서들과 결합한 복합항법시스템을 수행한다 [1,2].

달착륙선의 복합항법시스템에서 지형상대항법은 사용되는 지형정보에 따라 크게 카메라로부터 측정된 지형의 이미지 데이터를 이용하는 방법과 고도계나 Lidar로부터 측정된 거리 데이터를 이용하는 방법으로 분류된다. 카메라를 이용한 방법은 고도계나 Lidar를 이용한 방법보다 고 해상도의 이미지 데이터를 사용 할 수 있어 지형상대항법 성능이 더 좋은 것으로 알려져 있다[2]. 그러나 카메라를 이용한 지형상대항법은 빛에 따라 운용조건이 제약 될 수 있는 반면, 고도계나 Lidar를 이용한 지형상대항법은 빛에 관계없이 지형상대항법이 가능한 장점이 있다[3].

고도계는 상대적으로 Lidar보다 더 높은 운용 고도에서 지형상대항법이 가능하다[2]. 고도계를 이용한 지형상대항법 알고리즘 방식으로는 데이터 처리방식에 따라 측정치의 일정 데이터를 한꺼번에 처리하는 일괄처리방식과 현재의 측정치 정보를 이용하는 순차처리방식으로 나뉜다[4,5,6,7]. 고도계를 이용한 일괄처리방식의 지형상대항법은 측정된 지형고도 프로파일과 DEM(Digital Elevation Map)의 후보 지형고도 프로파일의 비교를 통해 상관도가 가장 큰 후보 지형고도 프로파일의 위치로 위치 갱신을 하게 된다[4].

일괄처리방식의 지형상대항법을 적용함에 있어 험준한 지형에서는 유일성을 갖는 지형들이 많으므로 측정된 지형고도 프로파일과 DEM의 후보 지형고도 프로파일과의 구별이 쉽기 때문에 지형상대항법의 위치오차가 작은 편이지만 평탄한 지형에서는 측정된 지형고도 프로파일과 DEM의 후보 지형고도 프로파일과의 구별이 어려워 오보정이 자주 발생한다고 알려져 있다 [8,9]. 이러한 문제점을 해결하고자 기존에는 측정된 지형고도 혹은 측정된 지형고도 기울기로 계산된 지형 험준도 지수를 이용하여 위치 해를 조건적으로 갱신하는 방법에 대한 연구가 진행되

었다[4,10,11]. 하지만 언덕과 같은 반복되는 지형에서 기존의 지형 험준도 지수가 지형이 험준하다고 판단하더라도 측정된 지형고도 프로파일과 유사한 후보 지형고도 프로파일이 존재하여 다른 지형으로 오보정을 유발하므로 오보정을 줄일 수 있는 기법에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 관심영역 내에서 항체의 위치를 기준으로 주변 지형과의 험준도를 판단하는 영역기반 지형 험준도 지수를 제안하였다. 영역기반 지형 험준도 지수를 통해 언덕과 같은 반복되는 지형에서 기존의 궤적 기반 지형 험준도 지수가 지형이 험준하다고 판단되더라도 측정된 지형고도 프로파일과 유사한 후보 지형고도 프로파일이 존재하는 다른 지형으로의 오보정 확률을 줄이는 연구를 수행하였다. 그리고 영역기반 지형 험준도 지수를 달착륙선의 지형상대항법에 적용하여 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다. 2장에서는 일괄처리방식의 지형상대항법 알고리즘과 지형 험준도 지수에 대해 기술하고 3장에서는 기존의 지형 험준도 지수의 단점을 보완하고자 영역기반 지형 험준도 지수를 제안한다. 4장에서는 제안한 영역기반 지형 험준도 지수를 이용한 지형상대항법을 달착륙선 항법시스템에 적용한 시뮬레이션 결과를 서술하고 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 일괄처리방식 지형상대항법 알고리즘 및 궤적기반 지형 험준도 지수

2.1 지형상대항법 알고리즘

일괄처리방식 지형상대항법은 Fig. 1과 같이 전파고도계로부터 측정된 지형고도 프로파일과 미리 저장된 DEM의 후보 지형고도 프로파일에 대해 상관기법을 적용하여 추정된 위치로 INS(Inertial Navigation System)의 위치를 갱신하는 시스템이다[4].

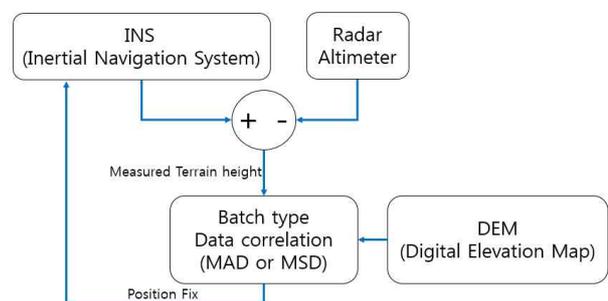


Fig. 1. Block diagram of batch process TRN

2.1.1 위치결정을 위한 일괄처리 방식의 3단계

일괄처리방식 지형상대항법은 데이터 준비단계, 데이터 획득단계 그리고 데이터 상관 단계로 위치를 결정한다[4]. 데이터 준비단계에서는 항체의 INS위치를 기준으로 관심영역의 데이터를 준비하게 된다. 관심영역의 크기는 진행방향과 진행방향의 수직인 방향에 대해 불확실성을 충족시킬 수 있는 충분한 크기여야 하고 측정된 지형고도 프로파일과 같은 길이를 갖는 후보 지형고도 프로파일들로 구성된 기준 행렬로 사용된다. 데이터 획득 단계에서는 INS의 고도와 고도계 데이터를 이용하여 지형고도를 계산한다. 측정된 지형고도(h_{meas})는 식(1)과 같이 INS의 고도(h_{ins})와 고도계로부터 측정된 고도(h_{radar})의 차분을 통해 얻어진다.

$$h_{meas} = h_{ins} - h_{radar} \quad (1)$$

데이터 상관 단계에서는 관심영역 내에서 주기적으로 측정된 지형고도 프로파일과 동일한 크기의 후보 지형고도 프로파일들에 대해 상관기법을 적용하여 측정된 지형고도 프로파일과 가장 유사한 후보 프로파일들을 찾는다.

2.1.2 일괄처리방식의 상관 방법

상관 값은 측정된 지형고도와 DEM 지형고도의 유사한 정도를 판단하는 척도이다. 상관기법으로는 MAD(Mean Absolute Difference) 와 MSD(Mean Squared Difference)가 있다. MAD는 측정된 지형고도 프로파일과 DEM의 후보 지형고도 프로파일의 차이의 절대 값의 평균을 의미하고, MSD는 측정된 지형고도 프로파일과 DEM 후보 지형고도 프로파일의 차이의 제곱의 평균을 의미한다. 따라서 MAD와 MSD결과에서 최소의 상관 값을 가지는 후보 지형고도 프로파일이 측정된 지형고도 프로파일과 가장 유사하다는 것을 의미한다. 한편 식(1)의 지형고도 측정값(h_{meas})은 INS와 고도계의 오차에 의한 바이어스 형태의 오차를 포함하기 때문에 상관오차가 유발된다. 본 논문에서는 측정치에 포함된 바이어스 형태의 오차에 의한 영향을 감소시키기 위해 식 (2) 및 (3)과 같이 측정된 지형고도 프로파일과 DEM의 후보 지형고도 프로파일의 평균 값을 제거하는 MAD와 MSD를 적용하였다[12,13].

$$MAD_{n,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \{h_{meas}(i) - \bar{h}_{meas}\} - \{h_{DB}(n+i, m) - \bar{h}_{DB}\} \right| \quad (2)$$

$$MSD_{n,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\{h_{meas}(i) - \bar{h}_{meas}\} - \{h_{DB}(n+i, m) - \bar{h}_{DB}\} \right)^2 \quad (3)$$

여기서, N 은 측정치 개수이고 h_{DB} 는 관심영역에서 DEM의 후보 지형고도 프로파일이다. 그리고 n, m 은 INS가 계산한 항체의 위치로부터 관심영역의 DEM의 행과 열 번호이다. 측정된 지형 고도 평균값(\bar{h}_{meas})과 DEM의 지형고도 값(h_{DB})의 평균(\bar{h}_{DB})은 식 (4) 및 (5)와 같다.

$$\bar{h}_{meas} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{meas}(i) \quad (4)$$

$$\bar{h}_{DB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{DB}(n+i, m) \quad (5)$$

그리고 식 (6) 및 (7)과 같이 관심영역 내에서 MAD또는 MSD가 최소값을 갖는 인덱스가 측정된 지형고도 프로파일과 제일 유사한 후보 지형고도 프로파일이라 판단하여 해당 인덱스의 위치 $P_{MAD}(n, m)$ 혹은 $P_{MSD}(n, m)$ 로 보정 위치를 추정한다.

$$P_{MAD}(n, m) = \arg \min_{n,m} MAD_{n,m} \quad (6)$$

$$P_{MSD}(n, m) = \arg \min_{n,m} MSD_{n,m} \quad (7)$$

2.2 궤적기반 지형 험준도 지수

일반적으로 지형상대항법은 지형고도의 변화가 많아 유일성의 특성을 가지는 지형일수록 정확한 항법해를 제공하는 것으로 알려져 있다. 반대로 지형의 유일성이 적을 경우에는 데이터 상관 과정에서 항체의 위치오차를 더욱 증가시키는 오보정이 일어날 수 있다. 이와 같은 오보정을 방지하기 위하여 지형상대항법에서 위치 갱신 기준으로 사용 되는 지표가 지형 험준도 지수이다. 지형 험준도 지수에는 지형의 고도 분포를 나타내는 σ_T 와 지형의 기울기 분포를 나타내는 σ_Z 가 있다[4].

지형 험준도 지수 σ_T, σ_Z 을 궤적기반 지형 험준도 지수라고 정의한다[10]. 궤적기반이란 Fig. 2와 같이 선형 궤적에 대하여 획득한 전파 고도계의 고도 샘플들(H_i)의 편차를 통하여 지형 험준도를 나타내는 지수이다.

σ_T 는 측정된 지형고도 프로파일의 표준편차를 나타내는 값이며 식 (8)과 같이 정의되고 지수의 값이 클수록 지형고도 프로파일의 고도 분포가 넓게 나타난다는 의미를 가진다[4].

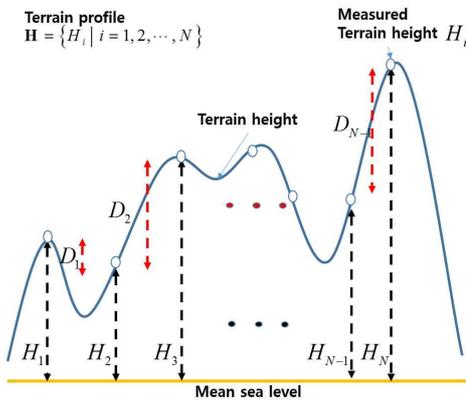


Fig. 2. Measured terrain Height samples and terrain slope samples

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

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \tag{8}$$

σ_z 는 이웃한 고도 샘플(H_i)간의 차이 값들(D_i)의 편차를 통하여 지형 험준도를 나타내는 지수이며 식 (9)와 같이 정의되고 측정된 지형고도 프로파일의 샘플 간에 기울기의 다양성을 나타내는 지수로, 값이 클수록 변화가 많은 독특한 형태의 지형을 나타내는 것으로 알려져 있다[4].

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

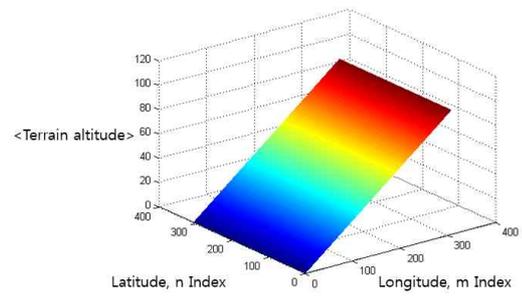
$$D_i = H_i - H_{i+1} \tag{9}$$

$$\bar{D} = (1/(N-1)) \sum_{i=1}^{N-1} D_i$$

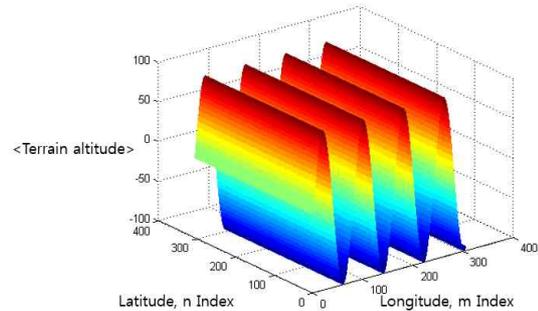
III. 영역기반 지형 험준도 지수

3.1 격자기반 지형 험준도 지수의 한계

격자기반 지형 험준도 지수를 적용하는 경우, 험준하지 않은 지형에서 지형상대항법의 오보정을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다[10]. 하지만 지형 험준도 지수가 높은 경우일지라도 오보정이 일어날 수 있는 확률이 존재하며 지형 험준도 지수가 구분 할 수 있는 지형에는 한계성이 존재한다. Fig. 3은 측정된 지형고도 프로파일이 경도방향이라 가정하였을 때 오보정이 발생할 수 있는 지형의 예를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 경도방향으로 지형 고도 분포가 높게 존재하여 σ_T 값이 커서 험준한 지형이라고 판단되지만 위도방향으



(a) Slope terrain model



(b) Repetitive terrain model

Fig. 3. Virtual terrain models of falsefix

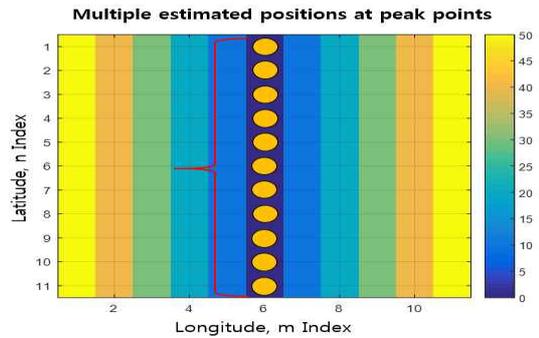


Fig. 4. MAD of false position fix terrains

로는 지형 고도가 동일하여 오보정이 발생될 수 있는 비탈면 지형이고 Fig. 3(b)는 경도방향으로 지형 고도 기울기 분포가 높게 존재하여 σ_z 값이 커서 험준한 지형이라고 판단되지만 위도방향으로는 지형 고도 기울기 분포가 0으로 동일하여 오보정이 발생 될 수 있는 언덕 지형이다. 한 방향에 대해서는 험준도 변화가 존재하지만 그에 수직되는 방향으로 험준도 변화가 없어서 일괄처리방식 상관 값에서 유사 후보 지형고도 프로파일이 다수 생성 될 수 있음을 예측 할 수 있다.

Figure 4는 Fig. 3(a), (b) 두 지형에 대한 MAD 상관 결과를 나타낸 것으로 경도방향의 측정된 지형고도 프로파일과 후보 지형고도 프로파

일과 상관기법을 수행하였을 때 경도 방향에 대해서는 험준도 변화가 존재하지만 그에 수직되는 위도 방향으로 험준도 변화가 없어서 MAD 최소 값을 갖는 지형고도 프로파일이 경도방향 6번 인덱스에서 위도 방향으로 다수 생성됨을 확인 할 수 있다.

3.2 영역기반 지형 험준도 지수

본 논문에서는 기존의 격자기반의 지형 험준도 지수의 한계점을 보완하기 위해 항법컴퓨터에 미리 탑재된 지형정보를 이용하여 항체의 INS (Inertial Navigation System) 위치 기준으로 주변 지형의 유사한 정도를 판단하는 영역기반 지형 험준도 지수를 제안한다. 영역기반 지형 험준도 지수로서, 소개된 지형의 기울기를 이용한 험준도 지수를 검증하고 지형의 곡률을 이용한 험준도 지수를 제안하여 추가로 성능분석 연구를 하였다. 이러한 두 가지 영역기반 지형 험준도 지수는 항체의 진행방향과 진행방향의 수직 방향으로 나눌 수 있어 두 가지 방향의 험준도 지수를 계산할 수 있는 장점을 가진다. 두 가지 방향의 험준도 계산방법은 window search 방식으로 최적의 지형고도 프로파일 위치를 찾는 MAD 혹은 MSD 상관기법에 양방향으로 지형의 유일성을 구분 할 수 있어 항체의 오보정을 줄일 수 있다.

3.2.1 지형의 기울기를 이용한 험준도 지수

지형의 기울기를 이용한 영역기반 험준도 지수를 설명하기 앞서, 진행방향의 지형 기울기를 이용한 험준도는 식 (9)의 확장 개념으로서, Fig. 5와 같이 관심영역에서 항법컴퓨터에 미리 탑재된 DEM을 이용하여 진행방향으로 인접한 샘플들의 차이 값들 ($D_{i,j}^{along}$)을 통해 식 (10)과 같이 표준편차 값으로 정의한다[11].

$$\sigma_z^{along} = \sqrt{\frac{1}{N \times (M-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M-1} (D_{i,j}^{along} - \overline{D_{i,j}^{along}})^2}$$

$$D_{i,j}^{along} = H_{i,j} - H_{i,j+1} \tag{10}$$

$$\overline{D_{i,j}^{along}} = \frac{1}{N \times (M-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M-1} D_{i,j}^{along}$$

다음으로, 진행방향에 대한 수직방향의 지형 기울기를 이용한 험준도는 식 (10)의 진행방향에 대한 지형의 기울기와 같은 방식으로 Fig. 5와 같이 관심영역의 DEM을 이용하여 진행방향의 수직방향으로 인접한 샘플들의 차이 값을 통해 식 (11)과 같이 표준편차 값으로 정의한다.

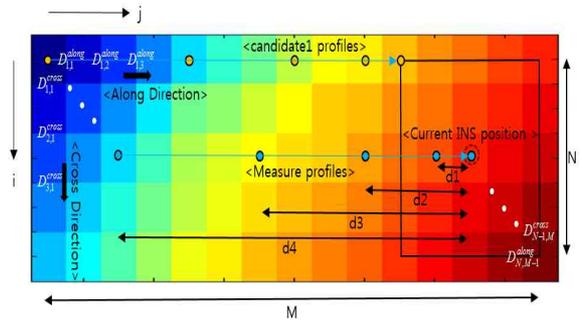


Fig. 5. Direction for terrain slope in ROI

$$\sigma_z^{cross} = \sqrt{\frac{1}{(N-1) \times M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N-1} (D_{i,j}^{cross} - \overline{D_{i,j}^{cross}})^2}$$

$$D_{i,j}^{cross} = H_{i,j} - H_{i+1,j} \tag{11}$$

$$\overline{D_{i,j}^{cross}} = \frac{1}{(N-1) \times M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N-1} D_{i,j}^{cross}$$

각 방향의 지형 기울기 표준편차를 통해 각 방향의 기울기 험준도 분포를 알 수 있어 식 (12)와 같이 진행방향의 기울기 험준도와 수직방향의 기울기 험준도의 곱을 통하여 두 방향의 험준도 정보를 가지는 지형의 기울기를 이용한 영역기반 험준도 지수를 나타낸다.

$$\sigma_z^{along \times cross} = \sigma_z^{along} \times \sigma_z^{cross} \tag{12}$$

3.2.2 지형의 곡률을 이용한 험준도 지수

지형의 기울기를 이용한 험준도 지수와 같은 방식으로 항체의 진행방향과 진행방향의 수직방향의 지형 곡률을 이용한 험준도 지수를 나눌 수 있어 두 가지 방향의 험준도 지수를 계산할 수 있는 장점을 가지므로 MAD 혹은 MSD 상관기법에 양방향으로 지형의 유일성을 구분 할 수 있어 항체의 오보정을 줄일 수 있는 지형의 곡률을 이용한 험준도 지수를 제안한다. 곡률은 곡선 방위각의 변화율로서 정의 되어, 곡선 위에 특정 점의 굽은 정도를 판단하는 척도가 되므로 식 (13)과 같이 $y=f(x)$ 에 대한 도함수로 표현이 가능하다[14].

$$K = \frac{d^2 y / dx^2}{(1 + [dy / dx]^2)^{3/2}} \tag{13}$$

진행방향의 지형 곡률은 Fig. 6과 같이 관심영역의 DEM을 이용하여 진행방향으로 $[1 \times p]$ 크기의 국소 데이터에서 Fig. 7과 같이 최소자승법을 통해 $(p-1)$ 차 함수로 근사된 함수의 도함수를 이용하여 곡률 값들($K_{i,j}^{along}$)로 나타 낼 수 있고, 각 곡률 값들에 대한 표준편차 값을 통해 진행방향에

대한 지형의 곡률을 이용한 험준도를 나타낼 수 있어 식 (14)와 같이 정의한다.

$$\sigma_K^{along} = \sqrt{\frac{1}{N \times (M - p + 1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M-p+1} (K_{i,j}^{along} - \overline{K_{i,j}^{along}})^2}$$

$$\overline{K_{i,j}^{along}} = \frac{1}{N \times (M - p + 1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M-p+1} K_{i,j}^{along} \quad (14)$$

$K_{i,j}^{along}$: Curvature from along line function fitting
 p : Local window size

진행방향에 대한 수직방향의 지형 곡률은 식 (14)와 같은 방식으로 Fig. 6에서 관심영역의 DEM을 이용하여 진행방향의 수직 방향으로 $[p \times 1]$ 크기의 국소 데이터에서 Fig. 7과 같이 최소자승법을 통해 $(p-1)$ 차 함수로 근사된 함수의 도함수를 이용하여 곡률 값들($K_{i,j}^{cross}$)로 나타 낼 수 있고, 각 곡률 값들에 대한 표준편차 값을 통해 진행방향에 수직방향의 지형의 곡률을 이용한 험준도를 나타 낼 수 있어 식 (15)와 같이 정의한다.

$$\sigma_K^{cross} = \sqrt{\frac{1}{(N - p + 1) \times M} \sum_{i=1}^{N-p+1} \sum_{j=1}^M (K_{i,j}^{cross} - \overline{K_{i,j}^{cross}})^2}$$

$$\overline{K_{i,j}^{cross}} = \frac{1}{(N - p + 1) \times M} \sum_{i=1}^{N-p+1} \sum_{j=1}^M K_{i,j}^{cross} \quad (15)$$

$K_{i,j}^{cross}$: Curvature from cross line function fitting

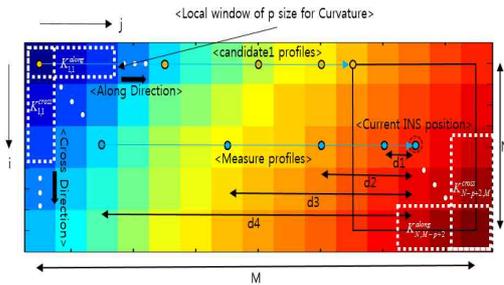


Fig. 6. Direction for terrain curvature in ROI

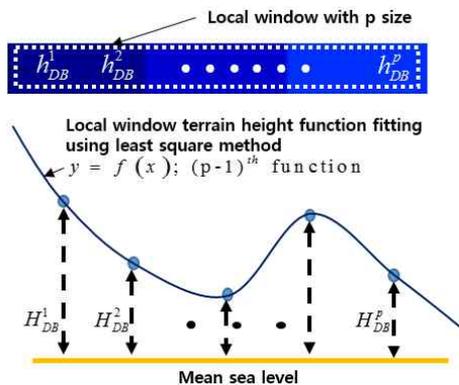


Fig. 7. Curvature(1D) in local window

각 방향의 지형 곡률 표준편차를 통해 각 방향의 곡률 험준도 분포를 알 수 있어 식 (16)과 같이 진행방향의 곡률 험준도와 수직방향의 곡률 험준도의 곱을 통하여 두 방향의 험준도 정보를 가지는 지형의 곡률을 이용한 영역기반 험준도 지수를 나타낸다.

$$\sigma_K^{along \times cross} = \sigma_K^{along} \times \sigma_K^{cross} \quad (16)$$

3.2.3 가상지형 모델의 다른 지형 험준도 분석

언덕과 같은 반복되는 지형과 같이 측정된 지형 고도 프로파일과 후보 지형고도 프로파일이 유사할 때 다른 지형으로 오보정 유발하는 문제를 검증하고자 가상의 모델지형에 대해 지형 험준도 지수 계산 하였다. 지형의 모델은 Fig. 8과 같이 크게 4가지 유형의 평지, 경사면, 한 방향으로만 지형의 기울기 변화가 있는 1D Gaussian 언덕, 양 방향으로 지형의 기울기 변화가 있는 2D Gaussian 언덕의 가상 지형 모델로 선정하였고 항체가 화살표 방향대로 가상의 지형 모델 위로 지남을 가정하였다.

Table 1은 각 지형 모델에 따른 지형 험준도

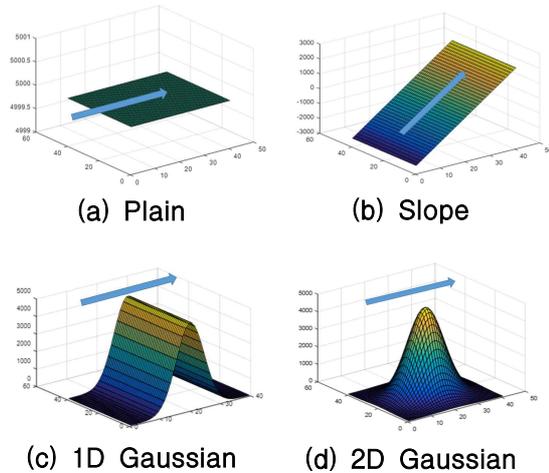


Fig. 8. Virtual terrain models

Table 1. Roughness of terrain models

	σ_T	σ_Z	$\sigma_Z^{along \times cross}$	$\sigma_K^{along \times cross}$
Plain	0	0	0	0
Slope	1.45e3	0	0	0
Gaussian (1D)	1.76e3	355.14	0	0
Gaussian (2D)	1.77e3	298	2.51e4	172.16

값을 보여준다. 평지에서는 고도 값과 고도의 변화가 존재하지 않아 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수와 영역기반 지형 험준도 지수 모두 지형이 유일성을 갖지 않는다고 판단을 한다. 하지만 경사면 지형의 경우 고도 값은 높게 분포하지만 고도의 변화율이 일정하여 주변 지형과 같은 고도 값을 갖는 지형고도 프로파일이 다수 존재하여 유일성이 떨어짐에 불구하고 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수(σ_T)는 지형이 유일성을 갖는다고 잘못 판단을 한다. 1D Gaussian 지형의 경우 고도 값, 고도 변화율도 다르지만 지형의 반복성으로 인해 측정된 지형과 유사한 지형이 존재하여 유일성이 떨어지는 지형이므로 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수(σ_T, σ_Z)는 고도 값, 고도 변화율이 존재하여 유일성을 갖는 지형이라 잘못 판단하지만 영역기반 지형 험준도 지수 ($\sigma_Z^{along \times cross}, \sigma_K^{along \times cross}$)는 측정된 지형과 주변지형이 비슷하여 유일성을 갖지 않는다고 올바른 판단을 한다. 측정치만 고려하는 궤적기반 지형 험준도 지수보다는 영역기반 지형 험준도 지수를 고려한다면 지형의 고도 분포나 기울기 분포가 높게 존재하여 기존의 지형 험준도 지수가 커서 위치갱신 판단이 되는 경우일지라도 언덕과 같은 반복되는 지형의 유사성에 의해 다수의 MAD 혹은 MSD 값들이 생성되어 오보정이 일어날 수 있는 확률을 줄일 수 있어 전반적인 지형상대항법 성능 개선을 예측 할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 결과

제안된 기법의 지형상대항법의 성능개선을 확인하기 위해 달착륙선의 착륙궤적에 대해 지형 험준도 지수 성능 분석시뮬레이션과 지형 험준도 지수를 이용한 지형상대항법 성능 분석의 시뮬레이션을 2가지로 나누어 수행하였다. 달 해상도 100 m DB를 이용하여 10초간 비행하면서 10개의 지형고도 측정치 샘플을 획득한다고 가정하였다. 시뮬레이션 오차 조건은 Table 2와 같다[15].

4.1 지형 험준도 지수 성능분석

본 논문에서는 10초간 10개의 지형고도 샘플 측정치를 얻는 동안의 이동거리와 초기 위치오차 2km(6 σ)씩 반영하여 관심영역 파라미터 N, M을 설정하였다. N x M 관심영역의 지형고도 데이터를 통해 영역기반 기울기 험준도를 계산 하였고, 곡률의 경우로는 N x M 관심영역에서 2개의 지형고도 차이를 통해 지형의 국소 기울기를 설정한 방법과는 다르게 3개 이상의 지형고도 데

이터를 통해 지형의 곡률 값을 나타낼 수 있어 관심영역에서 국소지역을 주변으로 1개의 포인트씩 국소영역으로 설정하여 국소영역 파라미터 p는 최소한의 데이터 개수인 3으로 설정하였고 3개의 지형고도 값을 통해 2차함수로 근사화 하여 근사화 된 도함수를 이용하여 곡률 값을 계산하였다.

전반적인 지형 험준도 지수의 성능을 분석하기 위해 Fig. 9와 같이 적도 구간을 중심으로 위도 $\pm 0.5\text{deg}$, 경도 0 ~ 60deg 구간을 10,000개로 나누어 초기위치를 이동하여 1회의 지형상대항법을 10,000개의 지형에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 10,000개의 지형에 대한 지형상대항법을 통

Table 2. Simulation error parameter

Object	Parameter(1 σ)	Value	
Laser altimeter	Bias	0.5m	
	Scale factor	1000ppm	
	Random noise	5m	
INS	Accelerometer	Bias	30 μ g
		Scale factor	60ppm
		Misalignment	20 arcsec
		Random walk	0.00017m/s/ \sqrt{s}
	Gyro	Bias	0.02 deg/hr
		Scale factor	1.6ppm
		Misalignment	20 arcsec
		Random walk	0.00005 deg/ \sqrt{s}
Initial position error	Latitude, Longitude, height	330 m	
Initial velocity error	N, E, D	0.2 m/s, 0.047m/s, 1.5m/s	
Initial attitude error	Roll, Pitch, Yaw	0.25 mrad	

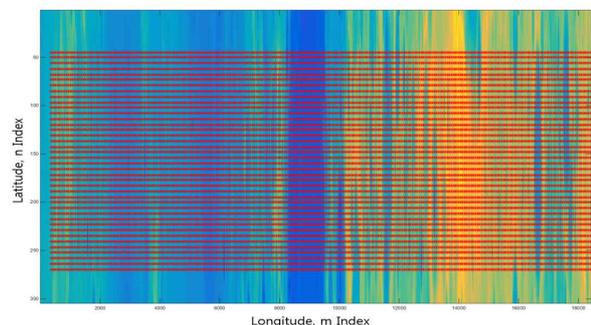


Fig. 9. TRN Samples of 10,000 regions

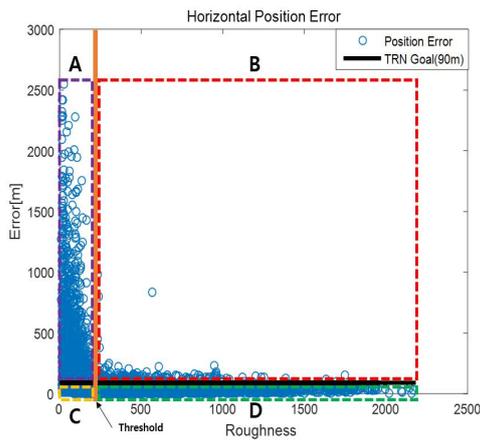


Fig. 10. Horizontal position errors of 10,000 regions

해 지형 험준도 지수의 성능 요인으로 오보정율, 지형 가용률, 정탐지율을 정의 하였고, 세 가지 성능 요인을 바탕으로 지형 험준도 지수의 성능을 비교분석하였다.

Figure 10은 10,000개의 지형에 대해 지형상대항법을 수행하여 수평 위치오차를 지형 험준도 지수에 따라 나타내었다. 검은 선은 오보정 기준을 의미하고 주황 선은 특정 지형 험준도 지수의 임계치를 의미한다. 오보정의 기준과 지형 험준도 지수의 임계치를 통해 A, B, C, D의 네가지 구간을 나눌수 있고 네가지 구간을 이용하여 지형 험준도 지수의 성능 요인을 정의 하였다.

지형 험준도 지수의 첫 번째 성능요인으로 오보정률은 전체 지형 개수(A+B+C+D 구간) 대비 특정 임계치를 적용하였을 때 임계치보다 높은 험준도 값을 가지지만 오보정 되는 개수(B 구간)의 비라 정의한다. 지형 험준도 지수에 따른 오보정률은 Fig. 11과 같다. 파란색 막대그래프는 특정 지형 험준도 지수에 해당하는 지형의 개수이고 빨간색 선은 특정 험준도 지수에 해당하는 오보정률을 나타낸 것이다. 지형 험준도가 험준 할수록 오보정률은 감소하는 관계임을 알 수 있다.

지형 가용률은 전체 지형 개수(A+B+C+D 구간) 대비 특정 임계치를 적용하였을 때 사용되는 지형의 개수(B+D 구간)의 비라 정의한다. 높은 지형 가용률은 지형상대항법 운용 구간 동안 위치해 보정을 많이 하게 되므로 항체의 INS 시스템의 위치 발산을 막을 수 있다. 그러므로 지형 가용률이 높을수록 지형상대항법을 많이 사용하게 되어 위치 보정을 많이 하므로 지형상대항법의 성능요인이 된다.

정탐지율은 전체 지형 개수(A+B+C+D 구간) 대비 특정 임계치 이하의 오보정 지형의 개수와

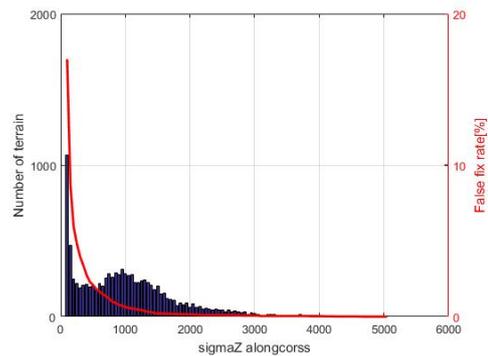


Fig. 11. False fix rate versus $\sigma_Z^{along \times cross}$

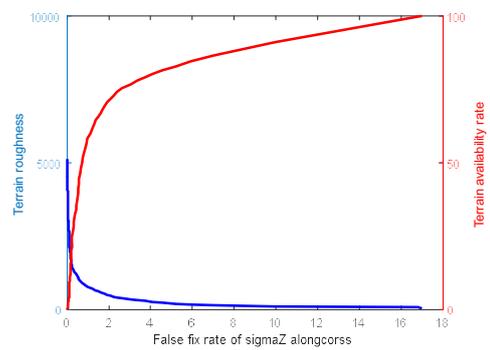


Fig. 12. Terrain availability rate of $\sigma_Z^{along \times cross}$

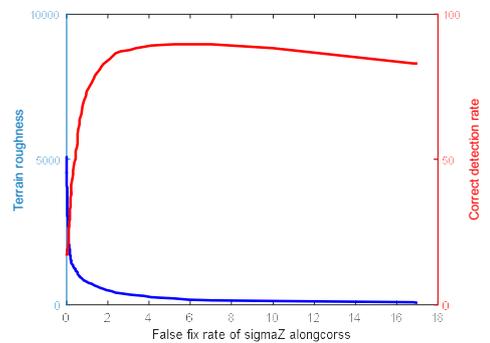


Fig. 13. Correct detection rate of $\sigma_Z^{along \times cross}$

특정 임계치 이상의 정보정 지형의 개수 합(A+D 구간)의 비이다. 특정 임계치 이상의 정보정 되는 지형의 경우도 올바른 판단의 경우이지만 특정 임계치 이하 오보정 지형도 임계치 설정으로 인해 오보정이라고 맞게 판단한 경우라 볼 수 있다. 전체 지형의 개수 대비 특정 임계치 이하의 오보정 지형의 개수와 특정 임계치 이상의 정보정 지형의 개수의 합의 비는 항체의 위치보정 분류 성능을 나타내어 지형상대항법의 성능 요인이 된다.

지형 험준도 지수 성능을 분석하기 위해 Fig. 12 및 13과 같이 지형상대항법의 성능요인인

Table 3. Performance parameters for terrain roughness indexes

	Terrain availability rate(%)	Correct detection rate(%)
σ_T	66.45	79.14
σ_Z	67.32	79.61
$\sigma_Z^{along \times cross}$	71.39	84.37
$\sigma_K^{along \times cross}$	70.99	82.9

지형 가용률과 정탐지율을 오보정 비율에 따른 지형 가용률과 정탐지율을 나타내었다.

지형상대항법의 정보정 수평 위치 오차 범위는 고도계와 DEM에 오차가 없는 경우 측정된 지형고도 프로파일과 후보 지형고도 프로파일이 일치하므로 DEM 해상도 절반의 오차범위를 가지므로 본 논문에서는 100m 해상도의 DEM를 사용하여 정보정의 수평 위치 오차범위(50m)에 해당하는 험준도 지수(σ_T)를 기준으로 오보정률 2%로 임계치를 설정하였다. 기존의 궤적기반 지형험준도 지수와 영역기반 지형 험준도 지수에 대해 앞서 보인 지형 가용률과 정탐지율을 각 험준도 지수에 따라 시뮬레이션을 통해 계산하였고 Table 3과 같이 오보정률 2%에 해당하는 지형 가용률과 정탐지율을 나타내었다.

4.2 지형 험준도 지수를 이용한 지형상대항법 성능 분석

본 논문에서는 달착륙 단계에서 고도계를 이용한 지형상대항법 운용 가능 구간인 동력하강단계에서 초기 고도 17.326km, 초기 속도 1.6971km/s 에서 항법을 시작하여 510초 동안 지형상대항법을 수행하였고, 제안한 영역기반 지형 험준도 지수를 고려한 지형상대항법의 성능 개선을 확인하고자 100회 몬테 칼로 시뮬레이션을 통해 RMS(Root Mean Square) 수평 위치 오차를 나타내었다.

Figure 14는 시간에 따른 RMS 수평 위치오차를 나타낸 것으로서 지형 험준도 지수를 고려하지 않은 경우와 각각의 궤적기반 지형 험준도 지수 σ_T , σ_Z 를 고려한 경우, 영역기반 지형 험준도 지수 $\sigma_Z^{along \times cross}$, $\sigma_K^{along \times cross}$ 를 고려한 경우 고려하여 총 4가지에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 14에서 나타낸 바와 같이 지형 험준도 지수를 적용한 경우가 지형 험준도 지수를 적용 않은 경우보다 지형상대항법 성능이 크게 향상됨을 볼 수 있다.

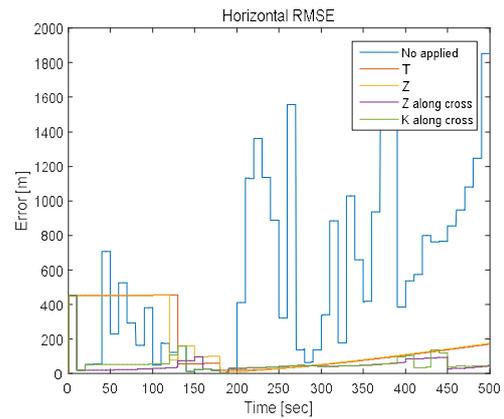


Fig. 14. Horizontal position RMS errors

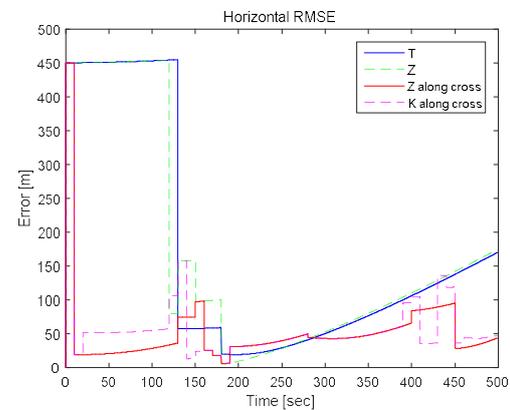


Fig. 15. Horizontal position RMS errors with roughness indexes

Figure 15는 험준도 지수의 항법성능차이를 보기 위하여 지형 험준도 지수를 고려하지 않은 경우를 제외하고 각각의 지형 험준도 지수 적용하였을 때 시간에 따른 RMS 수평 위치 오차를 나타내었다. 초기 오차 주어진 구간에서 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수(σ_T, σ_Z)는 지형 가용률이 낮아 초기 오차가 제거가 늦게 되지만 영역기반 지형 험준도 지수($\sigma_Z^{along \times cross}, \sigma_K^{along \times cross}$)는 높은 지형 가용률이 높아 위치 보정하여 초기 오차가 상대적으로 빨리 제거됨을 확인할 수 있다. 그리고 130초~180초 구간 사이에서는 정탐지율이 높아 더 작은 수평위치 오차를 가짐을 확인할 수 있다. 특히 130초~140초에 사용된 지형은 Fig. 16과 같이 3.1장에서 제기한 언덕과 같은 반복되는 지형으로 확인 되었고 Fig. 17과 같이 상관 값인 MAD 혹은 MSD 값이 한쪽 방향으로 유사한 값들이 분포하여 기존의 궤적기반의 지형 험준도 지수로는 오보정 할 수 있는 한계점을 확인할 수 있다. 또한 180 ~ 280 sec 구간에서의 오차는 50m이내 이므로 모든 지형 험준도 지수

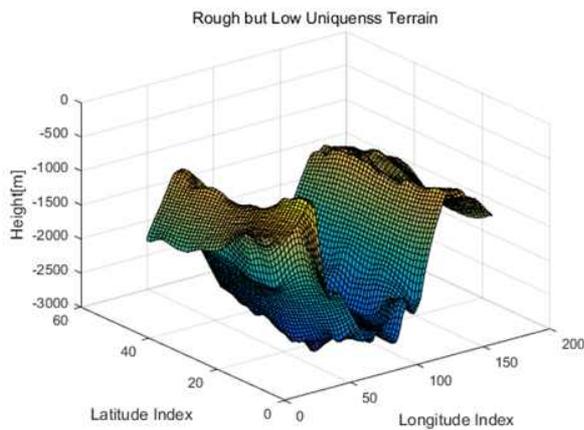


Fig. 16. Actual terrain models of False fix

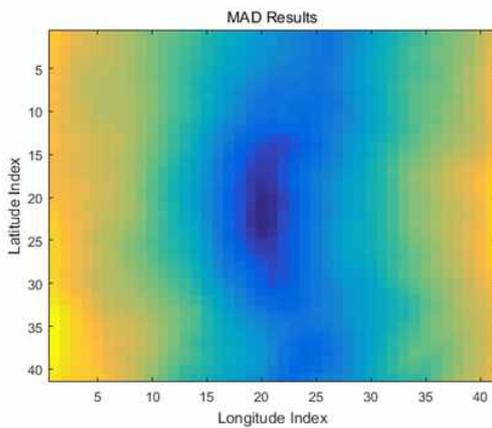


Fig. 17. MAD of False fix

Table 4. Mean of RMSE for terrain roughness indexes

	Mean of RMSE [m]
Without Roughness Index	559.33
σ_T	173.05
σ_Z	172.71
$\sigma_Z^{along \times cross}$	51.19
$\sigma_K^{along \times cross}$	58.60

에 대하여 정보정을 만족하는 구간이라 볼 수 있지만 280초 구간 이후 구간에서는 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수를 이용하였을 경우는 보정 없어 INS 발산이 이루어 지지만 영역기반 지형 험준도 지수를 적용 하였을 경우는 보정을 통하여 50m 이내 오차수준으로 들어 오는 것을 확인

할 수 있어 영역기반 험준도 지수를 적용할 경우 지형 가용률이 높음을 확인 할 수 있다.

Table 4는 RMS 수평 위치오차의 시간에 대한 평균을 통해 전반적인 달 착륙 궤적의 항법 성능을 비교하였다. 지형 험준도 지수를 적용하지 않은 경우는 559.33m, 궤적기반 험준도 지수 σ_T 를 적용한 경우는 173.05 m, 궤적기반 험준도 지수 σ_Z 를 적용한 경우는 172.71m, 영역기반 험준도 지수 $\sigma_Z^{along \times cross}$ 를 적용한 경우는 51.19m 그리고 영역기반 험준도 지수 $\sigma_K^{along \times cross}$ 를 적용한 경우는 58.60m이다. RMS 수평 위치오차의 시간에 대한 평균을 통해 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수를 이용한 지형상대항법 성능보다 제안한 영역기반 지형 험준도 지수를 고려하였을 때의 항법 성능 개선을 확인 할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 고도계를 이용한 일괄처리방식 지형상대항법에서 유사지형에 의한 오보정을 감소시키기 위한 영역기반 지형 험준도 지수를 제안하였다. 평준한 지형과 같이 지형의 유일성이 적을 경우에 오보정을 방지하기 위하여 기존의 궤적기반 험준도 지수가 지형상대항법에서 위치 갱신을 위한 지형 험준도 임계치로 사용 되지만 언덕과 같은 반복되는 지형과 같이 측정된 지형고도 프로파일과 후보 지형고도 프로파일이 유사할 때 다른 지형으로 오보정을 유발 할 수 있는 단점을 가지고 있어, 이러한 단점을 해결하기 위해 영역기반 험준도 지수를 제안하였다. 영역기반 험준도 지수는 INS 위치 지점을 기준으로 관심영역의 기울기 혹은 곡률을 이용하여 양방향의 분산을 통해 지형의 유사성을 판별 할 수 있어 유사 지형에 의한 오보정을 감소시킬 수 있다. 제안된 기법의 지형상대항법의 성능개선을 확인하기 위해 달착륙선의 착륙궤적에 대해 지형 험준도 지수 성능분석 시뮬레이션과 지형 험준도 지수를 적용한 지형상대항법 성능 분석의 시뮬레이션을 2가지로 나누어 수행하였다. 지형 험준도 지수 성능 분석 시뮬레이션에서 지형가용률과 정탐 지움면에서 영역기반 지형 험준도 지수의 성능이 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수의 성능보다 높음을 알 수 있었고 시간에 따른 RMS 수평 위치오차 비교를 통해 제안한 영역기반지형 험준도 지수를 고려한 지형 상대항법의 성능 개선을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 지원(과제번호 NRF-2013M1A3A3A02042468)을 받아 수행되었습니다.

References

- 1) T. Brady, J. Schwartz, "ALHAT system architecture and operational concept," IEEE Aerospace Conference, Big sky, Montana, 2007.
- 2) Johnson, Andrew E., and James F. Montgomery. "Overview of terrain relative navigation approaches for precise lunar landing." Aerospace Conference, IEEE, 2008.
- 3) Johnson, Andrew, and Tonislav Ivanov. "Analysis and testing of a LIDAR-based approach to terrain relative navigation for precise lunar landing." Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2011.
- 4) Siouris, George. M., Missile Guidance and Control Systems, Springer-Verlag, New York, pp. 551~576, 2003.
- 5) Hollowell, Jeff. "Heli/SITAN: A terrain referenced navigation algorithm for helicopters." Position Location and Navigation Symposium, 1990. Record. The 1990's-A Decade of Excellence in the Navigation Sciences. IEEE PLANS'90., IEEE. IEEE, 1990.
- 6) S.H. Jeong, et al, "A performance analysis of terrain-aided navigation(TAN) algorithms using interferometric radar altimeter", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 40(4), 2012, 285-291.
- 7) S.H. Mok, H.C. Bang, M.G. Yu, "A Performance Comparison of Nonlinear Kalman Filtering Based Terrain Referenced Navigation", Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 40(2), 2012, 108-117
- 8) Henley, A. J. "Terrain aided navigation: current status, techniques for flat terrain and reference data requirements." Position Location and Navigation Symposium, 1990. Record. The 1990's-A Decade of Excellence in the Navigation Sciences. IEEE PLANS'90., IEEE. IEEE, 1990.
- 9) Ekütekin, Vedat. "Navigation and control studies on cruise missiles", Ph.D. Dissertation, MIDDLE. EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2007.
- 10) Y.M. Yoo, et al, "Profile-based TRN/INS integration algorithm considering terrain roughness." Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.19, No.2, pp. 131-139, 2013.
- 11) Y.M. Yoo, S.M. Lee, C.G. Park, "New Terrain Roughness Index for Update of Profile Based TRN," Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, April 2013, pp. 381-387.
- 12) J. Metzger, O. Meister, G. F. Trommer, F. Tumbragel, T. Taddiken, "Adaptations of a comparison technique for terrain navigation," Aerospace Science and Technology, Vol. 9, No. 6, pp. 553~560, 2005.
- 13) P.M. Ku, Y.B. Park, C.G. Park. "A Study on Batch Process of Terrain Relative Navigation Applying Mean Removal Technique to Large Initial Altitude Error of Lunar Lander." The Korean Society For Aeronautical and Space Sciences, KSAS 2014 Fall Conference, 2014.
- 14) Roberts, Andy. "Curvature attributes and their application to 3 D interpreted horizons." First break 19.2 (2001): 85-100.
- 15) Geller, David K., and Daniel Christensen. "Linear covariance analysis for powered lunar descent and landing." Journal of Spacecraft and Rockets 46.6: 1231-1248, 2009.