creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

영역기반 지형 기울기 험준도를 이용한 달착륙선의 지형참조항법 성능분석

Performance Analysis of Terrain Referenced Navigation Using Area Based Terrain Slope Roughness for Lunar Lander

2016 년 8 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

구 평 모

초 록

고도계를 이용한 지형참조항법은 측정된 지형고도와 DEM(Digital Elevation Map)의 지형고도의 비교를 통해 위치보정이 이루어지는 일괄처리방식과 매 순간 획득되는 고도계 측정치와 DEM의 지형기울기를 활용하여 위치 보정하는 순차처리방식으로 나뉜다.

일괄처리방식 지형참조항법은 언덕과 같이 유사한 지형이 반복되는 경우에 측정된 지형고도 프로파일과 후보 지형고도 프로파일이 유사하여 다른 지형으로 오보정을 유발 할 수 있는 단점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 순차처리방식 지형참조항법은 큰 위치오차로 인하여 위치오차 공분산이 크지만 상대적으로 정확한 센서 정보로 인하여 필터의 위치오차 공분산 값이 빠르게 수렴하여 위치오차 공분산을 기준으로 지형의 대표 기울기 영역이 항체의 참 위치를 포함하지 못하게 되는 경우 오추정을 유발 할 수 있다.

본 논문에서는 일괄처리방식 지형참조항법의 단점을 극복하기 위해 탐색영역 안에 주변 지형의 유사한 정도를 판단하는 영역기반 지형 기울기 험준도 지수를 적용하였고[11], 영역기반 지형 곡률 험준도 지수를 제안하였다. 그리고 순차처리방식 지형참조항법의 단점을 극복하기 위해 지형고도 차이의 불확실성과 지형의 기울기 차이 불확실성을 반영한 측정 잡음 공분산을 제안하였다.

제안한 기법의 성능 검증을 위하여 달착륙선의 착륙궤적에 대해 일괄처리방식과 순차처리방식의 지형참조항법을 각각 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 기존의 궤적기반 지형 험준도 지수를 고려하였을 때 보다 영역기반 지형 험준도 지수를 고려하였을 때 일괄처리방

식 지형참조항법 성능이 개선됨을 확인 할 수 있었고, 제안한 지형 기울기 험준도를 이용한 측정 잡음 공분산을 반영 함으로써 큰 위치오차에서 안정적인 항법성능을 확인 할 수 있었다.

주요어: 관성항법(Inertial Navigation System),
지형참조항법(Terrain Referenced Navigation),
험준도 지수(Roughness Index),
측정 잡음 공분산(Measurement Noise Covariance)

학 번 : 2014-20673

목차

초 록 i

그림 목차 v

표 목차 vii

1. 서 론 1

1.1. 연구 배경 1

1.2. 연구 목적 및 내용 3

2. 지형참조항법 알고리즘 5

2.1. 일괄처리방식 지형참조항법 5

2.2. 순차처리방식 지형참조항법 8

3. 영역기반 지형 기울기 험준도를 이용한 일괄처리방식 지형참조항법 14

3.1. 궤적기반 지형 험준도 지수 14

3.2. 영역기반 지형 험준도 지수 19

3.2.1. 지형의 기울기를 이용한 험준도 지수 19

3.2.2. 지형의 곡률을 이용한 험준도 지수 21

3.2.3. 가상지형 모델에 따른 지형 험준도 분석 24

3.3. 시뮬레이션 및 성능분석 27

3.3.1. 지형 험준도 지수 성능분석 28

3.3.2. 지형 험준도 지수를 이용한 지형참조항법 성능분석 35

4. 영역기반 지형 기울기 험준도를 이용한 순차처리방식 지형참조항법 40

4.1. EKF-SL 의 측정 잡음 공분산 40
4.2. 영역기반 지형 기울기 험준도를 이용한 측정 잡음 공분산 45
4.2.1. 지형 고도 차이를 이용한 측정 잡음 공분산 추정 45
4.2.2. 지형 기울기 차이를 이용한 측정 잡음 공분산 추정 47
4.3. 시뮬레이션 및 성능분석 53
5. 결 론 65
참 고 문 헌 68
Abstract 71

그림 목차

그림 2. 1 일괄처리방식 지형참조항법 구성도 6
그림 2. 2 순차처리방식 지형참조항법 구성도 9
그림 3. 1 측정된 지형 고도 샘플과 지형 기울기 샘플 15
그림 3. 2 오보정의 가상의 지형 모델 17
그림 3. 3 오보정 지형의 MAD 18
그림 3. 4 관심영역의 지형 기울기 방향 20
그림 3. 5 관심영역의 지형 곡률 방향 22
그림 3. 6 국소 영역의 곡률(1D) 23
그림 3. 7 가상 지형 모델 25
그림 3. 8 10,000개 지형의 TRN 샘플 29
그림 3. 9 10,000개 지형에 대한 수평오차 30
그림 3. 10 $\sigma_z^{along\times cross}$에 대한 오보정 비율 31
그림 3. 11 $\sigma_z^{along\times cross}$에 대한 지형 가용률 33
그림 3. 12 $\sigma_z^{along\times cross}$에 대한 정탐지율 33
그림 3. 13 수평위치오차 RMS 36
그림 3. 14 험준도 지수에 따른 RMS 수평위치오차 37
그림 3. 15 오보정의 실제 지형 모델 38
그림 3. 16 오보정일 때의 MAD 38
그림 4. 1 기울기 추정에 따른 오보정 유발 41
그림 4. 2 지형고도 차이 불확실성 개념도 46
그림 4. 3 지형 DB를 이용한 참 기울기 후보 계산 48
그림 4. 4 Sine파 참 지형 50
그림 4. 5 Sine파 지형 DB 51
그림 4. 6 초기오차(2500m 이하)에 따른 위도오차 RMS 54
그림 4. 7 초기오차(2500m 이하)에 따른 경도오차 RMS 54
그림 4. 8 초기오차(2500m 이하)에 따른 고도오차 RMS 55

그림 4. 9 초기오차 2500m 이하 일 때의 고도계 측정치 오차와 기존의 측정 잡음 공분산 55
그림 4. 10 초기오차 3000m일 때의 위도오차 RMS 위도오차 공분산 57
그림 4. 11 초기오차 3000m일 때의 경도오차 RMS 경도오차 공분산 57
그림 4. 12 초기오차 3000m일 때의 고도오차 RMS와 고도오차 공분산 58
그림 4. 13 초기오차 3000m일 때의 고도계 측정치 오차와 기존의 측정 잡음 공분산 58
그림 4. 14 고도계 측정치 오차와 제안된 알고리즘의 측정 잡음 공분산 60
그림 4. 15 동력하강단계에서의 위도오차 공분산 61
그림 4. 16 동력하강단계에서의 경도오차 공분산 61
그림 4. 17 동력하강단계에서의 고도오차 공분산 62
그림 4. 18 동력하강단계에서의 위도오차 RMS 63
그림 4. 19 동력하강단계에서의 경도오차 RMS 63
그림 4. 20 동력하강단계에서의 고도오차 RMS 64

표 목차

표 3.1 지형 모델의 험준도 26
표 3.2 시뮬레이션 오차 파라미터 27
표 3.3 지형 험준도 지수에 따른 파라미터 성능 34
표 3.4 지형험준도 지수에 따른 RMS 수평위치오차 평균 39
표 4.1 가상의 지형에 따른 불확실성 비교 52
표 4.2 순차처리 지형참조항법의 운용구간에 따른 초기오차 53

1. 서 론

1.1. 연구 배경

달착륙선의 착륙 단계는 크게 달 궤도 단계, 천이 궤도 단계 그리고 동력 하강 단계로 구성된다. 달 궤도 단계는 달착륙선이 약 100km원형 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 지형참조항법은 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 지형참조항법 성능이 더 좋은 것으로 알려져 있다[2]. 그러나 카메라를 이용한 지형참조항법은 빛에 따라 운용조건이 제약 될 수 있는 반면, 고도계나 Lidar를 이용한 지형참조항법은 빛에 관계없이 지형참조항법이 가능한 장점이 있다[3].

고도계는 상대적으로 Lidar보다 더 높은 운용고도에서 지형참조항법이 가능하다[2]. 고도계를 이용한 지형참조항법 알고리즘 방식으로는 데이터 처리방식에 따라 측정치의 일정 데이터를 한꺼번에 처리하는 일괄처리방식과 현재의 측정치 정보를 이용하는 순차처리방식으로 나뉜다[4,5,6,7]. 고도계를 이용한 일괄처리방식의 지형참조항법은 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]. 고도계를 이용한 순차처리방식의 지형참조항법은 매 순간 획득되는 고도 데이터와 지형 DB의 지형 고도 변화율을 활용하여 위치 오차를 보정하게 된다.

일괄처리방식의 지형참조항법을 적용함에 있어 험준한 지형에서는 유일성을 갖는 지형들이 많으므로 측정된 지형고도 프로파일과 DEM의 후보 지형고도 프로파일과의 구별이 쉽기 때문에 지형참조항법의 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 진행되었다[4,10,11]. 하지만 언덕과 같은 반복되는 지형에서 기존의 지형 험준도 지수가 지형이 험준하다

고 판단하더라도 측정된 지형고도 프로파일과 유사한 후보 지형고도 프로파일이 존재하여 다른 지형으로 오보정을 유발하므로 오보정을 줄일 수 있는 기법에 대한 연구가 필요하다.

순차처리방식의 지형참조항법을 적용함에 있어 지형의 비선형성으로 지형 DB의 선형 모델 근사화가 불가능하므로 항법해가 부정확 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 기존에는 추정위치 오차 영역 내에서의 최소제곱법을 이용하여 지형의 기울기 값을 사용하고 추가적인 측정 잡음 공분산을 반영하여 안정적인 항법성능을 도출 할 수 있다. 하지만 달착륙선의 동력하강단계에서는 큰 초기오차를 갖고 상대적으로 정확한 고도계 센서로 인하여 수평위치 오차는 보정이 안되고 위치오차 공분산 값이 빠르게 수렴하여 작은 오차영역으로 인해 실제 위치를 포함하지 않은 오차영역을 설정하게 되는 문제점을 가지고 있다. 부정확한 오차영역은 지형의 기울기를 잘못 추정하게 되어 항법해가 부정확해지므로 큰 초기 오차로 인해 오추정 유발을 줄일 수 있는 기법에 대한 연구가 필요하다.

1.2. 연구 목적 및 내용

본 논문에서 일괄처리방식 지형참조항법으로는 탐색영역 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.

순차처리 지형참조항법으로는 큰 초기 오차로 인해 빠르게 위치오차 공분산이 수렴하여 작은 탐색영역으로 인한 오추정되는 문제를 완화하고자 영역기반 지형의 기울기 험준도를 이용하여 측정 잡음 공분산을 제안하였다.

본 논문의 2장에서는 기존에 연구되어 온 일괄처리방식 지형참조항법과 순차처리방식 지형참조항법에 대하여 소개 한다. 3장에서는 일괄처리방식 지형참조항법에서 지형의 험준도를 고려한 기존의 궤적기반 지형험준도 지수에 대한 한계점을 설명하고 영역기반 지형 험준도 지수에 대한 설명과 시뮬레이션을 통해 적용된 알고리즘에 대한 결과를 분석한다. 4장에서는 순차처리방식 지형참조항법에서 큰 초기위치오차를 고려한 기존의 알고리즘에 대한 한계를 설명하고 영역기반 지형 기울기 험준도를 반영한 측정 잡음 공분산에 대한 설명과 시뮬레이션을 통해 적용된 알고리즘에 대한 결과를 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺고 본 논문을 마치도록 한다.

2. 지형참조항법 알고리즘

고도계를 이용한 지형참조항법 알고리즘 방식으로는 데이터 처리방식에 따라 측정치의 일정 데이터를 한꺼번에 처리하는 일괄처리방식과 현재의 측정치 정보를 이용하는 순차처리방식으로 나뉜다[4,5,6,7]. 2장에서는 기존의 일괄처리방식의 지형참조항법 알고리즘과 순차처리 지형참조항법 알고리즘에 대하여 설명한다.

2.1. 일괄처리방식 지형참조항법

일괄처리방식 지형참조항법은 그림 2.1과 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].

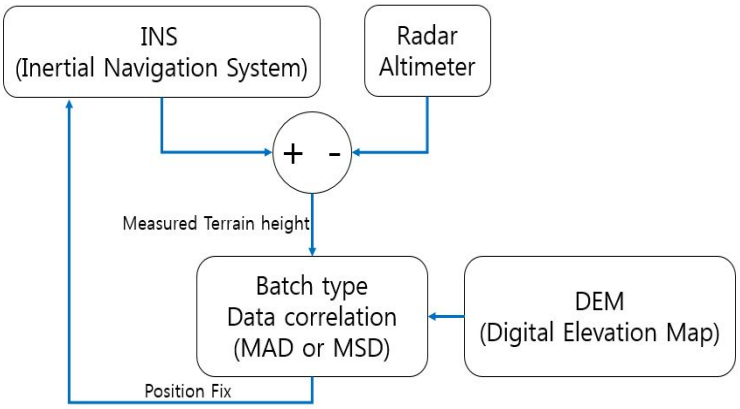


그림 2. 1 일괄처리방식 지형참조항법 구성도

일괄처리방식 지형참조항법은 데이터 준비단계, 데이터 획득단계 그리고 데이터 상관 단계로 위치를 결정한다[4]. 데이터 준비단계에서는 항체의 INS위치를 기준으로 탐색영역의 데이터를 준비하게 된다. 탐색영역의 크기는 진행방향과 진행방향의 수직한 방향에 대해 불확실성을 충족시킬 수 있는 충분한 크기여야 하고 측정된 지형고도 프로파일과 같은 길이를 갖는 후보 지형고도 프로파일들로 구성된 기준 행렬로 사용된다. 데이터 획득단계에서는 INS의 고도와 고도계 데이터를 이용하여 지형고도를 계산한다. 측정된 지형고도 h_{meas}는 식 (2.1)과 같이 INS의 고도 h_{ins}와 고도계로부터 측정된 고도 h_{radar}의 차분을 통해 얻어진다.

$$h_{meas} = h_{ins} - h_{radar} \tag{2.1}$$

데이터 상관 단계에서는 탐색영역 내에서 주기적으로 측정된 지형고도

프로파일과 동일한 크기의 후보 지형고도 프로파일들에 대해 상관기법을 적용하여 측정된 지형고도 프로파일과 가장 유사한 후보 프로파일들을 찾는다.

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 (2.1)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 (2.2) 및 (2.3)과 같이 측정된 지형고도 프로파일과 DEM의 후보 지형고도 프로파일의 평균 값을 제거하는 MAD와 MSD를 적용하였다[12,13].

$$\mathbf{MAD}_{n,m} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\{\mathbf{h}_{\mathbf{meas}}(i) - \bar{h}_{meas}\} - \mathbf{h}_{\mathbf{DB}}(n+i,m) - \bar{h}_{DB}\}\right| \tag{2.2}$$

$$\mathbf{MSD}_{n,m} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\{\mathbf{h}_{\mathbf{meas}}(i) - \bar{h}_{meas}\} - \{\mathbf{h}_{\mathbf{DB}}(n+i,m) - \bar{h}_{DB}\}\right)^2 \tag{2.3}$$

여기서, N은 측정치 개수이고 h_{DB}는 탐색영역에서 DEM의 후보 지형고

도 프로파일이다. 그리고 N,M은 INS가 계산한 항체의 위치로부터 탐색영역의 DEM의 행과 열 번호이다. 측정된 지형 고도 평균값($\bar{h}_{meas}$)과 DEM의 지형고도 값(h_{DB})의 평균($\bar{h}_{DB}$)은 식 (2.4) 및 (2.5)와 같다.

$$\bar{h}_{meas} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mathbf{h_{meas}}(i) \tag{2.4}$$

$$\bar{h}_{DB} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mathbf{h_{DB}}(n+i,m) \tag{2.5}$$

그리고 식 (2.6) 및 (2.7)과 같이 탐색영역 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 추정 한다.

2.2. 순차처리방식 지형참조항법

순차처리 방식의 지형참조항법은 매 순간 획득되는 고도 데이터를 활용하여 항체의 위치 보정정보를 계산함으로써 보다 다양한 환경에서 활용할 수 있다. 순차처리 방식은 프로파일 형태로 고도 데이터를 일정 시간 수집하여 지형 고도 데이터와의 비교를 통해 유사 지형을 판별하고 위치를 보

정하는 일괄처리 방법과 달리 매 순간 얻어지는 고도 데이터와 다양한 필터링 기법을 활용함으로써 다양한 환경에서 항체의 위치 정보를 보정이 가능하다. 특히, SITAN(Sandia Inertial Terrain Aided Navigation)은 순차처리 방식의 지형참조항법의 가장 대표적인 알고리즘 중 하나이다[14].

일반적인 SITAN 시스템의 블록도는 그림 2.2와 같다. 측정값으로 레이더를 사용하며 INS에서 얻어진 위치를 항공기의 초기 위치라 가정한다. 그 후 EKF를 통해 항법 정보를 추정하게 된다. 이때 사용된 시스템 모델과 측정치 모델은 각각 식 (2.6)과 식 (2.7)과 같다.

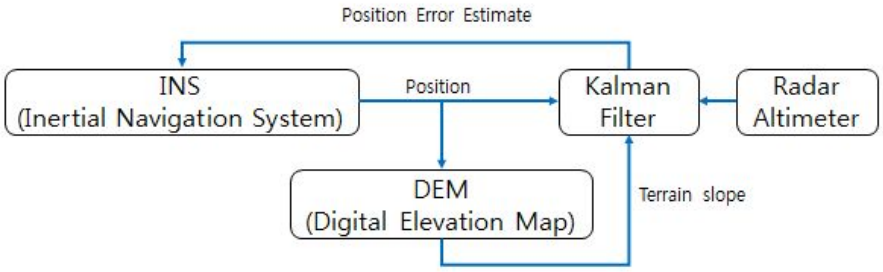


그림 2. 2 순차처리방식 지형참조항법 구성도

$$\delta \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(k) \cdot \delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{w}(k) \tag{2.6}$$

$$z(k) = \mathbf{H}(k) \cdot \delta \mathbf{x} + v(k) \tag{2.7}$$

$$\delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta r & \delta v & \delta \varepsilon & \delta f^b & \delta w^b \end{bmatrix}^T \tag{2.8}$$

여기서 $\delta\mathbf{x}$는 식 (2.8)과 같이 상태변수로 각각 x, y, z 축별 위치 오차(δr), 속도오차(δv), 자세오차($\delta\varepsilon$), 가속도계 바이어스(δf^b), 자이로 바이어스(δw^b)를 나타낸다. 그리고 $\mathbf{F}$(k)는 시스템 모델, $\mathbf{H}$(k)는 측정치 모델이며, w(k) , v(k) 는 백색 가우시안(Gaussian) 잡음으로 각각 공정잡음과 측정잡음을 의미한다.

측정치는 항체의 INS 로부터 추정한 항체와 지형과의 상대 거리차와 레이더 고도계로부터 실제 항체와 지형과의 상대 거리차 차이를 통해 나타낼 수 있으며 식 (2.9)와 같다.

$$z = \hat{y}_{radar} - y_{radar} \tag{2.9}$$

식 (2.9)의 측정치는 DEM의 지형고도 값(h_{DB})과 지구반경(R_0)을 이용하

여 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} z &= \left|\hat{r}^i\right| - R_0 - \hat{h}_{DB} - \left(\left|r^i\right| - R_0 - h_{DB}^{true}\right) + v_{radar} + v_{DB} \\ &= \left|\hat{r}^i\right| - \left|r^i\right| - \left(\hat{h}_{DB} - h_{DB}^{true}\right) + v_{radar} + v_{DB} \end{aligned} \tag{2.10}$$

여기서, r^i는 관성좌표계의 위치, v_{radar}는 고도계의 측정잡음, v_{DB}는 DEM의 지형고도 값의 측정잡음을 나타낸다.

식 (2.10)의 $\left|\hat{r}^i\right| - \left|r^i\right|$는 식 (2.11)과 같이 관성좌표계의 각 x, y, z 축의 단위위치벡터와 위치오차 상태변수벡터의 내적으로 표현 할 수 있다.

$$z = \left(\frac{r^i}{\left|r^i\right|}\right)^T \cdot \delta r^i - \left(\hat{h}_{DB} - h_{DB}^{true}\right) + v_{radar} + v_{DB} \tag{2.11}$$

여기서 식 (2.11)로부터 지형고도 차이($\hat{h}_{DB} - h_{DB}^{true}$)는 위도, 경도 방향으로의 위치 변화량($\delta r_N, \delta r_E, \delta r_D$)과 각 방향으로 선형화된 지형 데이터 기울기($\frac{\partial h_{DB}}{\partial r_N}, \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_E}, \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_D}$)를 이용하여 식 (2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{h}_{DB} - h_{DB}^{true} = \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_N}\delta r_N + \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_E}\delta r_E + \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_D}\delta r_D \tag{2.12}$$

식 (2.13)은 위도, 경도 방향으로의 위치 변화량($\delta r_N, \delta r_E, \delta r_D$)는 관성좌표계와 항법좌표계의 방향코사인행렬($\mathbf{C}_i^n$)을 이용하여 관성좌표계의 위치변화량($\delta r_x, \delta r_y, \delta r_z$)으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{h}_{DB} - h_{DB}^{true} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_N} & \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_E} & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{C}_i^n \cdot \begin{bmatrix} \delta r_x \\ \delta r_y \\ \delta r_z \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

측정치는 식 (2.13)을 식 (2.11)에 대입하여 정리하여 식 (2.14)와 같이 위치오차 상태변수로 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} z &= \left(\left(\frac{r^i}{|r^i|} \right)^T - \mathbf{S} \cdot \mathbf{C}_i^n \right) \delta r^i + v_{radar} + v_{DB} \\ &= \mathbf{H} \cdot \delta r^i + v_{radar} + v_{DB} \end{aligned} \tag{2.14}$$

여기서 $\mathbf{S}$는 선형화된 지형 데이터 기울기 벡터($\begin{bmatrix} \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_N} & \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_E} & 0 \end{bmatrix}$)이고 $\mathbf{H}$는 칼만필터에 적용되는 측정치 행렬을 나타낸다.

이를 통해 식 (2.14)와 같이 선형화된 식을 EKF 기반의 순차처리 방식 지형참조 항법에 적용할 수 있으며, 매 스텝마다 SITAN 알고리즘이 잘 작

동하기 위해서는 측정치 행렬을 구성하는 지형고도의 기울기 값을 잘 계산하는 것이 중요하다.

3. 영역기반 지형 기울기 험준도를 이용한 일괄처리방식 지형참조항법

본 3장에서는 기존의 지형험준도 지수의 개념을 설명하고 한계점에 대해 설명한다. 그리고 기존 지형험준도 지수를 보완하는 영역기반 지형험준도 지수에 대해 설명하고 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다.

3.1. 궤적기반 지형 험준도 지수

일반적으로 지형참조항법은 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 지형참조항법에서 위치 갱신 기준으로 사용 되는 지표가 지형 험준도 지수이다.

지형 험준도 지수에는 지형의 고도 분포를 나타내는 σ_T와 지형의 기울기 분포를 나타내는 σ_Z가 있다[4]. 지형 험준도 지수 σ_T, σ_Z를 궤적기반 지형 험준도 지수라고 정의한다[10]. 궤적기반이란 그림 3.1과 같이 선형 궤적

에 대하여 획득한 전파 고도계의 고도 샘플들(H_i)의 편차를 통하여 지형 험준도를 나타내는 지수이다.

σ_T는 측정된 지형고도 프로파일의 표준편차를 나타내는 값이며 식 (3.1)과 같이 정의되고 지수의 값이 클수록 지형고도 프로파일의 고도 분포가 넓게 나타난다는 의미를 가진다. 여기서 $\overline{\mathrm{H}}$는 전파 고도계의 고도 샘플들(H_i)의 평균을 의미한다[4].

$$\sigma_T = \sqrt{(1/N)\sum_{i=1}^{N}\left(\mathbf{H}_i - \overline{H}\right)^2} \tag{3.1}$$

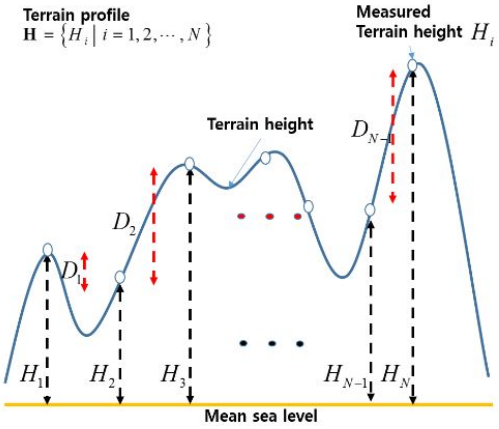


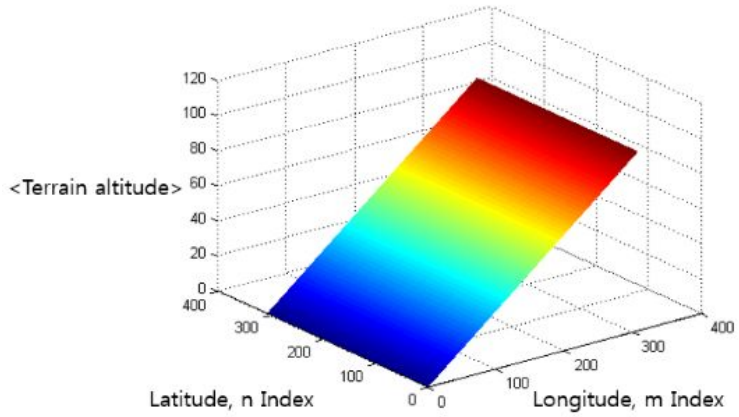
그림 3. 1 측정된 지형 고도 샘플과 지형 기울기 샘플

σ_Z는 이웃한 고도 샘플(H_i) 간의 차이 값(D_i)의 편차를 통하여 지형 험준도를 나타내는 지수이며 식 (3.2)와 같이 정의되고 측정된 지형고도 프로파일의 샘플 간에 기울기의 다양성을 나타내는 지수로, 값이 클수록 변화가 많은 독특한 형태의 지형을 나타내는 것으로 알려져 있다. 여기서 $\overline{\mathrm{D}}$는 전파 고도계의 고도 샘플간 차이 값(D_i)의 평균을 의미한다[4].

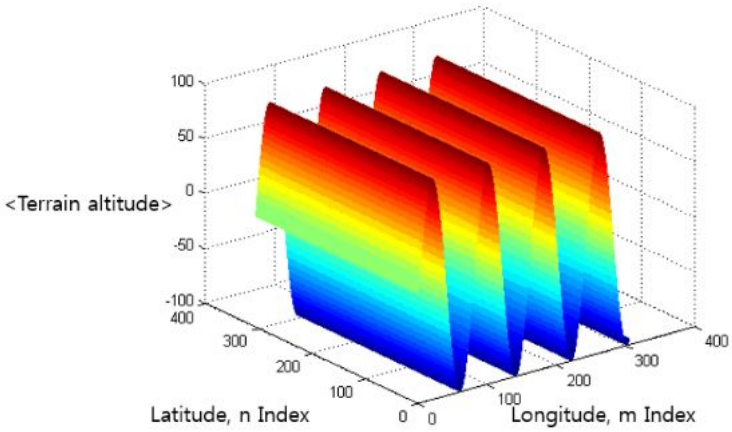
$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}\left(\mathbf{D}_i - \overline{D}\right)^2} \qquad (3.2)$$
$$\mathbf{D}_i = \mathbf{H}_i - \mathbf{H}_{i+1}$$

궤적기반 지형 험준도 지수를 적용하는 경우, 험준하지 않은 지형에서 지형참조항법의 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. 그림 3.2는 측정된 지형고도 프로파일이 경도방향이라 가정하였을 때 오보정이 발생할 수 있는 지형의 예를 나타낸 것이다. 그림 3.2 (a)는 경도방향으로 지형 고도 분포가 높게 존재하여 σ_T 값이 커서 험준한 지형이라고 판단되지만 위도방향으로는 지형 고도가 동일하여 오보정이 발생될 수 있는 비탈면 지형이고 그림 3.2 (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 지형

고도 프로파일이 다수 생성 될 수 있음을 예측 할 수 있다.



(a) 경사 지형 모델



(b) 반복적인 지형 모델

그림 3. 2 오보정의 가상의 지형 모델

그림 3.3은 그림 3.2 (a), 그림 3.2 (b) 두 지형에 대한 MAD 상관 결과를 나타낸 것으로 경도방향의 측정된 지형고도 프로파일과 후보 지형고도 프로파일과 상관기법을 수행하였을 때 경도 방향에 대해서는 험준도 변화가 존재하지만 그에 수직되는 위도 방향으로 험준도 변화가 없어서 MAD 최소값을 갖는 지형고도 프로파일이 6번 경도 인덱스에서 위도 방향으로 다수 생성됨을 확인 할 수 있다.

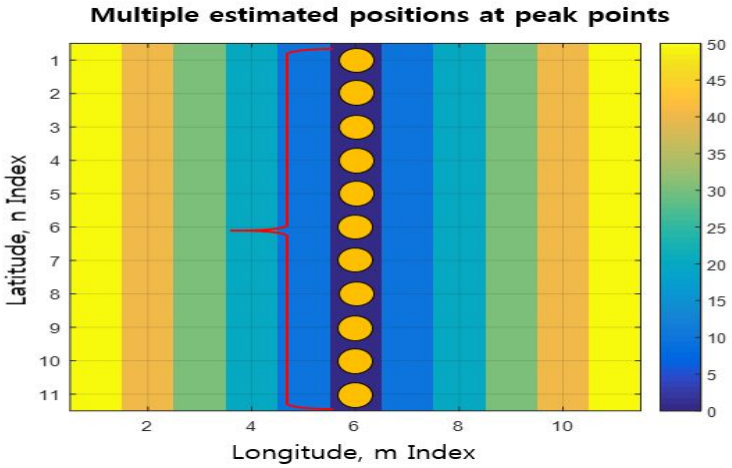


그림 3. 3 오보정 지형의 MAD

3.2. 영역기반 지형 험준도 지수

본 논문에서는 기존의 궤적기반의 지형 험준도 지수의 한계점을 보완하기 위해 탐색영역 안에 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 수직한 방향으로 나뉠 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 시스템에 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 그림 3.4와 같이 ROI에 해당하는 DEM의 진행방향으로 인접한 샘플들의 차이 값들($D_{i,j}^{along}$)을 통해 식 (3.2)의 확장 개념으로서, 식 (3.3)과 같이 표준편차 값으로 정의한다. 여기서

$\overline{D_{i,j}^{along}}$는 진행방향으로 인접한 샘플들의 차이 값들($D_{i,j}^{along}$)의 평균을 의미한다[11].

$$\sigma_z^{along} = \sqrt{\frac{1}{N \times (M-1)} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M-1} \left(\mathbf{D}_{i,j}^{along} - \overline{D_{i,j}^{along}} \right)^2} \qquad (3.3)$$
$$\mathbf{D}_{i,j}^{along} = H_{i,j} - H_{i,j+1}$$

다음으로, 진행방향에 대한 수직방향의 지형 기울기를 이용한 험준도는 식 (3.3)의 진행방향에 대한 지형의 기울기와 같은 방식으로 그림 3.4와 같이 ROI에 해당하는 DEM의 수직방향으로 인접한 샘플들의 차이 값을 통해 식 (3.4)과 같이 표준편차 값으로 정의 한다 여기서 $\overline{D_{i,j}^{cross}}$는 진행방향에 수직방향으로 인접한 샘플들의 차이 값들($D_{i,j}^{cross}$)의 평균을 의미한다.

$$\sigma_z^{cross} = \sqrt{\frac{1}{(N-1) \times M} \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\mathbf{D}_{i,j}^{cross} - \overline{D_{i,j}^{cross}} \right)^2} \qquad (3.4)$$
$$\mathbf{D}_{i,j}^{cross} = H_{i,j} - H_{i+1,j}$$

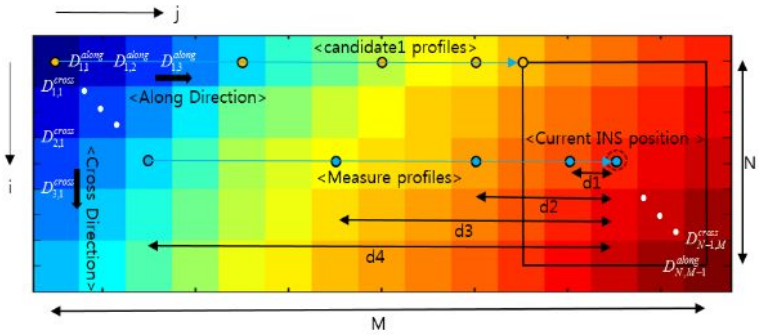


그림 3. 4 관심영역의 지형 기울기 방향

각 방향의 지형 기울기 표준편차를 통해 각 방향의 기울기 험준도 분포를 알 수 있어 식 (3.5)와 같이 진행방향의 기울기 험준도와 수직방향의 기울기 험준도의 곱을 통하여 두 방향의 험준도 정보를 가지는 지형의 기울기를 이용한 영역기반 험준도 지수를 나타낸다.

$$\sigma_z^{along\times cross} = \sigma_z^{along} \times \sigma_z^{cross} \tag{3.5}$$

3.2.2. 지형의 곡률을 이용한 험준도 지수

지형의 기울기를 이용한 험준도 지수와 같은 방식으로 항체의 진행방향과 진행방향의 수직한 방향의 지형 곡률을 이용한 험준도 지수를 나눌 수 있어 두 가지 방향의 험준도 지수를 계산할 수 있는 장점을 가지므로 MAD 혹은 MSD 시스템에 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 (3.6)과 같이 $y = f(x)$에 대한 도함수로 표현이 가능하다[15].

$$K = \frac{d^2y / dx^2}{\left(1 + \left[dy / dx\right]^2\right)^{3/2}} \tag{3.6}$$

진행방향의 지형 곡률은 그림 3.5와 같이 ROI에 해당하는 DEM 진행방향으로 $[1 \times p]$크기의 DEM의 국소 데이터에서 그림 3.6과 같이 최소자승법을 통해 $(p-1)$차 함수로 근사화 하여 근사화된 함수의 도함수를 이용하여 곡률 값들 $\mathrm{K}_{i,j}^{along}$로 나타낼 수 있고, 각 곡률 값들에 대한 표준편차 값을 통해 진행방향에 대한 지형의 곡률을 이용한 험준도를 나타낼 수 있어 식 (3.7)과 같이 정의한다. 여기서 $\overline{\mathrm{K}}_{i,j}^{along}$는 $\mathrm{K}_{i,j}^{along}$의 평균을 의미한다.

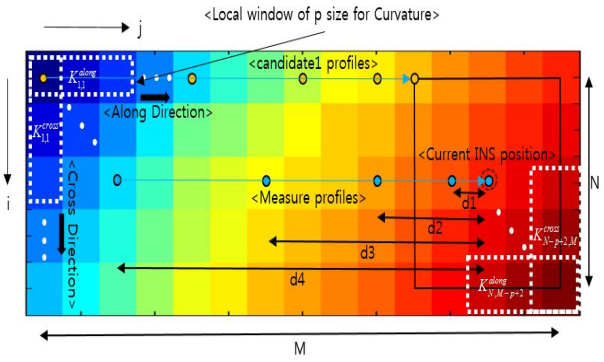


그림 3. 5 관심영역의 지형 곡률 방향

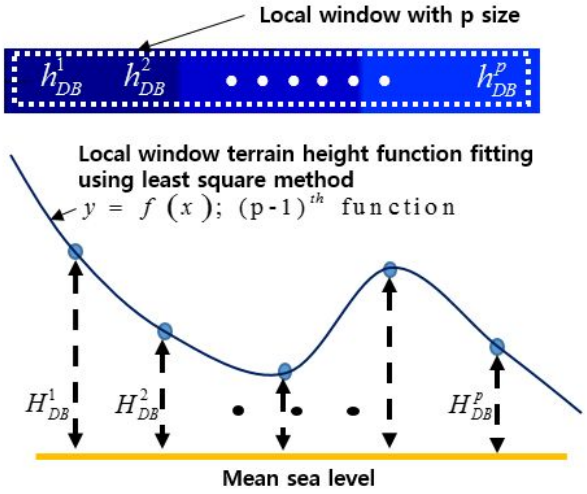


그림 3. 6 국소 영역의 곡률(1D)

$$\sigma_K^{along} = \sqrt{\frac{1}{N \times (M-p+1)} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M-p+1} \left(\mathbf{K}_{i,j}^{along} - \overline{K_{i,j}^{along}} \right)^2} \tag{3.7}$$

진행방향에 대한 수직방향의 지형 곡률은 식 (3.7)의 진행방향의 지형의 곡률과 같은 방식으로 그림 3.5와 같이 ROI에 해당하는 DEM 진행방향으로 $[1 \times p]$크기의 DEM의 국소 데이터에서 그림 3.6과 같이 최소자승법을 통해 $(p-1)$차 함수로 근사화 하여 근사화된 함수의 도함수를 이용하여 곡률 값들$\mathrm{K}_{i,j}^{cross}$ 로 나타 낼 수 있고, 각 곡률 값들에 대한 표준편차 값을 통해 진행방향에 대한 지형의 곡률을 이용한 험준도를 나타낼 수 있어 식 (3.8)과 같이 정의한다. 여기서 $\overline{\mathrm{K}}_{i,j}^{cross}$는 $\mathrm{K}_{i,j}^{cross}$의 평균을 의미한다.

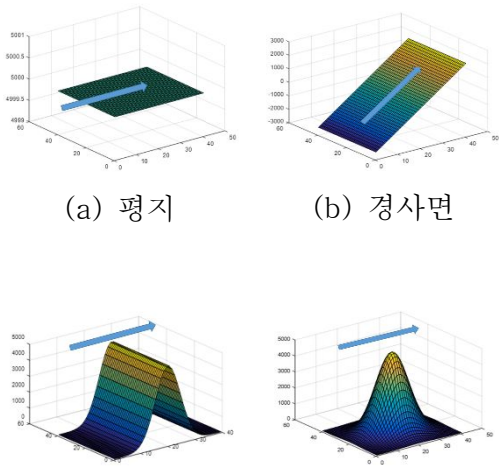
$$\sigma_K^{cross} = \sqrt{\frac{1}{(N-p+1) \times M} \sum_{i=1}^{N-p+1} \sum_{j=1}^{M} \left(K_{i,j}^{cross} - \overline{K_{i,j}^{cross}} \right)^2} \tag{3.8}$$

각 방향의 지형 곡률 표준편차를 통해 각 방향의 곡률 험준도 분포를 알 수 있어 식 (3.9)와 같이 진행방향의 곡률 험준도와 수직방향의 곡률 험준도의 곱을 통하여 두 방향의 험준도 정보를 가지는 지형의 곡률을 이용한 영역기반 험준도 지수를 나타낸다.

$$\sigma_K^{along\times cross} = \sigma_K^{along} \times \sigma_K^{cross} \tag{3.9}$$

3.2.3. 가상지형 모델에 따른 지형 험준도 분석

언덕과 같은 반복되는 지형과 같이 측정된 지형고도 프로파일과 후보 지형고도 프로파일이 유사할 때 다른 지형으로 오보정 유발하는 문제를 검증하고자 가상의 모델지형에 대해 지형 험준도 지수 계산 하였다. 지형의 모델은 그림 3.7과 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 위를 지난다 가정하였다.



(a) 평지 (b) 경사면

(c) 1D 가우시안 (d) 2D 가우시안

그림 3. 7 가상 지형 모델

표 3.1은 각 지형 모델에 따른 지형 험준도 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 Gaussian지형의 경우 고도 값, 고도 변화율도 다르지만 지형의 반복성으로 인해 측정한 지형과 유사한 지형이 존재하여 유일성이 떨어지는 지형이므로 기존의 궤적 기반 지형 험준도 지수(σ_T, σ_Z)는 고도 값, 고도변화율이 존재하여 유일성을 갖는 지형이라 잘못 판단하지만 영역기반 지형 험준도 지수

$(\sigma_Z^{along\times cross}, \sigma_K^{along\times cross})$는 측정한 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 지형참조항법 성능 개선을 예측 할 수 있다.

표 3. 1 지형 모델의 험준도

	σ_T	σ_Z	$\sigma_Z^{along\times cross}$	$\sigma_K^{along\times cross}$
Plain	0	0	0	0
Slope	1.45×10^3	0	0	0
Gaussian (1D)	1.76×10^3	355.14	0	0
Gaussian (2D)	1.77×10^3	298.04	2.51×10^4	172.16

3.3. 시뮬레이션 및 성능분석

제안된 기법의 지형참조항법의 성능개선을 확인하기 위해 달착륙선의 착륙궤적에 대해 지형 험준도 지수 성능 분석시뮬레이션과 지형 험준도 지수를 이용한 지형참조항법 성능 분석의 시뮬레이션을 2가지로 나누어 수행하였다. 달 해상도 100mDB를 이용하여 10초간 비행하면서 10개의 지형고도 측정치 샘플을 획득한다고 가정하였다. 시뮬레이션 오차 조건은 표 3.2와 같다[16].

표 3. 2 시뮬레이션 오차 파라미터

Object	Parameter(1σ)		Value
Laser altimeter	Bias		0.5m
	Scale factor		1000ppm
	Random noise		5m
INS	Accelerometer	Bias	30μg
		Scale factor	60ppm
		Misalignment	20arcsec
		Random walk	$0.00017\mathrm{m/s/}\sqrt{s}$
	Gyro	Bias	0.2deg/hr

		Scale factor	1.6ppm
		Misalignment	20arcsec
		Random walk	$0.0005\text{deg}/\sqrt{s}$
Initial position error	Latitude, Longitude, height		330m
Initial velocity error	N, E, D		0.2m/s,0.047m, 1.5m/s
Initial attitude error	Roll, Pitch, Yaw		0.25mrad

3.3.1. 지형 험준도 지수 성능분석

본 논문에서는 10초간 10개의 지형고도 샘플 측정치를 얻는 동안의 이동거리와 초기 위치오차 2km(6σ)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 지형

고도 차이를 통해 지형의 국소 기울기를 설정한 방법과는 다르게 3개 이상의 지형고도 데이터를 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 그림 3.8과 같이 적도 구간을 중심으로 위도 ±0.5deg, 경도 0~60deg 구간을 10,000개로 나누어 초기위치를 이동하여 1회의 지형참조항법을 10,000개의 지형에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 10,000개의 지형에 대한 지형참조항법을 통해 지형 험준도 지수의 성능 요인으로 오보정율, 지형 가용률, 정탐지율을 정의 하였고, 세 가지 성능 요인을 바탕으로 지형 험준도 지수의 성능을 비교분석하였다.

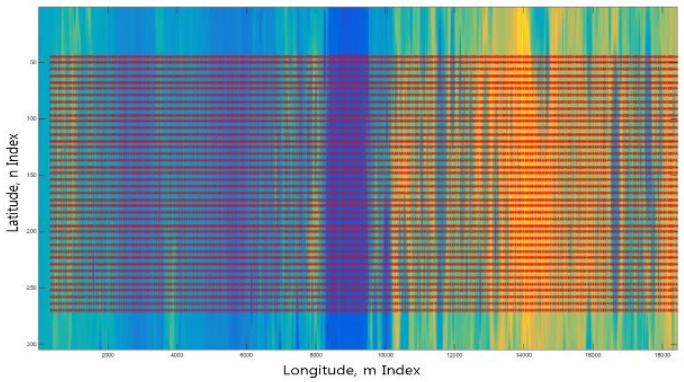


그림 3. 8 10,000개 지형의 TRN 샘플

그림 3.9는 10,000개의 지형에 대해 지형참조항법을 수행하여 수평 위치 오차를 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 정의하였다.

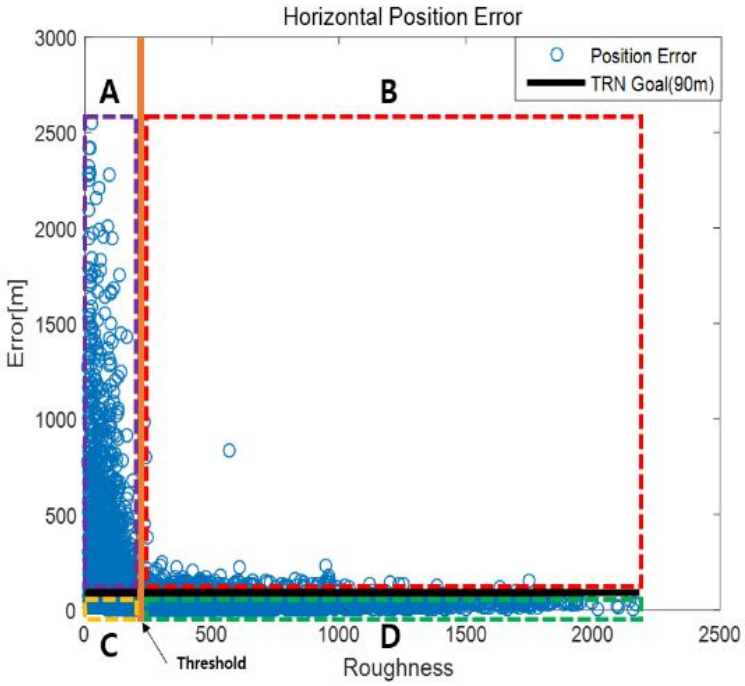


그림 3. 9 10,000개 지형에 대한 수평오차

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 그림 3.10과 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.

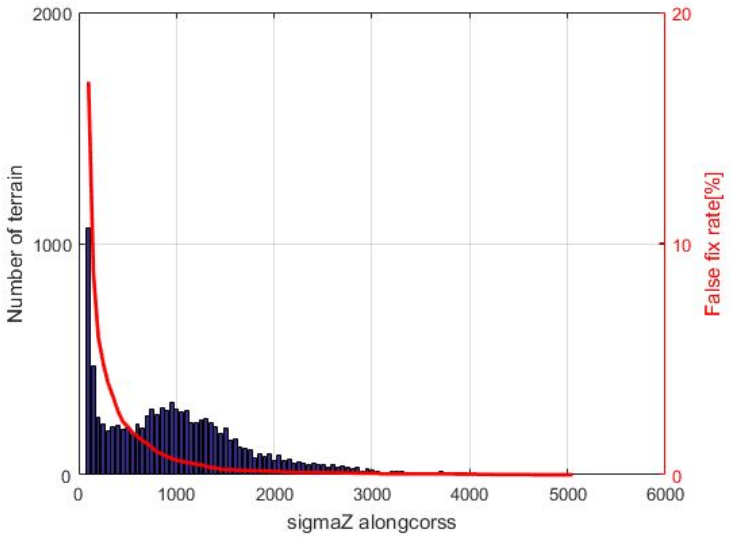


그림 3. 10 $\sigma_Z^{along\times cross}$에 대한 오보정 비율

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 지형참조항법 운용 구간 동안 위치해 보정을 많이 하게 되므로 항체의 INS 시스템의 위치 발산을 막을 수 있다. 그러므로 지형 가용률이 높을수록 지형참조항법을 많이 사용하게 되어 위치 보정을 많이 하므로 지형참조항법의 성능요인이 된다.

정탐지율은 전체 지형 개수(A+B+C+D 구간) 대비 특정 임계치 이하의 오보정 지형의 개수와 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 지형참조항법의 성능 요인이 된다.

지형 험준도 지수 성능을 분석하기 위해 Fig. 11~12와 같이 지형참조항법의 성능요인인 지형가용률과 정탐지율을 오보정 비율에 따른 지형 가용률과 정탐지율을 나타내었다.

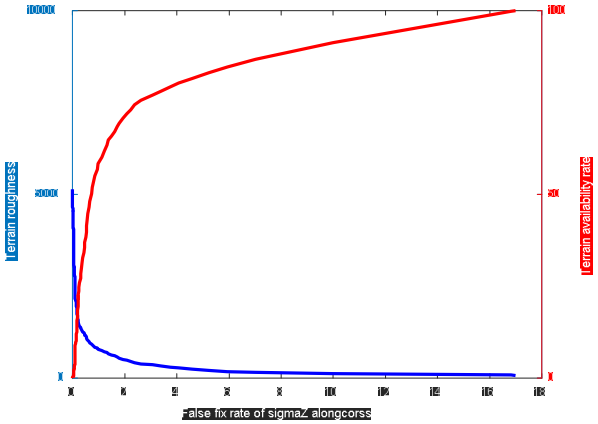


그림 3. 11 $\sigma_Z^{along \times cross}$에 대한 지형 가용률

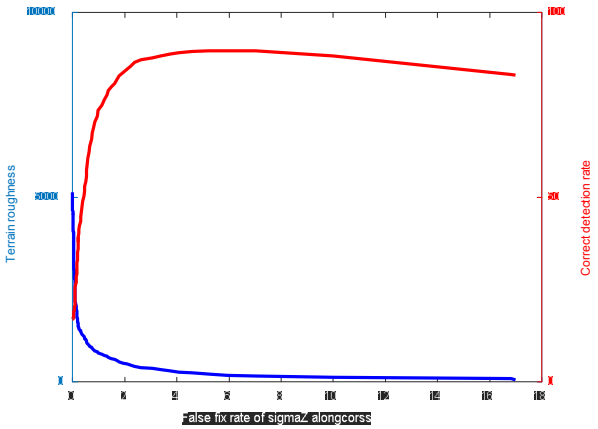


그림 3. 12 $\sigma_Z^{along \times cross}$에 대한 정탐지율

지형참조항법의 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 표 3.3과 같이 오보정률 2%에 해당하는 지형 가용률과 정탐지율을 나타내었다.

표 3. 3 지형 험준도 지수에 따른 파라미터 성능

	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

3.3.2. 지형 험준도 지수를 이용한 지형참조항법 성능분석

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

그림 3.13은 시간에 따른 RMS 수평 위치오차를 나타낸 것으로서 지형 험준도 지수를 고려하지 않은 경우와 각각의 궤적기반 지형 험준도 지수 σ_T, σ_Z를 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. 그림 3.13에서 나타낸 바와 같이 지형 험준도 지수를 적용한 경우가 지형 험준도 지수를 적용 않은 경우보다 지형참조항법 성능이 크게 향상됨을 볼 수 있다.

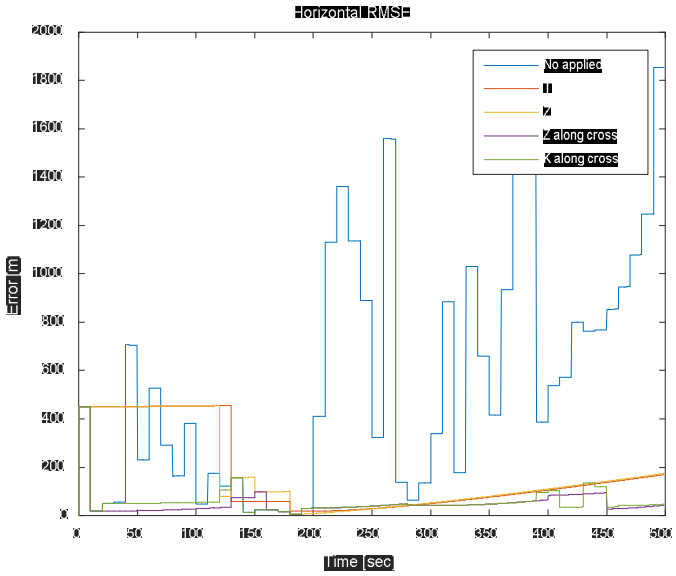


그림 3. 13 수평위치오차 RMS

그림 3.14는 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 확인 할 수 있다. 그리고 130초~180초 구간 사이에서는 정탐지율이 높아 더 작은 수평위치 오차를 가짐을 확인 할 수 있다. 특히 130초~140초에 사용된 지형은 그림 3.15와 같이 3.2.1에서 제기한 언덕과 같은 반복되는 지형으로 확인 되었고 그림 3.16과 같이 상관 값인 MAD 혹은 MSD 값이 한쪽 방향으로 유사한 값들이 분포하여 기존의 궤적기반의 지형 험준도 지수로는 오보정 할 수 있는 한계점을

확인 할 수 있다. 또한 180 ~ 280 sec 구간에서의 오차는 50m이내 이므로 모든 지형 험준도 지수에 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 지형험준도 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.

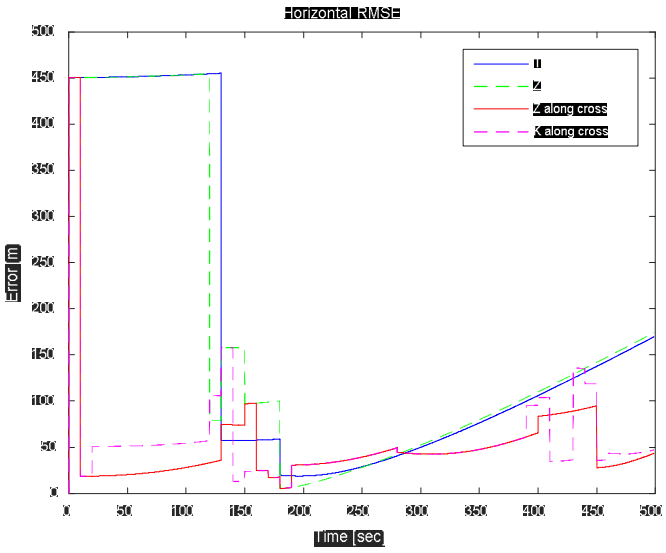


그림 3. 14 험준도 지수에 따른 RMS 수평위치오차

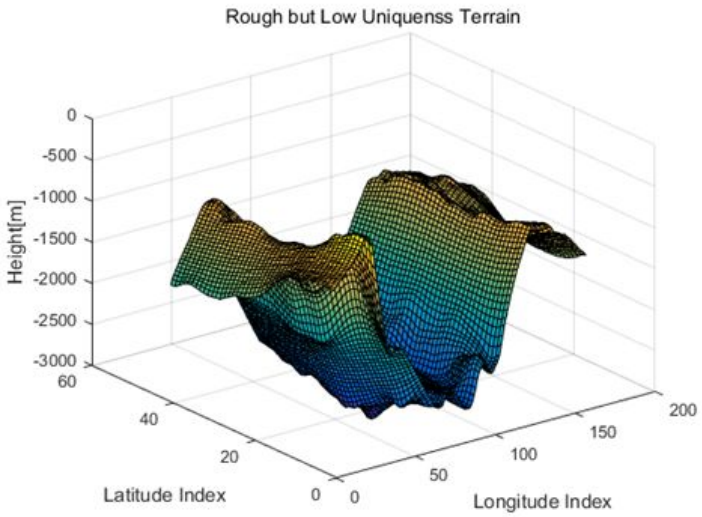


그림 3. 15 오보정의 실제 지형 모델

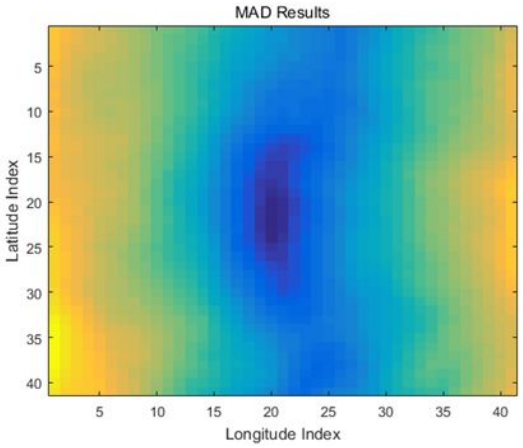


그림 3. 16 오보정일 때의 MAD

표 3.4는 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_T를 적용한 경우는 173.05m, 궤적기반 험준도 지수 σ_Z를 적용한 경우는 172.71m, 영역기반 험준도 지수 $\sigma_Z^{along\times cross}$ 를 적용한 경우는 51.19m그리고 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 지형참조항법 성능보다 제안한 영역기반 지형 험준도 지수를 고려하였을 때의 항법 성능 개선을 확인 할 수 있었다.

표 3. 4 지형험준도 지수에 따른 RMS 수평위치오차 평균

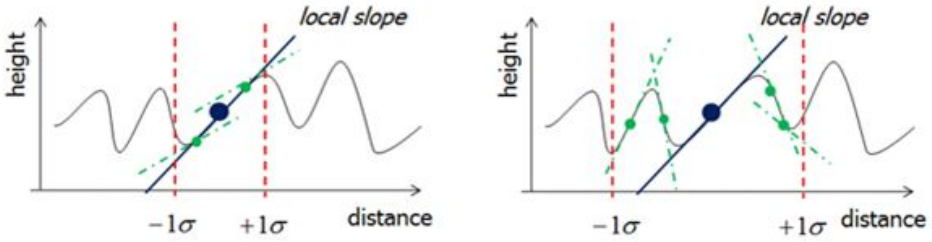
	Mean of RMSE [m]
Without Roughness Index	559.33
σ_T	173.05
σ_Z	172.71
$\sigma_Z^{along\times cross}$	51.19
$\sigma_K^{along\times cross}$	58.60

4. 영역기반 지형 기울기 험준도를 이용한 순차처리방식 지형참조항법

4장에서는 지형의 비선형성을 고려한 기존의 측정 잡음 공분산에 대한 설명과 한계점을 설명하고 기존의 측정 잡음 공분산을 개선하고자 지형고도 차이와 지형 기울기 차이를 이용한 측정 잡음 공분산에 대해 설명을 하고 시뮬레이션을 통해 성능 확인을 한다.

4.1. EKF-SL의 측정 잡음 공분산

항체의 INS 기준으로 지형의 local 기울기는 그림 4.1 (a)와 같이 지형이 선형성일 경우 정보정을 할 수 있지만 그림 4.1 (b)와 같이 지형이 비선형일 경우 참 기울기와 지형의 local 기울기가 달라 오보정을 유발하므로 관심영역에 대해 최소제곱법을 이용한 대표 지형 기울기를 통하여 지형의 기울기 대비 지형과의 잔차를 측정 잡음 공분산으로 추가해주는 EKF-SL(Stochastic Linearization)기법이 있다[14,17].



(a)정보정 (b)오보정

그림 4. 1 기울기 추정에 따른 오보정 유발

지형의 대표 기울기는 라인 기반 지형의 대표 기울기 방법과 영역 기반 지형의 대표 기울기 방식이 있다. 라인 기반 지형의 대표 기울기는 각각의 직선의 방정식으로 모델을 가정하여 식 (4.1)과 식 (4.2)와 같이 경도방향, 위도방향 비용함수를 나타내고 비용함수가 최소가 되는 각각의 경도방향, 위도방향의 기울기를 식 (4.3)과 식 (4.4)와 같이 구한다. 라인 기반 지형의 대표 기울기 대비 지형에 대한 잔차의 분산은 식 (4.5)와 같다[50].

$$S_{Line,\phi} = \sum_{i=1}^{N_x} \left[\left(a(\hat{\phi}_i - \hat{\phi}) + h_{DB}(\hat{\phi}, \hat{\lambda}) \right) - \left(h_{DB}(\hat{\phi}_i, \hat{\lambda}) \right) \right]^2 \tag{4.1}$$

$$S_{Line,\lambda} = \sum_{j=1}^{N_y} \left[\left(b(\hat{\lambda}_j - \hat{\lambda}) + h_{DB}(\hat{\phi}, \hat{\lambda}) \right) - \left(h_{DB}(\hat{\phi}, \hat{\lambda}_j) \right) \right]^2 \tag{4.2}$$

$$\hat{a}_{\text{Line}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_x}\left(\hat{\phi}_i - \hat{\phi}\right)\left(h_{DB}(\hat{\phi}_i, \hat{\lambda}) - h_{DB}(\hat{\phi}, \hat{\lambda})\right)}{\sum_{i=1}^{N_x}\left(\hat{\phi}_i - \hat{\phi}\right)^2} \tag{4.3}$$

$$\hat{b}_{\text{Line}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_y}\left(\hat{\lambda}_i - \hat{\lambda}\right)\left(h_{DB}(\hat{\phi}, \hat{\lambda}_i) - h_{DB}(\hat{\phi}, \hat{\lambda})\right)}{\sum_{j=1}^{N_y}\left(\hat{\lambda}_i - \hat{\lambda}\right)^2} \tag{4.4}$$

$$r_{Line} = \frac{\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\left[\left(\hat{a}_{Line}(\hat{\phi}_i - \hat{\phi}) + \hat{b}_{Line}(\hat{\lambda}_j - \hat{\lambda}) + h_{DB}(\hat{\phi}, \hat{\lambda})\right) - \left(h_{DB}(\hat{\phi}_i, \hat{\lambda}_j)\right)\right]^2}{N_x N_y} \tag{4.5}$$

같은 방식으로 영역기반 지형의 기울기는 평면의 방정식으로 모델을 가정하여 식 (4.6)과 같이 비용함수를 나타내고 비용함수가 최소가 되는 각각의 경도방향, 위도방향의 기울기를 식 (4.7)과 식 (4.8)과 같이 구한다. 영역 기반 지형의 대표 기울기 대비 지형에 대한 잔차의 분산은 식 (4.9)과 같다[17].

$$S_{\text{Plane}} = \sum_{j=1}^{N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\left[\left(a(\hat{\phi}_i - \hat{\phi}) + b(\hat{\lambda}_j - \hat{\lambda}) + h_{DB}(\hat{\phi}, \hat{\lambda})\right) - \left(h_{DB}(\hat{\phi}_i, \hat{\lambda}_j)\right)\right]^2 \tag{4.6}$$

$$\hat{a}_{\text{Plane}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\left(\hat{\phi}_i - \hat{\phi}\right)\left(h_{DB}(\hat{\phi}_i,\hat{\lambda}_j) - h_{DB}(\hat{\phi},\hat{\lambda})\right)}{\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\left(\hat{\phi}_i - \hat{\phi}\right)^2} \tag{4.7}$$

$$\hat{b}_{\text{Plane}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\left(\hat{\lambda}_j - \hat{\lambda}\right)\left(h_{DB}(\hat{\phi}_i,\hat{\lambda}_j) - h_{DB}(\hat{\phi},\hat{\lambda})\right)}{\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\left(\hat{\lambda}_j - \hat{\lambda}\right)^2} \tag{4.8}$$

$$r_{\text{Plane}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_y}\sum_{i=1}^{N_x}\left[\left(\hat{a}_{\text{Plane}}(\hat{\phi}_i - \hat{\phi}) + \hat{b}_{\text{Plane}}(\hat{\lambda}_j - \hat{\lambda}) + h_{DB}(\hat{\phi},\hat{\lambda})\right) - \left(h_{DB}(\hat{\phi}_i,\hat{\lambda}_j)\right)\right]^2}{N_x N_y} \tag{4.9}$$

계산된 라인기반 지형의 대표 기울기 대비 지형에 대한 잔차의 분산(r_{Line}) 또는 영역기반 지형의 대표 기울기 대비 지형에 대한 잔차의 분산(r_{Plane})은 식 (4.10)과 같이 센서 측정잡음 공분산과 지형 DEM의 측정잡음 공분산에 더해져 지형 데이터를 선형화로 모두 나타낼 수 없는 불확실성을 반영하게 된다.

$$R_{LS} = r_{radar} + r_{DB} + r_{Slope} \tag{4.10}$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^{-}\mathbf{H}_k^T\left(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^{-}\mathbf{H}_k^T + R_{LS}\right)^{-1} \tag{4.11}$$

이러한 측정 잡음 공분산은 지형의 비선형성에 따라 식 (4.11)의 칼만 필터의 게인 값에 영향을 주고 상태변수 추정에 반영된다. 지형의 비선형성이 클수록 EKF-SL의 측정 잡음 공분산이 커져 상태변수 업데이트에 칼만 필터의 게인이 작게 반영되고 지형의 선형성이 클수록 EKF-SL의 측정 잡음 공분산이 작아져 칼만 필터의 게인이 크게 반영된다. 하지만 큰 초기 오차를 가지는 경우 EKF-SL 적용이 부적절할 수 있다. 동력하강단계가 시작할 시점에는 관성 항법 오차전파로 인하여 달착륙선은 큰 초기 위치오차를 가지고 있다. 큰 위치오차로 인하여 EKF-SL 기반 지형참조항법을 적용시, 위치오차 공분산이 큰 반면, 상대적으로 정확한 센서 정보로 인하여 필터의 위치오차 공분산 값이 빠르게 수렴하지만 선형화 오차로 인해 실제 위치오차는 줄어들지 않아 위치오차 공분산을 기준으로 지형의 대표 기울기 영역이 항체의 참 위치를 포함 못하게 되어 점점 항법오차가 커져 발산할 수 있다. 이러한 동력하강단계에서 EKF-SL기반 지형참조항법을 적용할 때 문제가 될 수 있기에 추가적인 측정 잡음 공분산이 필요하다.

4.2. 영역기반 지형 기울기 험준도를 이용한 측정 잡음 공분산

4.1절에서는 지형의 비선형으로 인한 기존의 EKF-SL에 대해 개념을 설명과 한계점을 설명하였다. 4.2절에서는 이를 보완하는 영역기반 지형 기울기 험준도를 이용한 측정 잡음 공분산에 대해 설명한다.

4.2.1. 지형 고도 차이를 이용한 측정 잡음 공분산 추정

최소제곱법으로 지형의 대표기울기로 추정한 지형고도차이는 그림 4.2의 Δh_2를 의미한다. 기존의 EKF-SL은 추정한 지형고도와 실제 지형고도의 차이(Δh_1)을 측정 잡음 공분산으로 설정하였지만, 추가적으로 큰 초기오차로 인해 추가적인 측정 잡음 공분산을 반영하기 위하여 식 (4.10)과 같이 지형의 기울기 벡터를 통해 식 (4.11)과 같이 추정한 지형고도 차이(Δh_2)를 측정 잡음 공분산으로 반영 할 수 있다.

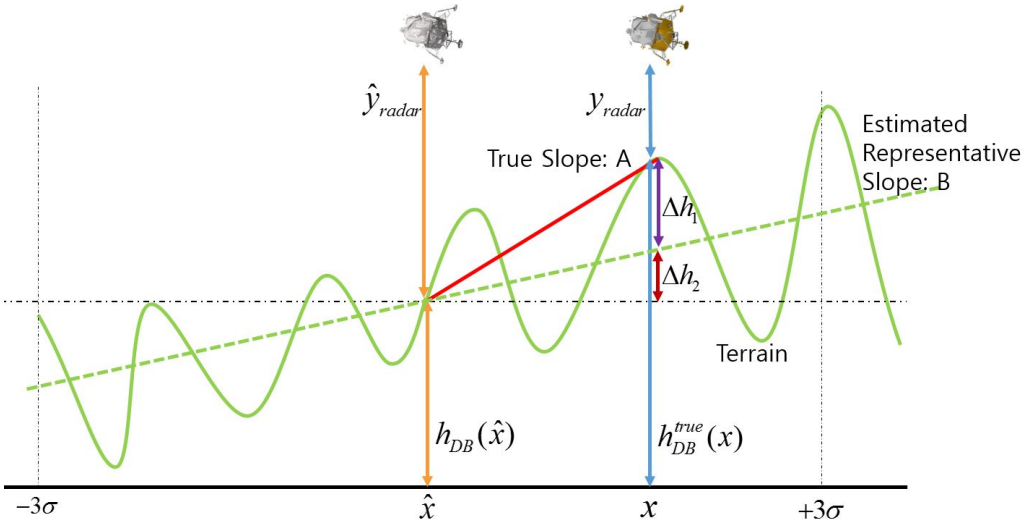


그림 4. 2 지형고도 차이 불확실성 개념도

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_N} & \frac{\partial h_{DB}}{\partial r_E} & 0 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

$$R_{\text{Estimate terrain height difference}} = \mathbf{S}_1 \mathbf{P} \mathbf{S}_1^{\,T} \tag{4.11}$$

지형의 비선형성으로부터 잘못 추정된 기울기로 인한 안정적인 수평위치 오차를 확보하기 위해서는 지형의 험준도를 반영시킬 수 있다. 지형의 기울기 험준도는 진행방향과 진행방향에 수직한 방향으로 나눌 수 있고 두 방향의 험준도 험준도 합을 통하여 지형의 험준도를 반영 할 수 있다. 이러한 지형의 기울기 험준도를 추정 지형고도차이 불확실성에 반영을 하면

식 (4.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$
\begin{aligned}
R_{New1} &= \alpha \cdot R_{\text{Estimate terrain height difference}} + R_{slope} \\
&= \alpha \cdot \mathbf{S}_1 \mathbf{P} \mathbf{S}_1^{\,T} + R_{slope} \\
&= \left(\sigma_z^{along} + \sigma_z^{cross}\right) \cdot \beta \cdot \mathbf{S}_1 \mathbf{P} \mathbf{S}_1^{\,T} + R_{slope}
\end{aligned}
\tag{4.12}
$$

여기서 α는 지형의 기울기 험준도, R_{Slope}는 기존의 EKF-SL의 측정 잡음 공분산, β는 디자인 파라미터, σ_Z^{along}은 진행방향의 기울기 험준도, σ_Z^{cross}는 진행방향에 수직한 기울기 험준도를 의미한다.

4.2.2. 지형 기울기 차이를 이용한 측정 잡음 공분산 추정

지형고도의 비선형으로 인해 기존의 EKF-SL에서 지형의 대표 기울기에 대한 불확실성을 위치오차 공분산을 통해 표현 할 수 있다. 그림 4.3과 같이 항체의 INS 위치와 항체의 참 위치 사이의 참 기울기와 대표 기울기 차이를 구하고 계산된 기울기 차이와 위치 공분산의 곱을 통하여 식 (4.13)와 같이 추정 못한 지형고도 차이인 Δh_1으로 나타낼 수 있으며 Δh_1에 대한 불확실성($R_{\Delta h_1}$)을 타나 낼 수 있다. 항체의 INS 위치와 참 위치 사이의 참

기울기 A를 모르므로 그림 4.2와 같이 지형 DB를 이용하여 항체의 INS 위치 중심으로 참 위치를 지형 DB의 관심영역 중의 격자 점 중에 한 곳이라 가정하면 참 기울기 후보들을 계산 할 수 있다. 식 (4.14)와 같이 계산된 참 기울기 후보들의 분산을 통해 식 참 기울기와 대표 기울기 차이의 불확실성($R_{\mathrm{A-B}}$)으로 가정 할 수 있다. 식 (4.15)와 같이 추정 못한 지형고도 차이 대한 불확실성($R_{\Delta \mathrm{h}_1}$)를 측정 잡음 공분산으로 반영 할 수 있다. 여기서 $\boldsymbol{S}_2$는 참 기울기와 대표 기울기 차이의 표준편차 값으로 이루어진 벡터이다.

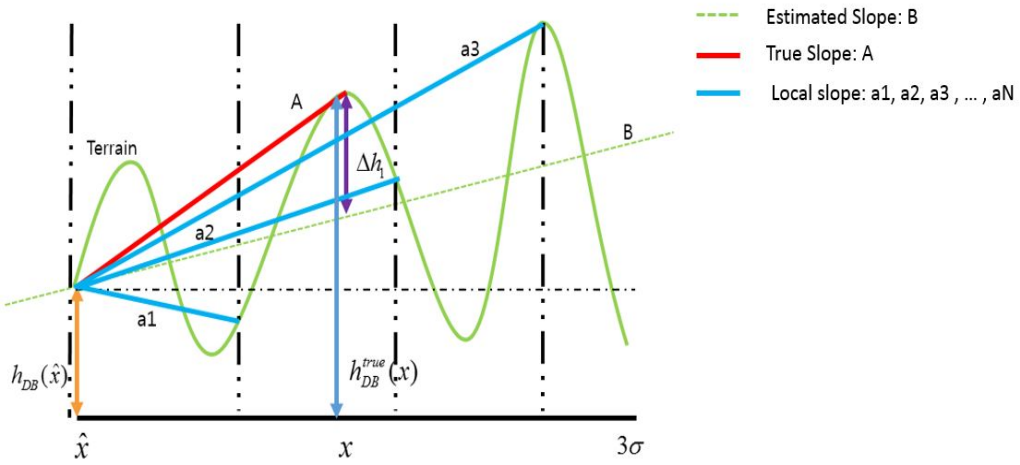


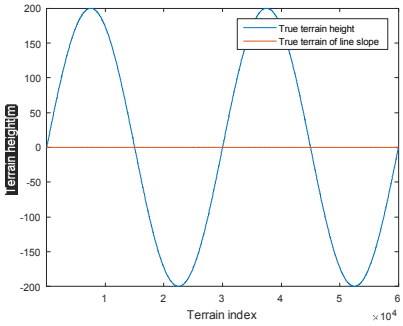
그림 4. 3 지형 DB 를 이용한 참 기울기 후보 계산

$$\Delta h_1 = (A - B) \cdot \delta x \tag{4.13}$$

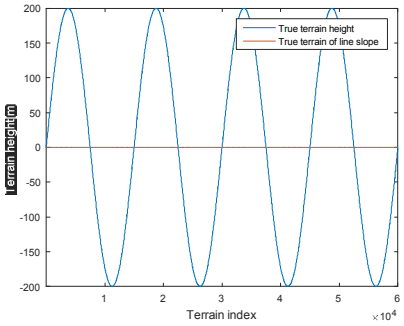
$$R_{A-B} \quad \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(a_i - \bar{a})^2 \tag{4.14}$$

$$R_{New2} = \mathbf{S}_2 \mathbf{P} \mathbf{S}_2^{\,T} \tag{4.15}$$

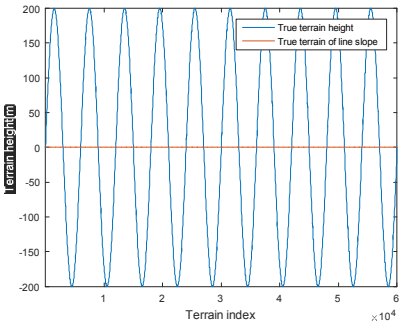
가상의 sine파 지형 3개를 통하여 기존의 EKF-SL의 불확실성과 제안한 불확실성을 비교하였다. 달찰륙선의 PDI 초기 큰 오차크기의 영역을 갖는 60km(3σ)에서 지형의 기울기 험준도에 따른 지형 3개를 나타냈었다. 그림 4.4와 같이 참 지형은 1m 해상도를 갖는 지형으로 이산화를 가정하였고 그림 4.5와 같이 DB는 100m 해상도를 가정하였다.



(a) Case 1

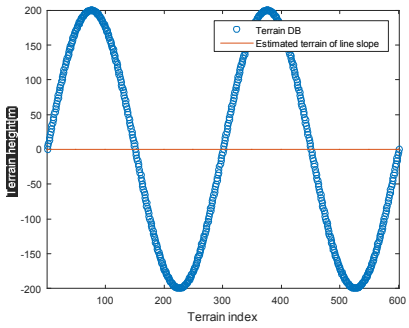


(b) Case 2

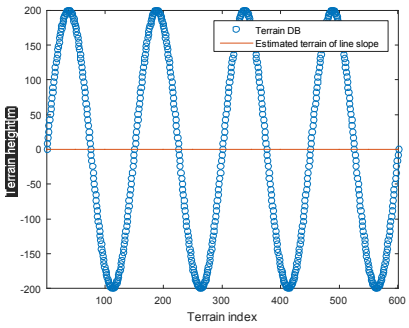


(c) Case 3

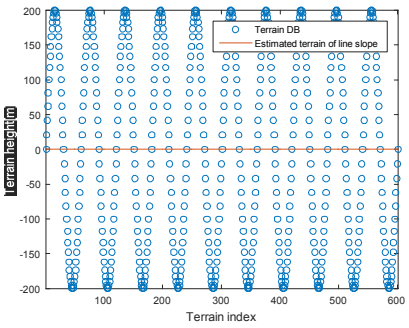
그림 4. 4 Sine 파 참 지형



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

그림 4. 5 Sine 파 지형 DB

기존의 EKF-SL의 불확실성과 제안한 불확실성을 표 4.1에서 비교하였다. 표 4.1에서 알 수 있듯이 true 지형과 DB 지형에 상관 없이 EKF-SL의 불확실성과 제안한 불확실성 값은 동일한 경향을 보임을 확인 할 수 있다. 3개의 지형에 대해서는 지형의 기울기 험준도가 험준도와 상관없이 EKF-

SL의 불확실성 값은 동일한 반면, 지형의 기울기 험준도가 험준할수록 제안한 불확실성 값 더 크게 반영될 수 있음을 확인 할 수 있어 제안한 지형의 비선형성을 더 잘 반영 할 수 있음을 예측 할 수 있다.

표 4. 1 가상의 지형에 따른 불확실성 비교

	Case1	Case2	Case3
R_{SL} from h_{DB}^{true}	141.42	141.42	141.42
R_{New2} from h_{DB}^{true}	180.91	274.97	454.43
R_{SL} from h_{DB}	141.42	141.42	141.42
R_{New2} from h_{DB}	180.62	273.58	447.55

4.3. 시뮬레이션 및 성능분석

표 4. 2 순차처리 지형참조항법의 운용구간에 따른 초기오차

Object	Parameter(1σ)	Value
Initial position error	Latitude, Longitude, Height	750, 9000, 2800 m
Initial velocity error	North, East, Down	0.2, 1.7, 3.2 m/s
Initial attitude error	North, East, Down	Each 0.25 mrad

제안된 기법의 순차처리 지형참조항법의 성능개선을 확인하기 위해 달착륙선의 착륙궤적에 대해 운용구간에 따른 시뮬레이션 초기 오차 조건은 표 4.2와 같고, 고도계와, IMU 센서 오차는 표 3.2와 같다.

먼저, 기존의 EKF-SL을 적용한 경우의 순차처리 지형참조항법 성능은 위도, 경도, 고도 오차는 각각 그림 4.6, 그림 4.7, 그림 4.8과 같이 초기 위치오차가 최대 2500m(1σ)까지 위치 오차 추정을 할 수 있음을 보여준다. 그리고 초기위치 오차 2500m 이하에서 고도계 측정치 오차와 계산된 불확실성이 일치함을 그림 4.9를 통해 알 수 있다.

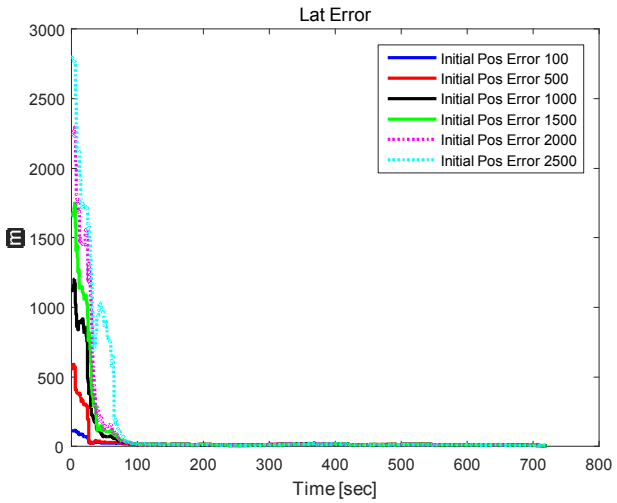


그림 4.6 초기오차(2500m 이하)에 따른 위도오차 RMS

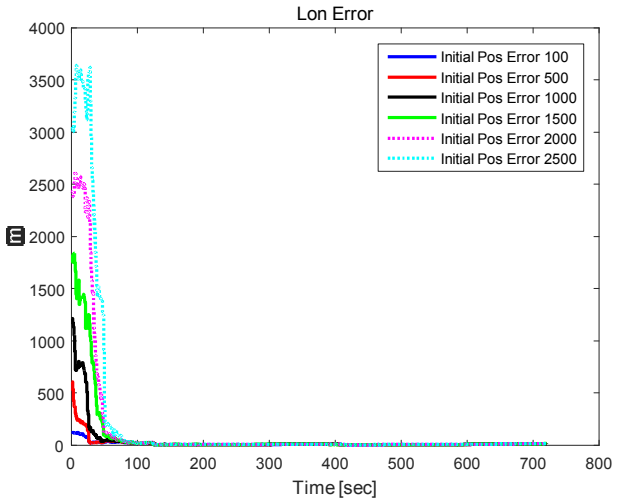


그림 4.7 초기오차(2500m 이하)에 따른 경도오차 RMS

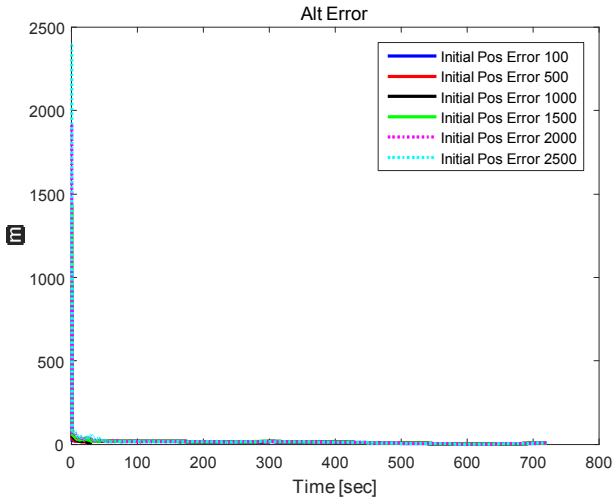


그림 4.8 초기오차(2500m 이하)에 따른 고도오차 RMS

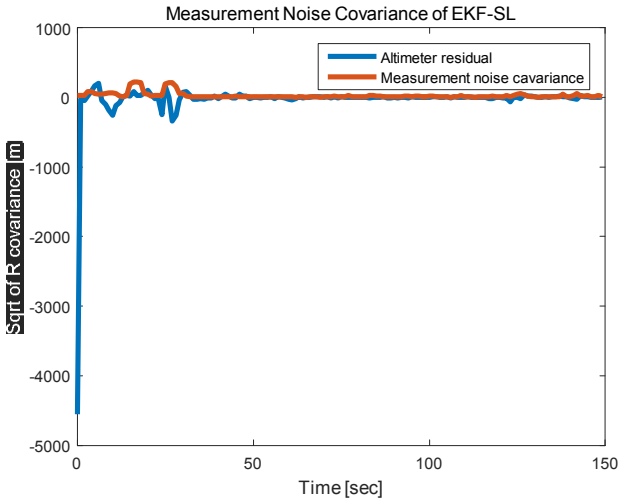


그림 4.9 초기오차 2500m 이하 일 때의 고도계 측정치 오차와 기존의 측정 잡음 공분산

하지만 초기 위치오차 3000m(1σ)인 경우, 기존의 EKF-SL을 적용한 경우의 순차처리 지형참조항법 성능은 위도, 경도, 고도 오차는 각각 그림 4.10, 그림 4.11, 그림 4.12와 같이 오차 추정을 못하고 발산할 수 있음을 알 수 있고, 고도계 측정치 오차와 계산된 불확실성이 불일치함을 그림 4.13을 통해 알 수 있다.

이는 큰 위치오차로 인하여 EKF-SL 기반 지형참조항법을 적용시, 위치오차 공분산이 큰 반면, 상대적으로 정확한 센서 정보로 인하여 필터의 위치오차 공분산 값이 빠르게 수렴하지만 선형화 오차로 인해 실제 위치오차는 줄어들지 않아 위치오차 공분산을 기준으로 지형의 대표 기울기 영역이 항체의 참 위치를 포함 못하게 되어 점점 항법오차가 커져 발산 할 수 있음을 확인하였다.

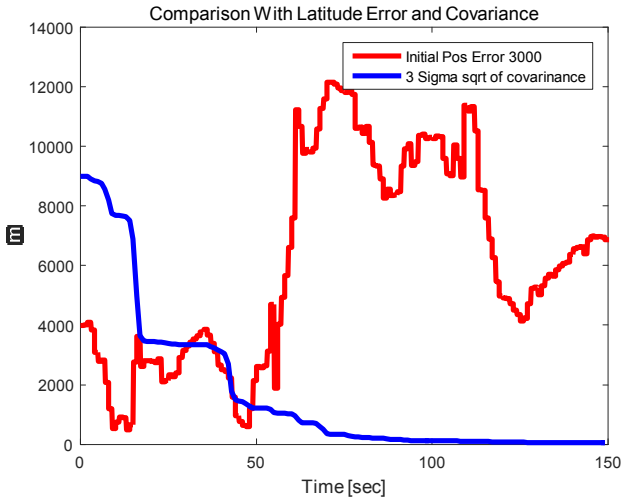


그림 4. 10 초기오차 3000m 일 때의 위도오차 RMS 위도오차 공분산

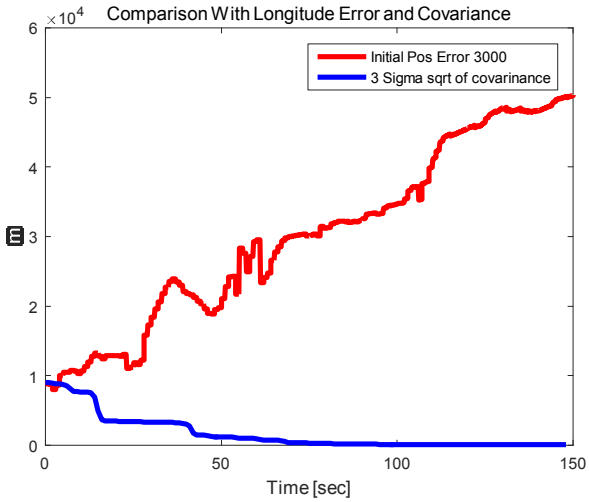


그림 4. 11 초기오차 3000m 일 때의 경도오차 RMS 경도오차 공분산

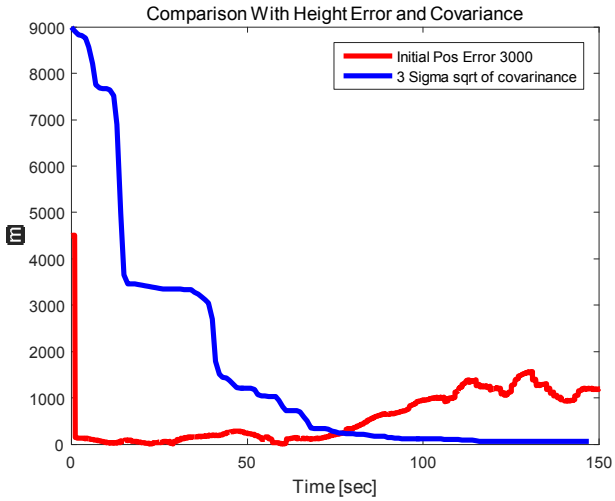


그림 4. 12 초기오차 3000m 일 때의 고도오차 RMS 와 고도오차 공분산

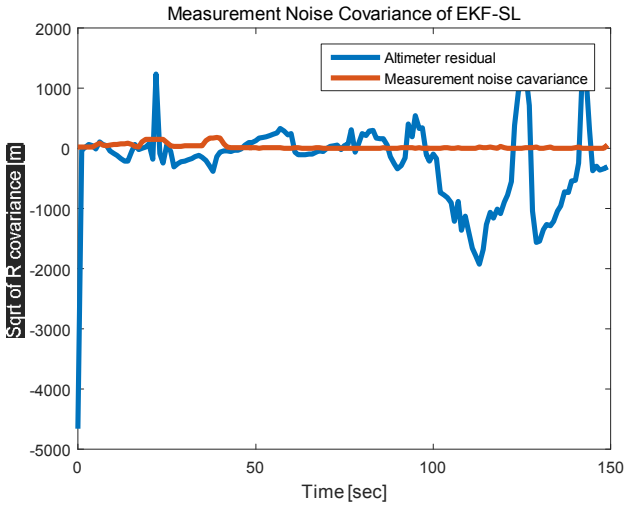
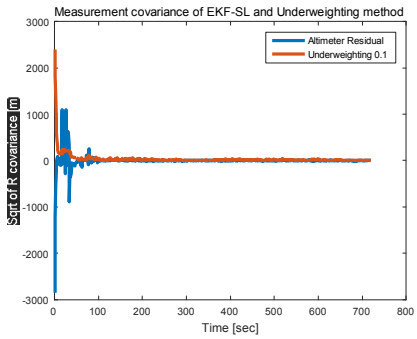
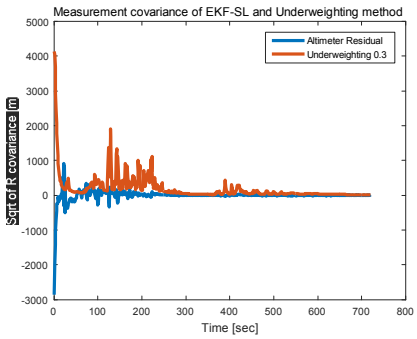


그림 4. 13 초기오차 3000m 일 때의 고도계 측정치 오차와 기존의 측정 잡음 공분산

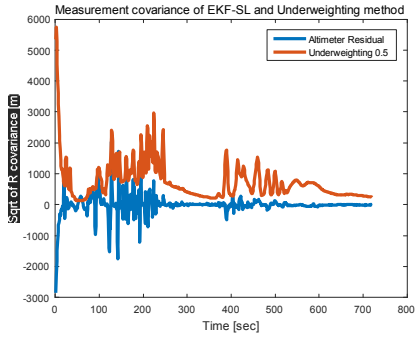
제안한 지형고도차이 불확실성과 지형 기울기 불확실성을 고려하였을 때, 고도계 측정치 오차와 계산된 불확실성을 그림 4.14와 같이 비교하였다. 그림 4.14(a)에서 알 수 있듯이 지형고도차 불확실성을 $\beta = 0.1$ 반영 할 경우에는 측정 잡음 공분산이 고도계 측정치 오차를 반영하지 못함을 알 수 있다. 반대로 그림 4.14(b)~(f)는 측정 잡음 공분산이 고도계 측정치 오차만큼 반영 할 수 있음을 알 수 있다. 그림 4.14(b)~(e) 에서는 β가 커짐에 따라 측정 잡음 공분산 값이 커짐을 알 수 있다. 이는 β설정으로 인해 필터의 상태변수의 수렴성을 결정하게 되면 적절한 β설정이 필요됨을 알 수 있다. 종합적으로 4.14(a)~(f) 중에 지형의 기울기 불확실성을 고려 하였을 때 최소한의 측정 잡음 공분산이 고도계 측정치 오차만큼 반영을 할 수 있음을 볼 수 있어, 지형의 기울기 불확실성을 고려하였을 때 수렴속도가 빠르면서 안정적인 항법성능 예측 할 수 있다.



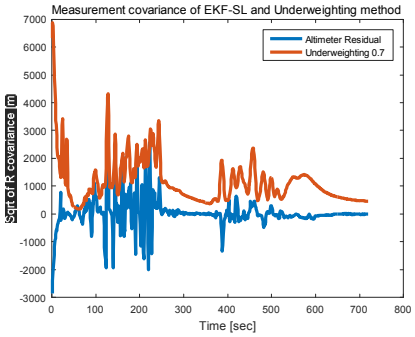
(a) $R_{new1}, \beta = 0.1$



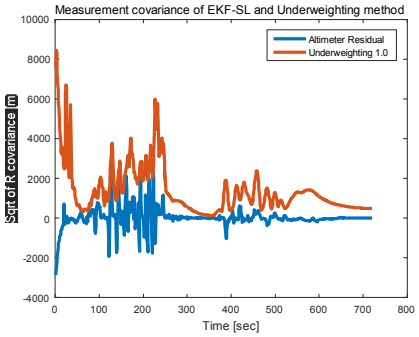
(b) $R_{new1}, \beta = 0.3$



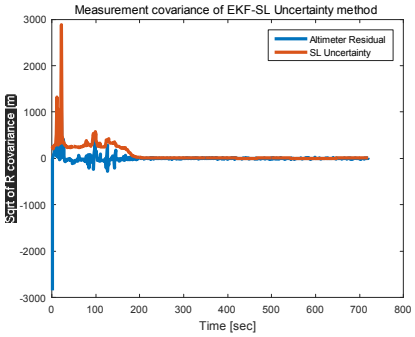
(c) $R_{new1}, \beta = 0.5$



(d) $R_{new1}, \beta = 0.7$



(e) $R_{new1}, \beta = 1.0$



(f) R_{new2}

그림 4. 14 고도계 측정치 오차와 제안된 알고리즘의 측정 잡음 공분산

그림 4.15~4.17과 같이 위치오차 공분산을 결과는 다음과 같다. 제안한 측정 잡음 공분산을 반영함으로써 위치 공분산 기준으로 기울기 영역이 실제 위치위치를 포함 할 수 있는 적절한 크기를 가질 수 있게 된다.

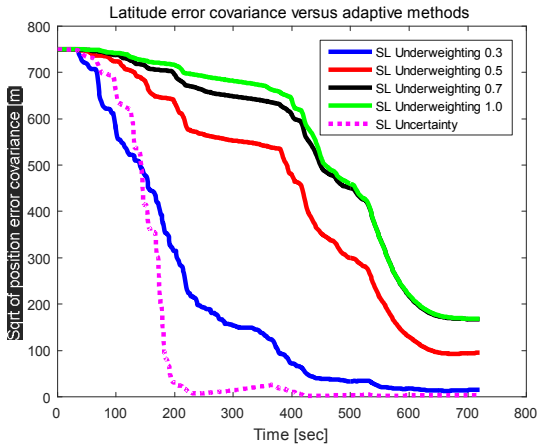


그림 4. 15 동력하강단계에서의 위도오차 공분산

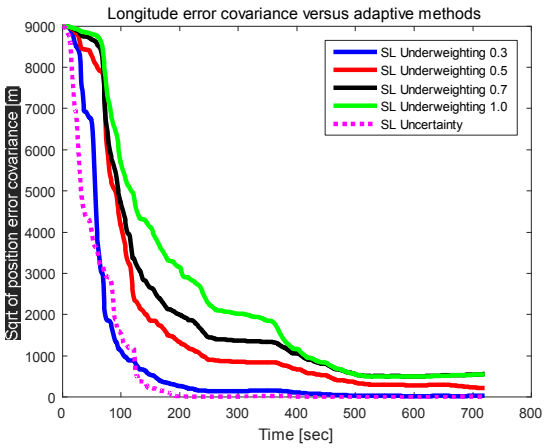


그림 4. 16 동력하강단계에서의 경도오차 공분산

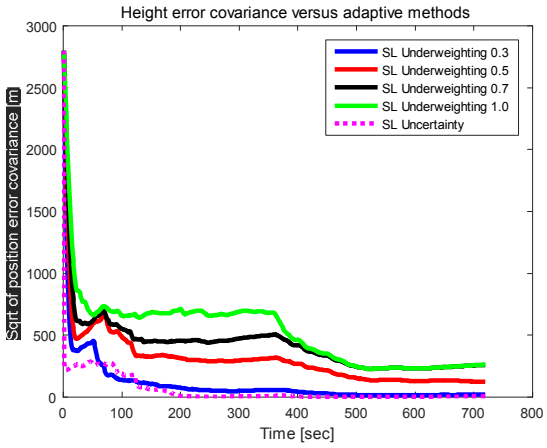


그림 4. 17 동력하강단계에서의 고도오차 공분산

제안한 측정 잡음 공분산을 반영한 순차처리 지형참조 항법성능은 그림 4.18~19와 같다. 추정 지형고도 차이를 반영하였을 때는 β설정에 따라 항법 성능이 결정되고 $\beta = 0.3$일 때 안정적인 항법 성능을 보이나 위치 오차 수렴속도가 늦음을 알 수 있다. 반면, 지형의 기울기 불확실성을 반영한 항법 성능은 전반적으로 위치 오차 수렴속도도 상대적으로 빠르면서 안정적인 항법성능을 보였다. 그림 4.18~19를 통해서 큰 초기 오차가 주어질 때 지형의 기울기 불확실성을 반영한 순차처리 지형참조항법 성능이 우수함을 알 수 있다.

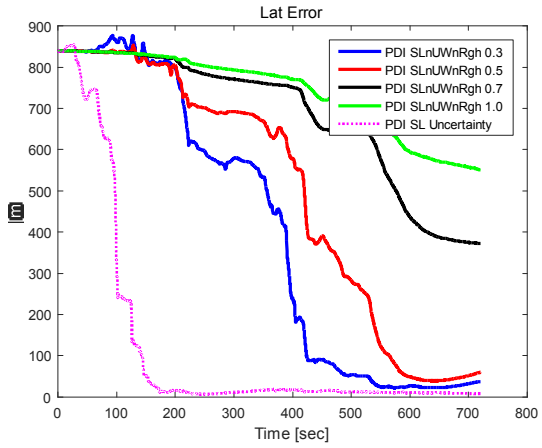


그림 4. 18 동력하강단계에서의 위도오차 RMS

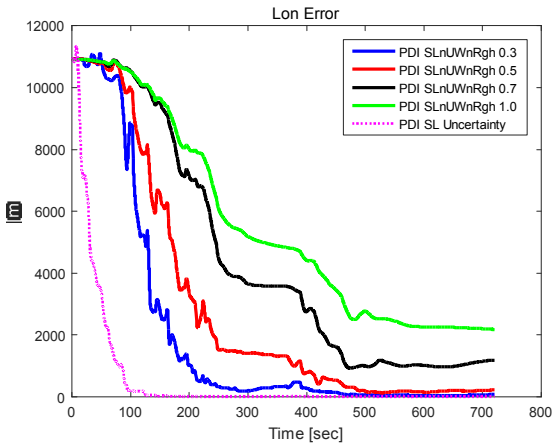


그림 4. 19 동력하강단계에서의 경도오차 RMS

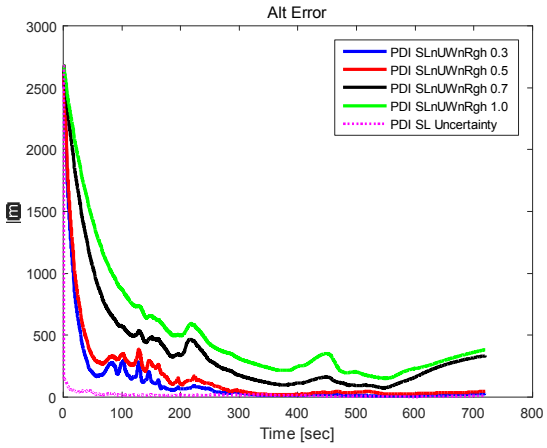


그림 4. 20 동력하강단계에서의 고도오차 RMS

5. 결 론

본 논문에서 일괄처리방식 지형참조항법으로는 고도계를 이용한 유사지형에 의한 오보정을 감소시키기 위한 영역기반 지형 험준도 지수를 제안하였다. 평준한 지형과 같이 지형의 유일성이 적을 경우에 오보정을 방지하기 위하여 기존의 궤적기반 험준도 지수가 지형참조항법에서 위치 갱신을 위한 지형 험준도 임계치로 사용되지만 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 탐색영역의 기울기 혹은 곡률을 이용하여 양방향의 분산을 통해 지형의 유사성을 판별 할 수 있어 유사 지형에 의한 오보정을 감소시킬 수 있다.

순차처리방식 지형참조항법으로는 지형의 비선형성으로 부정확한 지형의 기울기로 인한 항법해의 오추정을 방지하기 위하여 오차영역에 대하여 최소제곱법을 통해 지형의 대표 기울기를 적용하고 지형의 대표 기울기로 추정 못한 추정지형고도 잔차를 측정 잡음 공분산으로 반영하였지만 큰 초기오차를 가지는 경우, 위치오차 공분산이 큰 반면, 상대적으로 정확한 센서정보로 인하여 필터의 위치오차 공분산 값이 빠르게 수렴하지만 선형화 오

차로 인해 실제 위치오차는 줄어들지 않아 위치오차 공분산을 기준으로 지형의 대표 기울기 영역이 항체의 참 위치를 포함 못하게 되어 점점 항법오차가 커져 발산 할 수 있는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 지형의 기울기 험준도를 이용한 측정 잡음 공분산을 제안하였다. 지형의 기울기 험준도를 이용한 측정 잡음 공분산으로는 추정지형고도차이의 불확실성을 기울기 험준도에 반영하는 방법과 지형의 기울기 불확실성과 위치오차 공분산을 반영하여 추정 지형고도 잔차를 불확실성으로 반영하는 방법이다. 제안한 측정 잡음 공분산을 통해 큰 초기 오차를 가진 경우에 실제 위치를 포함할 수 있는 오차영역을 설정할 수 있어 적절한 기울기 추정을 통해 안정적인 항법성능을 도출 할 수 있다.

제안된 기법의 지형참조항법의 성능개선을 확인하기 위해 일괄처리방식 지형참조항법으로는 달착륙선의 착륙궤적에 대해 지형 험준도 지수 성능분석 시뮬레이션과 지형 험준도 지수를 적용한 지형참조항법 성능 분석의 시뮬레이션을 2가지로 나누어 수행하였다. 지형 험준도 지수 성능 분석 시뮬레이션에서 지형가용률과 정탐지율면에서 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. 순차처리방식 지형참조항법으로는 제안한 방법을 고도계 측정치 오차와 계산된 측

정 잡음 공분산 비교를 통해 고도계 측정치 오차만큼 측정 잡음 공분산 계산이 됨을 확인 할 수 있었고 제안한 두 가지 방법 중에 지형의 기울기 불확실성을 이용한 측정 잡음 공분산이 위치오차 수렴속도도 빠르면서 안정적인 항법성능을 확인하였다. 본 논문에서는 일괄처리방식에서 지형 DB 를 이용하여 진행방향뿐만 아니라 진행 방향의 수직방향의 험준도를 같이 고려한 영역기반 지형의 기울기 험준도 지수를 통해 항법성능 개선을 확인하였고 순차처리방식에서는 큰 초기 오차를 가질 때 영역기반 지형의 기울기 험준도를 통하여 항법 성능개선을 확인하였다

참 고 문 헌

[1] T. Brady, J. Schwartz, ″ALHAT system architecture and operational concept,″ IEEE Aerospace Conference, Big sky, Montana, 2007.

[2] A.E. Johnson and F. M. James, "Overview of terrain relative navigation approaches for precise lunar landing." Aerospace Conference, 2008 IEEE. IEEE, 2008.

[3] A. Johnson and I. Tonislav, "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] G.M. Siouris, Missile Guidance and Control Systems, Springer-Verlag, New York, pp. 551~576, 2003.

[5] J. Hollowell, "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, J.H. Yoon, M.G. Park, D.Y. Kim, C.K. Sung, H.S. Kim, Y.H. Kim, H.J. Kwak, W.Sun, K.J. Yoon, "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] A.J. Henley. "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] V. Ekütekin. ″Navigation and control studies on cruise missiles″, Ph.D. Dissertion, MIDDLE. EAST TECHNICAL UNIVERSITY, 2007.

[10] Y.M. Yoo, S,M. Lee, J.H. Kwon, M.J. Yu, C.G. Park, "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, B. 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] L.D. Hostetler and R.D. Andreas. "Nonlinear Kalman filtering techniques for terrain-aided navigation." Automatic Control, IEEE Transactions on 28.3 (1983): 315-323.

[15] A. Roberts. "Curvature attributes and their application to 3 D interpreted horizons." First break 19.2 (2001): 85-100.

[16] D.K. Geller and D. Christensen. "Linear covariance analysis for powered lunar descent and landing." Journal of Spacecraft and Rockets 46.6: 1231-1248, 2009.

[17] S.H. Mok and H.C. Bang. "Terrain slope estimation methods using the least squares approach for terrain referenced navigation." International Journal Aeronautical and Space Sciences 14.1 (2013): 85-90.

Abstract

TRN(Terrain Referenced Navigation) can be divided by batch type which 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) and sequential type which is technique to compensate position estimate using Kalman filter with altimeter measurement and terrain slope of DEM.

In batch type TRN, it is generally known that the performance of TRN is degraded when a measured terrain height profile and terrain height candidate profiles of the DEM are similar at hill or repetitive terrain. In sequential type TRN, a performance of TRN is degraded when incorrect calculating ROI area due to large position errors and accurate measurement information. In this thesis, area based terrain slope roughness index and area based terrain curvature roughness index which can detect similarity of terrain in ROI(Region Of Interest) are proposed to overcome batch type TRN problem. And terrain height difference and terrain slope difference methods are proposed as a measurement error covariance for de-weighting of altimeter information to overcome sequential type TRN problem.

Applying terrain roughness indexes to batch type TRN of lunar lander, it is shown that batch TRN using area based terrain roughness results in improved performance compared to conventional trajectory based method through simulation. And applying measurement error covariance to sequential type TRN of lunar lander, it is shown that sequential TRN has improved performance compared to conventional EKF-SL TRN through simulation.

Key-word : INS(Inertial Navigation System), TRN(Terrain Referenced Navigation), Roughness Index, Measurement Error Covariance

Student Number : 2014-20673