

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(1), 12-22(2016)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.1.12>

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

달 착륙선의 위험 상대거리 기반 착륙지 선정기법 성능 분석

이충민, 박영범, 박찬국*

Performance Analysis of Landing Point Designation Technique
Based on Relative Distance to Hazard for Lunar Lander

Choong-Min Lee, Young-Bum Park and Chan-Gook Park*

Department of Mechanical and Aerospace Engineering/ASRI

Seoul National University

ABSTRACT

Lidar-based hazard avoidance landing system for lunar lander calculates hazard cost with respect to the desired local landing area in order to identify hazard and designate safe landing point where the cost is minimum basically using slope and roughness of the landing area. In this case, if the parameters are only considered, chosen landing target can be designated near hazard threatening the lander. In order to solve this problem and select optimal safe landing point, hazard cost based on relative distance to hazard should not be considered as well as cost based on terrain parameters. In this paper, the effect of hazard cost based on relative distance to hazard on safe landing performance was analyzed and it was confirmed that landing site designation with two relative distances to hazard results in the best safe landing performance by an experiment using three-dimensional depth camera.

초 록

달착륙선의 라이다 기반 위험회피 착륙시스템은 기본적으로 목표 착륙지역에 대한 지형 파라미터인 경사와 험준도로 위험도를 계산하고 해당 지역에 대하여 위험도가 최소값을 갖는 점을 안전한 착륙 지점으로 선정한다. 이때, 경사와 험준도만을 고려할 경우 라이다 측정오차에 의해 착륙지가 위험요소 근처로 선정될 수 있으며 이는 착륙선에 위협적이다. 이러한 문제를 해결하고 최대한 안전한 착륙지점을 선정하기 위하여 위험상대거리 기반의 위험도를 기존의 지형파라미터 기반의 위험도와 함께 고려하여야 한다. 본 논문에서는 경사와 험준도 각각에 대한 위험상대거리 기반 위험도가 지형 특성에 따라 착륙지 선정결과에 미치는 영향을 분석하였고, 두 가지 위험상대거리를 동시에 고려하였을 때 가장 좋은 위험회피 착륙 성능을 나타냄을 시뮬레이션과 3차원 딥스 카메라를 이용한 실험을 통해 확인하였다.

Key Words : Lidar(Light detection and ranging), HDA(위험탐지 및 회피), Depth camera(딥스 카메라)

I. 서 론

달착륙선의 안전한 착륙을 위해서는 정밀하고 정확한 항법기술이 필요하다. 특히 미국 NASA에서 진행 중인 ALHAT(Autonomous Landing and Hazard Avoidance Technology) 프로젝트에서는 수평오차 90m(3- σ)이내의 착륙정확도를 목표로 하고 있으며, 이러한 요구조건을 만족시키고 정확하고 안전하게 착륙하기 위해 필수적인 기술 중에 하나로 위험탐지 및 회피(Hazard Detection and Avoidance) 기술에 대한 연구가 진행되고 있다[1].

달착륙선의 착륙 고도에 따른 임무형상은 Fig. 1과 같다. 달착륙선은 고도 100km의 달 궤도로부터 이탈하여 PDI(Powered Descent Initiation) 단계로 진입하면 역추진을 통해 감속하면서 하강하게 되고, 고도 약 15km에서부터는 정밀항법해를 얻기 위한 지형상대항법을 실시한다. 그리고 고도 약 2km의 착륙 종말단계에서는 위험탐지 및 회피 시스템이 크레이터, 바위, 비탈면, 절벽과 같이 달 표면에 존재하는 여러 위험요소들을 탐지하고 안전한 착륙지점을 선정한다. 지형상대항법 시 사용하는 지형데이터는 해상도가 낮아 달 표면에 존재하는 작은 위험요소들을 회피하기 어렵기 때문에 위험탐지를 위해서는 사용할 수 없다. 게다가 이러한 위험요소들은 착륙선에 손상을 주기에 충분히 크기 때문에 사전에 정확히 탐지하여 회피하는 것이 중요하다[2].

위험회피를 위한 센서는 레이더, 카메라, 라이다 등 여러 가지가 있는데, 레이더는 해상도가 낮고, 카메라는 빛조건에 민감한 반면, 라이다는 직접 조사한 레이저가 지면에 반사되어 되돌아오는 시간을 측정함으로써 실시간으로 3차원 거리 정보를 제공하기 때문에 빛조건에 관계없이 정밀한 위험회피가 가능하다[3].

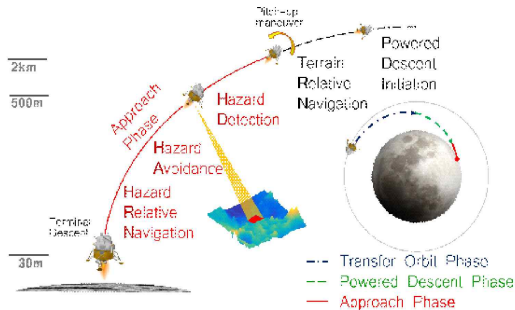


Fig. 1. Terminal landing mission profile for lunar lander

기존 ALHAT 프로젝트에서 연구한 라이다 기반 위험회피기술은 기본적으로 착륙지역의 경사 및 험준도를 추정한다[4]. 경사와 험준도는 착륙지역의 지형적 특성을 대표하는 지형 파라미터이다. 이 지형파라미터를 이용하여 경사 또는 험준도가 클수록 위험도가 증가하는 지형 파라미터 기반 위험도를 계산한다. 경사와 험준도는 3차원 거리 측정치를 착륙선 수평 크기를 단위로 하는 평면의 조합으로 근사화한 근사평면을 이용하여 계산한다. 두 지형 파라미터를 기준으로 착륙선의 설계 임계치를 넘는 점은 위험요소로 간주하고 이를 피해 계산된 위험도가 최소값을 갖는 지점을 착륙지점으로 선정한다. 이 때, 위험도가 최소인 점이 지형의 특성에 따라 위험요소 부근 또는 위에 존재하는 경우가 발생하는데 이 지점에 착륙하게 되면 위험요소가 착륙선에 손상을 줄 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 착륙지역의 모든 좌표가 위험요소와 떨어진 거리에 따라 위험도가 감소하는 위험상대거리 기반 위험도로 착륙지를 선정함으로써, 위험요소와 가능한 멀리 떨어진 최적의 착륙지점 선정이 가능하다[6]. 기존연구에서는 비탈면과 바위 두 가지 위험요소 중 바위의 분포가 우세하다는 가정 하에, 위험회피착륙 알고리즘에 대한 성능분석 시 위험요소 중 험준도와 관련된 바위만을 고려하였으나, 다양한 지형 특성을 반영하기 위해서는 경사에 대한 고려가 함께 이루어져야 한다[5].

따라서 본 논문에서는 경사 및 험준도 각각에 대한 위험 상대거리 기반 위험도를 제시하고 다양한 지형특성에 대하여 위험상대거리 위험도가 착륙지 선정에 미치는 영향을 확인하였다. 그리고 지형파라미터기반 위험도와 가중합 하였을 때의 착륙지 선정결과와 두 위험상대거리기반 위험도를 동시에 지형파라미터기반 위험도와 가중합 하였을 경우 등 여러 가지 알고리즘 조합에 따른 성능을 비교분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 달 지형 파라미터 추정 및 이를 이용한 위험회피착륙 알고리즘과 위험상대거리 위험도에 대해 서술한다. 3장 및 4장에서는 지형 파라미터 및 위험상대거리 기반 위험도의 여러 가지 조합에 따른 위험회피 성능을 다양한 지형에 대한 시뮬레이션과 TOF 카메라 기반 실험을 통해 비교 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 위험회피 착륙

2.1 고도맵 생성

달 지형은 바위, 경사, 크레이터 등에 의해 복

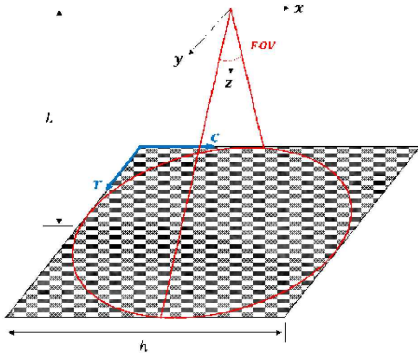


Fig. 2. Lidar coordinate

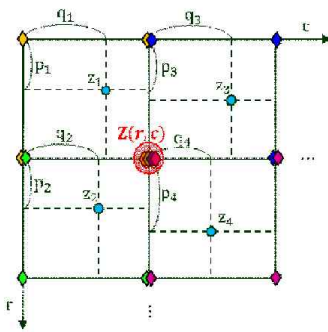


Fig. 3. Bilinear interpolation

잡한 지형 특성을 갖는다. 이로 인해 라이다로 측정된 3차원 거리데이터는 불균일한 수평위치에 존재하게 된다. 데이터 처리 효율을 높이기 위해 불균일한 측정치를 일정간격의 그리드 상에 맵핑하여 고도맵을 생성한다[4][7].

Figure 2와 같이 라이다가 직교좌표계의 원점에 위치해 있고, 초점방향의 벡터가 z 축에 일치되어 있을 때, 수직 하방을 향하여 거리를 측정할 경우 라이다의 직교좌표계는 FOV(Field Of View) f 와 수평방향의 샘플 개수 n , 측정영역의 수평방향 크기 h 와 평균 측정거리 L 을 이용하여 식(1)과 같이 GSD(Ground Sample Distance) s 를 단위로 하는 그리드 좌표계 (r, c) 로 변환할 수 있다.

$$s = h / n, h = 2L \tan(f / 2) \quad (1)$$

$$(r, c) = (y / s + n / 2, x / s + n / 2) \quad (2)$$

이 때, 고도값이 일정 간격의 그리드 상에 위치한 고도맵을 생성하기 위하여 이중 선형 보간법(bilinear interpolation)을 이용한다[8]. 이중 선형 보간법은 선형 보간법을 2차원으로 확장한 것

이다. Fig. 3과 같이 측정치 z 주위의 네 개 그리드 노드에 대한 데이터의 가중치 E 는 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} p_1 &= r - [r], & q_1 &= c - [c] \\ E(r, c) &+= (1 - p_1)(1 - q_1)z_n \\ E(r+1, c) &+= p_1(1 - q_1)z_n \\ E(r, c+1) &+= (1 - p_1)q_1z_n \\ E(r+1, c+1) &+= p_1q_1z_n \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 p , q 은 측정치 z 의 왼쪽 위에 위치한 노드를 기준으로 r , c 축 방향으로 떨어진 거리이다. 이는 식(3)과 같이 정수로 이루어진 노드 좌표로부터 0~1사이의 떨어진 거리가 더해진 형태의 측정치 좌표의 소수점 이하만 취하여 가중치를 계산한다. 이때 하나의 측정치는 그 측정치가 위치한 그리드 셀의 네 개 그리드 노드에 대하여 그 측정치에 가중치가 적용된 고도정보를 제공한다. 즉, 식(3)에서 '+'로써 표현한 바와 같이 하나의 특정 그리드 노드의 좌표 상 고도는 노드 주변 네 개의 측정치로부터 해당 노드에 대하여 가중치가 적용된 네 개의 고도정보를 제공하며, 이를 식(4)와 같이 가중합함으로써 고도를 결정한다. z 을 예로, p , q 을 이용하여 z 주변 노드에 대한 가중치를 계산하고 이를 z 에 적용하여 주변 노드에 대한 고도정보를 계산한 후 마찬가지로 z_2 , z_3 , z_4 네 개의 측정치에 대하여 주변의 노드에 대한 고도를 계산하고 이를 가중합하면 $Z(r, c)$ 에 해당하는 고도를 구할 수 있다 [1].

$$\begin{aligned} E &= p_1q_1z_1 + (1 - p_2)q_2z_2 \\ &+ p_3(1 - q_3)z_3 + (1 - p_4)(1 - q_4)z_4 \\ W &= p_1q_1 + (1 - p_2)q_2 \\ &+ p_3(1 - q_3) + (1 - p_4)(1 - q_4) \\ Z(r, c) &= E(r, c) / W(r, c) \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 경사 및 험준도 추정

2.2.1 경사 및 험준도 정의

달 표면에는 크레이터, 바위, 절벽과 같은 여러 위험요소들에 의해 다양한 형태의 지형이 존재한다. 이러한 달 지형의 특성을 표현하기 위한 대표적인 파라미터로 경사와 험준도가 있다. 경사는 달착륙선의 현재 중력벡터와 근사평면의 법선벡터가 이루는 각으로 정의하고, 험준도는 근사평면의 고도와 라이다 측정고도 간의 차이로 정의한다.

2.2.2 근사평면 추정

경사 및 험준도를 계산하기 위해서는 착륙지점의 복잡한 지형을 여러 개의 평면으로 근사화하여야 한다. 이 때 하나의 단일 평면을 근사평면이라고 하며, 이 근사평면을 구하기 위해 최소중앙치자승법(Least Median Square)을 이용한다. 중앙값은 최소자승법(Least Square)에서 사용하는 평균값과 달리 전체 데이터 중 아웃라이어의 영향을 받지 않기 때문에 바위나 크레이터에 관계없이 특정 영역을 실제 지형에 가까운 평면으로 근사화 할 수 있다.

이때 데이터 자체의 값에 의해 계산되는 평균과 달리 중앙값은 이에 관계없이 데이터의 크기 순서에 의해 결정되기 때문에 정형화된 형태로 식을 유도하는 것은 불가능하다. 따라서 특정 시스템에 맞도록 최소중앙치자승법기반의 알고리즘이 설계되어야 한다. 따라서 최소중앙치자승법기반의 근사평면 추정 알고리즘은 다음과 같다.

우선, 하나의 평면을 결정하기 위해서는 적어도 3개의 점이 필요하기 때문에 착륙선의 크기(footprint)만큼의 국소영역을 지정하고, 이 영역의 고도 데이터 중 3개의 점($\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b, \mathbf{x}_c$)을 임의로 선택한다. 이 3개의 점으로 이루어진 평면의 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} + d = 0 \tag{5}$$

$$\mathbf{n} = (\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_a) \times (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_a), \quad d = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_a \tag{6}$$

위 평면 파라미터 \mathbf{n}, d 를 이용하여 선택된 3개의 점 외 나머지 점(\mathbf{x}_i)들에 대한 근사오차 r_i 를 계산한다.

$$\{r_i\} = \{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_i + d)^2\} \tag{7}$$

이 근사오차의 중앙값을 저장하고, 같은 영역에 대하여 동일한 알고리즘을 반복하면서, 근사

오차의 중앙값이 최소가 되는 시행의 평면파라미터를 저장한다. 이 파라미터의 평면 파라미터가 된다. 이 때, 알고리즘의 반복횟수는 다음과 같이 아웃라이어(outlier), 즉 바위의 분포확률 o 와 3개의 점을 선택할 때 적어도 1번 이상 3개의 점이 모두 인라이어(inlier)가 선정될 확률 P 로부터 결정된다[4].

$$P = 1 - (1 - (1 - o)^3)^t, \quad t = \left\lceil \frac{\ln(1 - P)}{\ln\{1 - (1 - o)^3\}} \right\rceil \tag{8}$$

최적의 평면 파라미터를 결정한 후 이를 이용하여 다음과 같이 최소중앙치자승법 기반 근사평면의 근사오차에 대한 표준편차를 계산한다. 이를 기준으로 다음의 부등식을 만족하는 아웃라이어를 제거하고 나머지 인라이어에 대하여 최소자승법을 적용함으로써 최종적인 근사 평면을 구한다.

$$r_i = (\mathbf{n}' \cdot \mathbf{x}_i + d')^2 > \sigma_r \tag{9}$$

이 때 표준편차는 오차의 중앙값에 대한 표준편차로, 중앙값의 누적확률분포함수로부터 다음과 같이 계산된다[4].

$$\sigma_r = 1.4826 \left\{ 1 + \left(\frac{5}{t-3} \right) \right\} r_{median} \tag{10}$$

Figure 4는 전체 근사평면 계산 알고리즘을 flowchart로 나타낸 것이다. 착륙영역에 대한 라이다 측정치를 그리드에 맵핑한 DEM을 생성하고 DEM을 착륙선의 크기만큼의 영역으로 나눈다. 하나의 국소영역에 대하여 평면을 결정하기 위해 임의의 3점을 선택하여 근사평면을 구성하고 구성된 평면의 파라미터를 이용하여 국소영역 내 모든 점에 대하여 근사평면오차를 계산한다. 동일한 알고리즘을 T회 반복하여 매 회 계산한 근사평면오차의 중앙값을 저장하고, 이 중앙값이

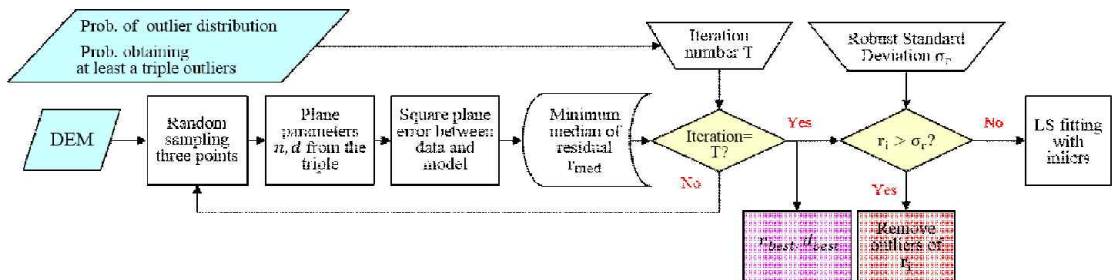


Fig. 4. Flow chart of the plane fitting algorithm based on least median square method

최소값을 나타내는 순간의 평면파라미터를 최적의 평면파라미터(c_{est}, d_{best})로 선택한다. 이를 이용하여 국소영역 내 모든 점에 대하여 근사오차를 다시 계산하고 근사오차에 대한 표준편차보다 작은 근사평면고도만 인라이어로 선별한다. 최종적으로 일반적인 최소자승법을 이용하여 평면을 근사화하여 근사평면을 계산한다.

근사평면의 법선벡터와 계산된 각 점의 고도를 이용하여 다음과 같이 경사 \mathbf{A} 와 험준도 \mathbf{R} 을 계산할 수 있다.

$$z_s = -(n_x x + n_y y + d) / n_z, \quad \mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z] \quad (11)$$

$$\mathbf{A}(r, c) = \cos^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_g / \|\mathbf{n}\| \|\mathbf{n}_g\|) \quad (12)$$

$$\mathbf{R}(r, c) = |\mathbf{Z}(r, c) - \mathbf{Z}_s(r, c)| \quad (13)$$

이 때, \mathbf{n} 은 착륙지를 평면으로 근사화 하였을 때 이 근사평면의 법선벡터이고, \mathbf{n}_g 는 착륙선에서 측정된 중력벡터이다. 이 두 벡터가 이루는 각을 경사로 정의하고 근사평면의 고도 \mathbf{Z}_s 와 라이다 측정고도 \mathbf{Z} 간의 차이를 험준도로 정의한다.

2.3 지형 파라미터 기반 위험도

근사평면으로부터 구한 지면의 경사와 험준도를 곱하고, 착륙선의 설계단계에서 결정되는 경사와 험준도에 각각에 대한 임계치 A_{THR}, R_{THR} 로 정규화함으로써 지형 파라미터 기반의 위험도(hazard cost)를 다음과 같이 정의한다[4].

$$\mathbf{C}(r, c) = \begin{cases} 1 & \mathbf{A}(r, c) > A_{THR} \\ & , \text{ or } \mathbf{R}(r, c) > R_{THR} \\ \frac{[\mathbf{R}(r, c) \times \mathbf{A}(r, c)]}{R_{THR} \times A_{THR}} & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

위와 같이 생성된 착륙지역에 대한 위험도지도 상에서 위험도가 작은 값을 가질수록 안전한 점이다. 그러나 지형특성 및 고도측정 오차로 인해 위험도가 최소인 점이 위험요소와 인접한 곳에 위치하는 문제가 발생할 수 있기 때문에 안전한 착륙을 보장할 수 없다. 따라서 이러한 위험요소와 최대한 멀리 떨어진 점을 착륙지로 선정함으로써 보다 안전한 착륙지점을 선정할 수 있다.

2.4 위험상대거리 기반 위험도

경사와 험준도가 설계 임계치를 넘어선 경우

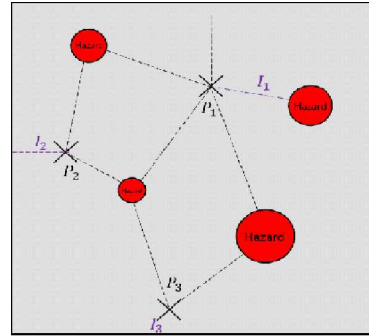


Fig. 5. Distance from points to the nearest hazard

각각 비탈면(slant), 바위(rock)로 정의하고 이를 위험요소로 판단하며 이 위험요소와 떨어진 거리에 따라 위험도가 감소하는 위험도맵을 생성한다 [5]. Fig. 5와 같이 착륙지역 내 임의의 좌표 P_1 과 위험요소들 간에 가장 인접한 거리는 I_1 이다.

이와 마찬가지로 P_2, P_3 각각에 대하여 위험요소와 가장 인접한 거리 I_2, I_3 를 구할 수 있다. 이를 일반화하여 n 을 위험요소의 개수라 할 때, 식(15)와 같이 I 를 표현할 수 있다.

$$I_j = |P_j - P_{hazard_j}|, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

다음으로 거리 I 가 클수록 위험도가 감소하도록 위험도를 계산하고 이를 착륙영역 내 최대 위험도를 이용하여 0~1의 값으로 정규화한다. 예를 들어 Fig. 5의 I_1 과 I_2, I_3 를 비교하면 I_3 가 가장 크기 때문에 좌표 P_1 상의 위험도가 가장 작은 값을 갖게 된다. 따라서, 착륙지역내 모든 좌표에 대하여 거리 I 에 따라 위험도가 감소하는 위험도맵을 생성한다. 이 때, 비탈면과의 상대거리에 대한 위험도를 DTNS(Distance to Nearest Slant) 위험도라 하고, 바위와의 상대거리 기반의 위험도를 DTNR (Distance to Nearest Rock) 위험도라 정의한다.

2.5 착륙지 선정

지형 파라미터 및 위험상대거리 기반의 위험도를 통합한 하나의 통합 위험도맵을 생성한다. 이 맵 상에서 최소 위험도를 갖는 점을 착륙지점으로 선정한다. 통합 위험도맵은 지형 파라미터 기반의 위험도맵과 DTNR, DTNS 위험도맵을 가중합하여 계산한다. 이때 각 위험도맵에 대한 가중치는 다음과 같이 각 위험도맵의 위험도 총합으로 계산한다[6].

$$\text{MapCost}_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{k,ij} \quad \begin{matrix} i, j: \text{pixel index} \\ k: \text{hazard cost maps based on} \\ \text{terrain parameters, DTNR and DTNS} \end{matrix} \quad (16)$$

$$w_k = \frac{\text{MapCost}_k}{\sum_{k=1:3} \text{MapCost}_k} \quad (17)$$

$$C_{\text{Integrated}} = \sum_{k=1:3} w_k C_k \quad (18)$$

III. 시뮬레이션

3.1 라이다 모델

2장에서 기술한 위험회피 및 착륙지 선정 알고리즘을 시뮬레이션하기 위하여 착륙대상지역에 대한 2축 김블형 스캐닝 라이다 모델기반의 3차원 거리측정치 생성을 생성하였다. 스캐닝라이다 측정치 생성을 위한 시뮬레이션 모델은 스캐닝 모델, 거리 모델로 구성된다[1]. 스캐닝 모델은 Fig. 6 과 같이 라이다의 화각 내에서 스캐닝 해상도에 따라 이산화 된 개수만큼의 레이저 각좌표를 갖는다. 이 때, 각좌표는 가우시안 화이트 노이즈 형태의 오프셋 오차를 갖는다. 각좌표로부터 레이저 벡터방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{r}(t) = [r_x(t), r_y(t), r_z(t)] = \mathbf{a} + \mathbf{b}t, \quad \|\mathbf{b}\| = 1 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= [x_n, y_n, z_n] \\ &= \frac{[L \tan \theta_n, L \tan \phi_n, L]}{\sqrt{(L \tan \theta_n)^2 + (L \tan \phi_n)^2 + L^2}} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 \mathbf{r} 은 레이저 벡터, L 은 평균측정거리이며, 2축 김블형 라이다에 대하여 f 가 수평, 수직 방향으로 존재할 때 θ_n 는 라이다의 수평방향 각 좌표이며 ϕ_n 는 수직방향 각좌표이다.

거리 모델에서는 이산화된 레이저 벡터가 지면에 반사되는 지점을 찾아 그 점과 레이저의 원

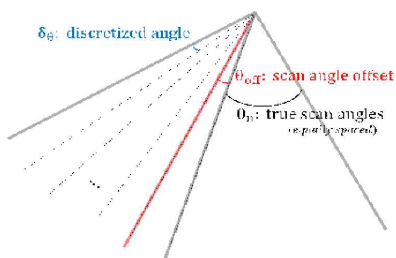


Fig. 6. Scanning Model

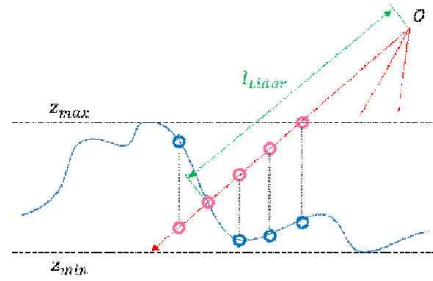


Fig. 7. Lidar range model

점 간의 거리를 측정 거리로 정의한다. 레이저벡터의 원점 \mathbf{a} 를 기준으로 t 를 증가시키면 원점에서부터 단위벡터 \mathbf{b} 의 방향으로 길이가 증가하게 된다. 따라서 반사지점을 찾기 위하여 Fig. 7과 같이 실제 착륙지역의 지형 고도가 최대인 점으로부터 최소인 점까지 t 를 늘려가면서 좌표를 이동시킨다. 이때 해당 좌표의 수직방향 위치를 동일 좌표 상의 실제 고도와 비교하면서 실제 고도가 레이저좌표보다 커지는 순간의 3차원 좌표가 곧 반사점의 위치가 된다. 이 위치와 원점간의 거리를 계산하여 각좌표에 대한 거리 측정치를 구할 수 있다.

3.2 시뮬레이션 결과

라이다 모델을 기반으로 생성된 3차원 고도 측정치를 이용하여 Fig. 8은 하나의 예제로써 2장에서 기술한 위험회피 알고리즘을 1회 수행한 시뮬레이션 결과이다. 본 논문에서는 광역의 착륙지역에 대한 측정지 획득을 위해 이미지 정합하는 과정 없이, 고정된 고도에서 획득한 단일측정치가 전체 목표 착륙지역을 포함하는 것으로

Table 1. Simulation conditon

Parameter	Value
Reference DEM: size	87.5m
Reference DEM: resolution	0.1m
Altitude	500m
Lidar: FOV	10°
Lidar: resolution	100
Lidar: range error	0.02m(1-σ)
Lidar: mirror angle error	None
Lander footprint	5m
Probability at least a plane without outlier(P)	0.99
Rock distribution(o)	0.10
Tolerance: slope	5°
Tolerance: roughness	0.3m

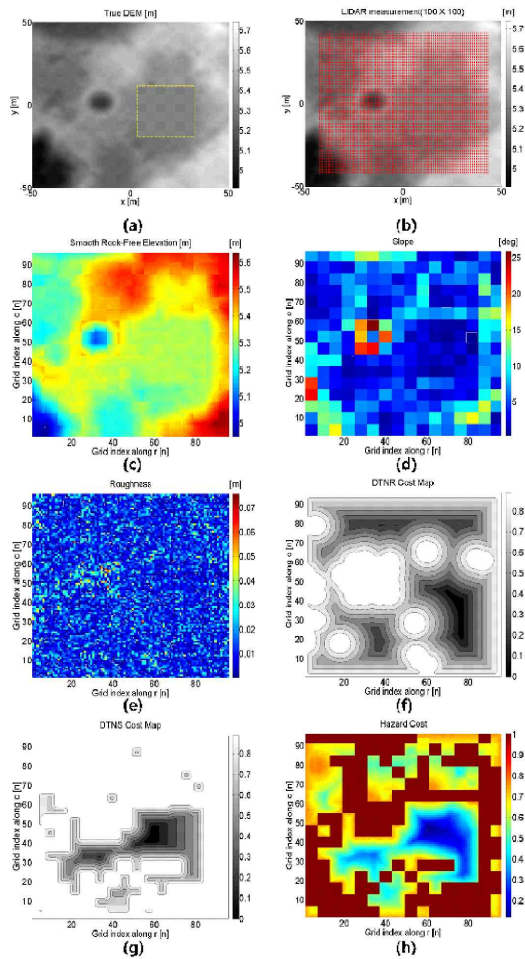


Fig. 8. One-time safe landing simulation result; True DEM(a), Lidar Measurement(b) DEM of approximated plane(c), slope(d), roughness(e), DTNR cost map(f), DTNS cost map(g), hazard cost map(h)

간주하여 해당 측정영역에 대하여 착륙지 선정 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같고, 경사 및 험준도에 대한 설계임계치는 NASA의 ALHAT프로젝트의 요구조건을 적용하였다. LOLA 고도데이터를 이용하여 2장에서 기술한 기법에 따라 고도맵을 생성하고, 이를 기반으로 생성한 라이다 측정치는 Fig. 8-(b)와 같다. 또한, 달 지형에 대한 라이다 측정치(b)를 이용하여 최소중양치자승법기반 평면근사를 수행함으로써 달 지형을 착륙선크기를 단위로 하는 평면들의 조합으로 근사화하고, 이를 고도맵(c)으로 재생성한다. 이 평면 파라미터와 근사평면 고

도맵을 이용하여 경사 및 험준도를 계산하면 (d), (e)와 같이 사전에 정의한 안전지대(황색선)의 경사 및 험준도가 다른 지역에 비해 상대적으로 작은 값을 나타냄을 알 수 있다. 설계임계치를 기준으로 탐지된 비탈면 또는 바위에 대한 위험 상대거리 기반 위험도맵은 (f), (g)와 같으며 이를 모두 가중합하여 통합 위험도(h)를 계산함으로써 이 위험도맵 상 가장 작은 위험도를 갖는 점을 착륙지로 선정한다. 3.2절에서 보인 착륙지 선정기법을 다양한 특성을 갖는 지형에 대하여 적용하여, 총 4종의 위험상대거리기반 위험도의 조합에 따른 알고리즘 별 착륙지 선정 성능을 비교하였다. 이 조합은 2장에서 기술한 바와 동일한 가중합 기법을 따른다.

두 가지의 위험상대거리 기반의 위험도맵이 지형 특성에 따라 착륙지 선정 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 9와 같이 경사의 변화 및 크기가 험준도에 비해 상대적으로 심한 지형,

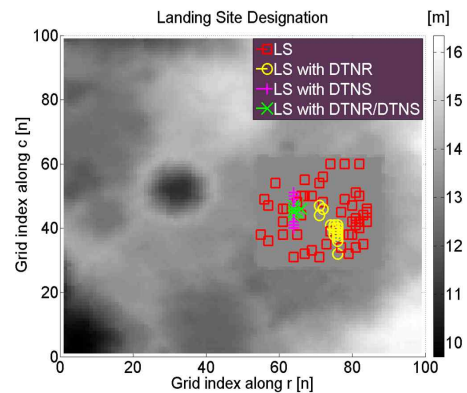


Fig. 9. HDA result with respect to the terrain with extreme slope change

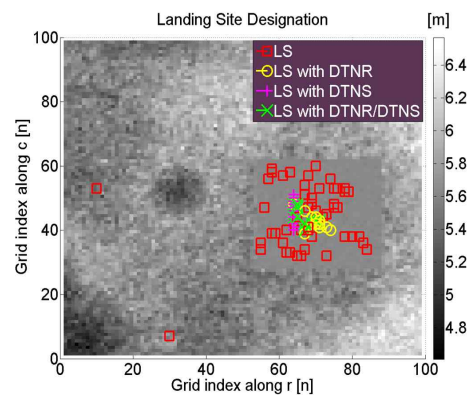


Fig. 10. HDA result with respect to a severely rough terrain

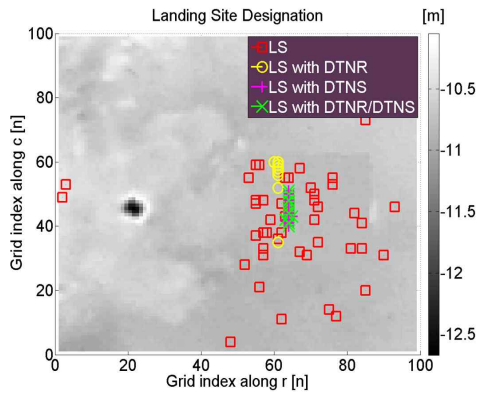


Fig. 11. HDA result with respect to a smooth terrain

반대로 Fig. 10과 같이 험준도가 경사보다 상대적으로 큰 지형, 그리고 Fig. 11과 같이 경사와 험준도 모두 낮은 평탄한 지형 등 총 3가지 특성을 갖는 지형에 대하여 각 50회 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하고, 알고리즘 별 성능분석을 위해 Table 3와 같이 임의로 설정한 안전지대에 착륙지가 선정될 확률을 비교하였다. 또한 보다 자세한 성능비교를 위하여 이 안전지대를 중심으로 각 알고리즘 별 선정된 착륙지가 떨어진 거리를 Table 4과 같이 rms로 나타내었다. 이 rms가 작을수록 안전한 착륙지로 판단한다.

3.3 지형특성에 따른 위험회피 성능 분석

3.2절에서 기술한바와 같이 3가지 특성의 지형에 대하여 4가지의 위험상대거리기반 위험도의 조합에 따른 착륙지 선정결과를 확인하기 위하여 첫 번째 성능지표로서 Table 3와 같이 안전지대에 착륙지가 선정될 확률을 비교한다. 각 지형특성에 따른 지형 파라미터 추정결과를 Table 1에서 확인해보면 경사의 크기가 크고 변화가 심한 지형(steeep)은 측정영역 내 추정된 경사의 평균이 험준도의 평균에 비해 큰 것을, 경사는 낮고 상대적으로 험준도가 큰 지형(rough)의 경우 반대로 험준도의 평균이 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다.

총 3가지 특성의 지형에 대하여 지형 파라미터만을 이용하여 착륙지를 선정된 결과 가장 좋지 않은 확률을 보인다. 대부분의 선정된 착륙지가 안전지대와 비안전지대 간의 경계에 근접하는 경우가 발생하며, 이 경우 착륙단계에서 자세 및 위치오차로 인해 인접한 위험요소와 충돌할 가능성이 존재한다. 특히 Fig. 11과 같이 평탄한 지형의 경우 라이다 거리측정오차에 큰 영향을 받아

Table 2. Mean of slope and roughness

Terrain condition \ Terrain parameter	Slope(deg)	Roughness(m)
Lunar (steep)	36.1	0.05
Lunar (rough)	14.8	0.08
Lunar (smooth)	8.5	0.02

Table 3. Landing probability of on the safe zone

Terrain condition \ Hazard cost	LS only with terrain parameter	LS with DTNR	LS with DTNS	LS with DTNR /DTNS
Lunar (steep)	92%	98%	100%	100%
Lunar (rough)	92%	100%	100%	100%
Lunar (smooth)	41%	100%	100%	100%

Table 4. RMS of distance between selected landing target and the center of the safe zone

Terrain condition \ Hazard cost	LS only with terrain parameter	LS with DTNR	LS with DTNS	LS with DTNR /DTNS
Lunar (steep)	15.5m	9.9m	5.4m	4.1m
Lunar (rough)	14.5m	4.1m	5.2m	4.1m
Lunar (smooth)	32.1m	15.4m	5.4m	5.4m

선정된 착륙지가 안전지대를 벗어나 위험요소 인근에 임의로 선정되는 것을 확인할 수 있다. 반면 지형파라미터와 함께 적어도 하나의 위험상대거리를 고려한 알고리즘의 경우 거의 100%에 가까운 착륙확률을 보인다.

다음으로 Table 4로부터 각 지형특성에 따른 알고리즘별 rms를 비교해보면, 지형파라미터만을 고려한 경우 rms가 지형의 특성에 관계없이 4가지 알고리즘 중 가장 큰 값으로 좋지 않은 결과를 나타낸다. DTNR 또는 DTNS를 지형파라미터와 함께 고려하면 지형파라미터만을 고려하였을 때보다 작은 rms를 갖는다. 그러나 이는 지형의 특성에 따라 항상 좋은 결과를 나타내지는 않는다.

Figure 9와 같이 험준도에 비해 경사의 변화가 심하고 그 크기가 큰 지형의 경우 DTNR만을 고려하게 되면 비탈면과의 상대거리가 고려되지 않아 선정된 착륙지가 안전지대 중심에서 멀어져 안전지대의 경계 쪽으로 접근하는 경우가 발생한

다. 그러나 DTNS를 고려한 경우 비탈면과의 상대거리를 고려하여 이와 가능한 멀리 떨어진 점을 찾기 때문에 가장 좋은 성능을 나타낸다.

반면 Fig. 10과 같이 경사에 비해 상대적으로 험준도가 큰 지형에서는 DTNR를 고려한 경우 바위와의 상대거리를 고려함으로써 이와 가능한 멀리 떨어진 점을 착륙지로 선정하기 때문에 비탈면과의 상대거리를 고려하는 DTNS만을 사용할 때보다 rms가 작은 좋은 성능을 나타낸다.

따라서, DTNR과 DTNS를 동시에 고려하여 착륙지를 선정하게 되면 지형의 특성에 관계없이 가장 좋은 성능을 나타낸다. 심지어 Fig. 11과 같이 경사와 험준도 모두 낮아 지형파라미터 추정 오차가 라이다 거리측정오차에 영향을 많이 받는 경우에도 DTNR 또는 DTNS를 각각 고려한 경우와 같거나 더 좋은 성능을 보인다.

IV. 실험 결과

4.1 TOF 카메라 기반 위험회피착륙

라이다와 같이 3차원 거리정보를 제공하는 센서로는 TOF 카메라가 있다. TOF 카메라는 레이저 대신 적외선을 조사하여 물체에 반사되어 되돌아오는 시간을 측정하여 거리를 측정하는 펄스 카메라의 일종으로 한 번에 일정 영역에 대한 3차원거리정보를 제공한다[9]. 이는 실제 달착륙선에 사용되는 라이다에 비해 가볍고 가격이 저렴하기 때문에 라이다 기반 위험회피착륙 알고리즘을 실험, 검증하기에 용이하다. 다만 TOF camera의 측정오차 수준을 실제 착륙선에 탑재되는 라이다의 거리측정오차에 가깝게 하기 위해 Gaussian filter를 적용하여 SNR(Signal to Noise Ratio)이 시뮬레이션에 근사하도록 하였다. 이러한 3차원거리정보를 이용하여 시뮬레이션과 마찬가지로 2장에서 기술한 고도맵 생성 기법에 따라 측정영역(적색선)에 대한 고도맵을 생성한다. 본 실험에 서는 Heptagon enterprise systems사의 SR4k 모델을 사용하였으며, Fig. 12와 같이 착륙지역에 대한 단순 모형으로 달 지형을 모사하였다. 달 지형모형에는 반구형태의 바위 모형이 크기별(big, medium, small)로 고루 분포해 있으며, 착륙지역 하단 약 1/3은 바위는 없는 평평한 비탈면(황색선)을 설치함으로써 위험상대거리 중 DTNR만을 고려하였을 때, 발생하는 문제를 확인하고 DTNS를 함께 고려하여 위험도를 계산하였을 때 성능이 향상됨을 보이기 위함이다. 달

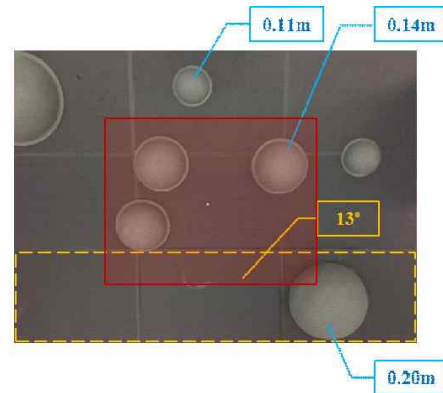


Fig. 12. Lunar surface mock-up

Table 5. Experiment condition

Parameter	Value
Reference DEM: size	2.75x2.13m
Rock size: big	20cm
Rock size: medium	14cm
Rock size: small	11cm
Slant slope	13°
Altitude	2m
TOF cam: FOV	69°x56°
TOF cam: resolution	176(h)x144(v)
TOF cam: range error*	0.005m(1- σ)
Lander footprint	0.1m
Tolerance: slope	10°
Tolerance: roughness	0.05m

*Gaussian filter : kernel 50x50, standard deviation 5

표면에 대해 SR4k를 이용하여 Fig. 12의 적색영역에 해당하는 3차원 거리 측정치를 획득하고, 이를 이용하여 Table 5의 실험조건하에 2장에서 기술한 위험회피 착륙알고리즘을 수행하였다. Fig. 13은 1회 위험회피착륙을 수행하는 과정에서 계산된 근사평면 DEM(a), 경사(b) 및 험준도(c), DTNR(d), DTNS(e) 위험도와 통합 위험도맵(f)이다. 지형파라미터 계산결과, Fig. 13에서 비교적 평탄한 중앙부의 경사 및 험준도가 다른 영역에 비해 상대적으로 작은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 의도한 바와 같이 모형 하단 1/3에 해당하는 평탄하지만 경사를 갖는 지형에 대하여 DTNR 위험도는 낮은 값을 DTNS 위험도는 높은 값을 갖는다.

Figure 14는 SR4k의 3차원 거리측정치를 이용하여 총 10회 위험회피착륙 알고리즘을 수행한 결과이다. 3장의 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 착륙지점이 지형파라미터만을 고려한 경우 측정

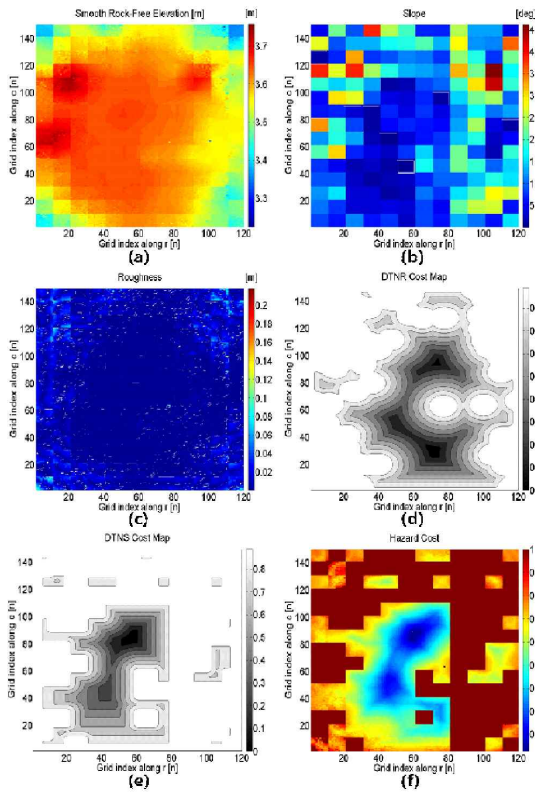


Fig. 13. Safe landing experiment result; smooth rock-free elevation(a), slope(b), roughness(c), DTNR cost map(d), DTNS cost map(e), hazard cost map(f)

오차에 의해 위험요소 근처 혹은 위에 선정되는 경우가 다수 발생한다.

지형파라미터와 DTNR을 함께 고려한 경우, 험준한 지역을 피해 지형파라미터만을 고려하여 선정된 착륙지에 비해 상대적으로 안전한 지형 중앙에 착륙지가 선정되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 비탈면과의 상대거리는 고려하지 않기 때문에 해당 비탈면이 험준도가 낮은 매끄러운 지형일 경우 Fig. 14와 같이 비탈면에 착륙지가 선정되는 문제가 발생한다. DTNS만을 고려한 경우에도 바위와의 상대거리를 고려하지 않기 때문에 이에 근접하여 착륙지가 선정되는 경우가 존재한다.

지형파라미터, DTNR 및 DTNS를 동시에 고려하여 위험도를 계산하면 바위, 비탈면 모두를 회피함으로써 다른 조합에 비해 위험요소로부터 멀리 떨어진 안전한 착륙지점 선정이 가능하다.

V. 결 론

본 논문에서는 달착륙선의 위험상대거리 기반 위험도가 위험회피 착륙 성능에 미치는 영향을 비교분석하였으며, 이를 통해 경사 및 험준도에 대한 위험상대거리 위험도가 지형 특성에 따라 착륙지 선정결과에 미치는 영향을 분석하였고, 지형파라미터기반 위험도와 동시에 가중합하였을 때 안전한 착륙지점을 선정함에 있어 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 시뮬레이션 및 실험결과를 통해 검증하였다.

후 기

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

References

- 1) Epp, Chirold D., and Thomas B. Smith. "Autonomous Precision Landing and Hazard Detection and Avoidance Technology (ALHAT)," *Aerospace Conference, IEEE, IEEE, 2007.*
- 2) Shankar, Uday J., et al. "Lunar Terrain Surface Modeling for the ALHAT Program," *Aerospace Conference, 2008 IEEE, IEEE, 2008.*
- 3) Johnson, Andrew E. and James F.

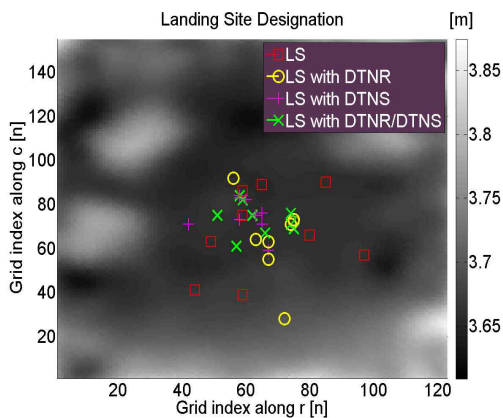


Fig. 14. Landing site designation resulting from hazard avoidance algorithm using TOF camera's three-dimensional point cloud

Montgomery. "Overview of Terrain Relative Navigation Approaches for Precise Lunar Landing," *Aerospace Conference, IEEE, IEEE*, 2008.

4) Johnson, Andrew E., et al. "Lidar-Based Hazard Avoidance for Safe Landing on Mars," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 25, No. 6, 2002, pp. 1091~1099.

5) Johnson, Andrew E., et al. "Analysis of On-Board Hazard Detection and Avoidance for Safe Lunar Landing," *Aerospace Conference, IEEE, IEEE*, 2008

6) Cohanin, Babak E., and Brian K. Collins. "Landing Point Designation Algorithm for Lunar Landing," *Journal of Spacecraft and*

Rockets, Vol. 46, No.4, 2009, pp.858-864.

7) de Lafontaine, Jean, David Neveu, and Karina Lebel. "Autonomous Planetary Landing Using a Lidar Sensor: the Closed-Loop System," *AIAA Guidance, Navigation and Control Systems Conference*, 2006.

8) Gribbon, Kim T., and Donald G. Bailey. "A Novel Approach to Real-time Bilinear Interpolation," *Field-Programmable Technology, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on. IEEE*, 2004.

9) Lim, Tae W., and Austin J. Toombs. "Pose Estimation Using a Flash Lidar," *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, 2014.