修士論文

自己位置推定精度を考慮した 月惑星探査ローバの経路計画手法 に関する研究

Study on Path Planning Method Considering Localization Accuracy for Exploration Rover

令和元年 8 月 15 日

指導教員：橋本樹明 教授

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻

修士課程

37-176482 前中脩人 (Shuto Maenaka)

Abstact

Recently, autonomous rovers are used for lunar and planetary exploration. It is necessary that the rovers determine their routes and localize their positions autonomously. In the environment of celestial surface, visual images taken by optical cameras are used for localization, because localizing with only dead reckoning such as IMU (Inertial Measurement Unit) or WO (Wheel Odometry) induces error accumulation.

Skyline algorithm is one of methods for localizing with panoramic images. In this method, extracted real skyline is compared with known digital elevation model to decide position. The accuracy of localization with skyline algorithm depends on the difference of the skyline between two points where localization is executed.

In order to make navigation and localization with skyline algorithm easier, this paper proposes novel path planning method considering localization accuracy. In this method, dijkstra algorithm is used for optimization, and a new index evaluating the difference of the skyline is introduced for cost function of path planning.

To confirm the effect of the proposed method, a simulation was conducted in a virtual terrain firstly. The virtual terrain was made by crater model and the function used in perlin noise. The simulation is consisted by two steps. Firstly, two paths are planned by the conventional method and the proposed method on the terrain. Secondly, simulator makes virtual rover follow each paths with localization by skyline algorithm, and localization error is calculated.

The simulation was also conducted in the DEM (Digital Elevation Model) of the Mars and Moon. The results of these simulation showed that the path planned by the proposed method decreases the error of localization conducted in the process of following the path.

目次

第 1 章　序論　10
1.1　研究背景 10
1.2　探査ローバの経路計画に関する先行研究 11
1.3　探査ローバの自己位置推定に関する先行研究 12
1.4　本研究の目的 15
1.5　本論文の構成 15

第 2 章　スカイラインマッチング　17
2.1　スカイラインマッチングの概要 17
2.2　本研究で用いるスカイラインマッチングアルゴリズム 17
2.2.1　観測スカイラインの抽出 17
2.2.2　地形情報に基づく予想スカイライン生成 18
2.2.3　スカイラインの比較による自己位置推定 19
2.3　先行研究における位置推定精度検証 21

第 3 章　位置推定精度を考慮した経路計画　23
3.1　提案する経路計画手法の目的 23
3.2　位置推定の難易度の決定要素 23
3.3　最適化手法 24
3.4　従来手法の評価関数 25
3.5　提案手法の評価関数 27

第 4 章　仮想地形におけるシミュレーション　29
4.1　仮想地形の作成 29
4.1.1　クレータ 29

4.1.2 丘陵 30
4.1.3 作成した仮想地形 31
4.2 経路計画シミュレーション 31
4.3 経路追従シミュレーション 32
4.3.1 模擬観測スカイラインの作成 32
4.3.2 ローバの走行条件 33
4.3.3 シミュレーション結果 35

第 5 章 実際の地形を用いたシミュレーション 55
5.1 ケース 1：火星表面（丘陵地近傍） 55
5.1.1 使用した地形情報 55
5.1.2 経路計画シミュレーション 55
5.1.3 経路追従シミュレーション 57
5.2 ケース 2：月表面（南極域） 76
5.2.1 使用した地形情報 76
5.2.2 経路計画シミュレーション 76
5.2.3 経路追従シミュレーション 77
5.3 ケース 3：火星表面（クレータ内部） 99
5.3.1 使用した地形情報 99
5.3.2 経路計画シミュレーション 99

第 6 章 結論 106
6.1 本研究のまとめ 106
6.2 今後の課題 106

発表文献 108

参考文献 109

謝辞 113

図目次

1.1 Mars Exploration Rover. 11
1.2 A visualization of path plan simulation for a rover generated using various combinations of weighting factors. 12
1.3 The result path on the simple map. Yellow area represents feature-rich terrain while blue area represents featureless terrain. 13
1.4 The red lines represent the viewing directions of mast cameras. In (a), the mast angles and timing are predefined. In (b), the optimal viewing angles and timing are computed based on the VOSAP(proposed) algorithm. 13
1.5 Feature points used for VO by MER Spirit. 14
1.6 Trajectory of the Curiosity using feature matching. 14
1.7 The system of VIPER. 15

2.1 Example of skyline extraction. 18
2.2 Example of DEM. 19
2.3 The algorithm of rendering skyline. 20
2.4 Localization simulation done in previous work. 22

3.1 Difference of skylines. 24
3.2 Dijkstra algorithm. 26
3.3 Making graph based on DEM. 26

4.1 Fifth order function used in Perlin noise. 30
4.2 Virtual terrain. 31
4.3 2 paths on virtual terrain. 32
4.4 Simulated real skyline. 33
4.5 Outline of the simulation. 34
4.6 Localization Error and Following Error. 35
4.7 Mean of error of the localization on the virtual terrain (condition 1). 36
4.8 Variance of error of the localization on the virtual terrain (condition 1). . . . 36

4.9 Goal reach rate on the virtual terrain (condition 1). 37
4.10 Reached position on the conventional path on the virtual terrain (condition 1). 37
4.11 Reached position on the proposed path on the virtual terrain (condition 1). . 38
4.12 Sum of the difference of skyline in paths on the virtual terrain (condition 1). . 39
4.13 Sum of the difference of skyline in trajectories on the virtual terrain (condition 1). 39
4.14 Skylines from the conventional path on the virtual terrain (condition 1) (segment 1-5). 41
4.15 Skylines from the conventional path on the virtual terrain (condition 1) (segment 6-10). 42
4.16 Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 1) (segment 1-5). 43
4.17 Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 1) (segment 6-10). 44
4.18 Mean of error of the localization on the virtual terrain (condition 2). 45
4.19 Variance of error of the localization on the virtual terrain (condition 2). . . . 46
4.20 Goal reach rate on the virtual terrain (condition 2). 46
4.21 Reached position on the conventional path on the virtual terrain (condition 2). 47
4.22 Reached position on the proposed path on the virtual terrain (condition 2). . 47
4.23 Sum of the difference of skyline in paths on the virtual terrain (condition 2). . 48
4.24 Sum of the difference of skyline in trajectories on the virtual terrain (condition 2). 49
4.25 Skylines from the conventional path on the virtual terrain (condition 2) (segment 1-5). 50
4.26 Skylines from the conventional path on the virtual terrain (condition 2) (segment 6-10). 51
4.27 Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 2) (segment 1-5). 52
4.28 Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 2) (segment 6-10). 53
4.29 Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 2) (segment 11-13). 54

5.1 Gusev crater near Columbia hills on the Mars (case 1). 56
5.2 2 paths on the Mars surface (case 1). 56
5.3 Mean of error of the localization on the Mars surface (case 1, condition 1). . . 57
5.4 Variance of error of the localization on the Mars surface (case 1, condition 1). 58

5.5 Goal reach rate on the Mars surface (case 1, condition 1). 58
5.6 Reached position on the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 1). 59
5.7 Reached position on the proposed path on the Mars surface (case 1, condition 1). 59
5.8 Sum of the difference of skyline in paths on the Mars surface (case 1, condition 1). 60
5.9 Sum of the difference of skyline in trajectories on the Mars surface (case 1, condition 1). 60
5.10 Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 1) (segment 1-5). 62
5.11 Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 1) (segment 6-10). 63
5.12 Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 1) (segment 1-5). 64
5.13 Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 1) (segment 6-10). 65
5.14 Mean of error of the localization on the Mars surface (case 1, condition 2). . . 66
5.15 Variance of error of the localization on the Mars surface (case 1, condition 2). 67
5.16 Goal reach rate on the Mars surface (case 1, condition 2). 68
5.17 Reached position on the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 2). 68
5.18 Reached position on the proposed path on the Mars surface (case 1, condition 2). 69
5.19 Sum of the difference of skyline in paths on the Mars surface (case 1, condition 2). 70
5.20 Sum of the difference of skyline in trajectories on the Mars surface (case 1, condition 2). 70
5.21 Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 1-5). 71
5.22 Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 6). 72
5.23 Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 1-5). 73
5.24 Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 6-10). 74

5.25 Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 11-12). 75
5.26 South pole region of the Moon (case 2). 76
5.27 2 paths on the Moon surface (case 2). 77
5.28 Mean of error of the localization on the Moon surface (case 2, condition 1). . 78
5.29 Variance of error of the localization on the Moon surface (case 2, condition 1). 79
5.30 Goal reach rate on the Moon surface (case 2, condition 1). 80
5.31 Reached position on the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 1). 80
5.32 Reached position on the proposed path on the Moon surface (case 2, condition 1). 81
5.33 Sum of the difference of skyline in paths on the Moon surface (case 2, condition 1). 82
5.34 Sum of the difference of skyline in trajectories on the Moon surface (case 2, condition 1). 82
5.35 Skylines from the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 1) (segment 1-5). 84
5.36 Skylines from the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 1) (segment 6-10). 85
5.37 Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 1) (segment 1-5). 86
5.38 Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 1) (segment 6-10). 87
5.39 Terrain characteristic of 2 paths on the Moon surface (case 2). 88
5.40 Mean of error of the localization on the Moon surface (case 2, condition 2). . 89
5.41 Variance of error of the localization on the Moon surface (case 2, condition 2). 89
5.42 Goal reach rate on the Moon surface (case 2, condition 2). 90
5.43 Reached position on the conventional path on the Moon surface (case 22, condition 2). 91
5.44 Reached position on the proposed path on the Moon surface (case 2, condition 2). 91
5.45 Sum of the difference of skyline in paths on the Moon surface (case 2, condition 2). 92
5.46 Sum of the difference of skyline in trajectories on the Moon surface (case 2, condition 2). 92

5.47 Skylines from the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 1-5). 94
5.48 Skylines from the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 6-8). 95
5.49 Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 1-5). 96
5.50 Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 6-10). 97
5.51 Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 11-13). 98
5.52 Crater on northern plains of the Mars (case 3). 99
5.53 2 paths on the Mars surface (case 3). 100
5.58 The difference of skyline per distance in paths on each cases. 101
5.54 Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 3, condition 1) (segment 1-5). 102
5.55 Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 3, condition 1) (segment 6-10). 103
5.56 Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 3, condition 1) (segment 1-5). 104
5.57 Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 3, condition 1) (segment 6-10). 105

表目次

2.1 Standard deviations of noises for simulated skylines 21

4.1 Constants of the model of shape of craters 30
4.2 Standard deviations of noises for simulated skylines. 33
4.3 Standard deviations of noises for moving of rover 34

5.1 The difference of skyline per distance in paths on each cases. 101

第 1 章

序論

1.1 研究背景

地球や生命，ひいては我々人類の起源を探るため，様々な形での宇宙探査がこれまでに計画・実行されてきた。中でも，地球外の天体表面へ人間あるいは自律移動ロボットを送り込むことは，当該天体を詳細に調査する上で重要な役割を担ってきた。しかし，天体表面における有人ミッションは，1972 年に打ち上げられたアポロ 17 号によるものを最後におこなわれておらず，人類が 2019 年現在までに直接足を踏み入れることに成功した天体は未だ月のみである。その背景には，冷戦下で続いたアメリカとソビエト連邦の宇宙開発競争が沈静化したことで，高い危険性を伴う上に多額の投資が必要となる有人宇宙探査が敬遠されるようになったことが原因として挙げられる。

その一方で，無人探査機は継続的に送り込まれ，惑星科学を始めとした学術分野の発展に大きく寄与してきた。特に，ローバと呼ばれる自律移動可能な車両型のロボットは，図 1.1 に示す Mars Exploration Rover（MER）（図 1.1）などを始めとしてこれまでに 8 台が月および火星表面に送り込まれてきた [1]。現在，月面で中国の玉兎 2 号 [2]，火星で NASA の Mars Science Laboratory Curiosity（MSL）[3] が活動中であるほか，今年 7 月にはローバ「プラギャン」を積載したインドの月面探査ミッション，チャンドラヤーン 2 号 [4] の打ち上げがおこなわれた。さらに，2020 年には欧州宇宙機関（ESA）によるローバの打ち上げが ExoMars 計画の一環として予定されており [5]，探査ローバを用いた宇宙探査は今後も盛んにおこなわれていくと予想される。

天体表面で長時間の活動をおこなう探査ローバは，真空，温度，そして地形や障害物などの点で，非常に過酷な環境にさらされる。そんな中でミッションを遂行するローバには，高い自律走行性能が求められる。また，人間の手が届かないばかりか，地球との通信すら限定されることが多いため，何よりも安全かつ確実に移動することが重要となる。安全・確実な自律走行の実現には，障害物の乗り越え性能や耐スリップ性能などのハードウェア面での性能と，経路計画や自己位置推定のようなソフトウェア面での性能の両方が高水準にあることが必要となる。本研究では，このうち，後者について焦点を当てる。次項から，探査ローバの自己位置推定手

法および経路計画手法について詳しく述べる。

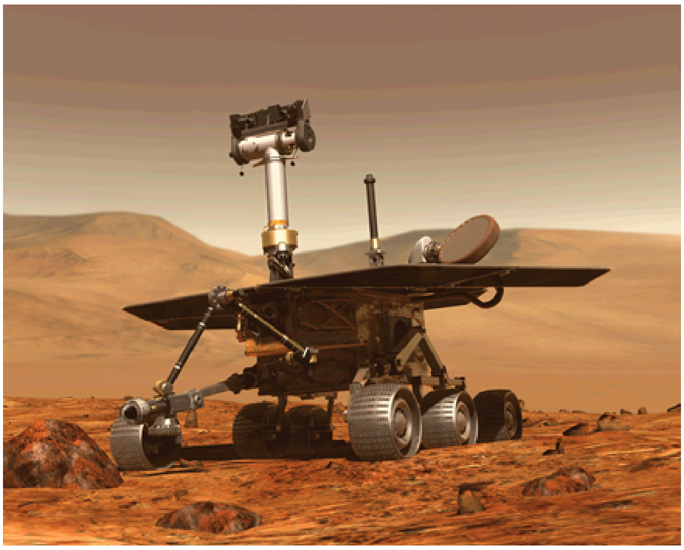

図 1.1: Mars Exploration Rover[6].

1.2 探査ローバの経路計画に関する先行研究

前項で述べたとおり，月惑星の表面においては，安全かつ確実に自律移動することが求められる。その実現のため，これまでにも様々な要素を考慮した経路計画手法が提案されてきた。一般的に，探査ローバのような移動ロボットの経路計画では，制約条件を満たしつつ，コストを最小にするように最適化計算をおこなうことで経路が求められる。コストとしては，移動距離や移動時間が一般的に用いられるほか，安全性や確実性を高めるために様々な要素に対応するコストが導入されてきた。

安全性を高めるための経路計画としては，

- 車両の走行性を最適化する手法
- エネルギーを最適化する手法
- 通信を最適化する手法

などが提案されている。1 つ目には荒地を避けて走破性を確保する手法 [7]，地面の滑りやすさを考慮した手法 [8] などが挙げられる。2 つ目のエネルギーに関する研究としては，発電のために必要な日照量を最大化することを目的した手法 [9]，消費電力を最小化する手法 [10] などが存在する。3 つ目の通信について考慮したものには，[11] などがある。また，これらを総合してローバの内的要素・外的要素に落とし込む手法 [12] も提案されている（図 1.2）。

一方で，近年では，ローバによる追従性を考慮した経路計画の研究も複数おこなわれている。地形をもとに，画像の特徴量が豊富な領域を通過することで誤差を抑制する経路計画 [13]（図 1.3）や，同じく特徴量の豊富な領域へカメラの方向を最適化する手法 [14]（図 1.4）などが提案

されている。しかし，これらの手法を用いるためには，特徴量の豊富な領域とそうでない領域とに地形を事前に分類しておく必要がある。さらに，位置推定の誤差に関しては，特徴量の多さに応じて一律に与えられているに過ぎず，具体的な位置推定手法に基づいて経路追従の容易性が示されているとは言いがたい。

また，経路計画は想定する経路の長さに応じて，局所的な計画（Local planning）と大域的な計画（Global planning）とに大別される [15]。Local な経路計画は 1 m から 10 m 程度のオーダーの距離を移動することを想定したもので，岩などの障害物を回避しながら安全に走行することを主眼に置いていると言える。ローバが走行する過程で得られる情報を元に細かく更新が繰り返されていくべきものである。それに対し，Global な経路計画は，100 m から 1 km オーダーの長さの経路を求めるもので，より大きな地形や地質による走破性などを考慮することを目的としている。これら 2 つは互いに補い合う関係であり，第一に周辺環境についての粗い情報を用いた Global planning によってミッションレベルでのスタートからゴールへの移動経路が計画され，移動の過程でより細かい周辺情報を利用して Local planning で実際に走行する箇所を決定する，という順序で探査ローバの移動が成される。上述した経路追従性を考慮した研究の多くは，図 1.3 に示したように，Local planning に焦点を当てたものであった。

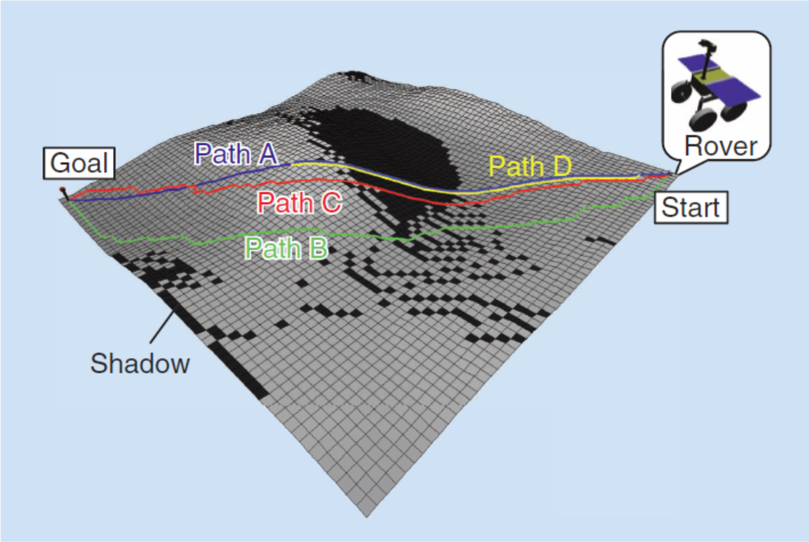

図 1.2: A visualization of path plan simulation for a rover generated using various combinations of weighting factors $(W_{dist}, W_{int}, W_{exth})$[12].

1.3 探査ローバの自己位置推定に関する先行研究

経路計画と同様，決定した経路を自律的に追従することも，惑星探査ローバの重要な機能である。移動ロボットにおいて広く用いられる相対的な位置推定技術に，車輪の回転角によって始点からの移動距離・方向を求める Wheel Odometry（WO）や，角速度と加速度の測定によって位置を計算する Inertial Measurement Unit（IMU）がある。しかし，月惑星表面は細かい砂

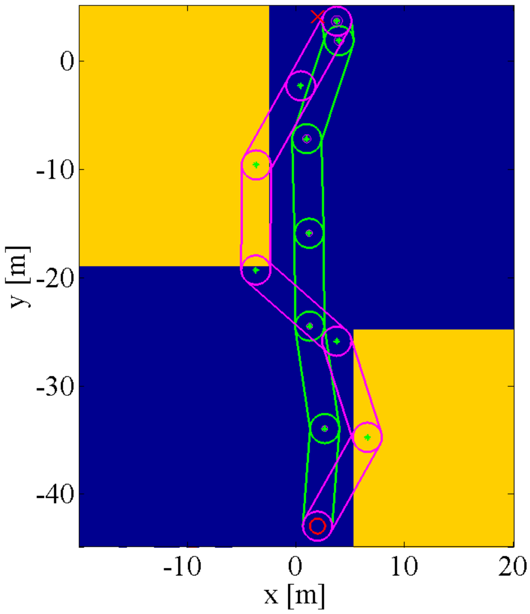

図 1.3: The result path on the simple map. Yellow area represents feature-rich terrain while blue area represents featureless terrain[13].

図 1.4: The red lines represent the viewing directions of mast cameras. In (a), the mast angles and timing are predefined. In (b), the optimal viewing angles and timing are computed based on the VOSAP(proposed) algorithm[14].

地に覆われており，車輪のスリップによる誤差が蓄積するため，WO や IMU のみによってナビゲーションをおこなうことは難しい。そのため，光学カメラによる画像を用いた位置推定手法が併用されている [16]。画像に基づく位置推定手法としては，Visual Odometry（VO）[17]（図 1.5），衛星画像との特徴点マッチング [18]（図 1.6），Visual Simultaneous Localization and Mapping（V-SLAM）[19]，地形マッチング [20]，スカイラインマッチング [21][22]（図 1.7）などが研究されており，このうち VO は MER および MSL，特徴点マッチングは MSL で実際に用いられている [23][18]。

上に挙げた位置推定手法の中で，地形マッチングとスカイラインマッチングはローバの存在位置周辺の地形情報が既知であることが前提となっている。これらの手法は，ローバに搭載されたカメラによって得られる画像と地形情報とを比較することで位置推定をおこなうため，周辺地形の特徴によって推定精度が変動するという特徴がある。中でもスカイラインマッチングはそれが顕著で，場所によっては 10m 程度の精度で位置を同定できることがある一方，時には 1000 m 以上の誤差が生じてしまう [22][24]。スカイラインマッチングは他の手法と比較して計算負荷を抑えられるものの，この地形依存性の大きさが影響し，探査ローバにおいて実用化されるには至っていない。

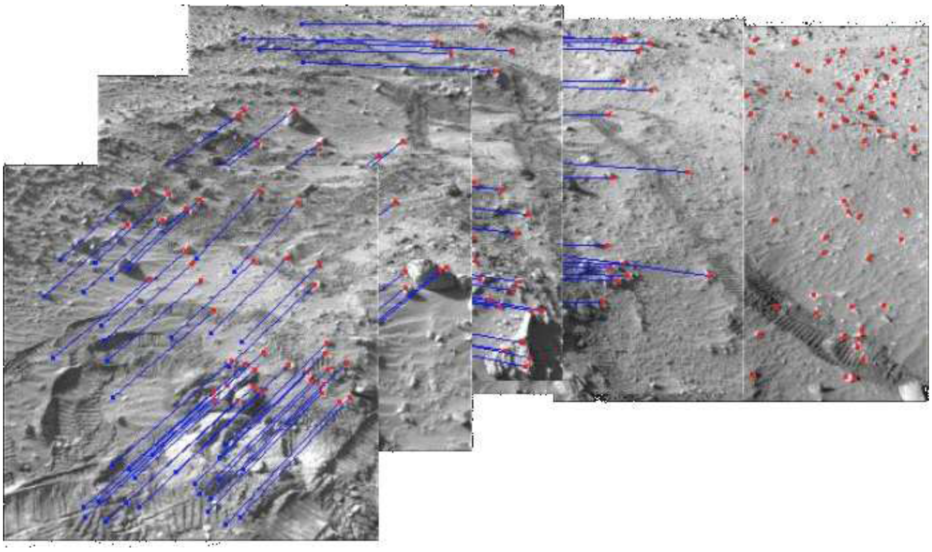

図 1.5: Feature points used for VO by MER Spirit[17].

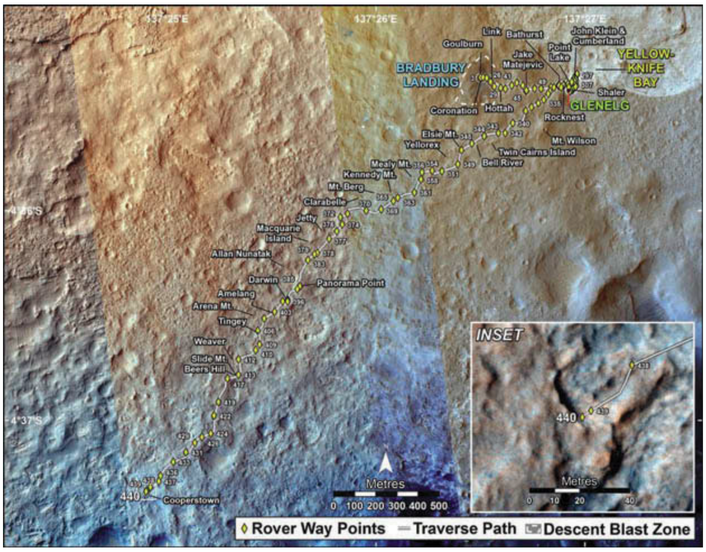

図 1.6: Trajectory of the Curiosity using feature matching[18].

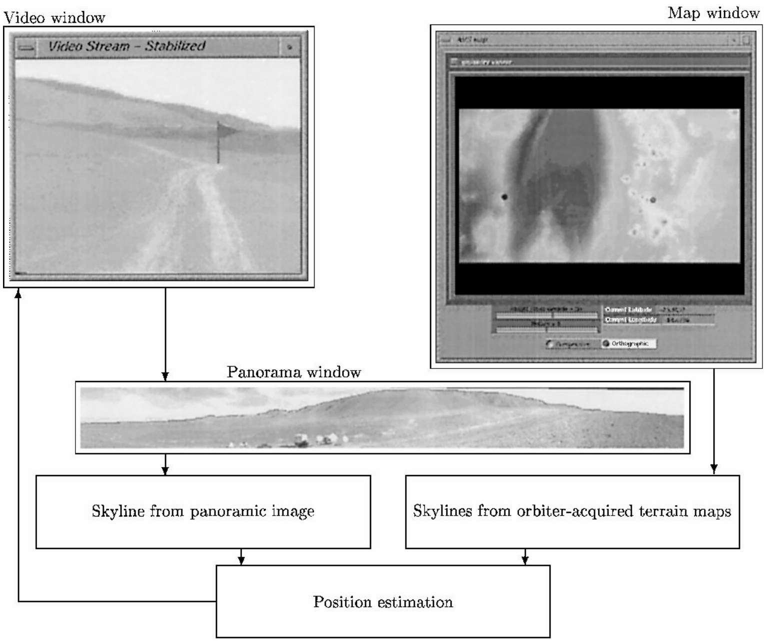

図 1.7: The system of VIPER[22].

1.4 本研究の目的

本研究では，スカイラインマッチングによるローバの位置推定の精度を考慮した，経路追従が容易な経路計画を検討する。

ここまで述べたとおり，安全な経路計画と正確な位置推定は探査ローバにおける大きな課題であるといえる。その改善のため，経路計画手法および自己位置推定手法のそれぞれについては個別に様々な研究がおこなわれてきているが，経路計画の段階から位置推定について考慮した研究は未だ少ない。少ないながら存在するそれらの研究も，主に VO を想定した Local planning について取り扱ったものであり，大域的な地形的な特徴に応じた位置推定精度の変化を考慮しているとは言いがたい。

しかし，位置推定の精度が地形に依存することを考えれば，より大域的な範囲で位置推定が容易になるように経路を選択することは，安全・確実な移動をおこなうために有効であると考えられる。そこで，本研究では，自己位置推定を高精度でおこなうことができるような，Global な経路を計画することを目的とする。そして，具体的な位置推定手法として，特に地形依存性の高いスカイラインマッチングを想定し，経路計画によって位置推定の精度を向上させられることを示す。さらにこれらの前提に立ち，位置推定に基づく経路追従のシミュレーションをおこなうことで提案手法の有効性を実証する。

1.5 本論文の構成

第 2 章では，スカイラインマッチングによる自己位置推定について詳しく解説する。スカイラインマッチングは，本研究において月惑星探査ローバの位置推定手法として想定する手法で

ある。

第 3 章では，探査ローバの位置推定を容易にする経路計画手法を提案する。また，比較対象として想定する従来の経路計画手法についても述べる。

第 4 章では，丘陵とクレータを持つ仮想地形を作成し，第 3 章で述べた手法によって計画された経路について検証をおこなう。ローバが自己位置推定をおこないながら経路を辿ることを想定して実施したシミュレーションについて述べる。

第 5 章では，第 4 章と同様のシミュレーションを火星および月の実際の地形を用いておこなった結果を示し，提案手法の有効性について考察をおこなう。

第 6 章では，本論文の結論と今後の展望を述べる。

第 2 章

スカイラインマッチング

本章では，本研究において探査ローバの位置推定手法として想定する，スカイラインマッチングアルゴリズムについて解説する。

2.1 スカイラインマッチングの概要

スカイラインマッチングは，地平線の形を用いて自己位置を推定する手法の総称である。Cozman らによって提案された VIPER[21][22] と呼ばれる手法が基礎となっており，ローバに搭載された光学カメラによるパノラマ画像からスカイラインを抽出し，予想される位置の周辺の Digital Elevation Model（DEM）と比較することで位置推定をおこなう。

近年では，スカイラインから地形的な頂点（ピーク）を検出し，DEM 上のピーク位置と比較する手法 [25] なども提案されているが，本研究では VIPER を簡略化した手法 [26] を取り扱う。この手法では，DEM 上の各点において，観測されることが予想されるスカイライン（予想スカイラインと呼ぶ）を事前に生成しておき，実際に観測されたスカイライン（観測スカイラインと呼ぶ）とそれらを比較し，予想スカイラインと観測スカイラインの差が最も小さい位置を現在地と推定する。次項以降で，この位置推定手法について詳しく述べる。

2.2 本研究で用いるスカイラインマッチングアルゴリズム

2.2.1 観測スカイラインの抽出

スカイラインマッチングにおいて，スカイラインは各方位角 ϕ 方向における地平線への仰角 m_ϕ を用いて表される。ローバの位置推定実行地点において実際に観測される地平線について，1° 刻みの方位角 $\phi = (0, ..., 359)[^\circ]$ ごとに仰角を測定し，360 次元のベクトル $\boldsymbol{m} = (m_0, ..., m_{359})$ としてスカイラインを得る。以降，このスカイラインを観測スカイラインと呼ぶ。

ローバから観測される地平線は，搭載されたカメラによるパノラマ写真から抽出される。撮影された画像を，輝度に閾値を設定することで二値画像化し，2 つの領域の境界線を地平線とし

て抽出する（図 2.1）。こうして得られた地平線画像をもとに，ピクセルで表現された画像上での座標を方位角・仰角に変換することで，観測スカイラインが得られる。変換は次式によっておこなわれる。

$$\frac{z_0 - v(\phi)}{\mu} \tag{2.1}$$

ここで，z_0 はパノラマ画像上における仰角 0 の高さ，$v(\phi)$ は方位角 ϕ 方向に対応する地平線上の点の画像上での高さ，μ は画像の解像度 [rad/pixel] である。

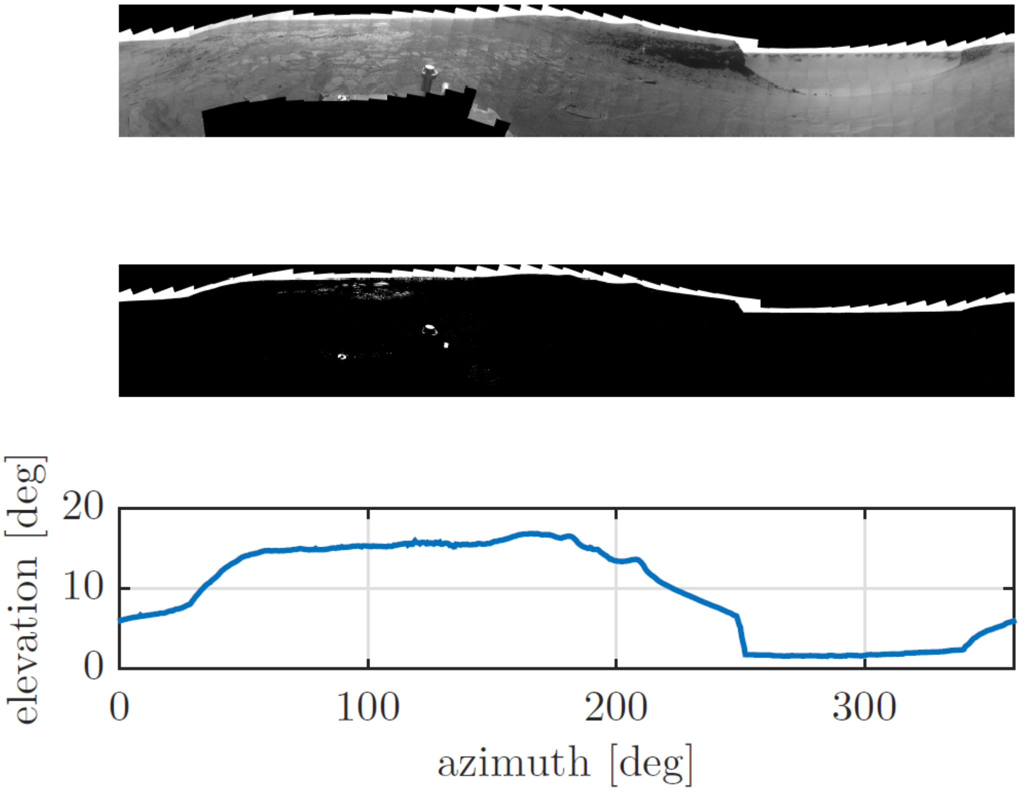

図 2.1: Example of skyline extraction.

2.2.2　地形情報に基づく予想スカイライン生成

DEM は，図 2.2 のように，地形を水平面で一様な大きさの格子状に分割し，それぞれのセルに中心地の標高値を持たせることで地表面の地形をデジタルに表現したものである。

DEM 上の各点の座標を，$\boldsymbol{p} = (x, y)$，各点での高さを $z(\boldsymbol{p})$ と表す。このとき，図 2.3 のように，$\boldsymbol{p}$ から見てある方位角 ϕ_j 方向に δp ずつ M 回補間していくことを考える，すると，k 個目の点における高さは，

$$a_{j,k} = z\left(\boldsymbol{p} + k\begin{pmatrix} cos(\phi_j) + \alpha \\ sin(\phi_j) + \alpha \end{pmatrix}\delta p\right) - d(k\delta p) \tag{2.2}$$

と表すことができる。このとき，α は方位角方向のローバの向きであり，$d(k\delta p)$ は惑星の曲

率に基づく補正項で，惑星の半径 r を用いて，

$$d(k\delta p) = r - \sqrt{r^2 - (k\delta p)^2} \tag{2.3}$$

によって求められる。また，この k 個目の点に対するローバからの仰角は，

$$e_{j,k} = arctan\left(\frac{a_{j,k} - (a_{j,0} + h)}{k\delta p}\right) \tag{2.4}$$

となる。このとき, h はローバに搭載されたカメラの高さである。本研究では, Mars Exploration Rover Spirit のカメラの高さ [27] を参考に 1.5 m とした。

スカイラインに対する方位角 ϕ_j 方向の仰角は，観測地点から地平線までの距離 D 内における最大の $e_{j,k}$ であり，これを s_j と表す。D は，天体ごとの半径とカメラの高さから，三平方の定理によって求められる。s_j はすなわち，k を $M = D/\delta p$ まで変化させた際の最大の $e_{j,k}$ である。これと同じことを ϕ_j を 0° から 359° まで 1° ずつ変化させながらおこなうことで，

$$s(\boldsymbol{p}) = (s_0, s_1, \cdots, s_{359}) \tag{2.5}$$

として，点 $\boldsymbol{p} = (x, y)$ における，DEM から予想されるスカイラインを得る。以降は，このスカイライン $s(\boldsymbol{p})$ を予想スカイラインと呼ぶ。

本研究において，経路追従のシミュレーションに用いた各パラメータの値を，表 2.1 にまとめた。シミュレーションについては，第 4 章，第 5 章で詳しく述べる。

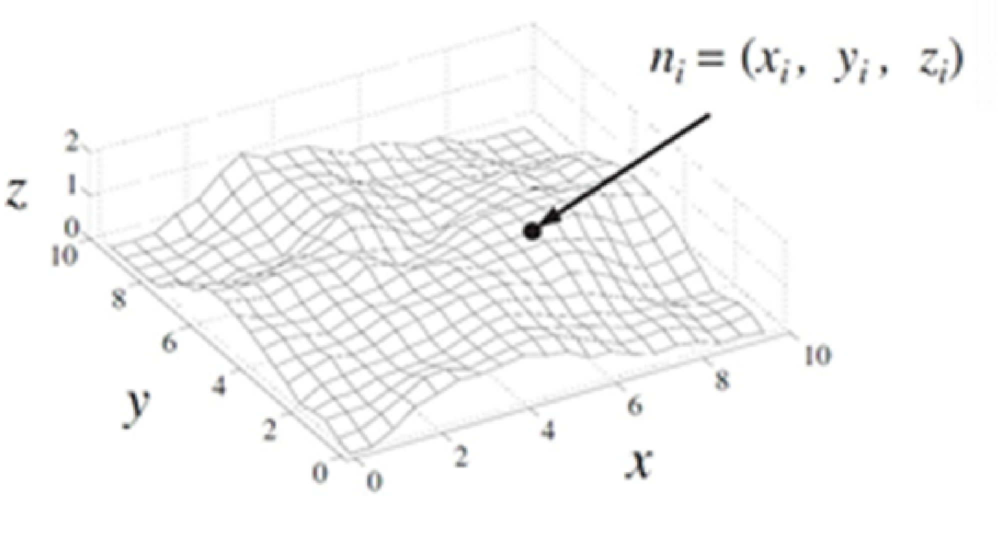

図 2.2: Example of DEM[8].

2.2.3　スカイラインの比較による自己位置推定

前項において得られた予想スカイラインと，パノラマカメラによって得られる観測スカイラインとを比較することで推定位置を求める。

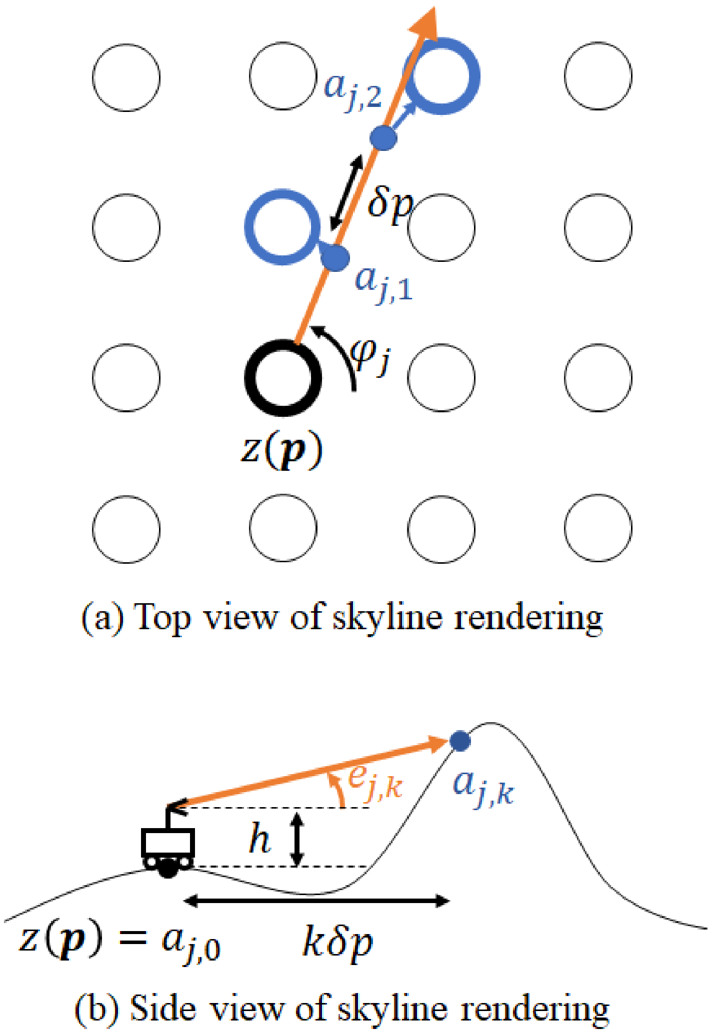

図 2.3: The algorithm of rendering skyline.

予想スカイライン $s(\boldsymbol{p}) = (s_0, ..., s_{359})$ と観測スカイライン $m = (m_0, ..., m_{359})$ との比較計量を，

$$e^2(\boldsymbol{p}) = \sum_j (m_j - s_j(\boldsymbol{p}, \alpha))^{\mathrm{T}} (m_j - s_j(\boldsymbol{p}, \alpha)) \tag{2.6}$$

とする。このとき，推定位置 $\boldsymbol{p}^*$ は，

$$(\boldsymbol{p}^*, \alpha^*) = \underset{\boldsymbol{p},\alpha}{\arg\min}\, e^2(\boldsymbol{p}, \alpha) \tag{2.7}$$

と求められる。

また，本研究では，簡単のため, スカイラインマッチングによるローバの方位角の推定はおこなわず，方位角は太陽センサや IMU，VO などのその他の機器によって得られると仮定している。すなわち，α の推定はおこなっていない。ただし，4 章のシミュレーション条件についての項で述べるとおり，その他のセンサによる方位角の推定には，一定の誤差が生じるものとした。

表 2.1: Standard deviations of noises for simulated skylines

Parameter	Value on Mars	Value on Moon	Description
δp	5 [m]	10 [m]	interpolation step
r	3396000 [m]	1738000 [m]	radius of star
D	3192 [m]	2283 [m]	distance to horizon
M	D / δp		number of step
h	1.5 [m]		height of the camera on the rover

2.3 先行研究における位置推定精度検証

前項の位置推定手法の提案にあたり，MER Spirit および Oppoutunity の活動領域において，位置推定のシミュレーションがおこなわれている。位置推定は，High Resolution Imaging Science Experiment（HiRISE）によって作成された火星の DEM[28] と，実際に 2 機の MER によって撮影された画像 [29] を用いて 2 つの地点でおこなわれた（図 2.4）。位置 $\boldsymbol{p}$ と方向 α の推定誤差はそれぞれ，51 m と 1°，27 m と 5° となっている。ただし，前者の場合に用いられた DEM の解像度は 4 m，後者の場合は 1 m である。

一方で，この検証では，図 2.4 に示したとおり，クレータや丘陵地の近傍におけるケースを扱っている。こういった特徴的な地形が存在する領域では，スカイラインマッチングによる位置推定がおこないやすいと考えられる。

また，スカイラインマッチングの精度を月面地形を用いて検証した研究 [30] では，0.5 m の解像度を持つ DEM のもとでは，約 6 m の精度で位置推定が可能であることが報告されている。しかしながら，探査ローバの限られた計算性能を考慮すると，高解像度の DEM を処理することは負担が大きい。0.5 m もの高精度の DEM を用いることは現実的でない可能性もある。さらに一方で，5 m〜5 m 精度の DEM を用いた位置推定では，誤差が 20 m〜111 m の範囲で変動し，位置推定に失敗する地点も存在したことが述べられている。地形およびそれを表現する DEM の条件に応じて位置推定の精度が大きく変動していることは否定できない。

パノラマ画像から得られる地平線の中でも，特にピークのみを用いて位置推定をおこなう手法 [25] では，解像度が 13 m × 24 m の DEM を用いて位置推定のシミュレーションがおこなわれた結果，平均精度が 61.8 m となったことが示されている。さらに，この研究では，ローバの移動に応じた地平線の変動がわずかであることこそが，スカイラインマッチングによる位置推定の精度が制限される原因であると提言されている。

ローバに搭載された LIDAR センサによって 3 次元地図を作成し，それをもとに地平線と DEM とを比較することで位置推定をおこなう，Multi-frame Odometry-compensated Global Alignment（MOGA）[31] と呼ばれる手法も提案されている。この手法は，13 m の解像度で 40 m の精度が得られ，ある条件では VIPER と比較して高精度な位置推定が可能であることが示されている。ただし，光学カメラとは別に LIDAR のセンサを搭載しなければならないこと

は，重量などが厳しく制限される探査ローバにおいては小さくない負担である。また，この手法でも誤差が約 100 m におよぶケースもあり，探査ローバがミッションを遂行する過程においては位置推定精度が高い領域を選択して走行することはやはり必要であると考えられる。

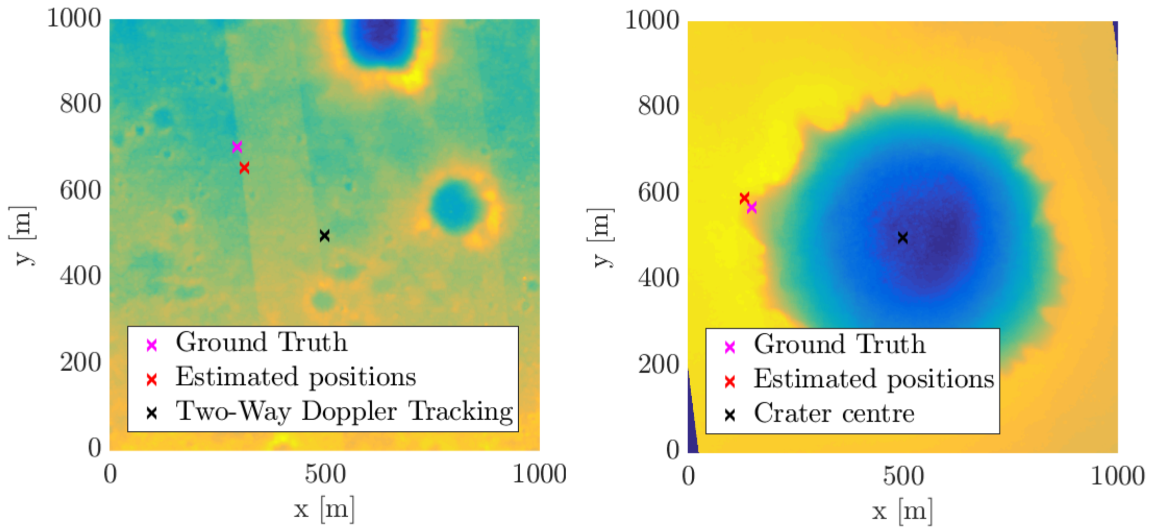

図 2.4: Localization simulation done in previous work.

第 3 章

位置推定精度を考慮した経路計画

本章では，本研究において提案する経路計画手法について具体的に述べる。また，従来手法として想定する経路計画手法についても述べ，両者の違いを明確化する。

3.1 提案する経路計画手法の目的

本研究では，月惑星探査ローバがスカイラインマッチングに基づいて自己位置推定をおこない，その推定結果に基づいて経路を辿ると仮定した上で，ローバが辿りやすい経路を計画することを目的とする。計画する経路は，数 m から数十 m 程度の局地的なものではなく，数 km の長さを持つ大域的なものを想定し，実際のミッションレベルでの探査ローバの正確な移動を補助する経路を求める。

ローバが経路を正確に追従するためには，当然ながら自己位置推定を正確におこなうことが求められる。したがって，スカイラインマッチングによる自己位置推定をおこないやすい経路が，辿りやすい経路であると言い換えることができる。そのような経路を求めることのできる経路計画手法を検討するため，スカイラインマッチングによる位置推定の難易度を表す指標について，次項で定義する。

3.2 位置推定の難易度の決定要素

前項で述べたとおり，スカイラインマッチングによる自己位置推定は，DEM から計算される予想スカイラインとパノラマカメラによって撮影された写真から抽出される観測スカイラインとを比較することでおこなわれている。予想スカイラインと観測スカイラインとは，次に示す e^2 の大きさによって比較される。

$$e^2(\boldsymbol{p}) = \sum_j (m_j - s_j(\boldsymbol{p}))^{\mathrm{T}}(m_j - s_j(\boldsymbol{p})) \tag{3.1}$$

ローバの現在地の候補地点に応じての中で，その地点からの予想スカイラインによって e^2 が

最も小さくなる地点が，現在位置として推定されるのであった。

このとき，ローバの実際の現在地の周辺において，予想スカイライン $s(\boldsymbol{p})$ が複数の候補地点において似通っている（すなわち，$\boldsymbol{p}$ を変化させても $s_j(\boldsymbol{p})$ の変化が小さい）場合，ローバの位置を正しく推定することが難しいと考えられる。異なる位置 $\boldsymbol{p}$ においても e^2 が小さくなってしまい，誤推定が起こる可能性が生じるためである。

したがって，スカイラインマッチングによる自己位置推定が容易であるような経路とは，ローバの移動に応じてスカイラインが大きく変化するような経路であると言える。経路全体を通じてスカイラインの変化量が大きくなるように経路を設計すれば，経路上の各所でスカイラインマッチングによる位置推定の精度を向上することができるはずである。

そこで本研究では，スカイラインの変化量を議論するため，スカイラインの差異の大きさを表す計量 D を定義することとする。スカイラインマッチングにおける観測スカイラインと予想スカイラインの比較は，式 3.1 によっておこなわれるため，これを参考に，次のように導入する（図 3.1）。ある地点 $\boldsymbol{p}$ と $\boldsymbol{p}'$ との間において，D の値が大きいほど，$\boldsymbol{p}$ と $\boldsymbol{p}'$ を誤推定する可能性が小さくなると考えられる。

$$D = \sum_{j=0}^{359} \left(s_j(\boldsymbol{p}) - s'_j(\boldsymbol{p}') \right)^2 \tag{3.2}$$

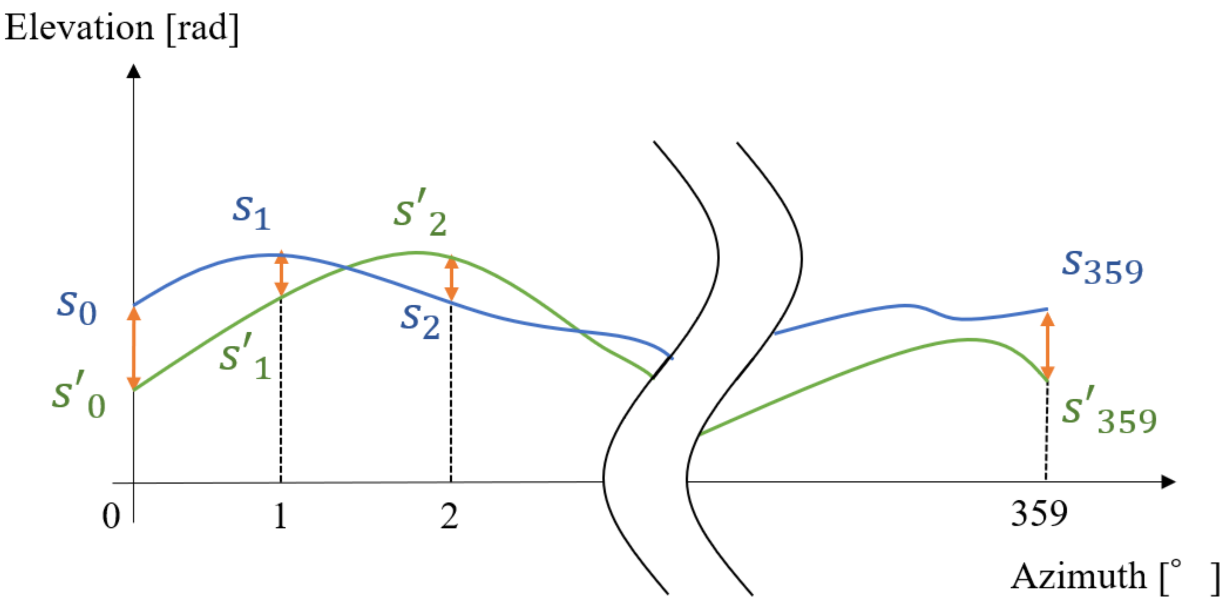

図 3.1: Difference of skylines.

3.3　最適化手法

本研究では，経路の最適化手法としてダイクストラ法 [32] を用いる。

月惑星探査ローバの経路計画においては，他に Rapidly exploring Random Tree（RRT）を用いた研究 [33][34] や，遺伝的アルゴリズムを用いた研究 [7] なども存在する。しかし，本研究では Digital Elevation Model によって表現された地形データを使用し，予想スカイラインの導出やスカイラインマッチングによる自己位置推定をおこなうため，ラスターデータの取り扱いに適したグラフ探索アルゴリズムを用いることとし，最も一般的な手法の 1 つであるダイクストラ法を選択した。

ダイクストラ法は，最短経路問題を解く際に広く用いられるアルゴリズムである。出発点から目的地までがいくつかのノードと非負のコストを持ったエッジで構成されたグラフによって繋がっているとき，エッジのコストが最小となるような経路を求めることができる [32][35]。

グラフ探索のアルゴリズムとしては，ダイクストラ法の改良である A*アルゴリズム [36] や，さらにそれの改良である D*アルゴリズム [37] などが他に存在する。A*アルゴリズムは，ダイクストラ法の一般化と呼べるものであり，現在の探索ノードからゴールまでのコストの推定値を導入するによってより効率的な探索が可能になっている。また，D*アルゴリズムは，エッジのコストが動的に変化する場合に対応した手法である。本研究において焦点を当てる位置推定の容易さは静的な要素であるため，ダイクストラ法と A*アルゴリズムを検討したが，より基本的な手法であるダイクストラ法を採用することとした。本研究で提案する経路計画手法は，ダイクストラ法以外のグラフ探索アルゴリズムに対しても適用することができる。

ダイクストラ法の概要を図 3.2 に示す。現在の探索ノード (A) と隣り合うノード (B, C, D) のうち，最もエッジのコストが小さいノードを探す (B)。すると，A から B へ移動する際の最小コストが確定できる。移動先の B と隣り合うノード (C, E) のうち，先ほど A から移動しなかったノード (C) へ繋がるエッジが存在する場合，A → B と B → C の合計コストと A → C のコストとで小さいほうを A から C へ移動する際の最小コストとして確定する。この手順を出発地から始めて繰り返し，各ノードへ至るための最小コストを順次確定させていくことで，出発地から目的地へのコストが最小となる経路を決定する。

ダイクストラ法を用いるため，DEM を元に無向グラフを作成する。DEM 上の各点をそのままノードとし，各ノードには DEM 上での標高情報を与える。また，各ノードの位置関係を保って格子状にエッジによって接続し，グラフとして扱うことができるようにした（図 3.3)。グラフ上の各エッジに，次項から述べる評価関数に基づいてコストを与え，それを用いてダイクストラ法による経路計画を実施する。

3.4 従来手法の評価関数

従来の経路計画では，出発地から目的地へ至るまでの距離や時間とローバの安定性を考慮して評価関数が設定され，エッジのコストとして与えられることが多い。

本研究では，経路計画の従来手法として，ノード間の距離と傾斜角を考慮したものを想定することとする。

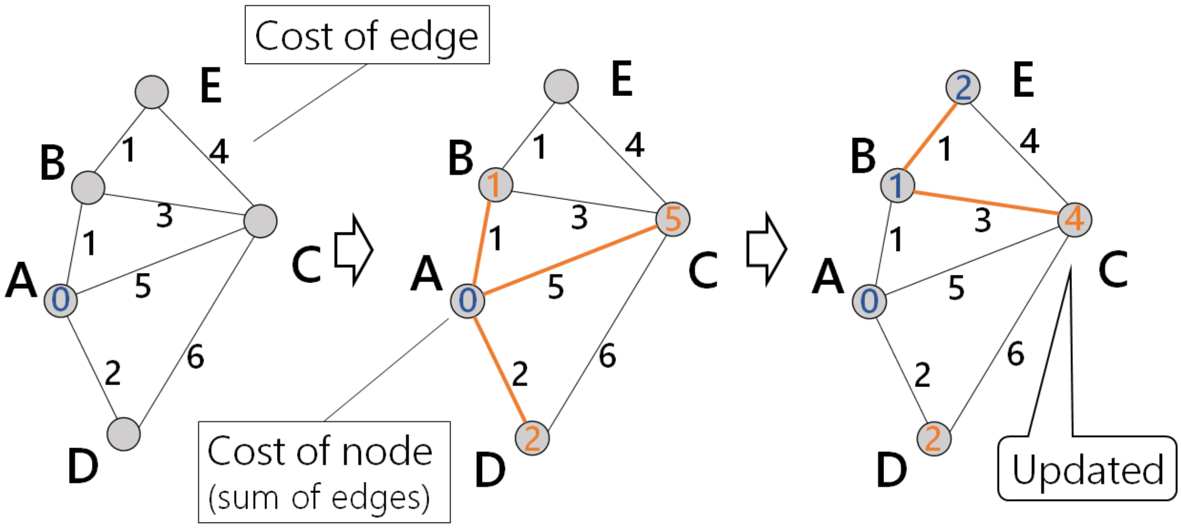

図 3.2: Dijkstra algorithm.

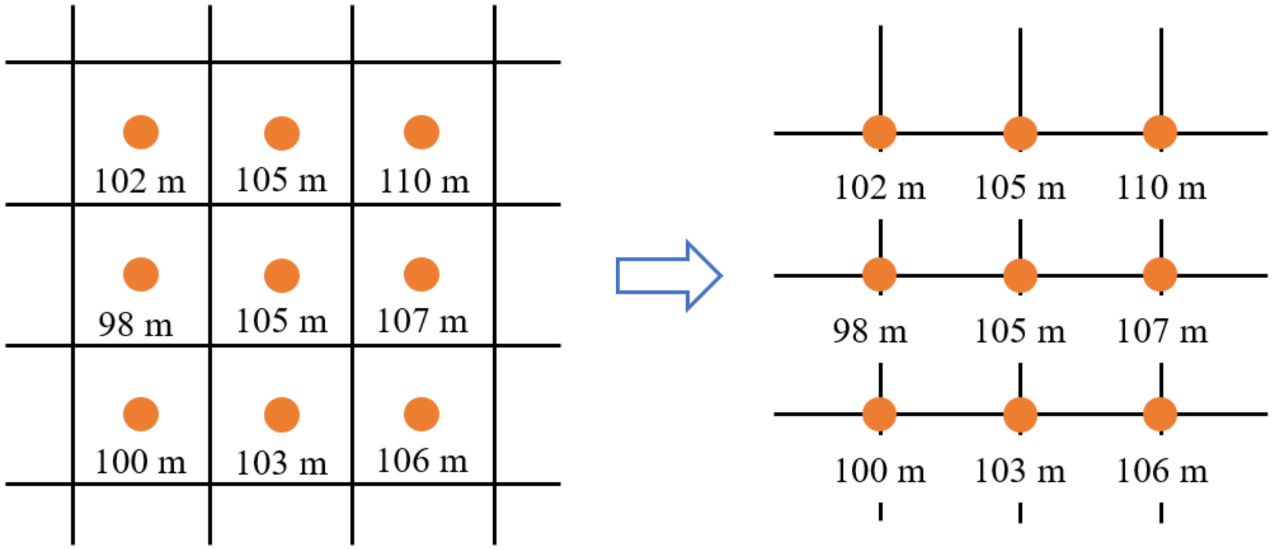

図 3.3: Making graph based on DEM.

まず，ノード n_i，n_j 間の距離 L_{ij} を，

$$
\begin{aligned}
L_{ij} &= |n_i - n_j| \\
&= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}
\end{aligned}
\tag{3.3}
$$

と定義する。

また，隣り合うノードへ進むときの傾斜角度 α_{ij} を，

$$
\alpha_{ij} = arctan\left(\frac{z_j - z_i}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}\right) \tag{3.4}
$$

と定義する。

これらを用いて，ノード間の評価関数 $C(n_i, n_j)$ を以下のように設定する。

$$C_{con}(n_i, n_j) = W_L \frac{L_{ij}}{N_L} + W_\alpha \frac{\alpha_{ij}}{N_\alpha} \tag{3.5}$$

ここで，W_L, W_α はそれぞれ L_{ij}, α_{ij} の重みであり，N_L, N_α はそれぞれの指標を規格化する係数である。また，ローバの走行可能な最大傾斜角度は 15° とし，α_{ij} がこれを超えた場合は W_α を無限大とする。本研究においては，重み付けの係数 W_L, W_α はいずれも 0.5 とした。N_L はノード間の距離の最大値である，DEM の解像度の $\sqrt{2}$ 倍とし，N_α は走行可能な最大の傾斜角である 15° とした。これを用いて，経路全体の評価関数は，

$$\begin{aligned} C_{con}(path) &= \sum_{path} C_{con}(n_i, n_j) \\ &= \sum_{path} \left(W_L \frac{L_{ij}}{N_L} + W_\alpha \frac{\alpha_{ij}}{N_\alpha} \right) \end{aligned} \tag{3.6}$$

となる。

3.5 提案手法の評価関数

3.2. で述べたとおり，スカイラインマッチングによる位置推定を容易にするためには，経路全体を通じたスカイラインの変化量 D を大きくする必要がある。これを考慮に入れて経路計画をおこなうため，ダイクストラ法において各エッジに与えられる評価関数に，各エッジ両端のノード間のスカイラインの変化量 D_{ij} を導入する。

あるエッジによって結ばれた 2 つのノード n_i，n_j 間におけるスカイラインの変化量を表す計量を，

$$D_{ij} = \sum_{k=0}^{359} (s_{i_k}(x_i, y_i) - s_{j_k}(x_j, y_j))^2 \tag{3.7}$$

と表し，これを用いて，新たに評価関数を以下のように設定する。

$$C_{pro}(n_i, n_j) = W_L \frac{L_{ij}}{N_L} + W_\alpha \frac{\alpha_{ij}}{N_\alpha} + W_D \frac{\frac{1}{D_{ij}} \frac{L_{ij}}{N_{ij}}}{N_D} \tag{3.8}$$

距離 L_{ij} および傾斜角 α_{ij} は最小化が求められるのに対し，スカイラインの変化量 D_{ij} は最大化する必要があるため，$(D_{ij})^{-1}$ を従来手法の評価関数に加えた。D_{ij} を L_{ij} を割っているのは，スカイラインの変化量を距離あたりの値で扱うためである。L_{ij} はすなわちエッジの長さであり，本研究で扱っているグラフは DEM を元にしているため格子状であるから，実際には，

$$\frac{L_{ij}}{N_{ij}} = \begin{cases} 1 & (p_{i_x} = p_{j_x} \cup p_{i_y} = p_{j_y}) \\ \sqrt{2} & (otherwise) \end{cases} \tag{3.9}$$

となる。

また，前節と同様に，W_D は D_{ij} の重み，N_D は規格化の係数である。また同様に，経路全体の評価関数は，

$$C_{pro}(path) = \sum_{path} C_{pro}(n_i, n_j) = \sum_{path} \left(W_L \frac{L_{ij}}{N_L} + W_\alpha \frac{\alpha_{ij}}{N_\alpha} + W_D \frac{\frac{1}{D_{ij}} \frac{L_{ij}}{N_{ij}}}{N_D} \right) \tag{3.10}$$

となる。本研究では，提案した位置推定精度に関する要素の導入効果を特に確認するため，$W_L = 0.1, W_\alpha = 0.1$，$W_D = 0.8$ と設定した。規格化係数 N_D の値については，位置推定をおこなうために必要となる最小のスカイラインの差異として設定し，以下のように求めた。

$$N_D = (\epsilon \times 2)^2 \times 360 \tag{3.11}$$

ϵ は，パノラマ画像の解像度などに基づく，スカイライン抽出の誤差として想定される値である。すなわち，想定される誤差を考慮したうえで，正確にスカイラインマッチングによる位置推定をすることができると考えられる D_{ij} の値を，許容されるスカイラインの変化量の最小値として設定し，それを N_D とした。ただし，この N_D および重み付け係数 W の大きさを調整することで，走行距離・傾斜角・位置推定精度のそれぞれをどの程度重要視するかを変更することができる。

次章以降のシミュレーションでは，後述する誤差の値を用いて，$N_D = 0.5$ とした。

上記の評価関数を用いて，ダイクストラ法により DEM 上で最適経路を求める手法を，スカイラインマッチングによる自己位置推定の精度を考慮した経路計画手法として提案する。

第 4 章

仮想地形におけるシミュレーション

本章では，前章で提案した経路計画手法の効果を確認することを目的に，シミュレーションをおこなう。提案手法による経路計画の有効性を検証するため，簡単な仮想地形を作成し，従来手法と提案手法に基づいて実際に経路計画を実施した。その後，計画された経路をローバに追従させることを想定し，経路を追従する過程での位置推定誤差を計算するシミュレーションをおこなった。

4.1 仮想地形の作成

簡単な仮想地形として，平坦な地面にクレータと丘陵を持つ地形を考える。模擬的なクレータと丘陵の作成方法を以下に記す。

4.1.1 クレータ

クレータの作成には，定式化された月面クレータの形状モデル [38] を用いた。半径 r_1 のクレータは，中心からの距離を r，高さを $h(r)$ として，以下のように表すことができる。各定数については表 4.1 に示す。

この形状モデルは，落ち窪んだ中央部，それを囲む盛り上がった縁部，高さが緩やかに 0 へ下がっていく周辺部によって構成されている。

$$
\begin{cases}
\text{中央部（}0 \leq r < r_0\text{）} \\
\dfrac{h(r)}{r_1} = \dfrac{h_0}{r_1}\left(\dfrac{r}{r_1}\dfrac{r_1}{r_0}\right)^{\alpha} - \dfrac{h_0}{r_1} \\
\text{縁部（}r_0 \leq r < r_2\text{）} \\
\dfrac{h(r)}{r_1} = a_1\left(\dfrac{r}{r_1} - 1\right)^{3} + a_2\left(\dfrac{r}{r_1} - 1\right)^{2} + \dfrac{h_1}{r_1} \\
\text{周辺部（}r_2 \leq r\text{）} \\
\dfrac{h(r)}{r_1} = \dfrac{h_1}{r_1}\left(\dfrac{r}{r_1} - a_3\right)^{\beta}
\end{cases}
\tag{4.1}
$$

表 4.1: Constants of the model of shape of craters

r_0	$0.844r_1$	Radius of recess
r_2	$1.054r_1$	Radius to edge
h_0	$0.367r_1$	Depth of crater
h_1	$0.038r_1$	Height of edge
a_1	3.13	
a_2	-1.09	
a_3	0.0255	
α	1.31	
β	2.6	

4.1.2　丘陵

仮想丘陵の作成には，CG でのランダムな地形の作成などに用いられる，パーリンノイズ [39][40] を参考にした。パーリンノイズは，境界面でなだらかに 0 になるような関数を使用し，これらを格子上でランダムに足し合わせることで作成され，この特徴によって，なだらかに変化し，周期的でないようなノイズが実現されている。特に改良パーリンノイズ [40] では，この関数として，

$$C(t) = 1 - (6|t^5| - 15t^4 + 10|t^3|) \tag{4.2}$$

が用いられている（図 4.1)。境界面でなだらかに 0 になるという性質に着目し，この関数を用いて丘陵地形を作成した。

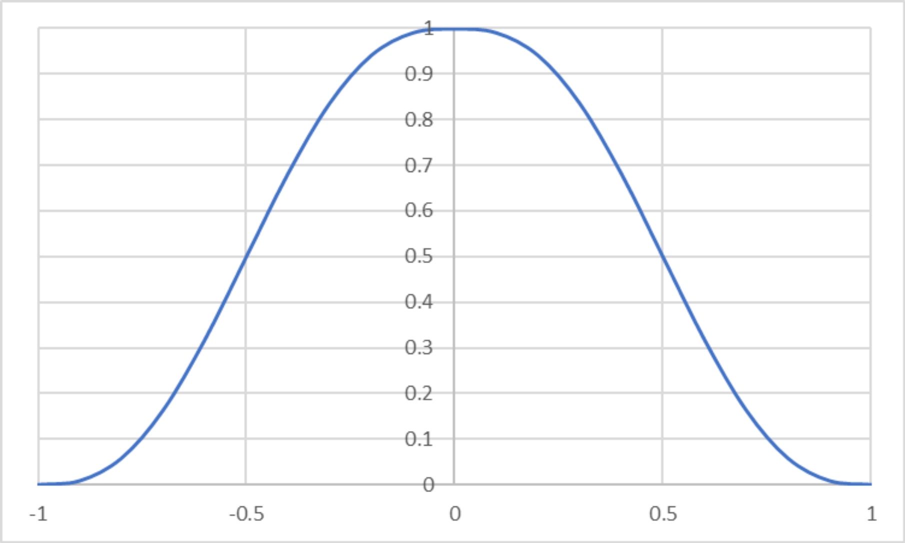

図 4.1: Fifth order function used in Perlin noise.

4.1.3 作成した仮想地形

上記のクレータと丘陵の作成方法を元に，半径 400 m のクレータ 1 つと半径 200 m 丘陵 3 つを持つ仮想地形を，図 4.2 の通り作成した。解像度は 10 m/pixel とした。また，この地形は仮に月面上の地形として考え，半径や地平線までの距離は月面と同等としている。

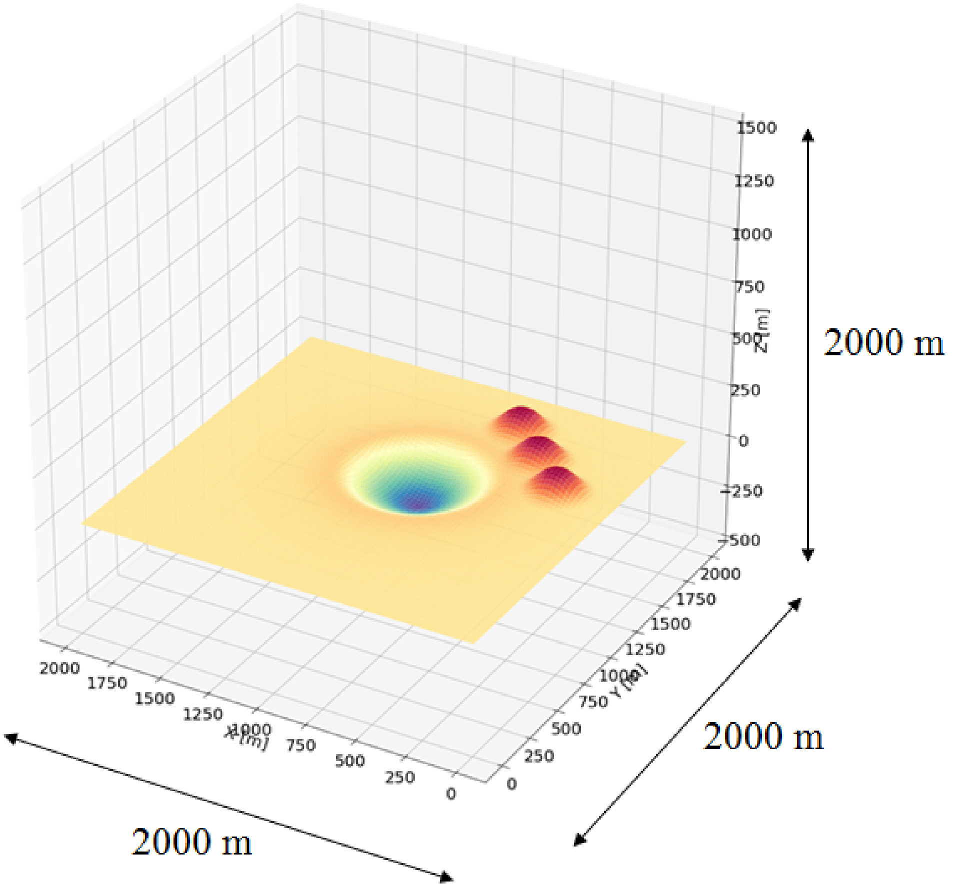

図 4.2: Virtual terrain.

4.2 経路計画シミュレーション

前項で作成した仮想地形において，従来手法と提案手法を用いて経路計画をおこなった。得られた 2 つの経路を図 4.3 に示す。

経路長は，従来手法経路が 1899 m，提案手法経路が 2592 m となった。従来手法経路ではクレータの左側を通過しているのに対し，提案手法経路はクレータと丘陵の間を通過していることがわかる。

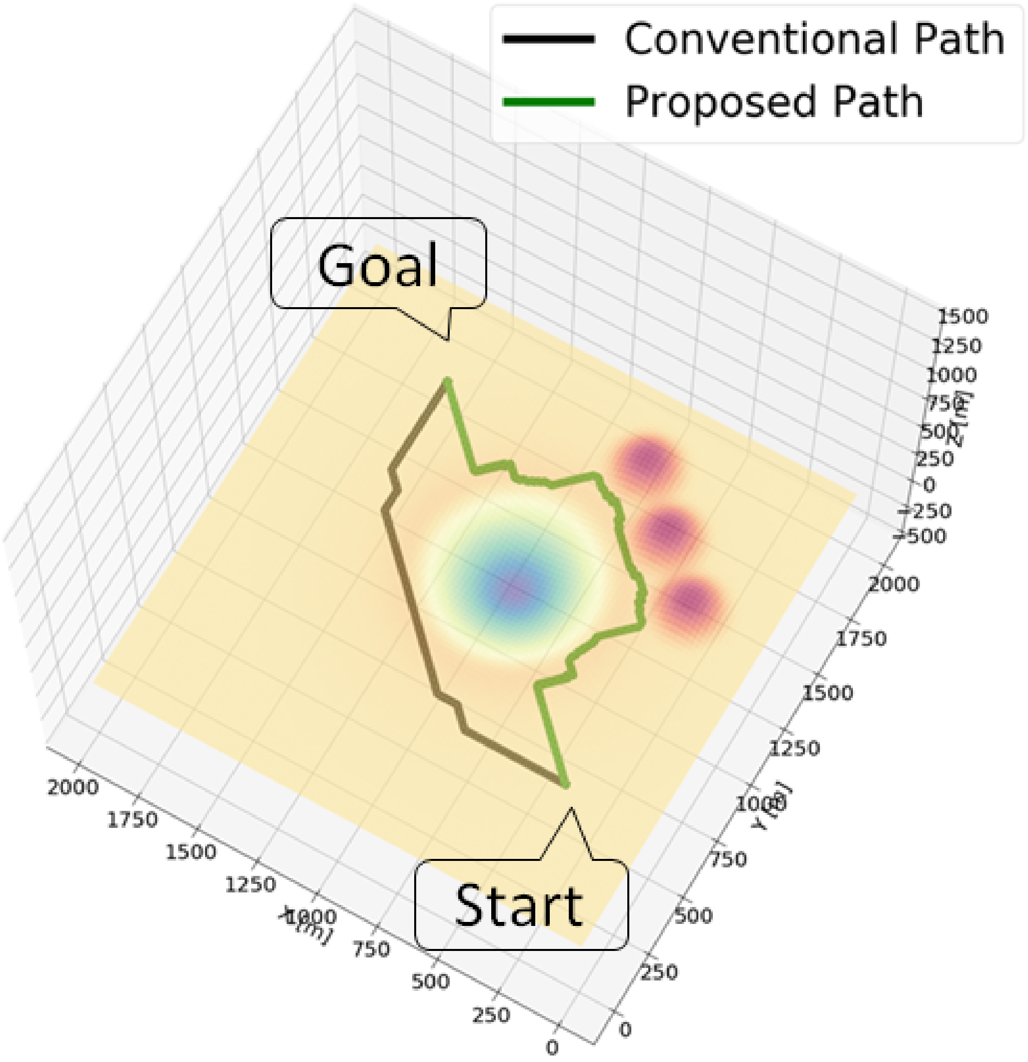

図 4.3: 2 paths on virtual terrain.

4.3　経路追従シミュレーション

4.3.1　模擬観測スカイラインの作成

第 3 章で述べたとおり，スカイラインマッチングによる自己位置推定においては，DEM から計算される予想スカイラインと，ローバに搭載されたパノラマカメラによって撮影された画像から得られる観測スカイラインの両方が必要となる。しかし，火星や月の任意の地点において，観測スカイラインを得ることは現状不可能である。そこで，位置推定をおこなう各地点において，観測スカイラインを模擬した。

ローバの現在位置における予想スカイラインを DEM から求め，そこにノイズを付加することで模擬観測スカイラインとした。ノイズは，

- 方位角

- パノラマ画像の解像度
- その他の外環境

に基づくものを，それぞれ正規分布に従うと仮定して予想スカイラインへ加えた。方位角については，方位角に推定誤差が生じることでスカイラインが方位角方向にずれると想定し，他 2 種類の誤差に関しては単純にスカイラインへの仰角へノイズを加えた。各ノイズの正規分布の標準偏差の大きさを，表 4.2 にまとめた。また，ノイズを付与した模擬観測スカイラインの一例を，図 4.4 に示す（後述する火星表面の DEM を使用）。

表 4.2: Standard deviations of noises for simulated skylines.

Type of noise	σ
Azimuth angle	10 [°]
Resolution of pictures	0.01 [rad]
Other environment	0.5 [°]

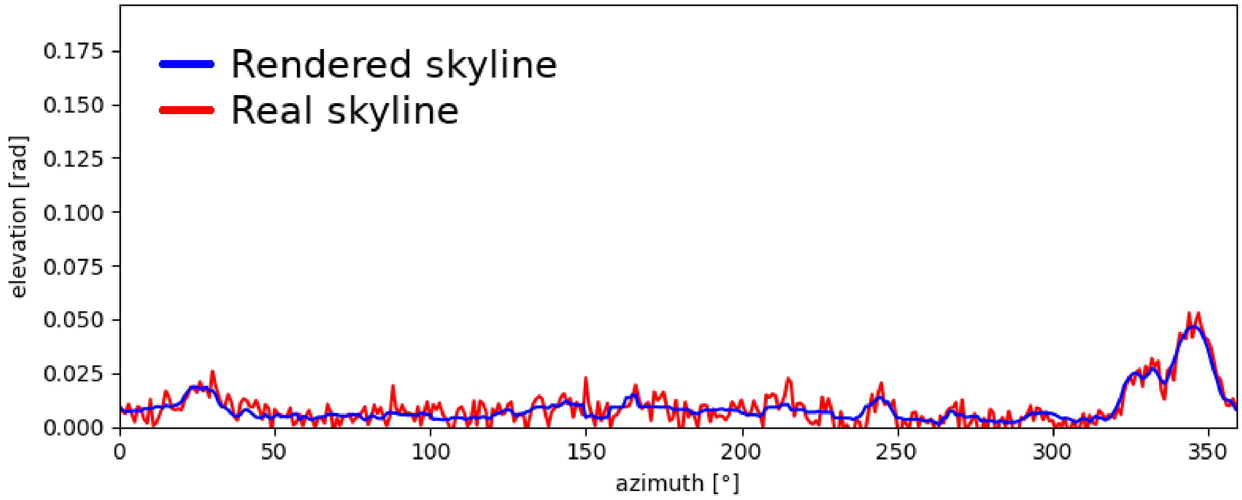

図 4.4: Simulated real skyline.

4.3.2 ローバの走行条件

経路追従のシミュレーションをおこなうにあたり，生成された経路を複数の区間に分割する。各区間において，ローバは経路に応じてノード間を移動する。このとき，ローバの進行する距離と方位角に，正規分布に従う誤差が生じると仮定し，最終的に到達する位置を計算する。ここで，距離と方位角に与える誤差の標準偏差を，表 4.3 に示す。表 4.2 および表 4.3 に示した各誤差の大きさは，先行研究を参考にやや大きめに設定した。方位角および距離の誤差は，ビジュアルオドメトリおよび自己位置推定に関する研究 [41] を，パノラマ画像の解像度に基づく

誤差はスカイラインマッチングに関する研究 [26] を基に定めた。

区間 1 つ分の移動が終了後，スカイラインマッチングに基づく自己位置推定をおこない，推定位置と経路上の目標位置との差分だけローバを移動させ，位置を修正するように走らせる（このように位置を修正した後のローバの存在位置を，到達位置と呼ぶ）。これを全ての区間で繰り返した。シミュレーションの概要を図 4.5 に示す。

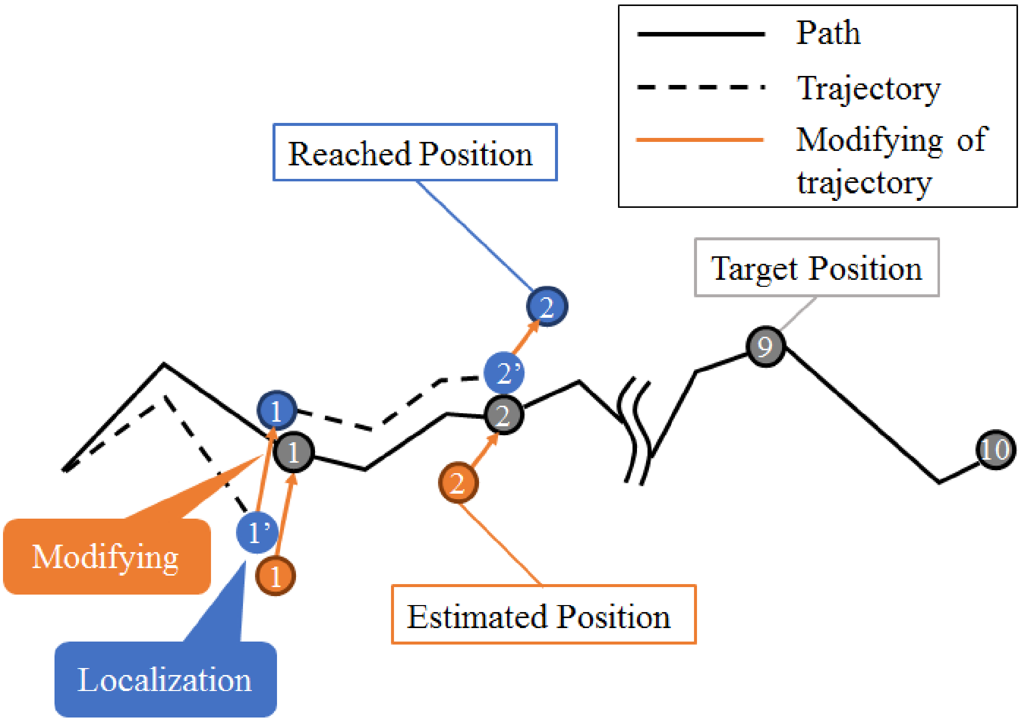

図 4.5: Outline of the simulation.

表 4.3: Standard deviations of noises for moving of rover

Type of noise	σ
Azimuth angle	10 [°]
Distance	0.3(30%)

各区間の終点において，スカイラインマッチングによって推定された位置と，ローバが実際に存在する現在位置との差を，位置推定誤差として定義・計算し，従来手法・提案手法によって計画された経路における位置推定の容易性を比較した（図 4.6）。

以上のシミュレーションを，各ケース各経路について 10,000 回ずつ実施し，位置推定誤差の平均および分散を求め，位置推定および経路追従の容易性の指標として用いた。また，経路上での目標位置（各区間の終点）の周囲半径 30 m の範囲を各区間のゴール領域とし，到達位置がゴール領域内に入る確率をゴール到達率として求めた。

また，区間の分割方法については，下記の 2 つの条件を考える。

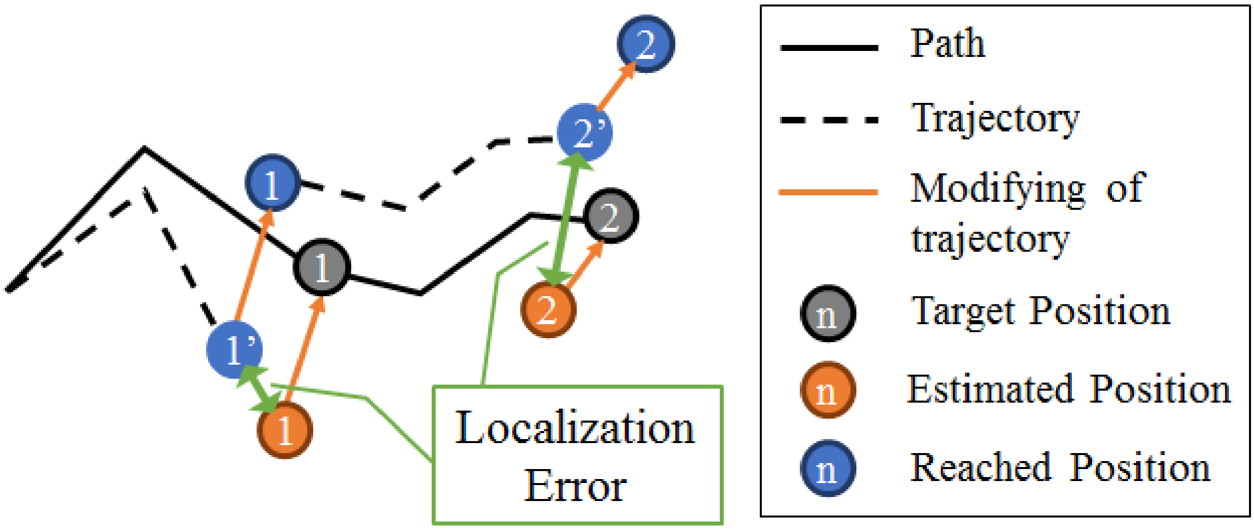

図 4.6: Localization Error and Following Error.

- 条件 1：等区間数分割
  各経路をそれぞれ 10 個の区間に分割する。経路内では区間ごとの距離は等しいが，従来手法経路と提案手法経路とでは区間ごとの距離が異なる。
- 条件 2：等距離分割
  各経路を，約 200 m ずつの区間に分割する。従来手法経路と提案手法経路とでは，区間の数が異なる。

経路の分割方法以外の条件は基本的に同一であるが，スカイラインマッチングによる位置推定をおこなう際の，候補地点の数のみが異なる。条件 1 では，目標地点を中心とする一辺 60 m の正方形内に含まれるノードが候補地点であり，条件 2 は，目標地点を中心とする一辺 10 ノードの正方形内を候補地点としている。

上記の条件に基づき，経路追従のシミュレーションを実施した。

4.3.3 シミュレーション結果

条件 1：等区間数分割

仮想地形上での，従来手法経路と提案手法経路における位置推定誤差の平均値を図 4.7 に示す。経路全体を通じて，提案手法経路を辿る場合のほうが，位置推定誤差が小さくなっていることがわかる。特に経路の中盤において顕著に精度が改善されており，図 4.3 に示した経路の通り，クレータと 3 つの丘の間を通過していることが有効に働いていると考えられる。図 4.8 に示す分散も，やはり提案手法による経路のほうが小さくなっている。

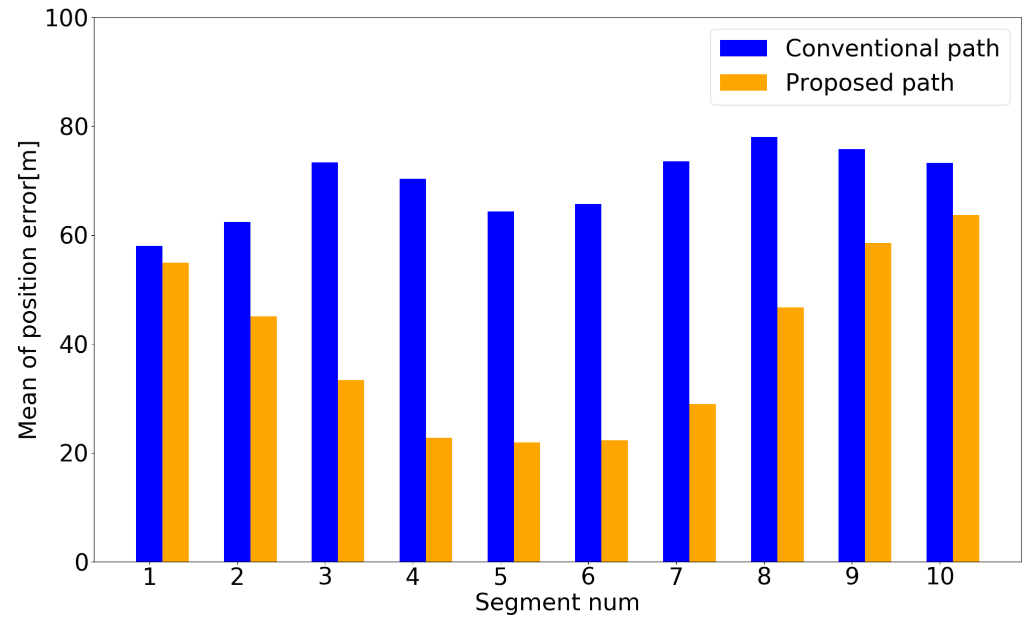

図 4.7: Mean of error of the localization on the virtual terrain (condition 1).

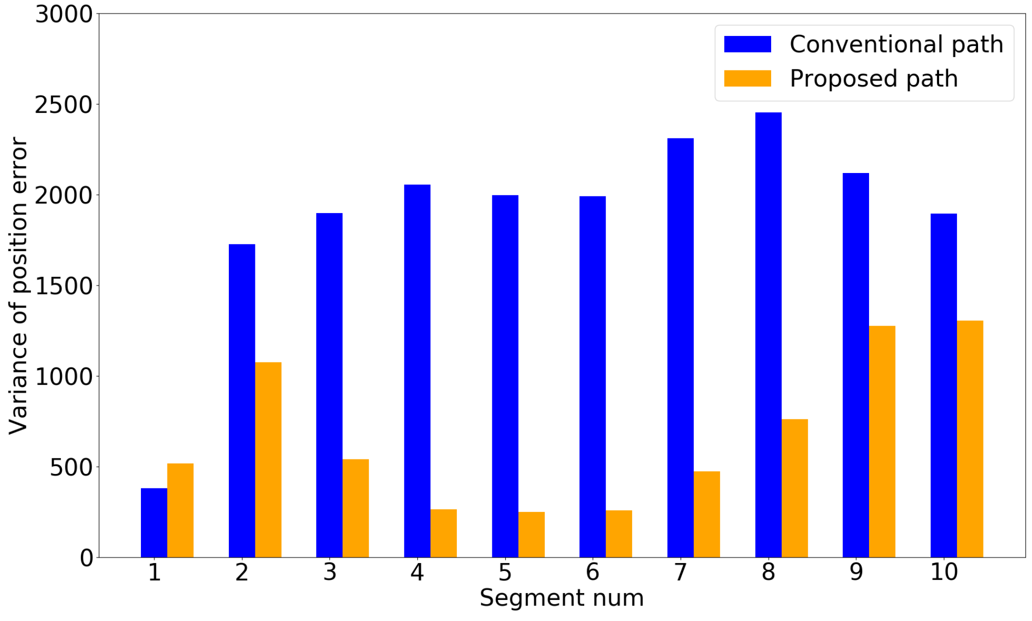

図 4.8: Variance of error of the localization on the virtual terrain (condition 1).

また，図 4.9 にゴール到達率を示した。位置推定誤差と同様に，特に経路の中盤に当たる経路 3～8 で顕著に到達率が向上している。図 4.10，図 4.11 に示す到達位置の散布図でも，同じ傾向が現れている。丘陵地とクレータに挟まれた領域で，到達位置が目標位置の付近に集中していることが特徴的である。一方，最終的な経路の終点への到達率は，いずれの経路においても 10～20% 程度と低くなっているが，やはり提案手法経路では従来手法経路の場合と比較してやや到達率が高くなっている。

図 4.10，図 4.11 内の黒い楕円は，到達位置の 95% 信頼楕円である。すなわち，スタート地点を出発したローバの 95% はこの楕円内に到達するということになる。従来手法経路と比較して提案手法経路を辿った場合のほうが全体的に楕円領域が小さくなっており，目標位置に対してより精度良く誘導することに成功していると言える。

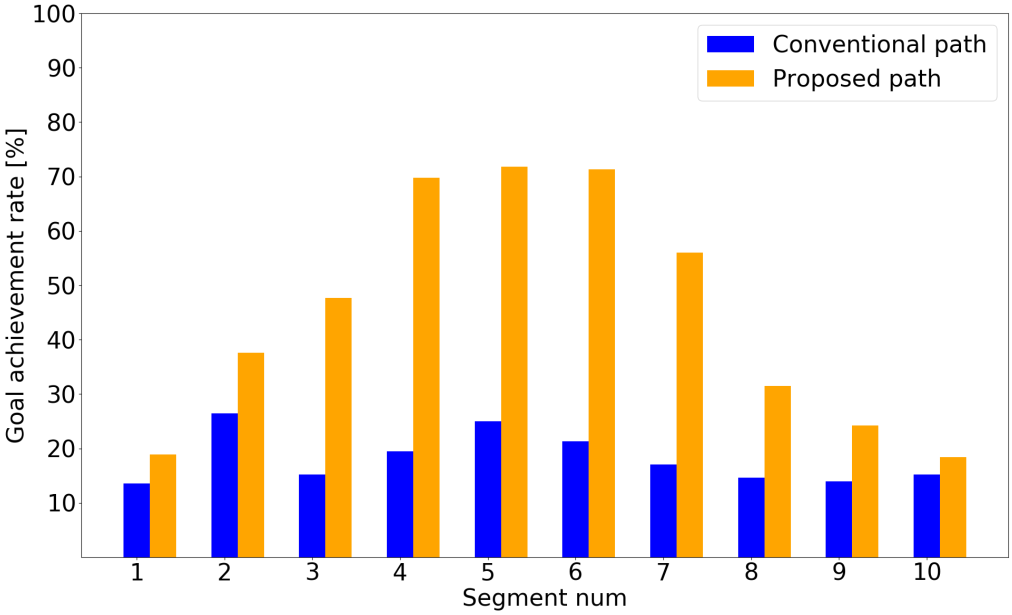

図 4.9: Goal reach rate on the virtual terrain (condition 1).

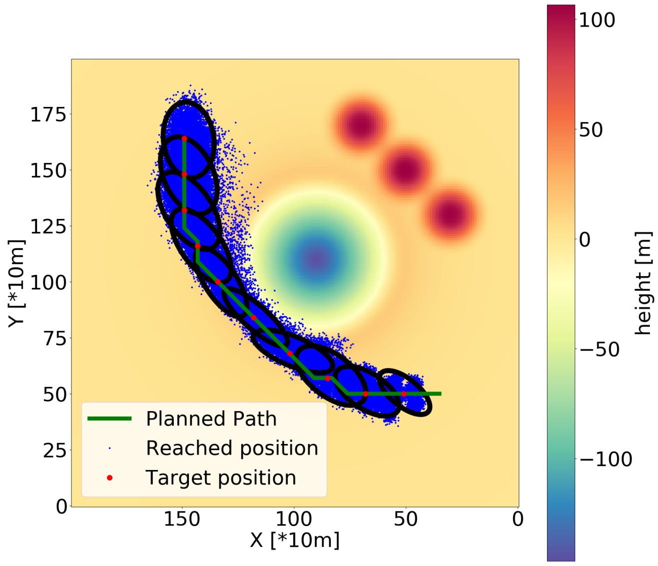

図 4.10: Reached position on the conventional path on the virtual terrain (condition 1).

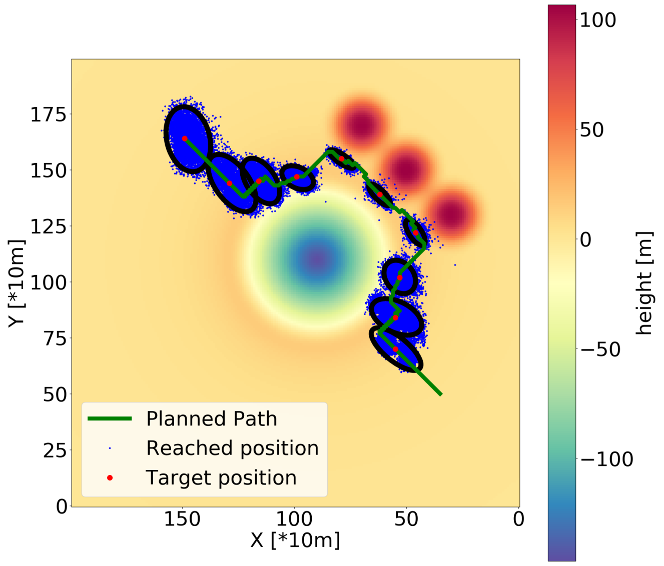

図 4.11: Reached position on the proposed path on the virtual terrain (condition 1).

さらに，図 4.12，図 4.13 に，各区間を通じてのスカイラインの変化量の合計を示した。スカイラインの変化量は，第 3 章で述べたとおり，スカイラインマッチングによる位置推定の難易度を決定する要素として，本研究で仮定しているものである。

図 4.12 は，経路を正確に辿ったと仮定した場合の，ローバから観測されるスカイラインの変化量を表している。区間 5，6 を中心とした釣鐘型に近い形になっており，図 4.7，図 4.9 に見られる位置推定誤差の小さくなる領域およびゴール到達率が高くなる領域と，スカイラインの変化量の大きくなる領域が一致していることが見てとれる。このことから，「スカイラインの変化量が大きいほど位置推定が容易である」という本研究における仮定は妥当であると考えられる。

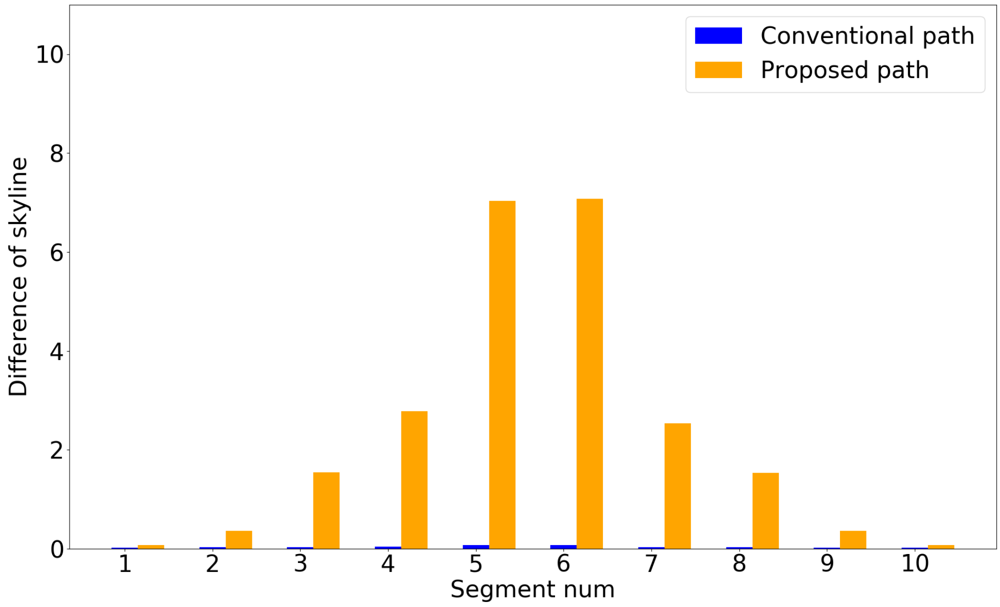

図 4.12: Sum of the difference of skyline in paths on the virtual terrain (condition 1).

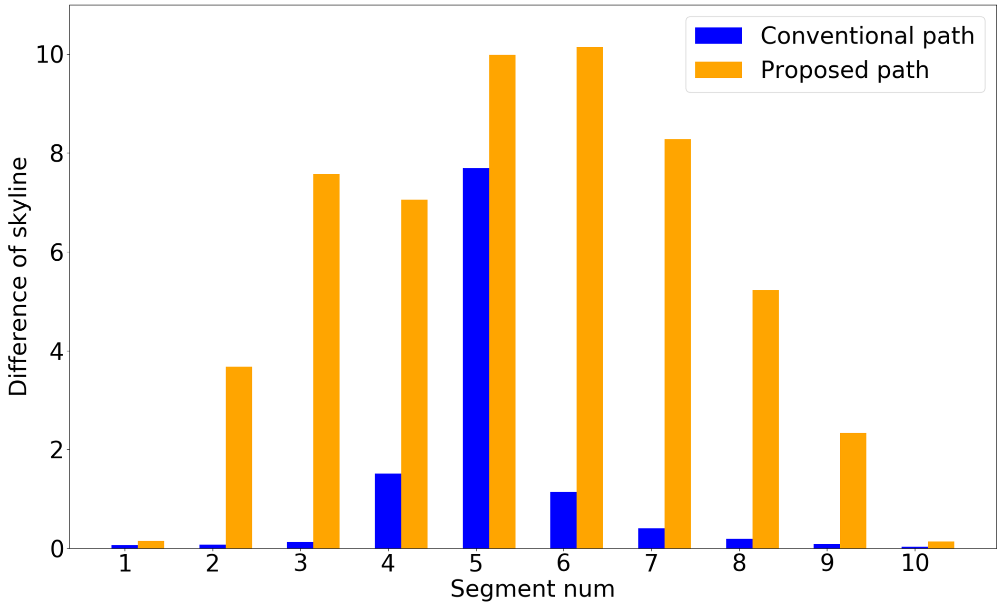

図 4.13: Sum of the difference of skyline in trajectories on the virtual terrain (condition 1).

また，提案手法によって経路上から観測されるスカイラインに変化が生じていることを確認するため，位置推定をおこなう位置から見えるスカイラインとその位置を求めた。

図 4.14，図 4.15 に，従来手法経路上の各区間の終点から観測されるスカイラインを示した。一方，図 4.16，図 4.17 は，提案手法経路上から見えるスカイラインである。

両者を比較すると，区間 3〜7 において，右側に示されている観測されるスカイラインの形が大きく異なっていることが見て取れる。この区間において，スカイラインとして観測されている地形の位置（図の左側）を比較すると，概して提案手法経路の場合のほうが，より近くの地形がスカイラインとして観測されていると言える。提案手法では，特徴的な地形の近傍を通過することで，スカイラインが大きく変化する経路が計画されており，それによって位置推定および経路追従の精度が向上したと考えられる。

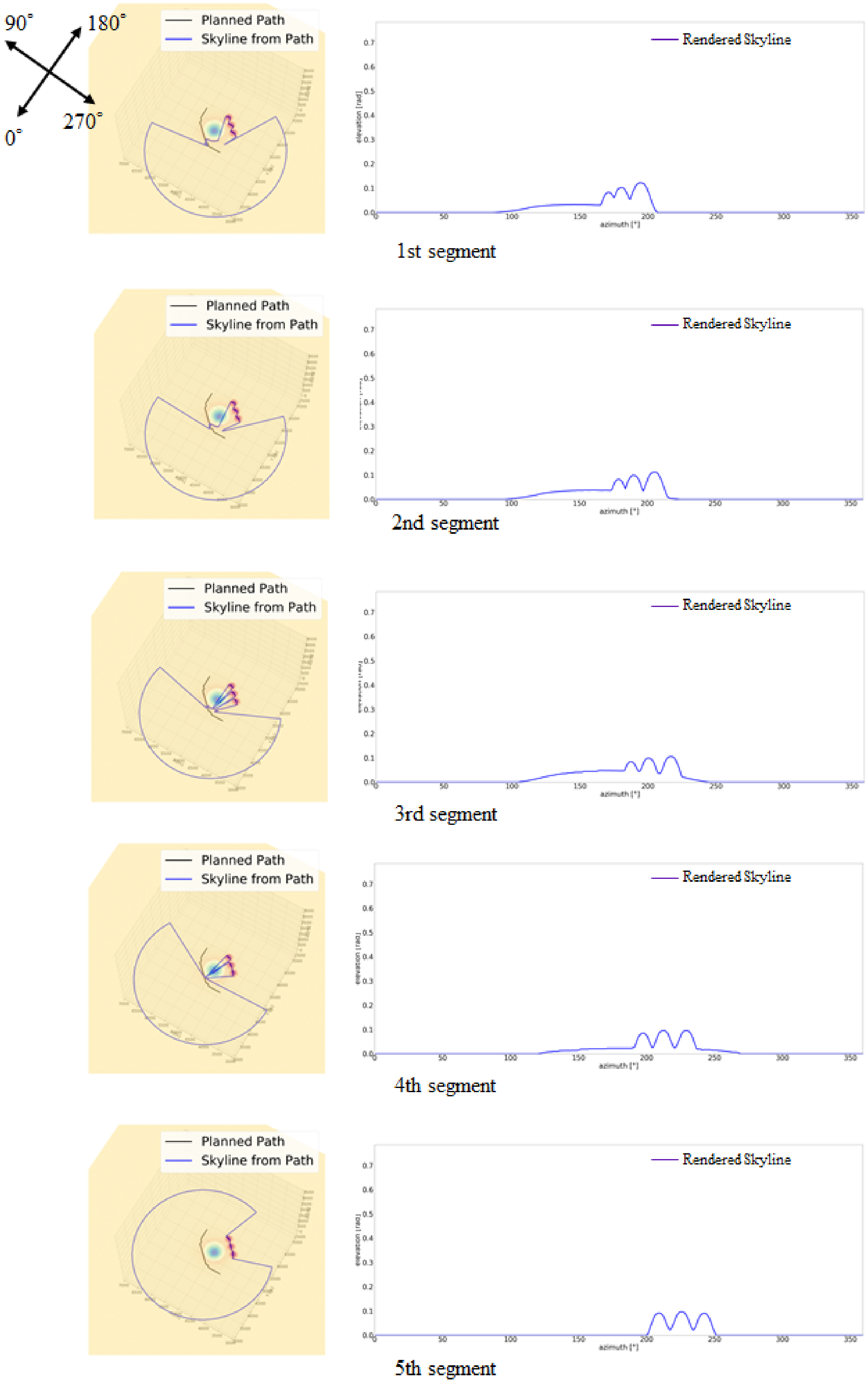

図 4.14: Skylines from the conventional path on the virtual terrain (condition 1) (segment 1-5).

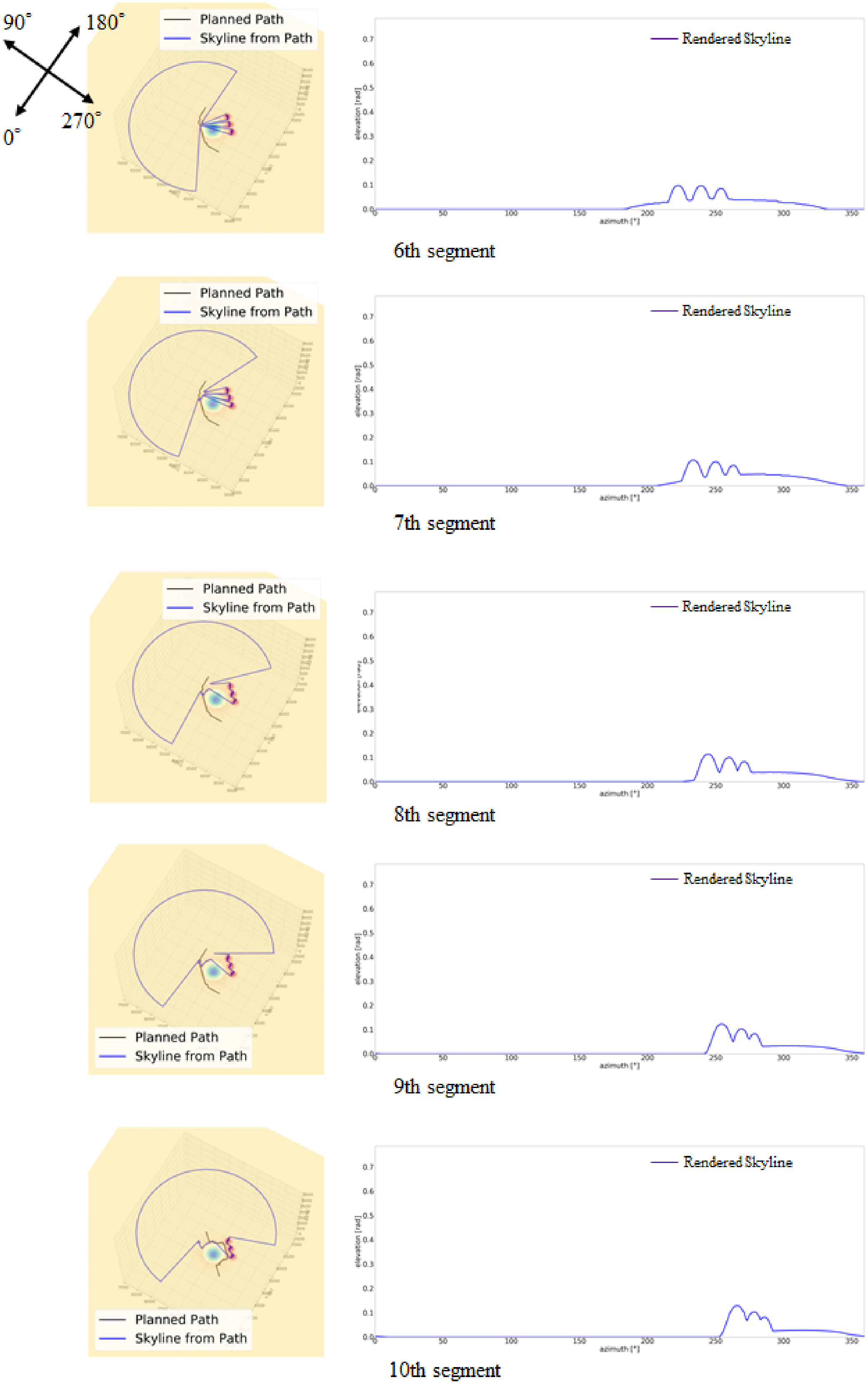

図 4.15: Skylines from the conventional path on the virtual terrain (condition 1) (segment 6-10).

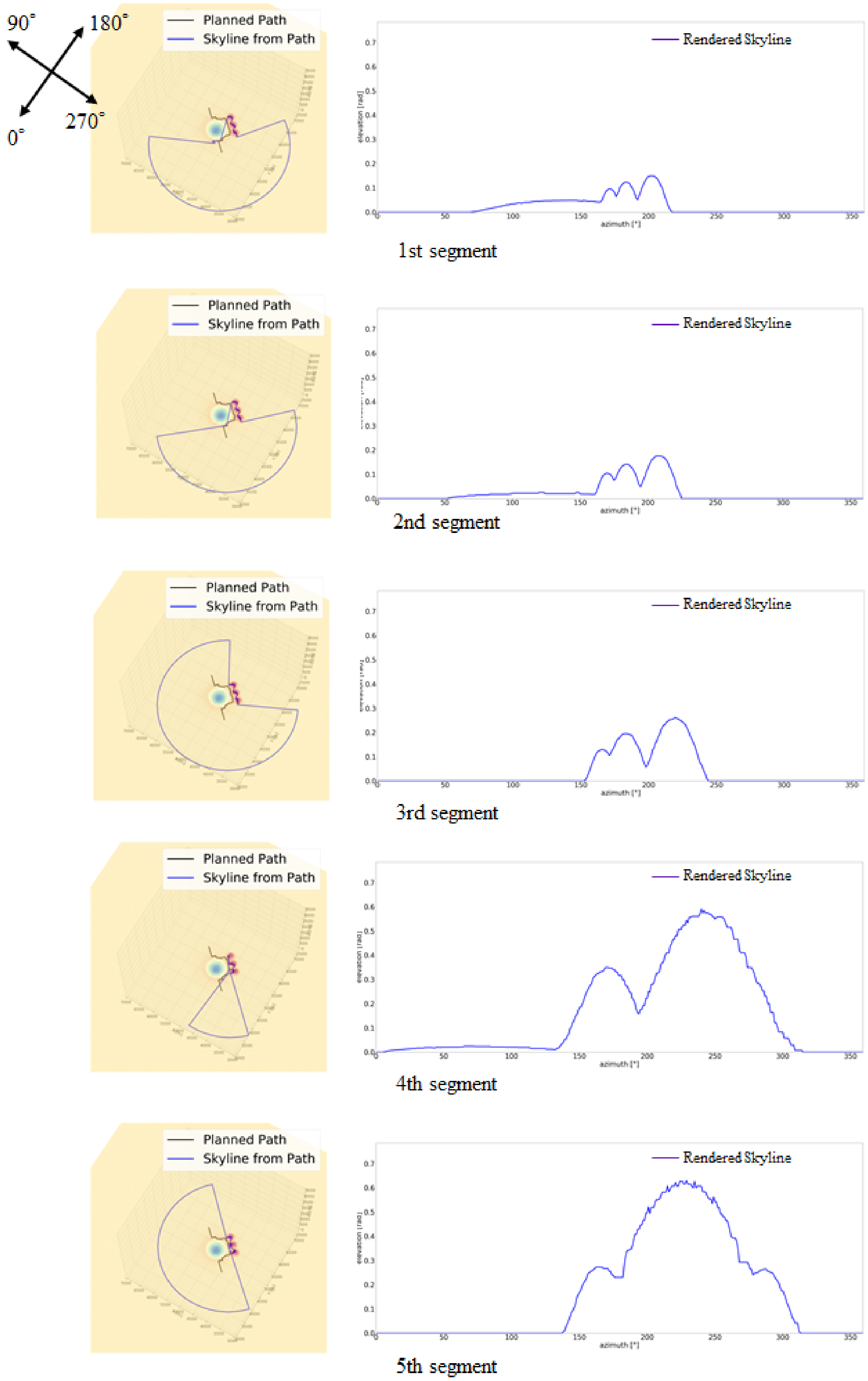

図 4.16: Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 1) (segment 1-5).

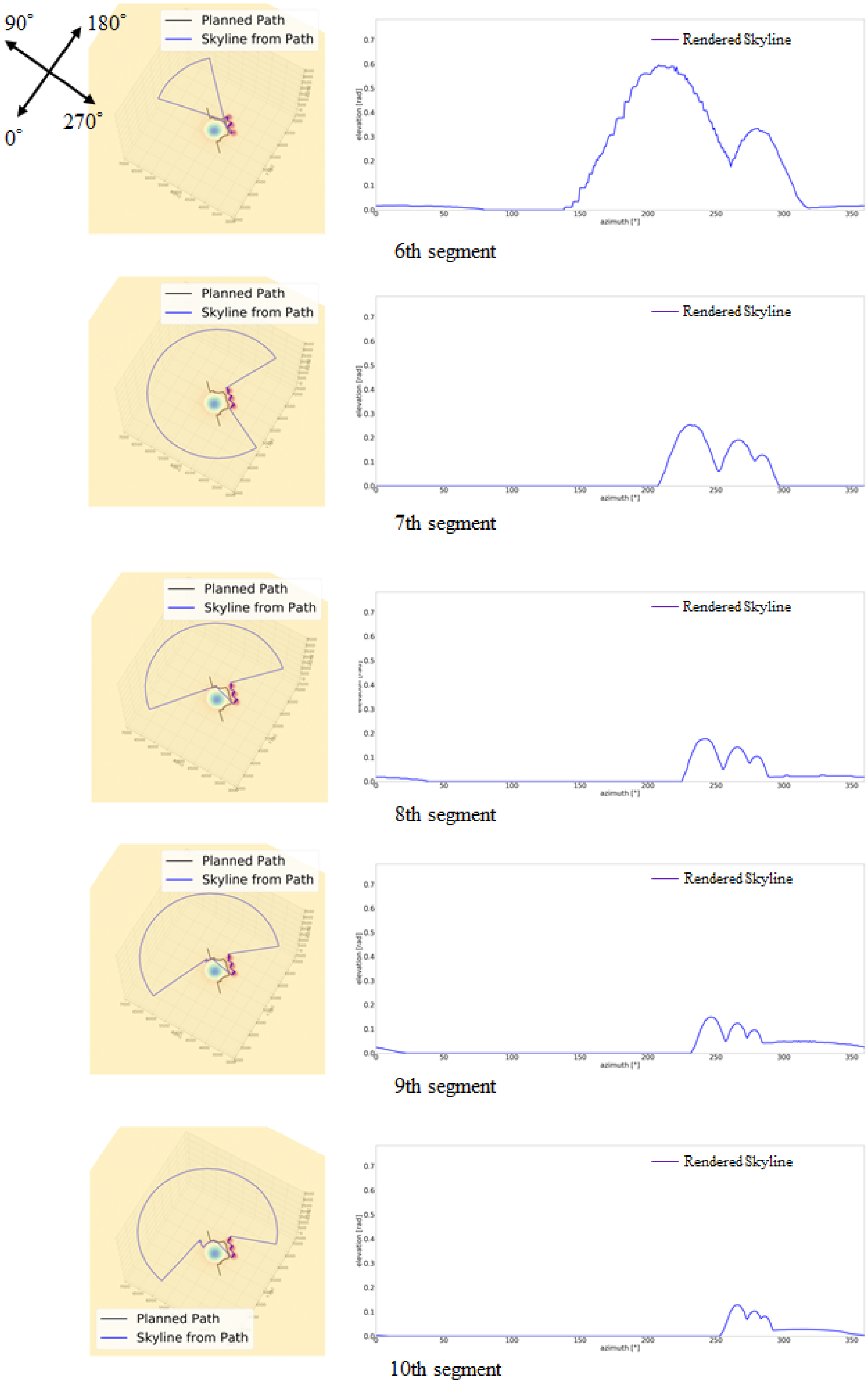

図 4.17: Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 1) (segment 6-10).

条件 2：等距離分割

ここからは，各経路を約 200 m ごとの区間に分割し，その終点で位置推定をおこなうことで経路を追従するという条件の下でのシミュレーション結果を示す。

図 4.18，4.19 には，各区間終点での位置推定誤差について，平均値と分散を示した。同じ距離を走ったところで比較をすると，平均誤差も分散も提案手法によって全体を通じて大きく抑制されていることがわかる。約 2000 m の地点では，平均誤差が 41.5%，分散が 67.2% 減少している。それ以降の地点で従来手法経路における誤差が記録されていないのは，従来手法経路のほうが経路長が短く，区間の数もそれに伴って少なくなっているためである。

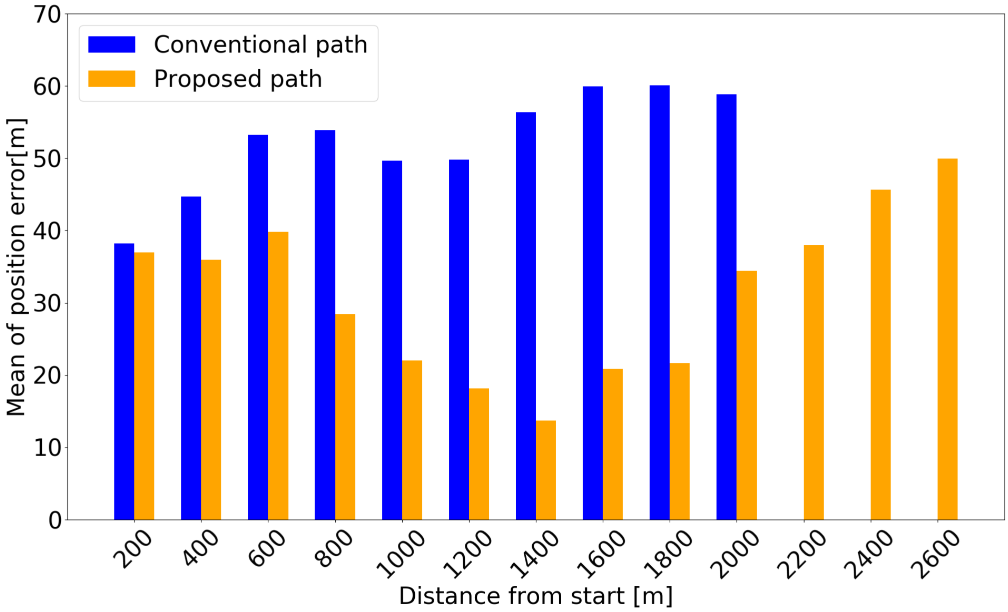

図 4.18: Mean of error of the localization on the virtual terrain (condition 2).

各区間終点におけるゴール到達率は図 4.20 のようになった。従来手法経路ではいずれの区間においても 40% 以下しかゴール領域に到達できていないのに対し，提案手法経路は特に経路中盤で到達率が向上し，約 1400 m の地点では 90% 以上に達している。最終的な経路終点への到達率についても，従来手法経路では 21.2% であるのに対し，提案手法経路では 26.9% と，27% ほど改善している。ローバの移動距離が長くなるほど誤差は蓄積して大きくなっていくはずであるが，ゴール到達率は向上していることから，提案手法経路は位置推定を容易にすることに成功していることがわかる。

また，図 4.21，4.22 に示したローバの到達位置を見ても，提案手法経路を走行することで目標位置の近傍へより精度よく到達することができていると言える。

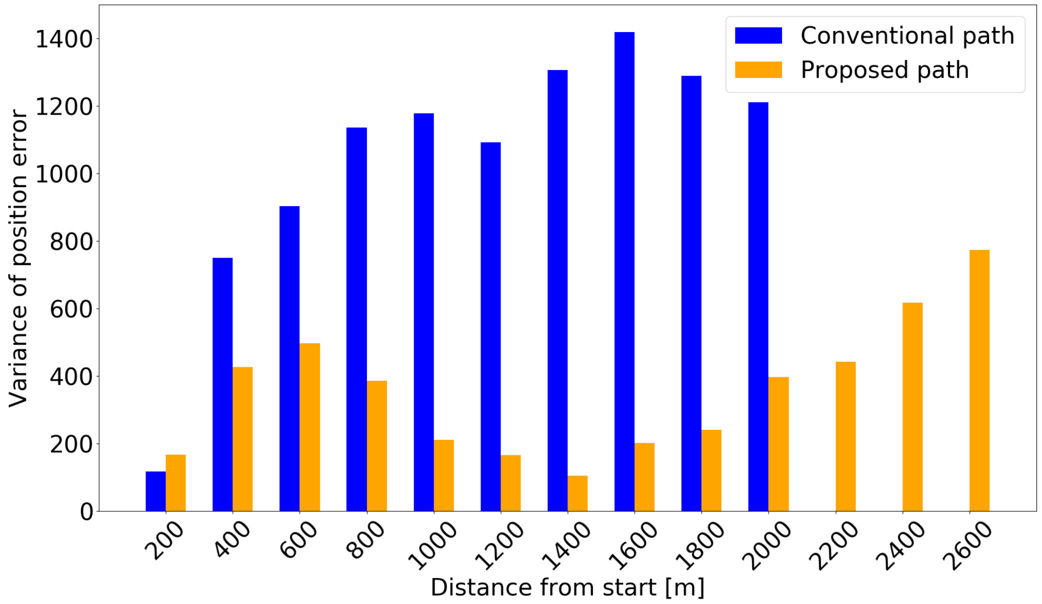

図 4.19: Variance of error of the localization on the virtual terrain (condition 2).

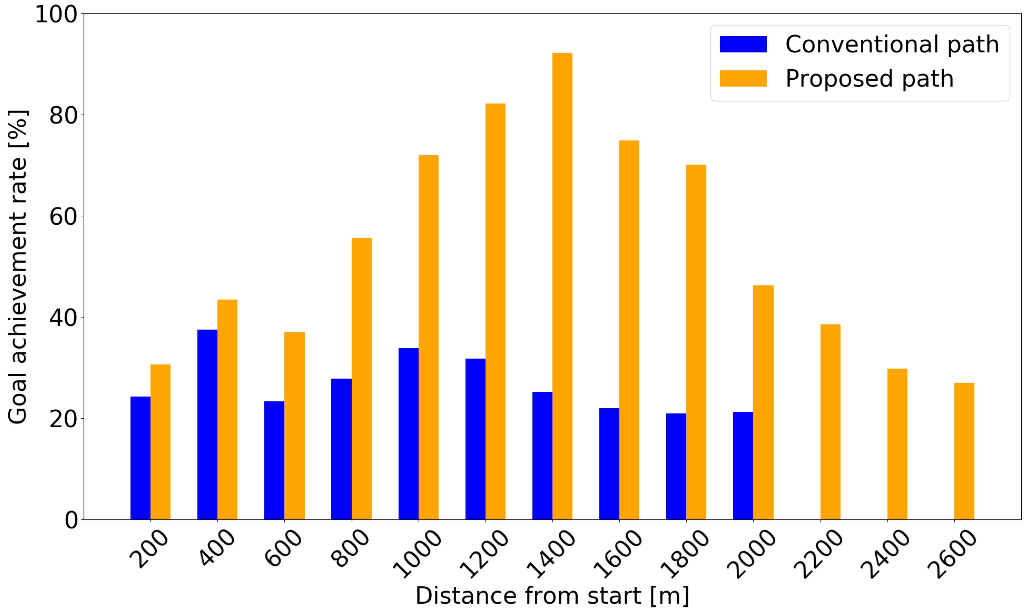

図 4.20: Goal reach rate on the virtual terrain (condition 2).

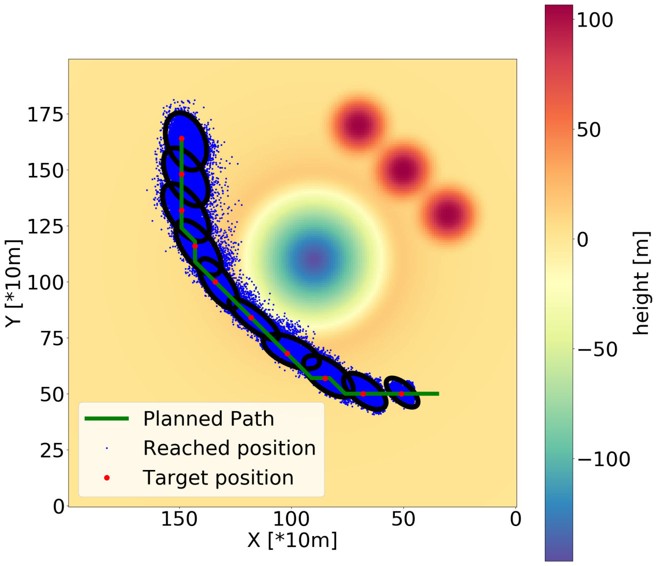

図 4.21: Reached position on the conventional path on the virtual terrain (condition 2).

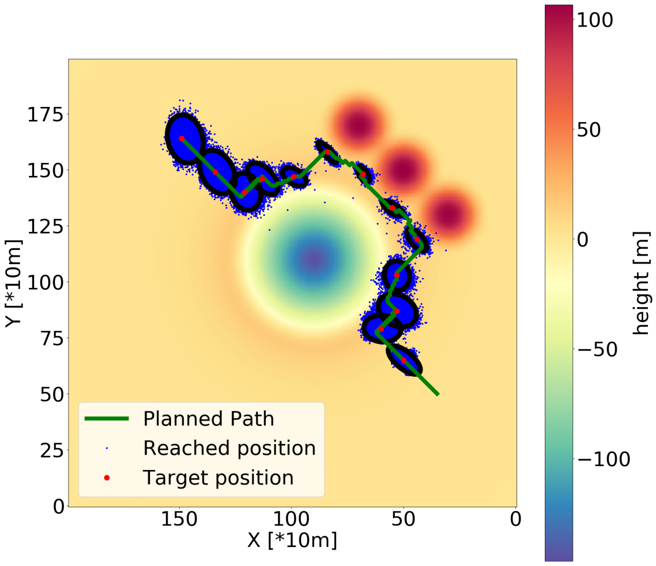

図 4.22: Reached position on the proposed path on the virtual terrain (condition 2).

図 4.23，4.24 には，経路上およびローバ軌跡上それぞれから観測されるスカイラインについて，各区間におけるスカイラインの変化量の合計値を示した。スカイラインの変化量をが大きくなるように経路計画をおこなった結果として，経路上から観測されるスカイラインについては，提案手法経路において変化量が著しく大きくなっている。それに対し，ローバ軌跡上からのスカイラインにおいても同様の傾向が見られるものの，唯一 1000 m 地点では従来手法経路の場合のほうがスカイライン変化量が大きくなっている。これは，図 4.21 を見てわかるように，従来手法経路を走行した場合には経路を大きく外れてクレータ内に落ち込むケースが存在することが原因であると考えられる。クレータ内に進入すると，スカイラインとして観測可能な地形は増える一方で，当然傾斜は大きくなるため，経路から逸れて予定外にクレータを走行することは危険を伴う。図 4.22 からわかるとおり，提案手法経路を走行した場合には，クレータ内にローバが落ち込むケースは非常に少ない。

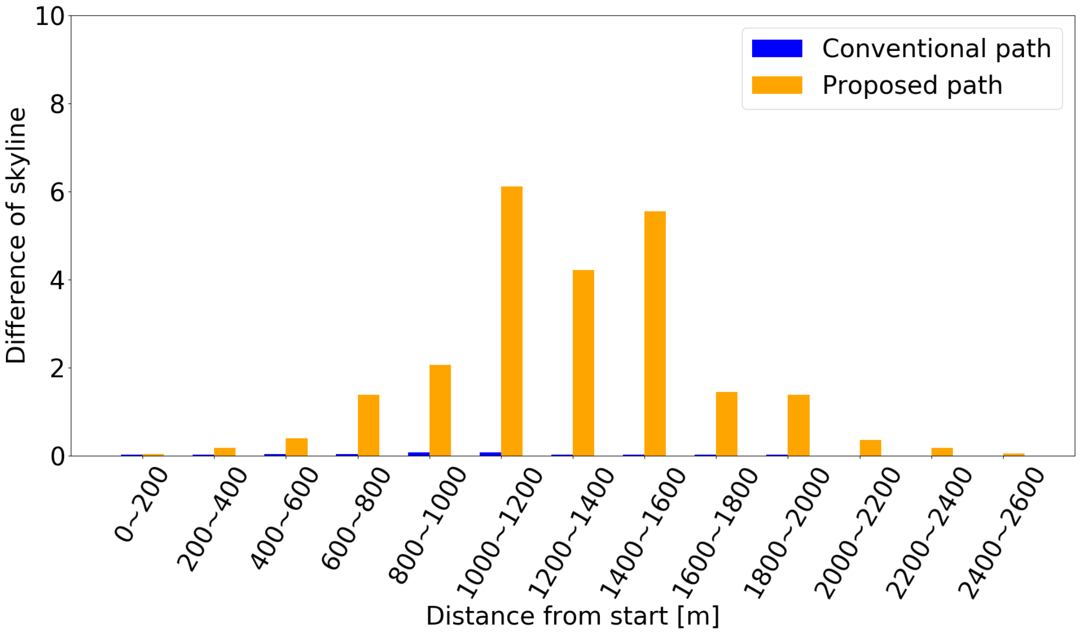

図 4.23: Sum of the difference of skyline in paths on the virtual terrain (condition 2).

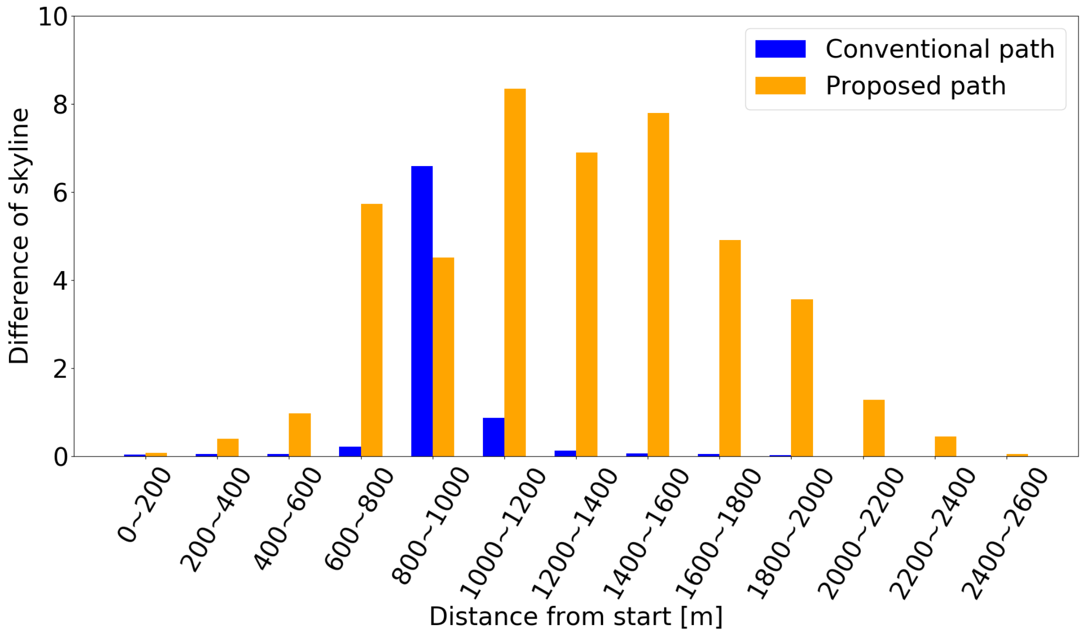

図 4.24: Sum of the difference of skyline in trajectories on the virtual terrain (condition 2).

図 4.25〜4.29 には，各経路上から観測されるスカイラインの位置および形を示した。条件 1 の場合と同様に，提案手法経路の中盤において丘陵地が大きくスカイラインに現れており，丘の近くを通過するような経路にしたことでスカイラインの変化が大きくなり，位置推定が容易になったということが示唆されている。

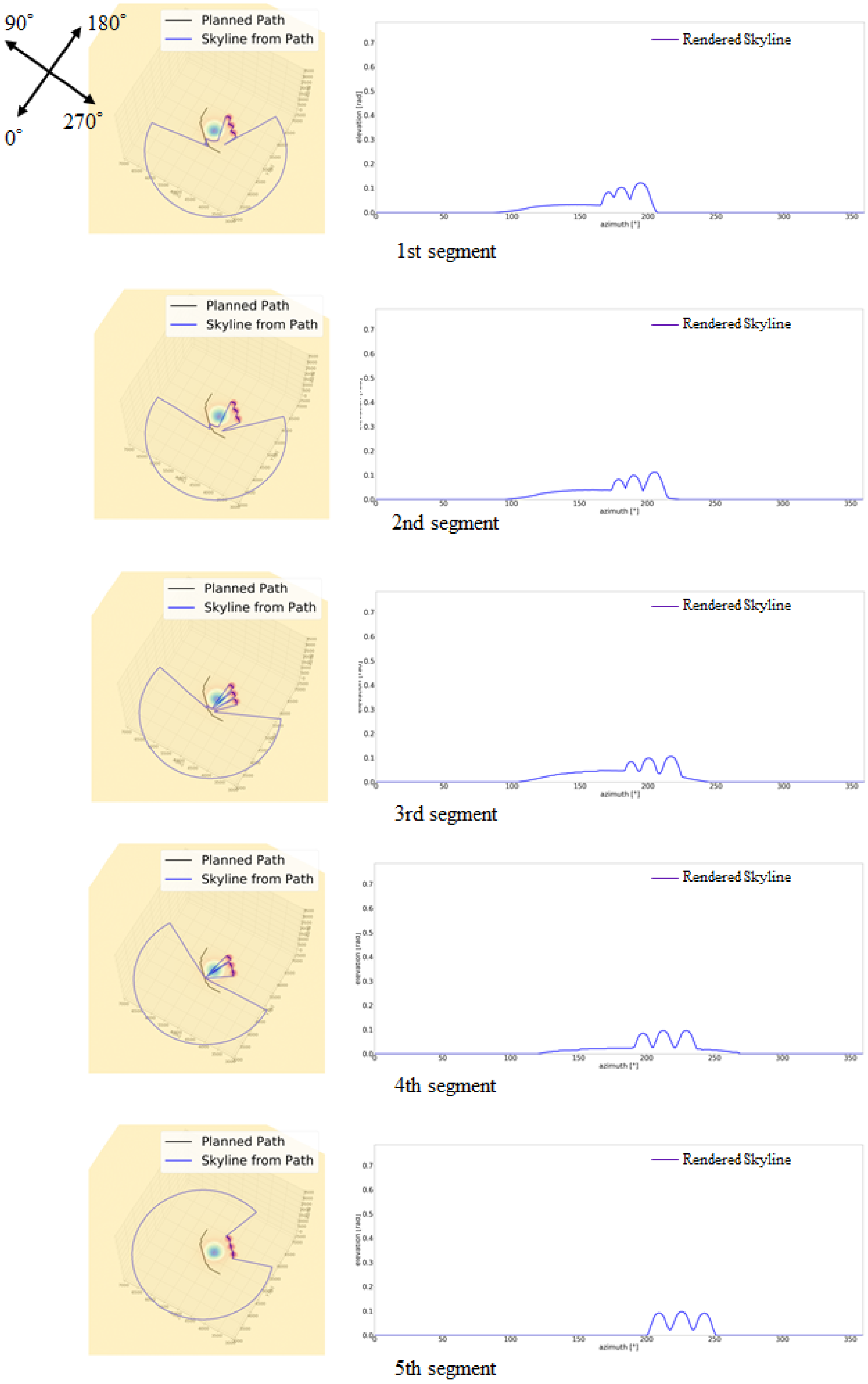

図 4.25: Skylines from the conventional path on the virtual terrain (condition 2) (segment 1-5).

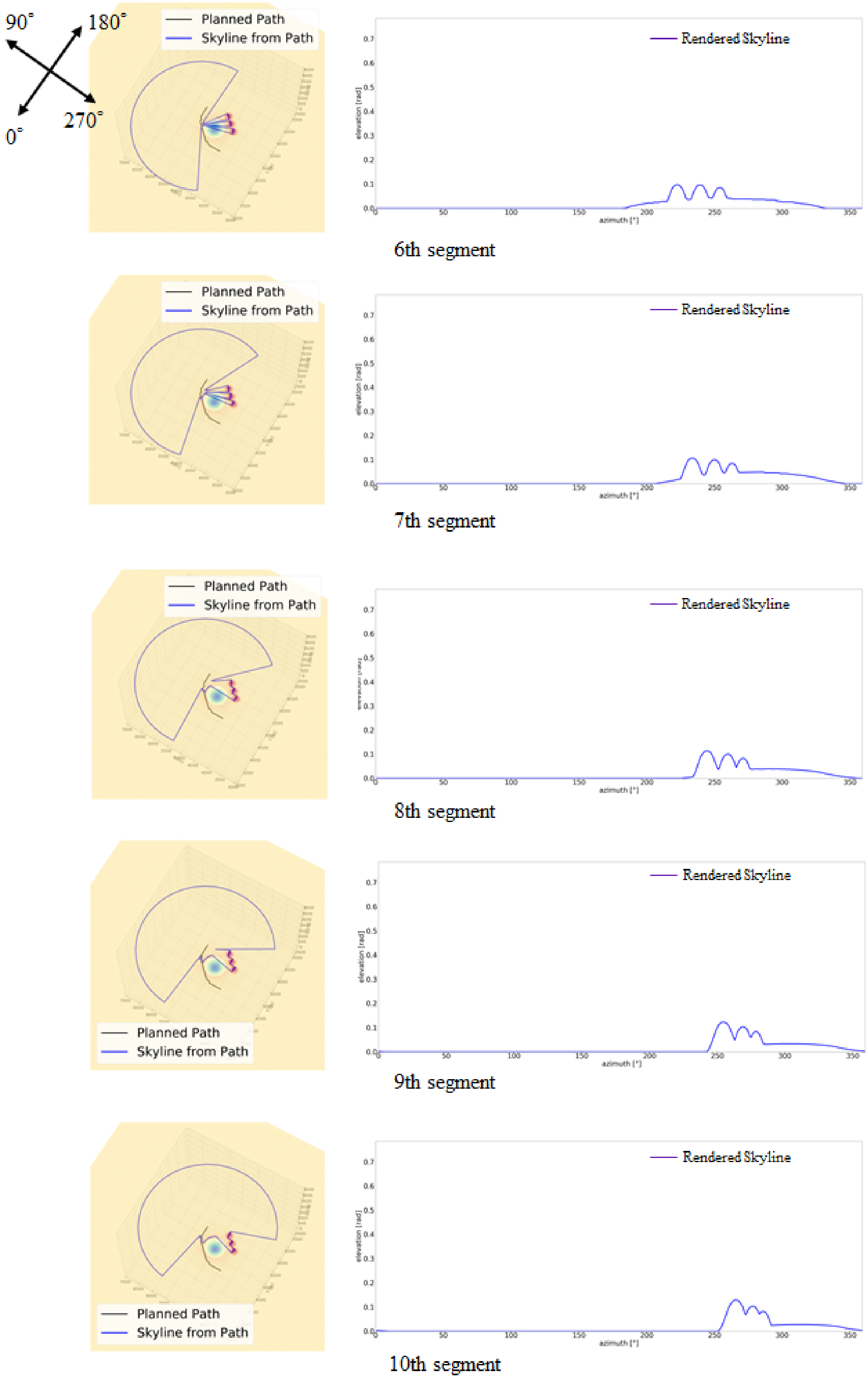

図 4.26: Skylines from the conventional path on the virtual terrain (condition 2) (segment 6-10).

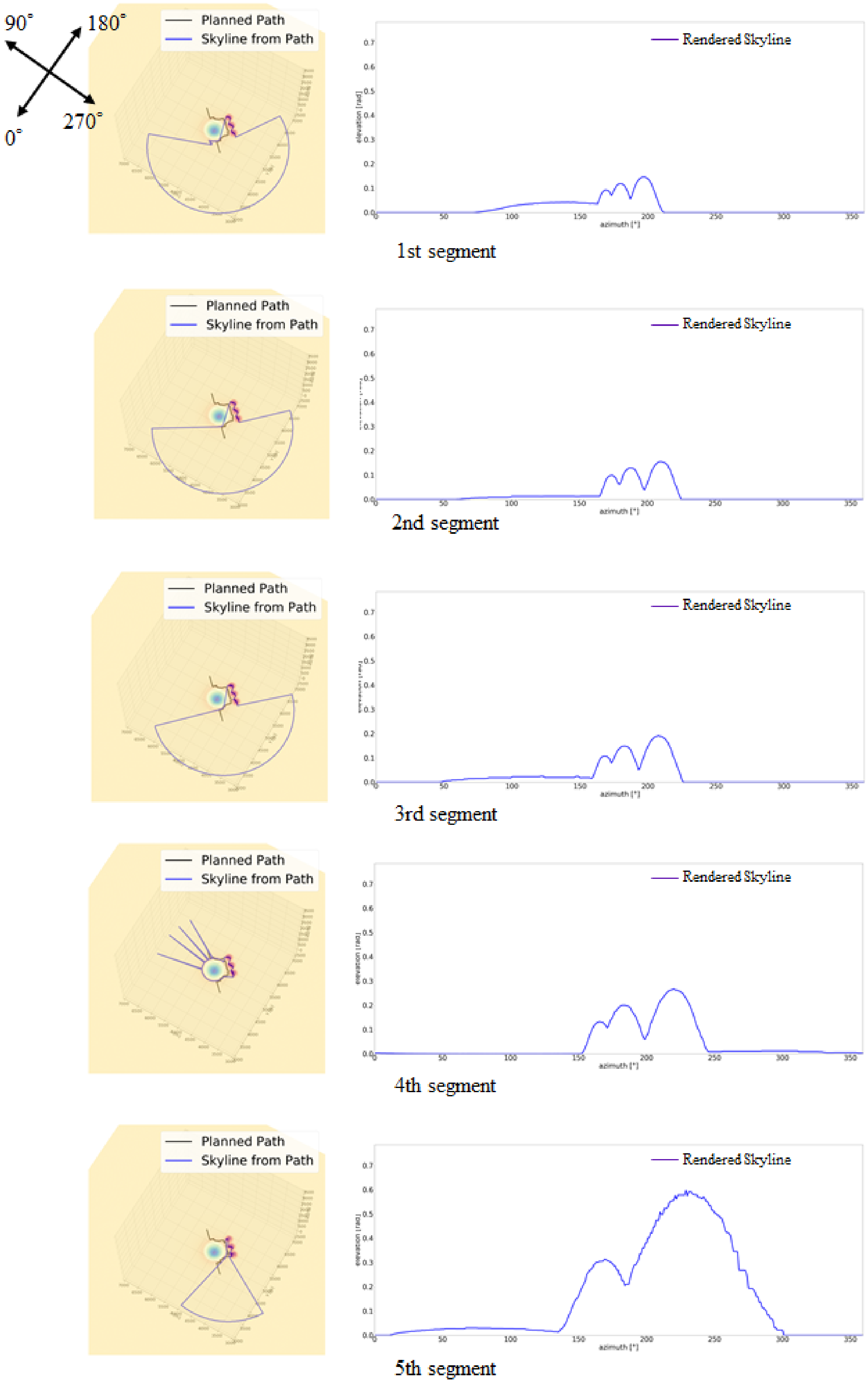

図 4.27: Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 2) (segment 1-5).

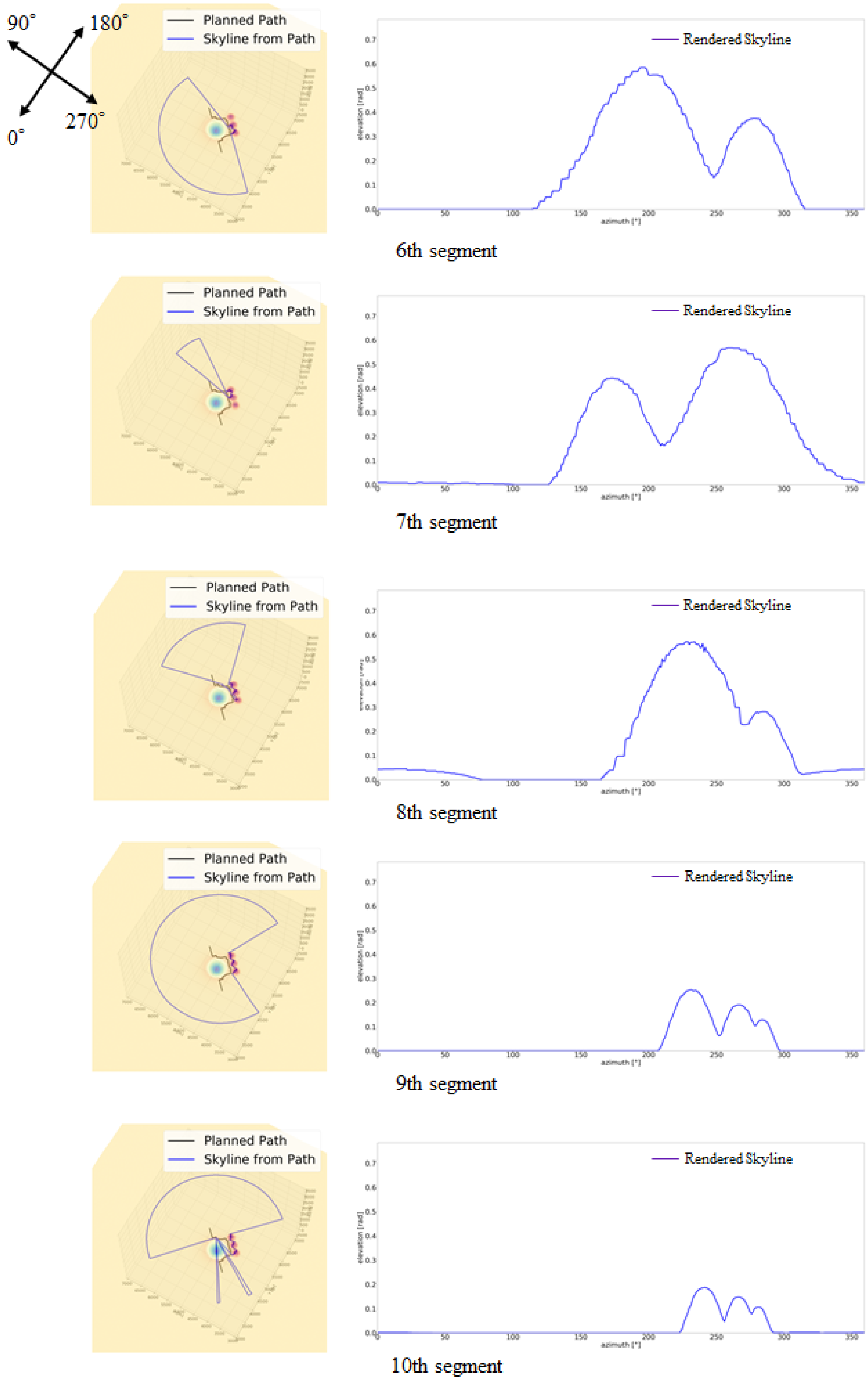

図 4.28: Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 2) (segment 6-10).

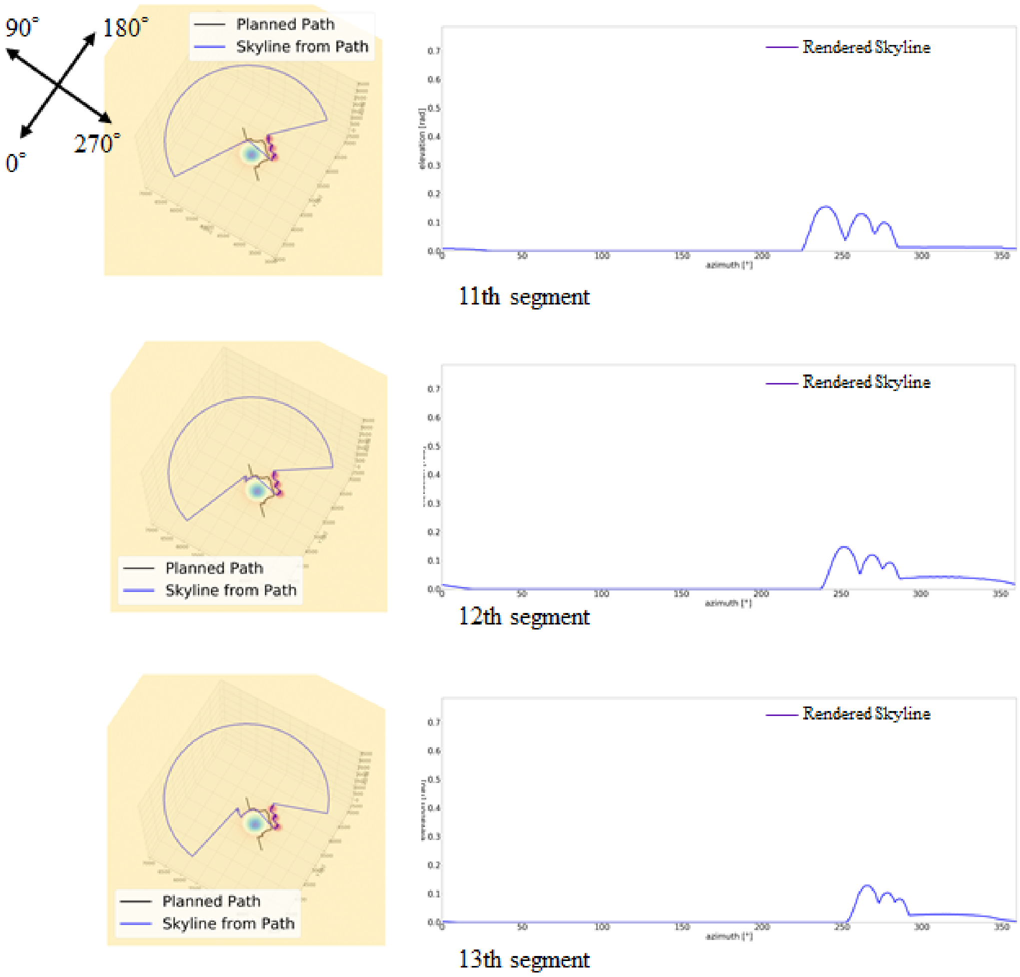

図 4.29: Skylines from the Proposed path on the virtual terrain (condition 2) (segment 11-13).

第 5 章

実際の地形を用いたシミュレーション

前章では，簡単な仮想地形を用いて提案手法の有効性を検証したが，本章では火星および月の実際の地形を用いて同様のシミュレーションをおこない，従来手法と提案手法のそれぞれによる経路における位置推定誤差の比較をおこなう。

5.1　ケース 1：火星表面（丘陵地近傍）

5.1.1　使用した地形情報

火星表面の DEM データとして，Mars Reconnaissance Orbiter に搭載された High Resolution Imaging Science Experiment（HiRISE）で撮影されたステレオ画像に基づいて作成されたものを用いた [28]。ケース 1 では，Mars Exploration Rover Spirit の着陸地点周辺の地形を使用している。本来，この DEM データは 1.01 m/pixel の精度を持っているが，本研究では計算量の問題から，5.05 m/pixel に間引きして使用した。

シミュレーションに用いた地形を図 5.1 に示す。左図の通り，大きな丘が存在する領域であるが，右に拡大した地形図のように，丘以外の部分は全体的に平らな地形が続くのが火星表面の特徴である。スカイラインとしては左図の領域まで観測されるが，実際にローバが走行するのは右図の領域となる。

5.1.2　経路計画シミュレーション

仮想地形の場合と同様，従来手法と提案手法のそれぞれに基づいて経路計画をおこなった。得られた経路を図 5.2 に示す。

経路長は，従来手法経路が 1132 m，提案手法経路が 2344 m となった。従来手法経路は始点と終点をほぼ直線状に結んでいる。全体として平坦な地形で，傾斜による影響が少ないため，ほぼ最短距離となるような経路が得られたと考えられる。

一方，提案手法経路は，従来手法によるものの 2 倍以上の長さとなった。大きく迂回している反面，途中にある小規模の丘陵やクレータの近傍を通過している。

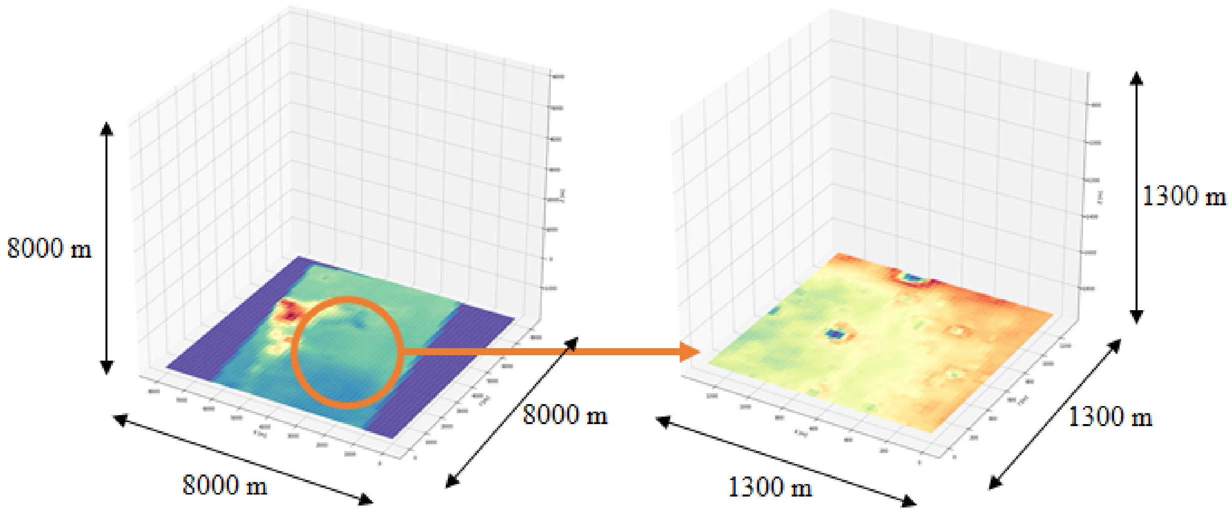

図 5.1: Gusev crater near Columbia hills on the Mars (case 1).

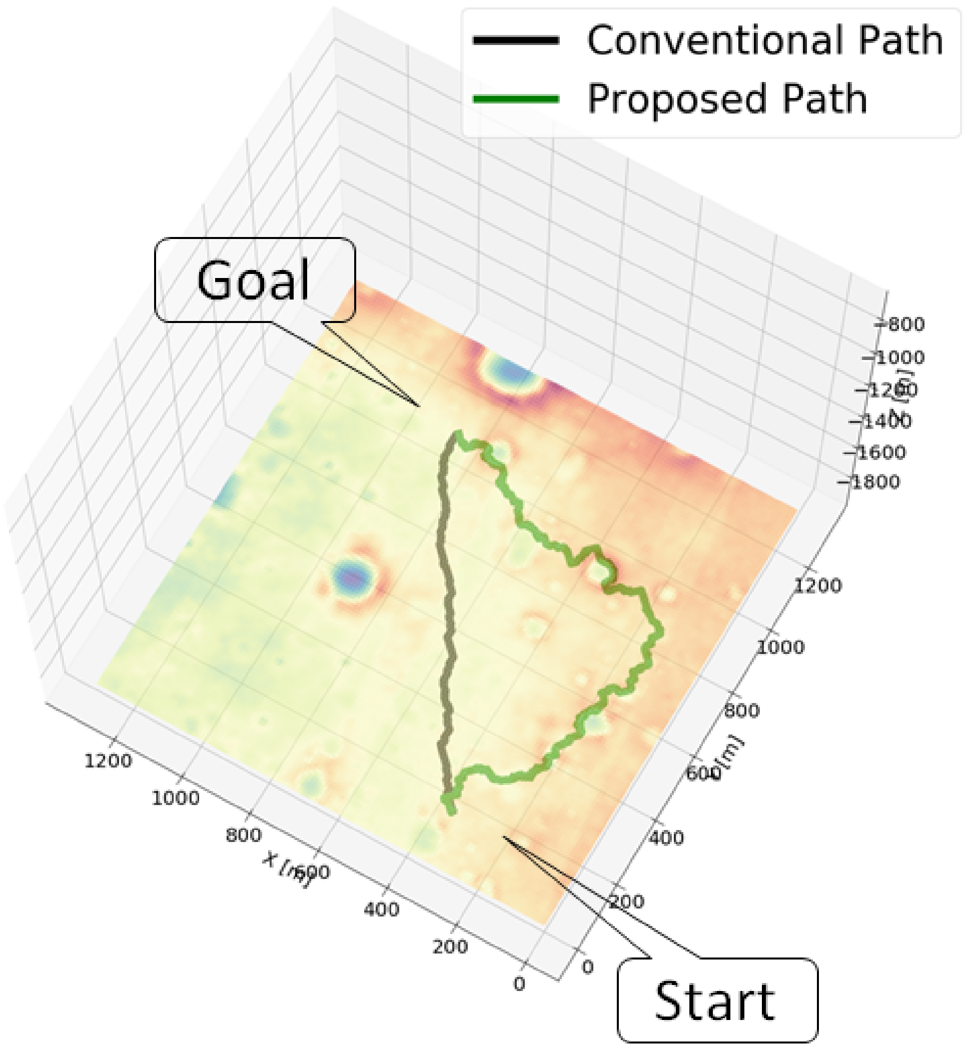

図 5.2: 2 paths on the Mars surface (case 1).

5.1.3　経路追従シミュレーション

条件 1：等区間数分割

4.1.，4.2. の内容に準じて模擬観測スカイラインを作成，およびローバの移動条件を設定し，前項で得られた 2 つの経路について 4 章と同様のシミュレーションをおこなった。

従来手法経路と提案手法経路における，位置推定誤差の平均値および分散を図 5.3，図 5.4 に示す。全体を通じて，提案手法経路において平均，分散ともに減少していることが見て取れる。特に分散に注目すると，従来手法経路では終点に近づくにつれて分散が大きく増大しているのに対し，提案手法経路では増大が抑えられていることがわかる。従来手法経路の場合で分散が大きくなってしまっているのは，提案手法の場合と比べ，誤差が極端に大きくなってしまうケースが多いからだと考えられる。ローバの走行軌跡が経路から一定以上離れてしまうと，もはや位置推定をおこなうことが不可能になり，走行すればするほど際限なく誤差が増大してしまうのである。しかし，提案手法経路では，終始一貫して平均 20 m〜30 m 程度の精度で位置を推定できているため，多くの場合で経路から大きく外れずに走行することができている。

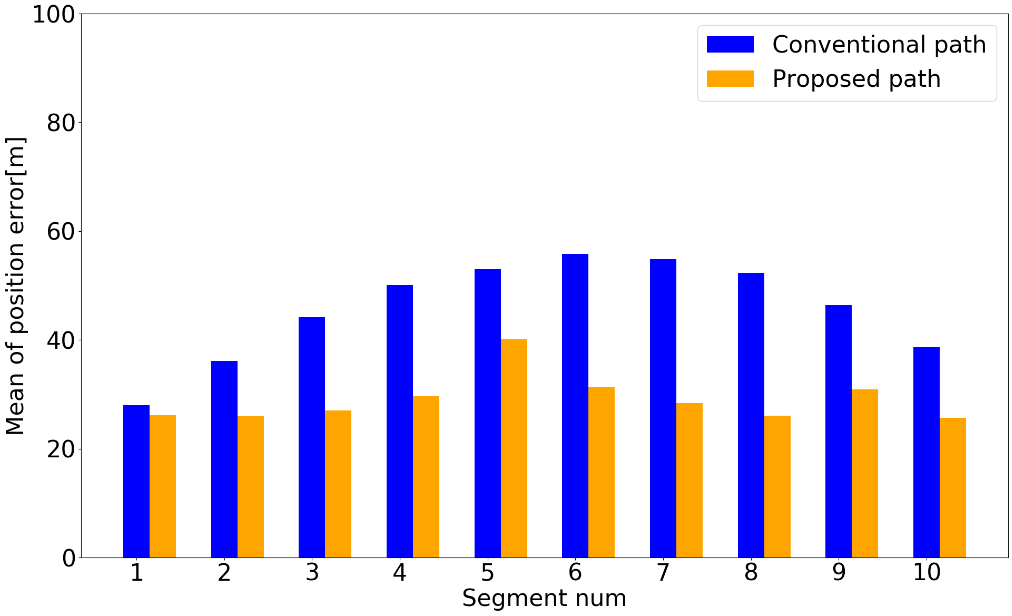

図 5.3: Mean of error of the localization on the Mars surface (case 1, condition 1).

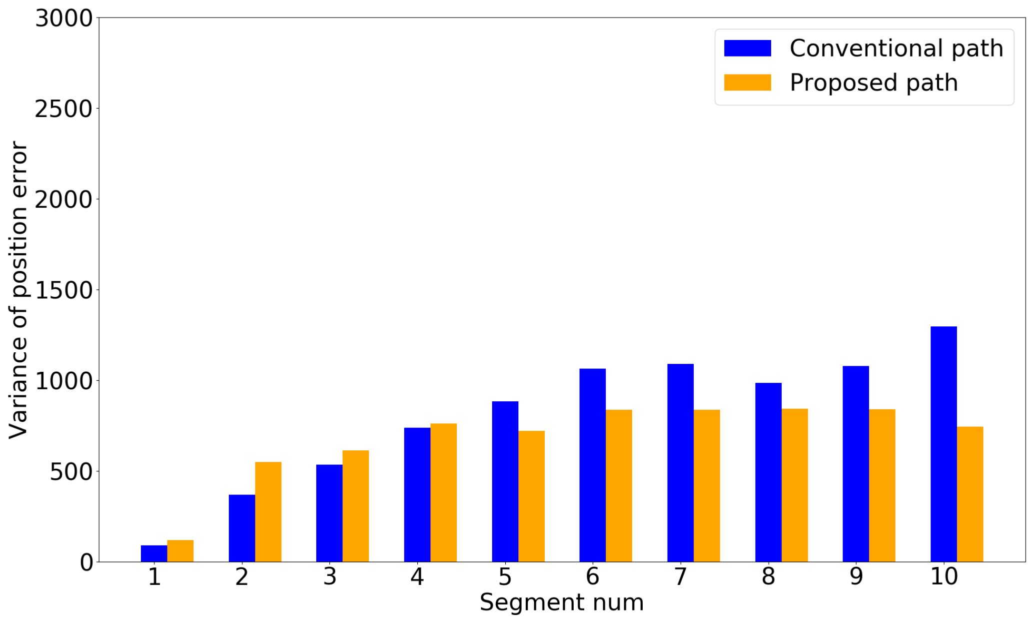

図 5.4: Variance of error of the localization on the Mars surface (case 1, condition 1).

また，図 5.5 には，各区間終点におけるゴール到達率を示した。特に区間 4 以降において，提案手法経路を走行した場合のほうが顕著に到達率が高くなっている。図 5.6，図 5.7 に示した，経路上の目標位置とローバの到達位置の散布図を見ても，従来手法経路を走行した場合（図 5.6）においては経路の終点よりも先まで到達位置が広く分布しているのに対し，提案手法経路の場合（図 5.7）ではそれが抑えられている。信頼楕円の大きさも経路全体を通じて提案手法経路の場合がより小さくなっており，目標位置から大きく離れてしまう可能性が低くなっていることがわかる。

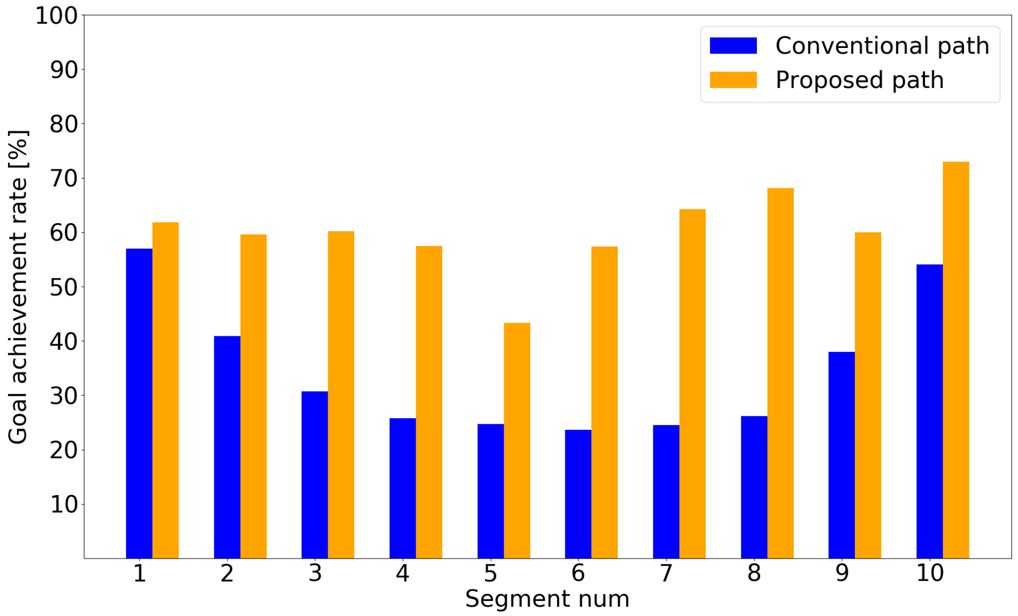

図 5.5: Goal reach rate on the Mars surface (case 1, condition 1).

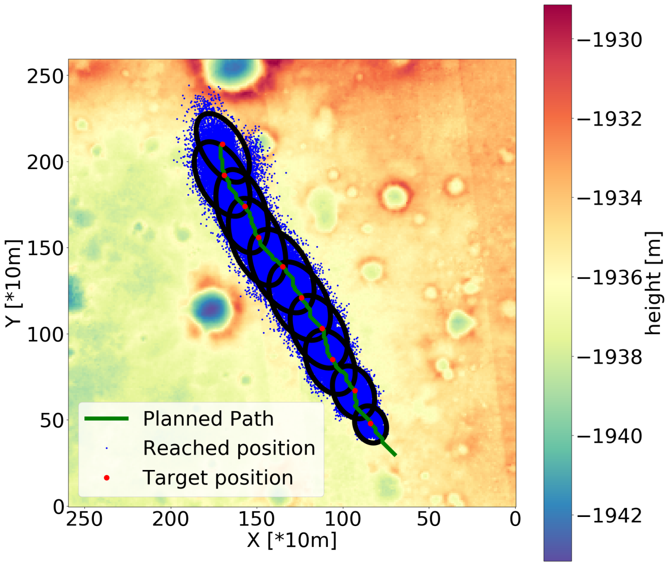

図 5.6: Reached position on the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 1).

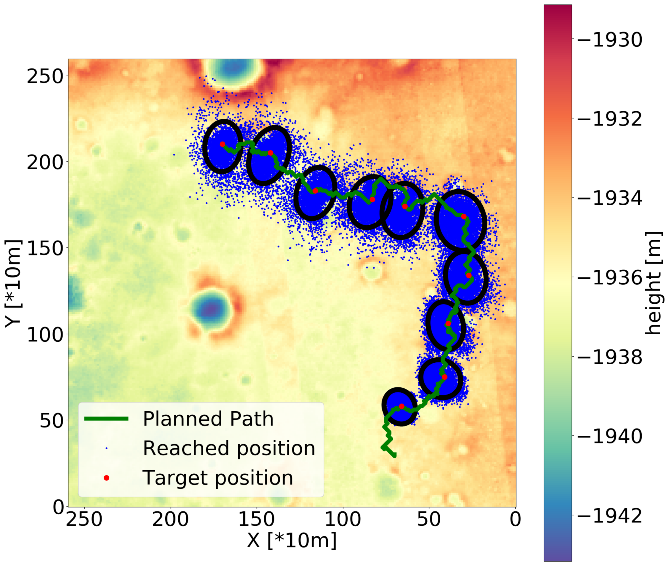

図 5.7: Reached position on the proposed path on the Mars surface (case 1, condition 1).

一方，図 5.8 と図 5.9 には，経路上およびローバ軌跡上におけるスカイライン変化量の合計をそれぞれ示した。いずれの場合も，提案手法経路における場合のほうが著しく大きくスカイラインが変化していることがわかる。

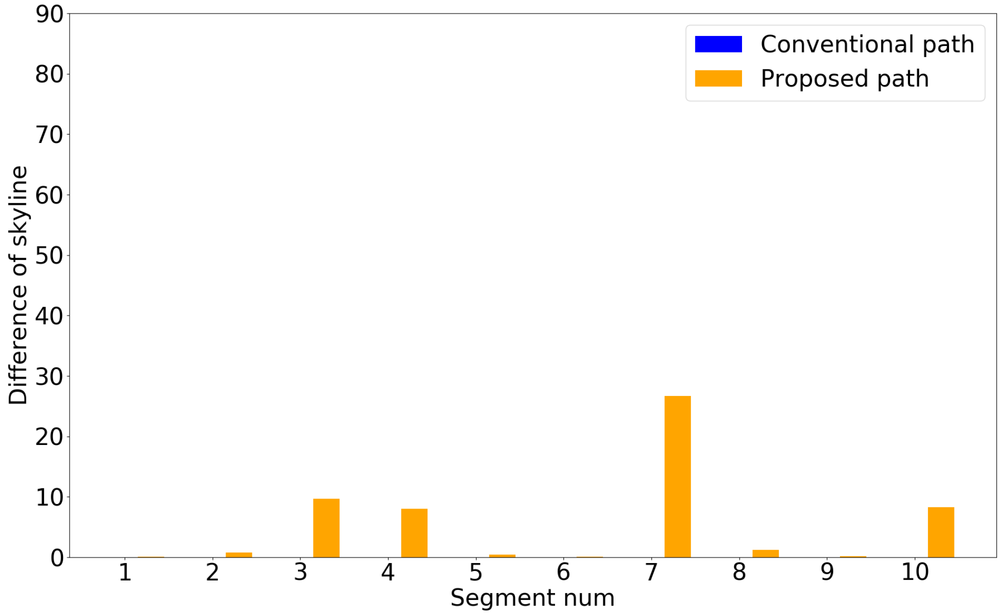

図 5.8: Sum of the difference of skyline in paths on the Mars surface (case 1, condition 1).

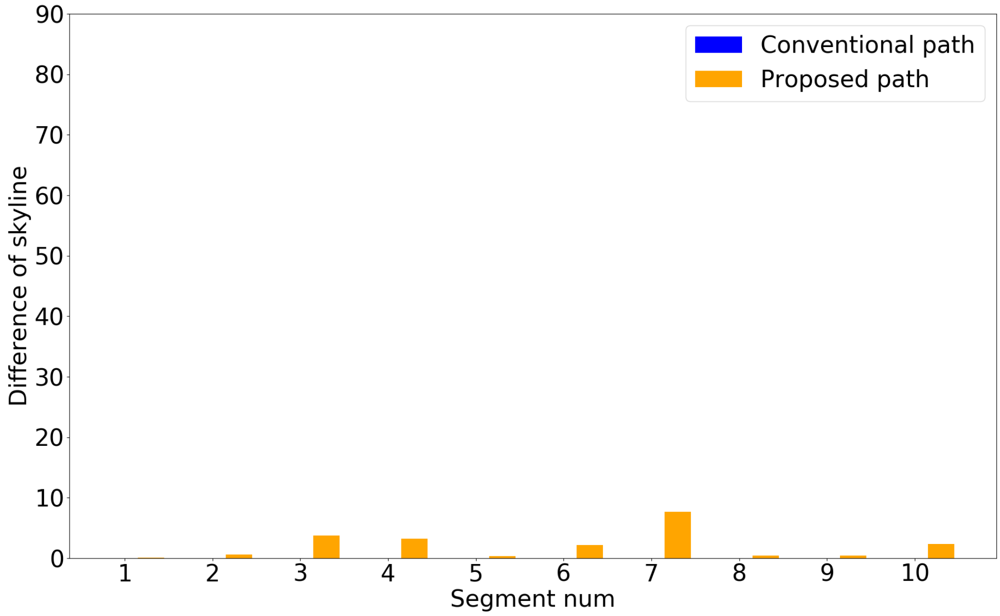

図 5.9: Sum of the difference of skyline in trajectories on the Mars surface (case 1, condition 1).

さらに，仮想地形の場合と同様に，各経路から観測されるスカイラインとその存在位置を求めた。

図 5.10，図 5.11 に従来手法，図 5.12，図 5.13 に提案手法の場合の，経路上の各区間の終点から観測されるスカイラインを示した。特に区間 2，3 において，観測されるスカイラインの形に明確な差異が生じている。提案手法の場合にのみ，スカイライン上に大きな丘が見られており，これは小規模な丘陵の付近を走行していることによる結果である。提案手法により，スカイラインの変化量の大きい経路を選択することで，位置推定を容易にすることに成功していると言える。

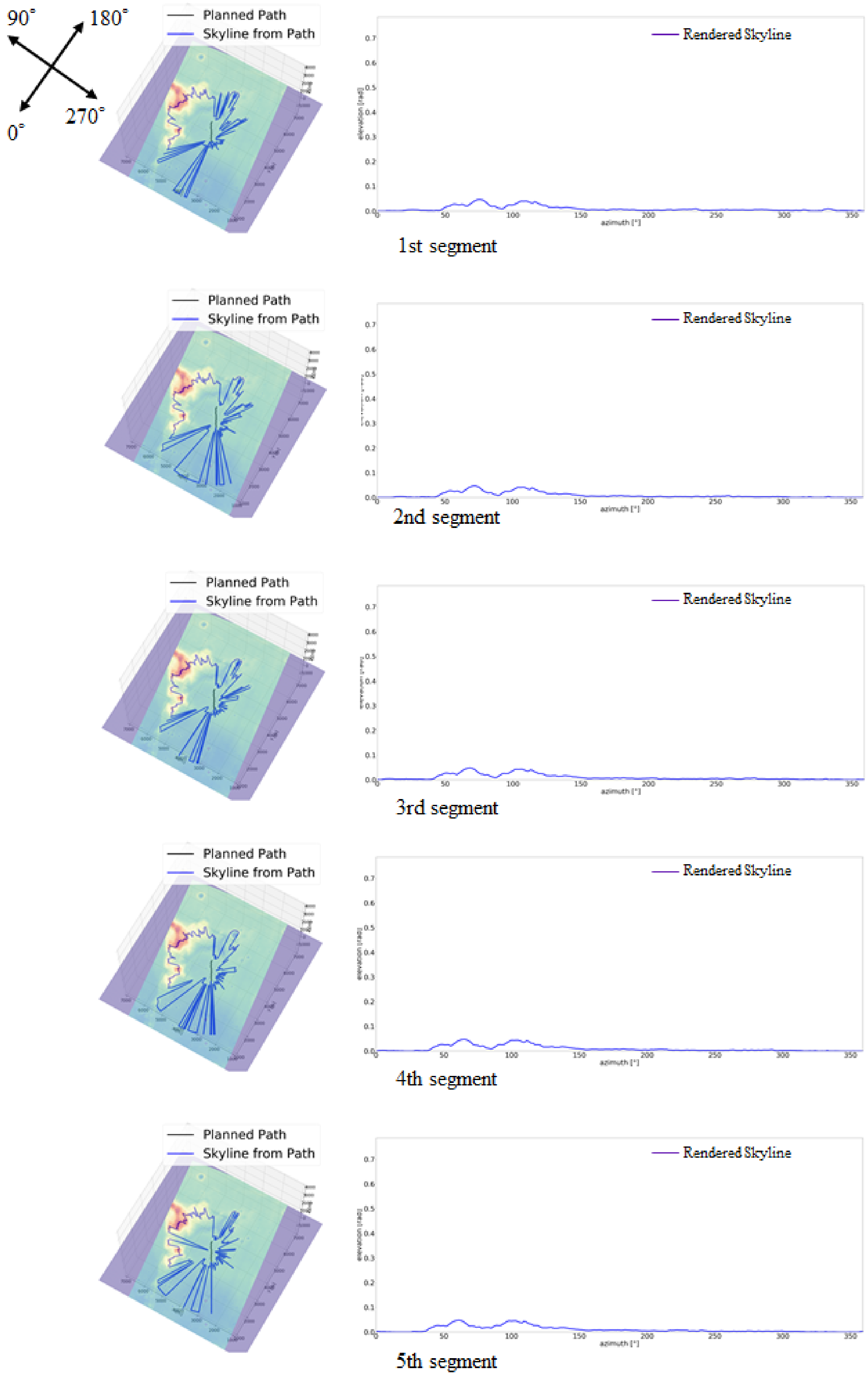

図 5.10: Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 1) (segment 1-5).

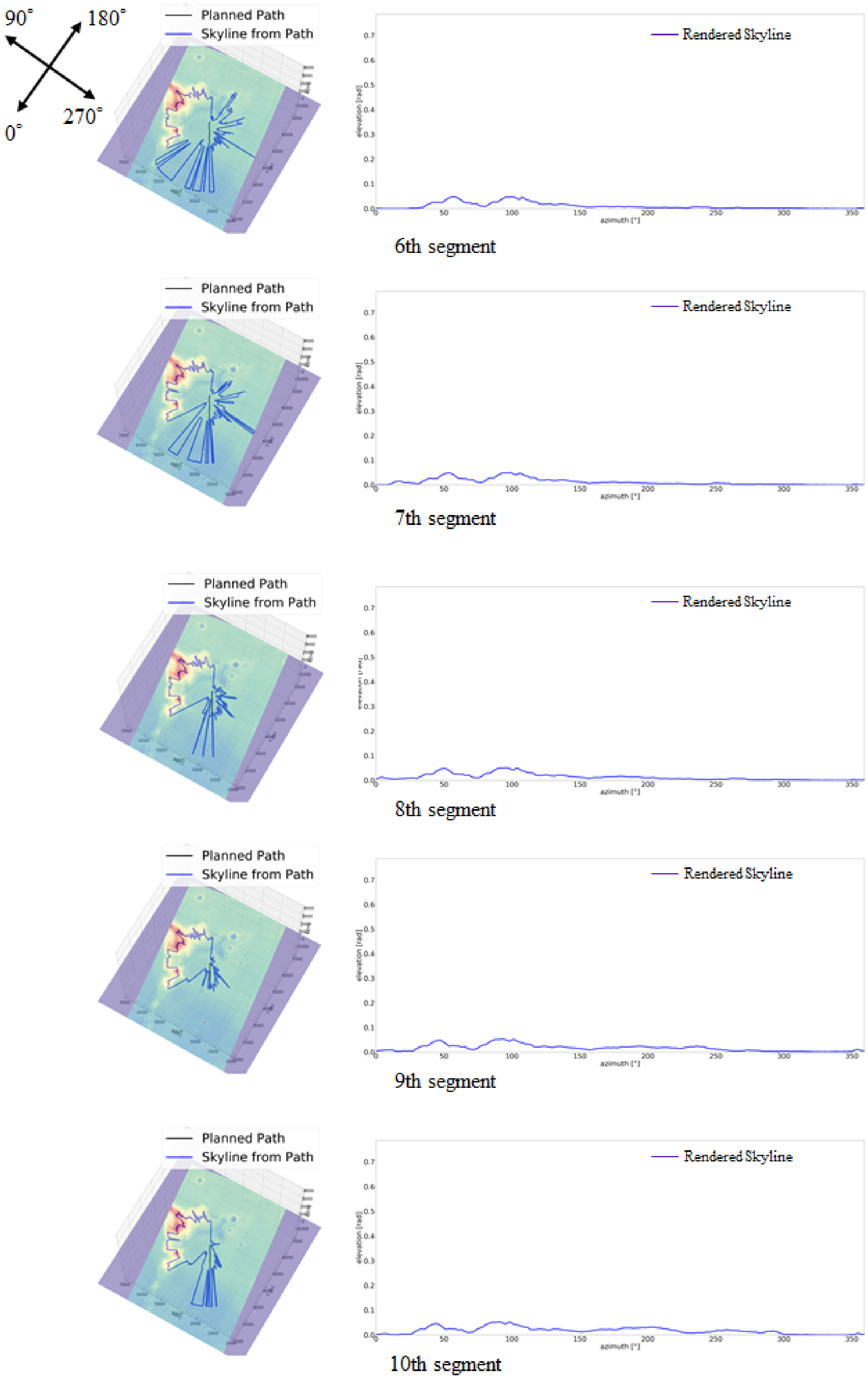

図 5.11: Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 1) (segment 6-10).

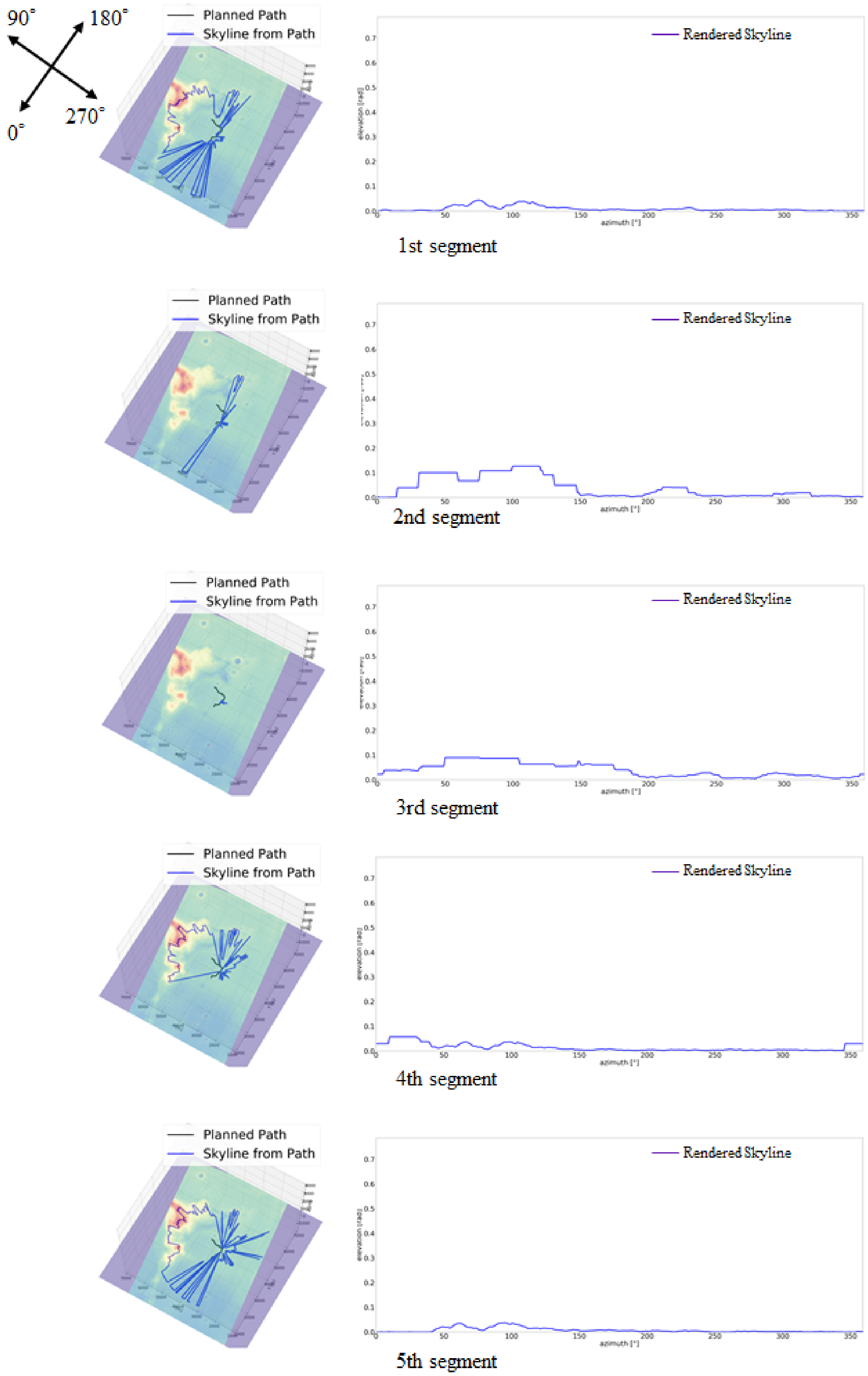

図 5.12: Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 1) (segment 1-5).

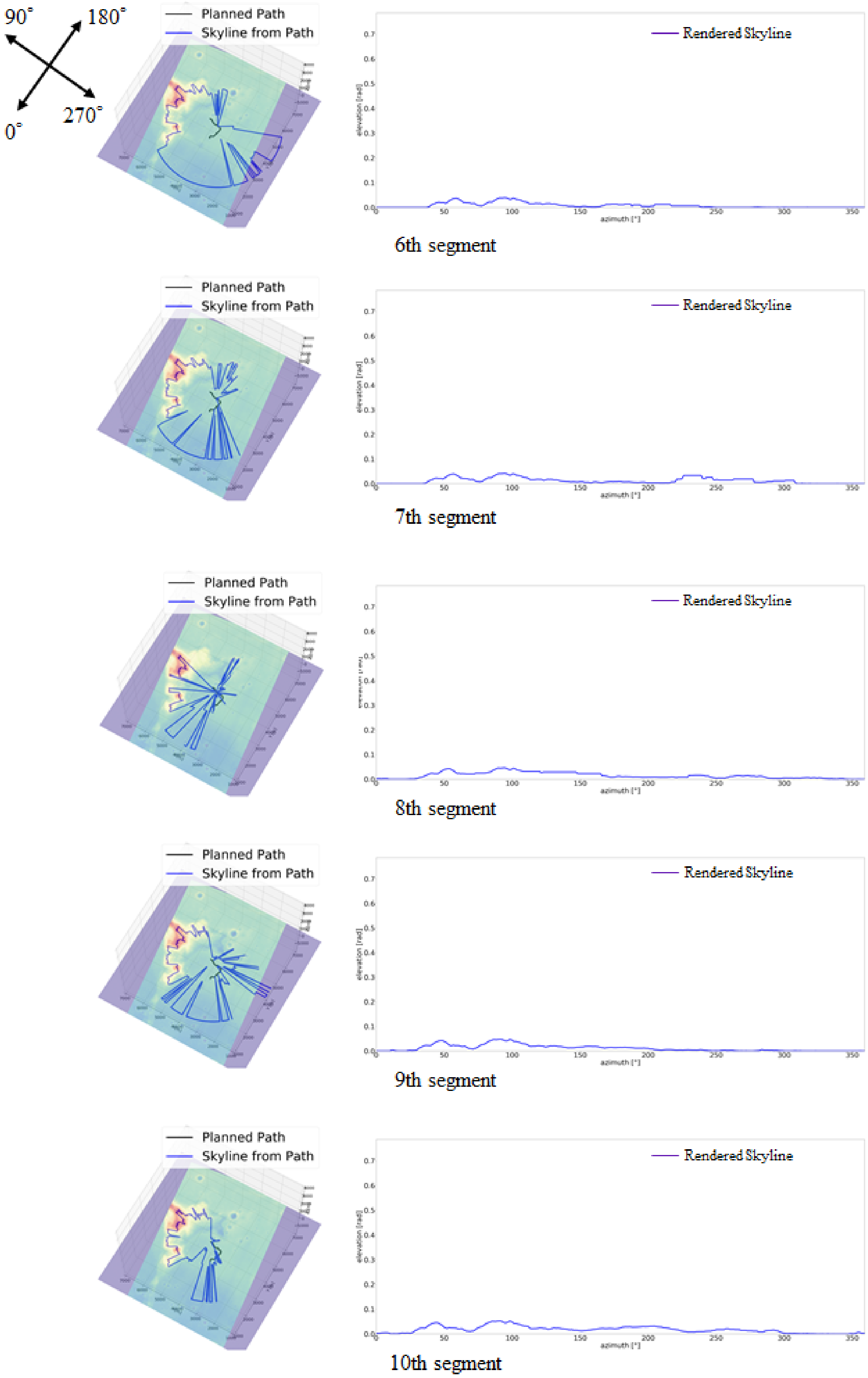

図 5.13: Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 1) (segment 6-10).

条件 2：等距離分割

経路を 200 m ずつに分割した場合についても経路追従シミュレーションを実施した。

平均誤差と誤差の分散を，それぞれ図 5.14 と図 5.15 に示した。平均誤差は最大で約 47% 改善されているものの，提案手法経路における誤差が従来手法経路の場合を上回っている地点もあり，条件 1 の結果ほど顕著に提案手法による効果が現れているとは言いがたい。しかし，図 5.15 において，従来手法経路ではスタート地点から遠ざかるほど分散が増加しているのに対し，提案手法経路では 1200 m 地点以降では分散の増加が抑えられており，この点については提案手法によって位置推定精度が向上した影響が現れていると考えられる。

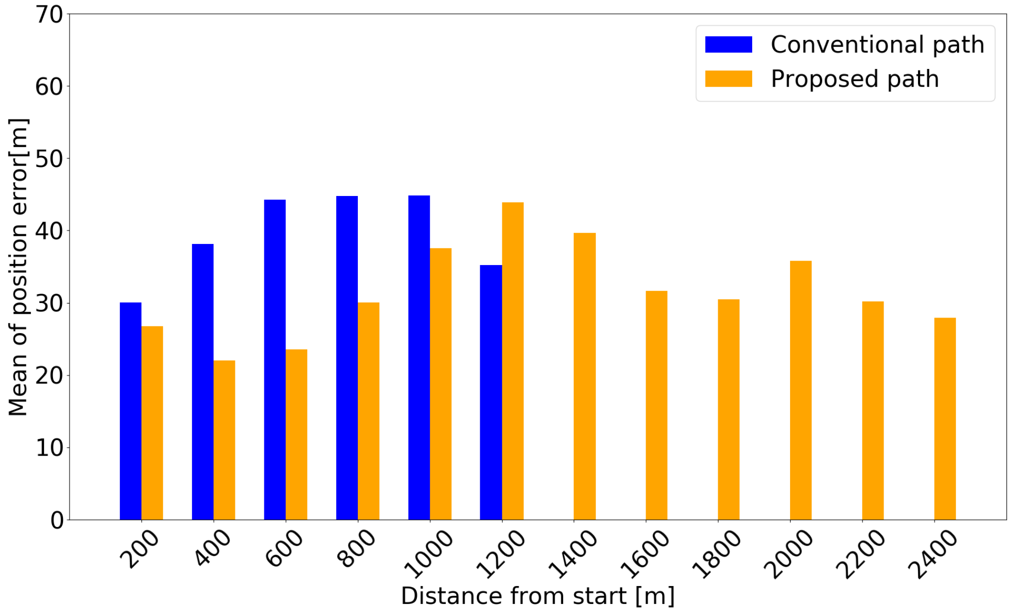

図 5.14: Mean of error of the localization on the Mars surface (case 1, condition 2).

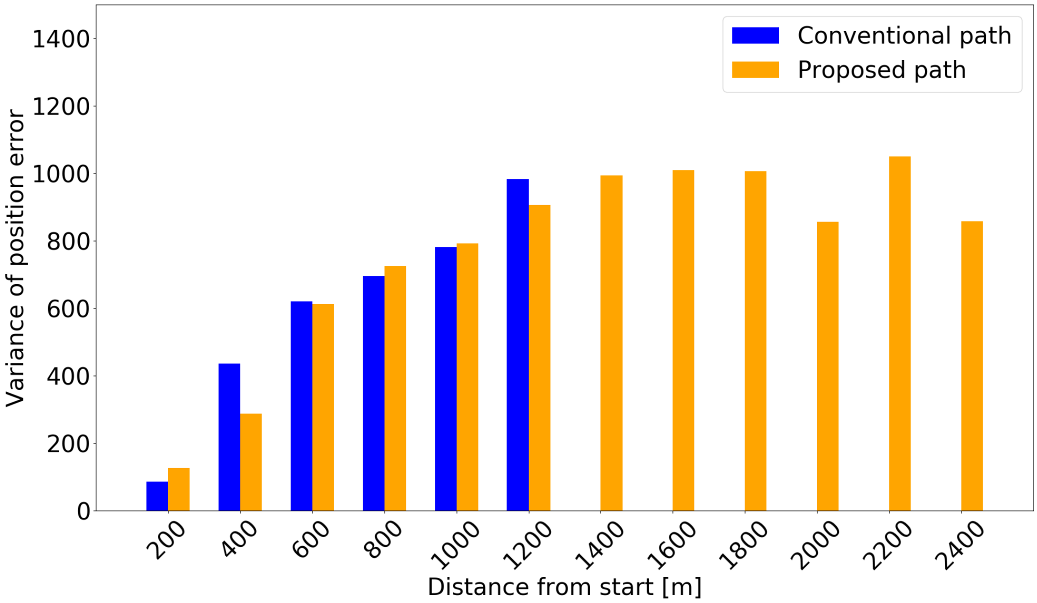

図 5.15: Variance of error of the localization on the Mars surface (case 1, condition 2).

図 5.16 に示したゴール到達率は，提案手法経路において向上していることが見て取れる。1200 m 地点以外ではすべて従来手法経路を上回っているだけでなく，経路の終点においても到達率が 27.3% 向上している。

図 5.17，5.18 には，ローバの到達位置およびその 95% 信頼楕円を示した。提案手法経路のほうが経路から大きく外れているケースが多いようにも見えるが，これは経路の形状の違いに起因している。従来手法経路は直線的であるため，ローバの走行する距離および方位角に誤差が生じたとしても，到達位置は経路の周囲に集中しやすい。実際には位置推定に失敗し，目標地点からずれていたとしても，そのずれが画一的になりやすいのである。それに対し，提案手法経路は全体として弧を描くような形になっている上，細かく蛇行している。したがって，目標位置から外れた場合に到達しうる位置が多様に存在する。このことは，信頼楕円の形状が，従来手法経路では細長く，提案手法経路では円形に近くなっていることからも裏付けられる。

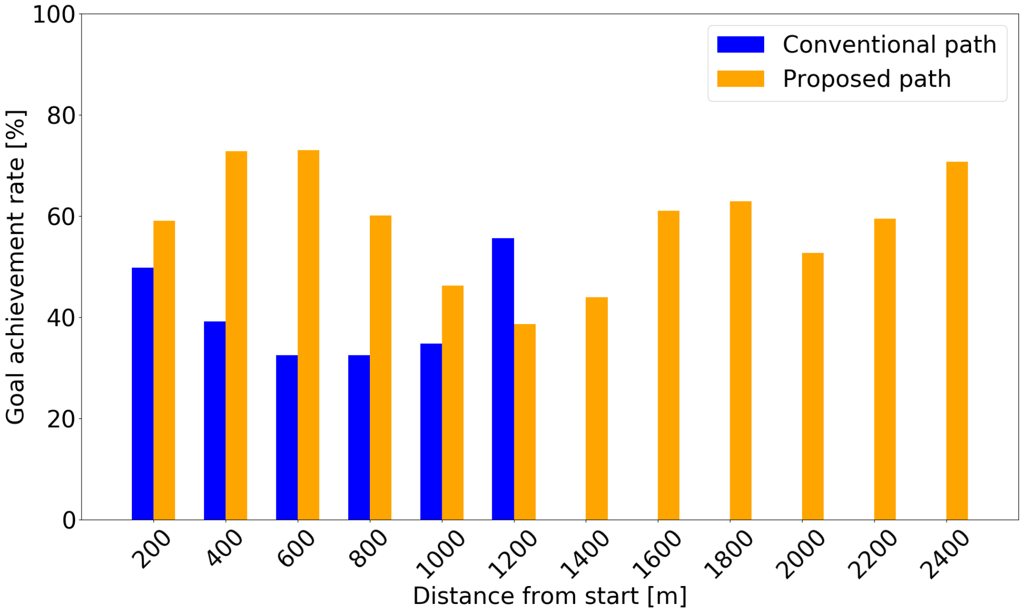

図 5.16: Goal reach rate on the Mars surface (case 1, condition 2).

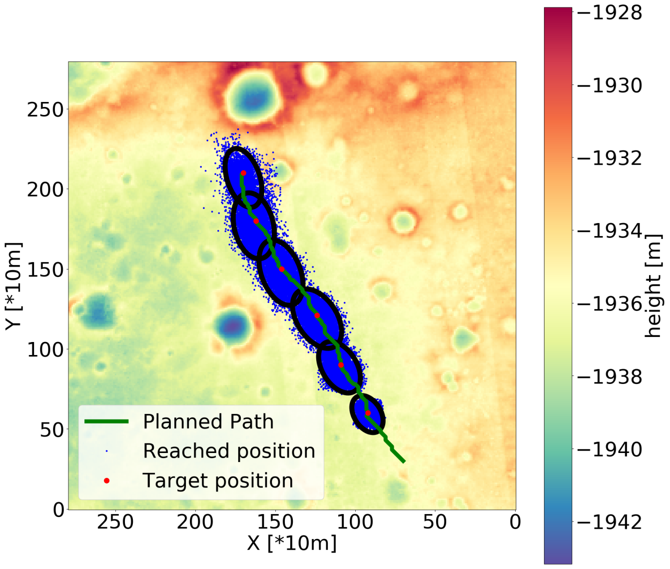

図 5.17: Reached position on the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 2).

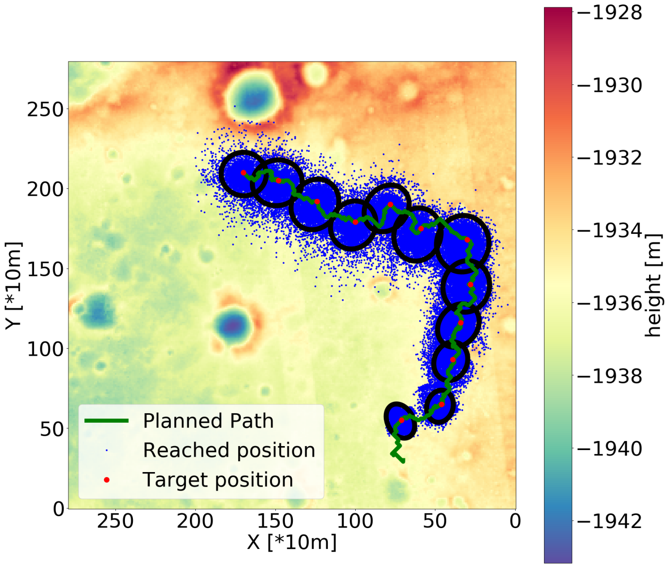

図 5.18: Reached position on the proposed path on the Mars surface (case 1, condition 2).

図 5.19 と図 5.20 には，経路上およびローバ軌跡上におけるスカイライン変化量の合計をそれぞれ示した。いずれの場合も，提案手法経路においては従来手法経路と比較して大きくスカイラインが変化していることがわかる。また，特にスカイラインの変化量の大きい 1600 m の地点では，位置推定精度およびゴール到達率が急激に回復しており，確かに位置推定が容易になっていることが確認できる（図 5.14，5.16）。

図 5.21〜5.25 は，経路上から観測されるスカイラインの存在位置および形状である。条件 1 の場合と比較すると，スカイライン上に大きな地形が現れているケースは少ないが，提案手法経路における区間 9（1800 m 地点）や区間 11（2200 m 地点）では，スカイラインの存在位置が経路の近くに分布しており，特徴的な地形の近傍を通過していることがわかる。

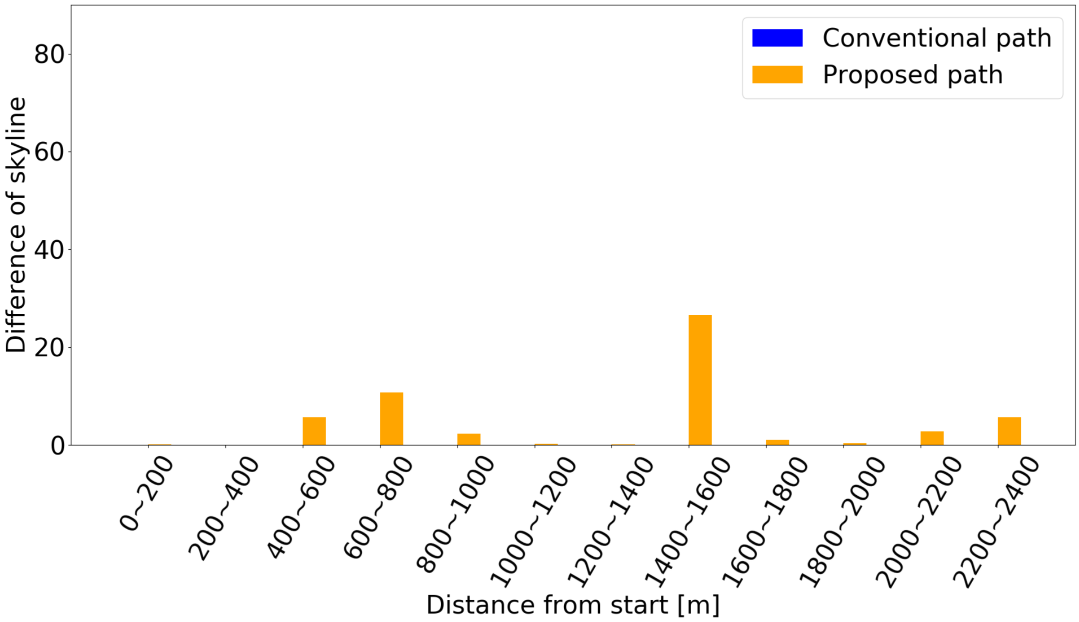

図 5.19: Sum of the difference of skyline in paths on the Mars surface (case 1, condition 2).

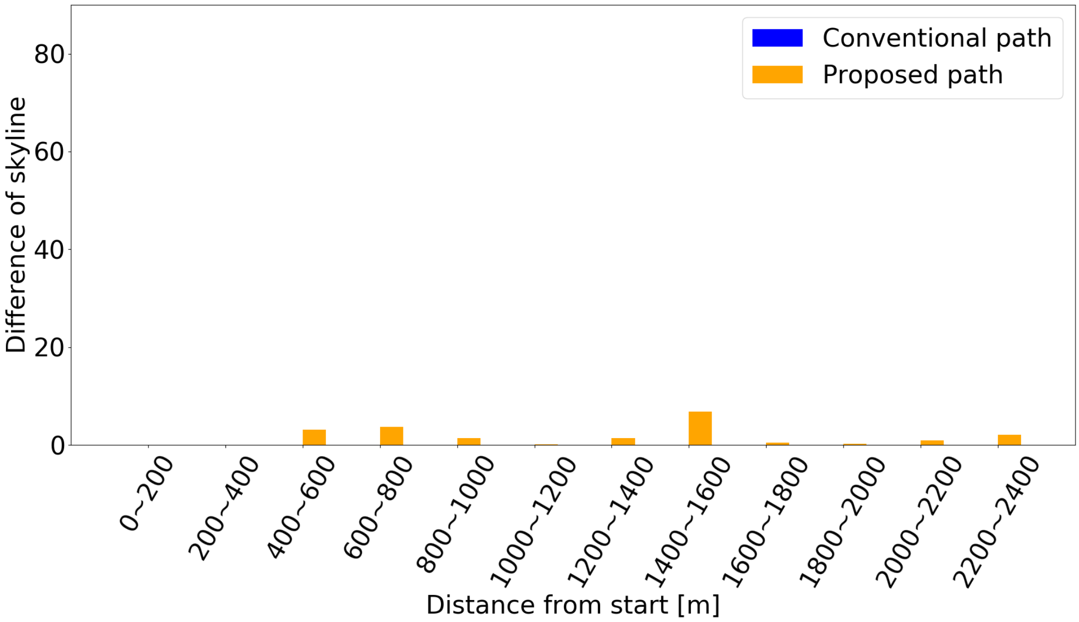

図 5.20: Sum of the difference of skyline in trajectories on the Mars surface (case 1, condition 2).

1-5).

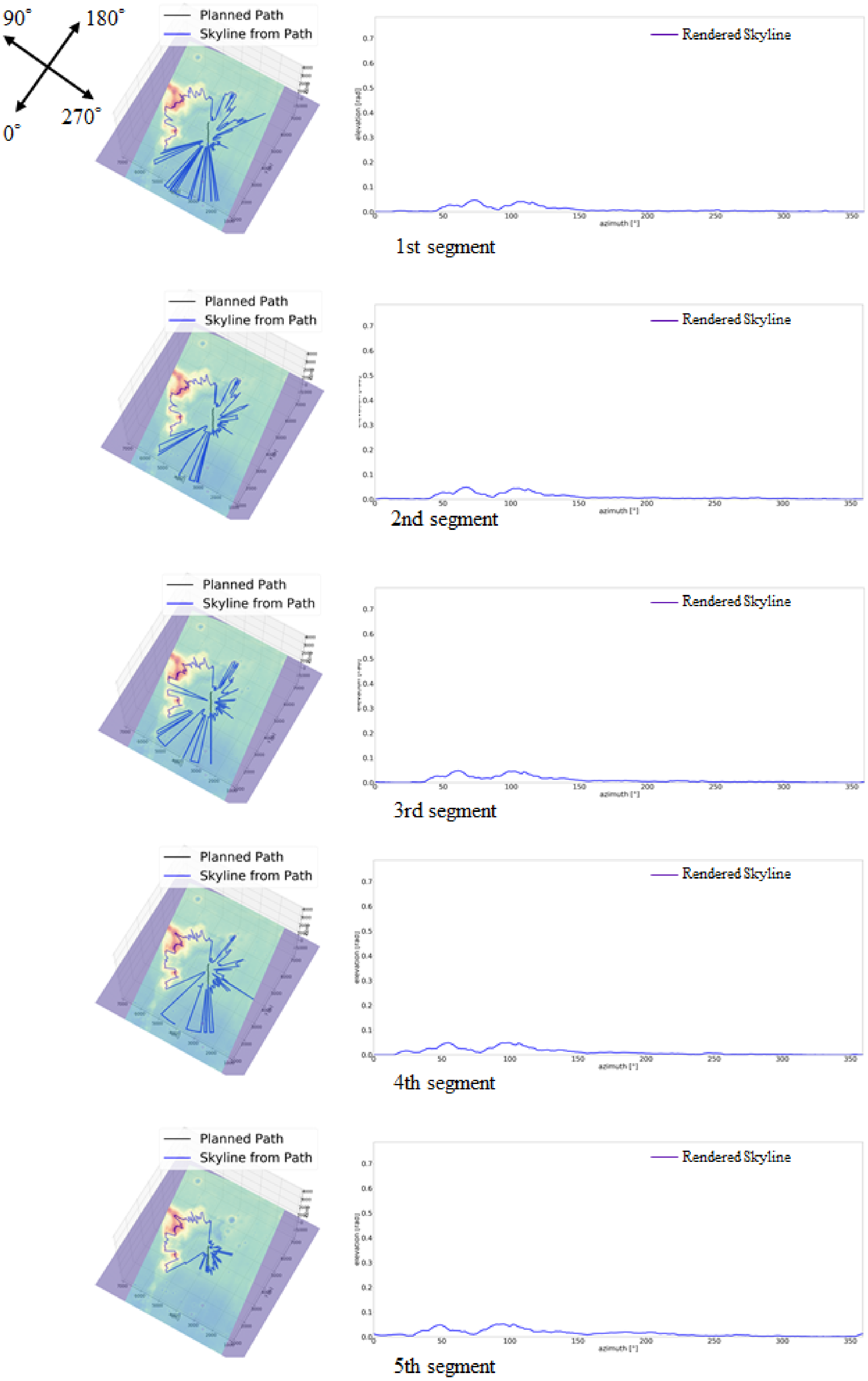

図 5.21: Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 1-5).

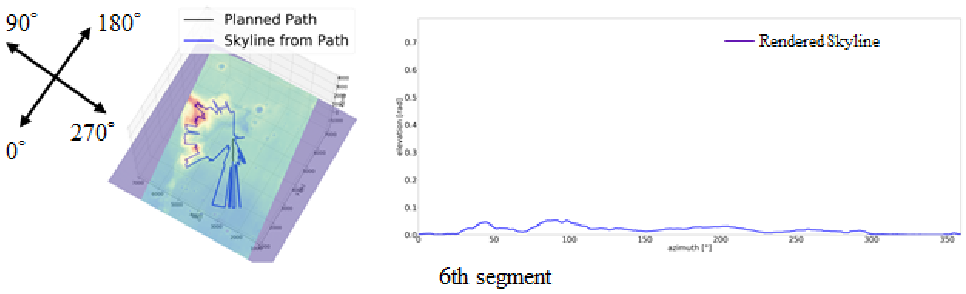

図 5.22: Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 6).

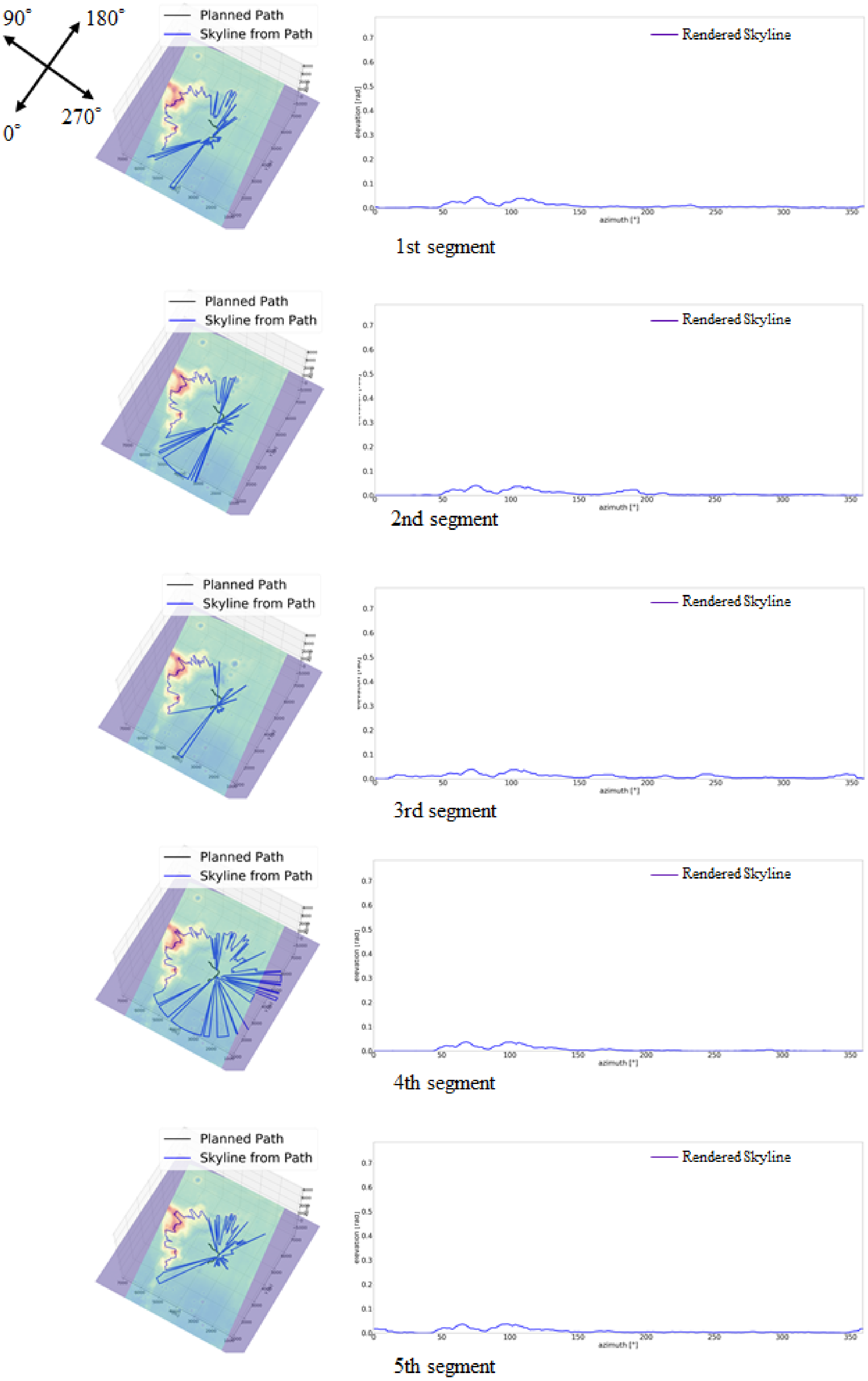

図 5.23: Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 1-5).

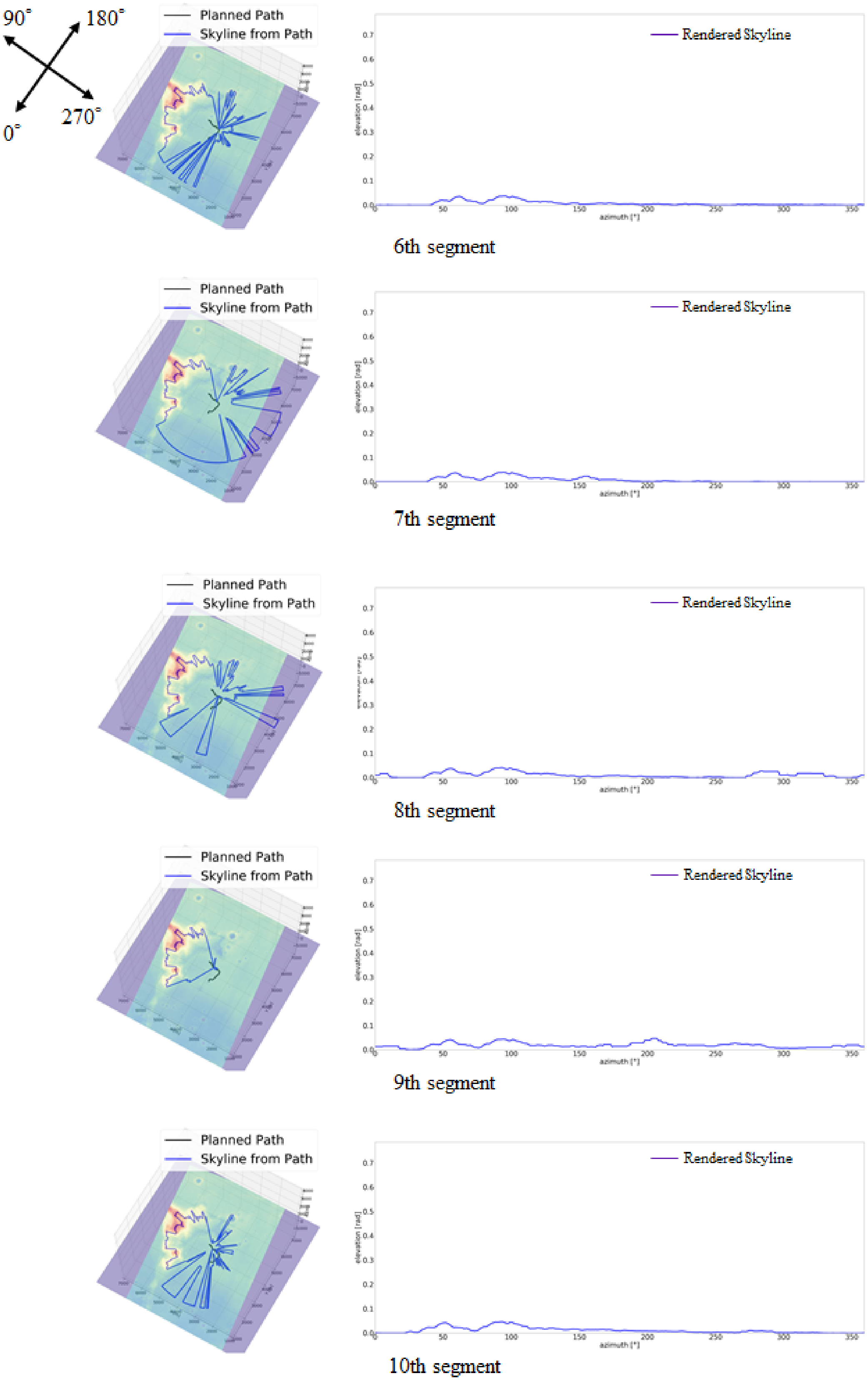

図 5.24: Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 6-10).

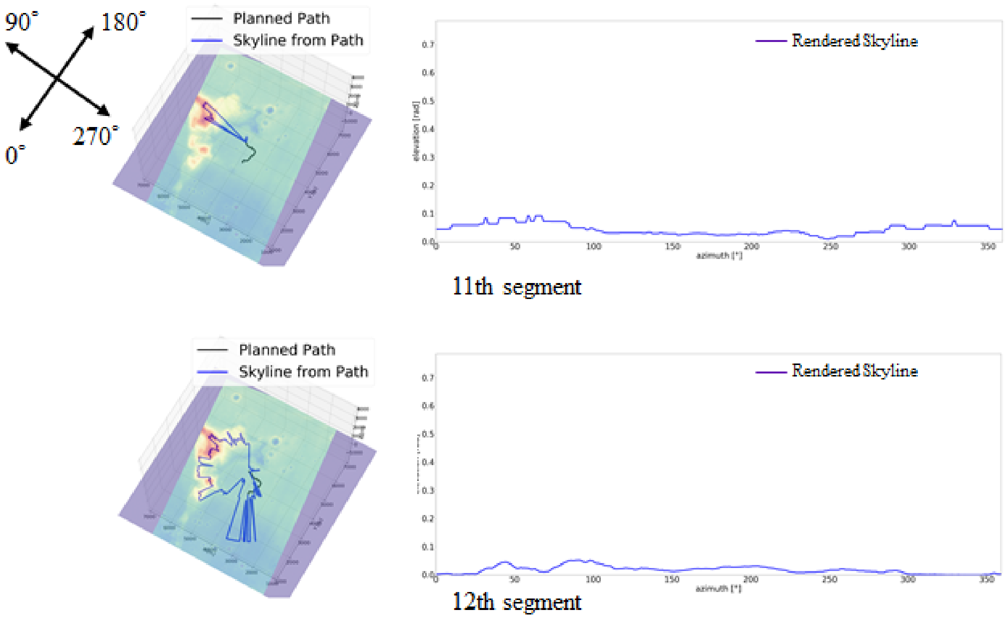

図 5.25: Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 1, condition 2) (segment 11-12).

5.2 ケース 2：月表面（南極域）

5.2.1 使用した地形情報

月表面の DEM データとして，Lunar Reconnaissance Orbiter の Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) による測定に基づいて作成されたものを用いた [42]。月表面においては，全域に渡って DEM が作成されているが，今回は特に南極付近の領域に注目した。本項で扱う DEM は，極域付近では 10 m/pixel の精度を持っている。

シミュレーションに用いた地形を図 5.26 に示す。火星表面の地形と比べ，全体的に細かい変化に富んだ地形であることが見て取れる。右図の通り，2 km 四方に拡大して見ても，数十 m 規模の丘やクレータ，尾根や谷が点在しており，観測する場所によってスカイラインも大きく異なって見えることが予想される。また，火星と比較すると傾斜条件も厳しく，比較的平坦な領域を選択して経路を計画することが必要である。

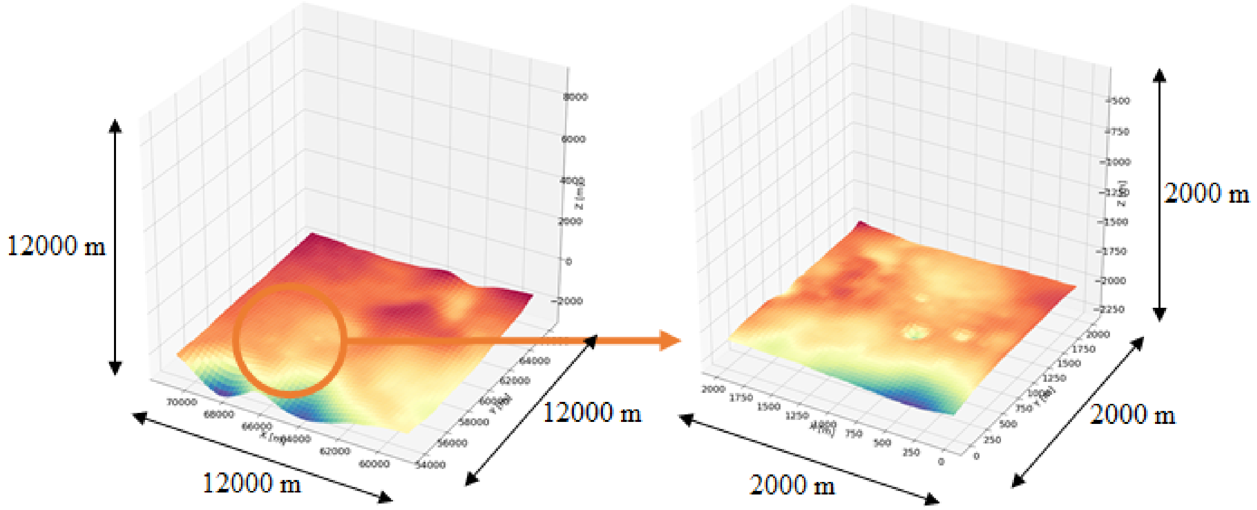

図 5.26: South pole region of the Moon (case 2).

5.2.2 経路計画シミュレーション

月南極付近の地形における経路計画の結果は図 5.27 のようになった。

経路長は，従来手法経路が 1456 m，提案手法経路が 2574 m となった。概観としては，従来手法経路がやや右まわりの直線的なルート，提案手法経路は S 字に蛇行したルートとなっている。このように経路が分かれたことには，2 つの経路の間に，始点と終点を結ぶ方向に伸びる尾根線が存在すること，そして終点付近にクレータが点在していることが関係していると考えられる。

始点から終点へ直線的に経路を描こうとすると，経路前半に存在する尾根を登ることになり，傾斜が大きくなってしまう。そこで，尾根を迂回することが求められるが，スカイラインの変化量を表す項の有無によって，この尾根をどのように巻くかという点で差異が生じた。従来手

法経路では，より距離が短く抑えられる右巻きが選択されている。一方，提案手法経路は初めは右へ進むものの，傾斜が緩くなったところで左へ方向転換し，その後の尾根を左から巻いている。

また，後半部分では，提案手法経路はクレータの近傍を通過しており，ケース 1 と同様の特徴が見られる。その結果，終点より奥側へ少し行き過ぎた後，迂回して戻ってくるような経路が得られている。

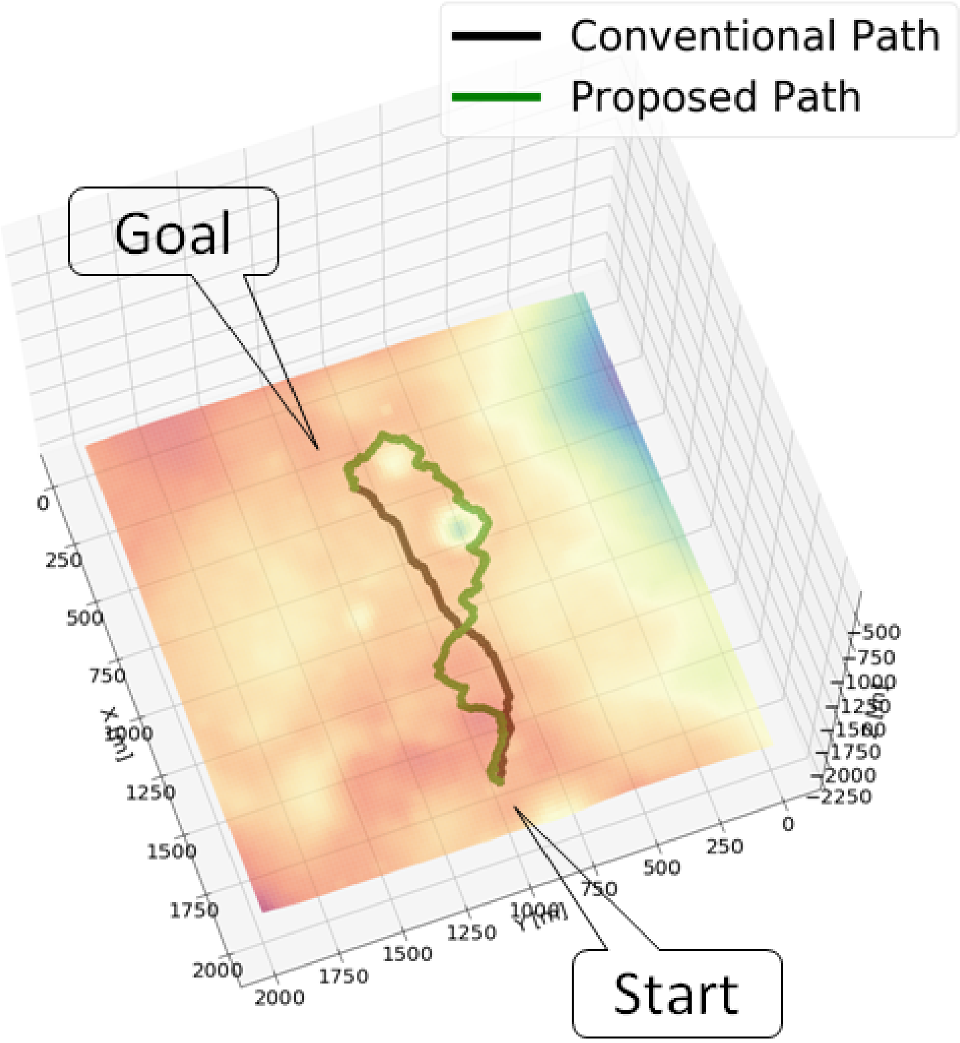

図 5.27: 2 paths on the Moon surface (case 2).

5.2.3　経路追従シミュレーション

条件 1：等区間数分割

仮想地形および火星表面の場合と同様に，仮想のローバによる経路追従のシミュレーションを実施し，位置推定誤差と経路追従誤差を検証した。

従来手法経路と提案手法経路における，位置推定誤差の平均値および分散を図 5.28，図 5.29

に示す。平均，分散ともに，提案手法経路における誤差が従来手法経路のものを上回っている区間が存在している。それ以外の区間に関しても，仮想地形や火星の場合と比較すると，全体を通じて 2 つの経路間の差異が小さくなっていると言える。しかしながら，これらの誤差の大きさは，総じて仮想地形や火星における場合と比較して小さくなっている。従来手法を用いた場合の，経路の終点での経路追従誤差の平均値が，仮想地形では約 80 m，火星表面では約 40 m だったのに対し，月面においては約 30 m。各 DEM における解像度を考慮すれば，経路終点での誤差は，仮想地形で約 8 ノード分，火星では約 8 ノード分，そして月面では約 3 ノード分であり，位置推定の容易性を考慮しない段階で既に他の地形と比較して経路を正確に追従できていると言うことができる。事実，位置推定誤差に注目すると，従来手法経路の区間 7，提案手法経路の区間 6 を除く全ての経路・区間において，ノード数にして 0〜2 個分程度の精度で位置推定に成功しており，特徴的な地形が豊富に存在する月極域の地形がスカイラインマッチングによる位置推定を容易にしていると考えられる。したがって，位置推定を考慮した提案手法による経路計画を用いても，改善の余地が少なかった可能性が高い。

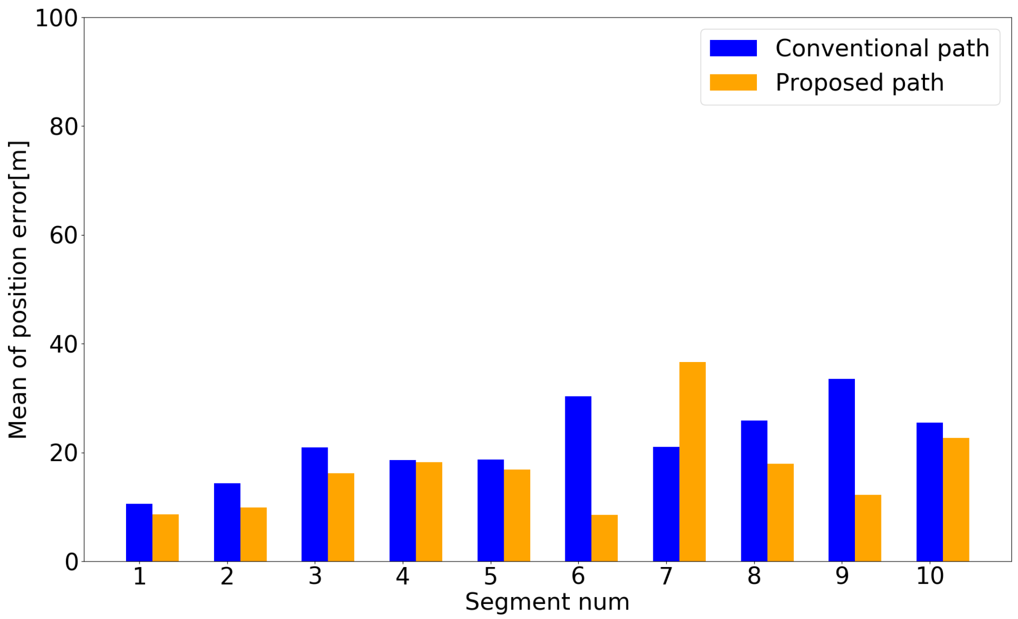

図 5.28: Mean of error of the localization on the Moon surface (case 2, condition 1).

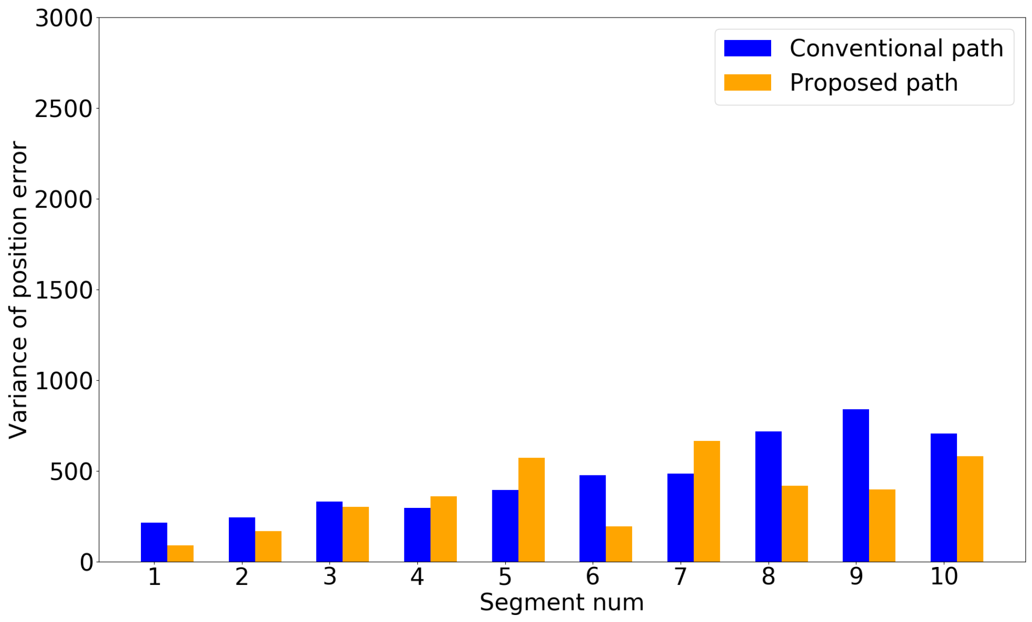

図 5.29: Variance of error of the localization on the Moon surface (case 2, condition 1).

図 5.30 に示したゴール到達率からも，そのことが裏付けられる。仮想地形および火星表面の場合と比較して，従来手法経路においてもゴール到達率が高くなっている。また，従来手法経路と提案手法経路とを比較すると，区間 6 と 7 におけるゴール到達率が特徴的である。区間 6 では提案手法経路の場合の到達率が，区間 7 では逆に従来手法経路の場合の到達率が，もう一方よりはるかに高くなっていることが見てとれる。この原因は，図 5.31，図 5.32 に示す，ローバの目標位置および到達位置を見ると理解できる。提案手法経路における区間 6 の終点はクレータを半ばほどまで下った位置にあり，周囲に特徴的な地形が豊富な，スカイラインマッチングによる位置推定がおこないやすい位置に存在している。対して，区間 7 の終点は，クレータの縁からやや離れた位置に存在し，周囲に地平線として観測できる大きな地形が少ない地点であることが予想される。これは，経路全体でのスカイラインの変化量を最大化しており，経路上の任意の地点で位置推定がおこないやすい経路が得られているわけではないためである。経路を等間隔の区間に分け，その終点で位置推定をおこなうという条件では，その位置推定実行地点で推定がおこないやすくなっていると必ずしも言うことはできない。

図 5.31，図 5.32 の 95% 信頼楕円の大きさを見ても，提案手法経路の区間 7 の終点においてローバの到達しうる領域が広がっていることが見て取れる。しかしながら，それ以降は終点までのすべての区間で従来手法経路と比べて信頼楕円が小さくなっており，経路終点の近傍への到達可能性は向上していると言える。

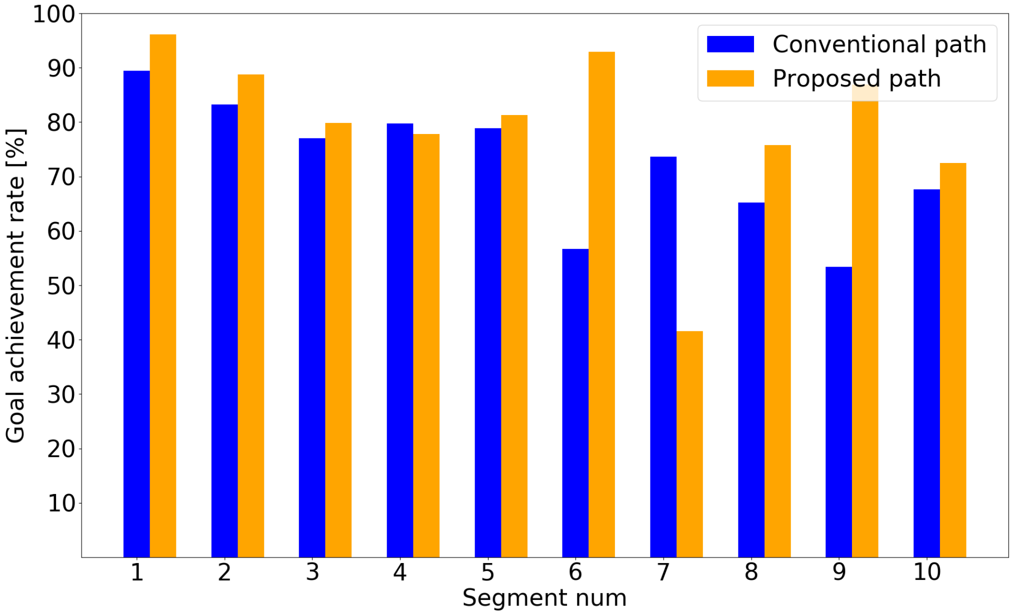

図 5.30: Goal reach rate on the Moon surface (case 2, condition 1).

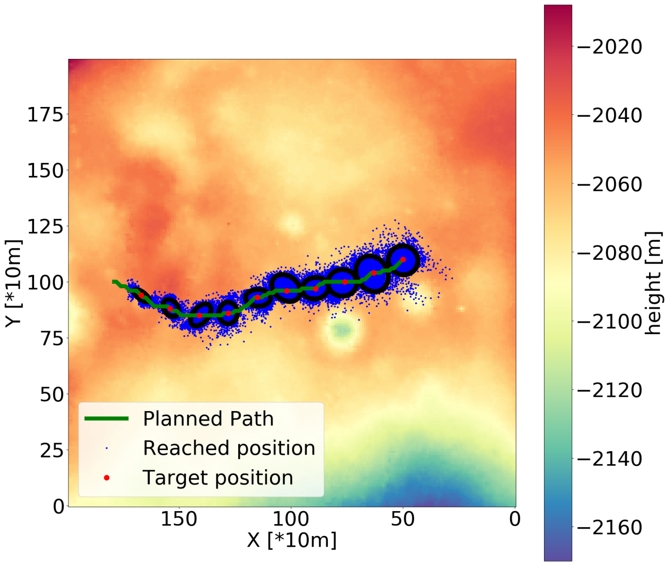

図 5.31: Reached position on the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 1).

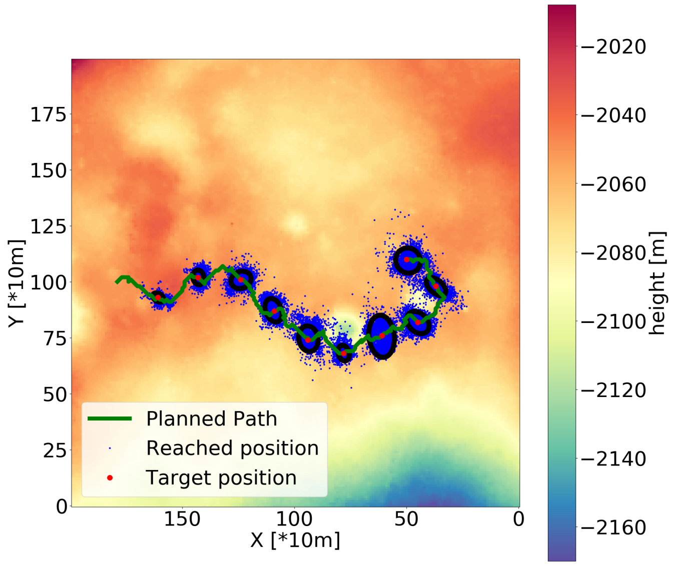

図 5.32: Reached position on the proposed path on the Moon surface (case 2, condition 1).

前述した区間 7 周辺における地形的な特徴は，図 5.33，図 5.34 に示す，スカイラインの変化量の合計にも現れている。経路上，ローバ軌跡上のいずれの場合においても，区間 7 におけるスカイラインの変化量の合計は他区間と比較して大きくなっている。これは，図 5.32 のように，区間 7 がクレータの中腹から登りきるまでの区間であるためである。しかしながら，区間 7 の終点自体は登りきった地点にあり，その周囲は比較的開けているため，終点ではスカイラインが十分に観測できていない。このことは，後述するスカイラインの存在位置を見ても確認できる。また，図 5.33 と図 5.34 を比較すると，区間 6，7，8，10 においてはローバ軌跡上から観測されるスカイラインが経路上から観測されるものと比較してより大きな変化量を持っている。これは，図 5.32 にも示されているように，ローバが経路から外れた結果としてクレータの深い位置まで落ち込んでしまうケースが存在するためである。クレータ内ではスカイラインの変化量が増大することがあるが，一方で傾斜角も大きくなってしまい，ローバにとってのリスク要素となる可能性がある。本研究で提案する経路計画手法では，クレータやピークの付近を積極的に通過するような経路が計画されやすいため，傾斜の大きい領域に入り込んでしまう可能性があることには注意が必要である。

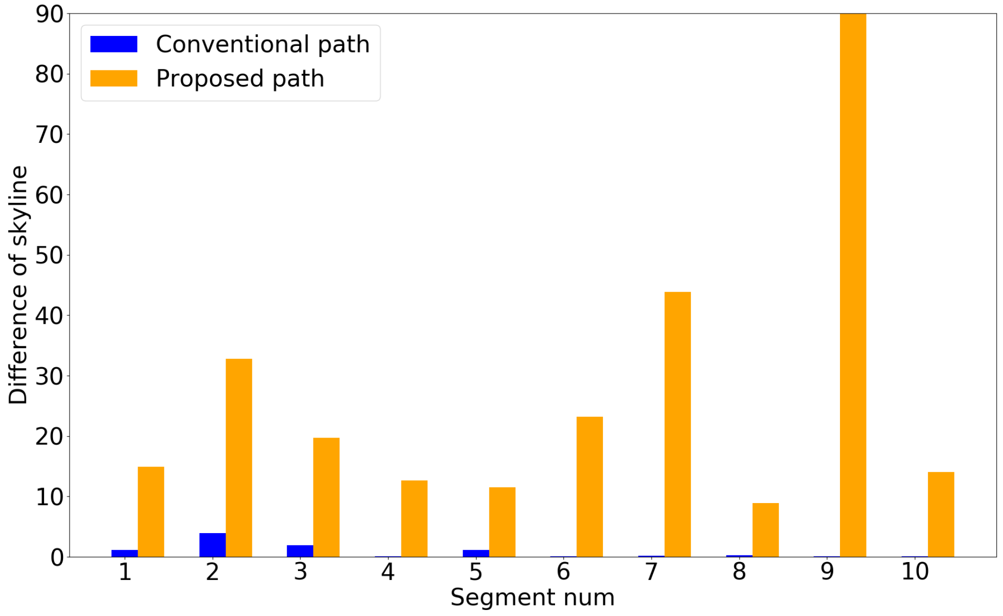

図 5.33: Sum of the difference of skyline in paths on the Moon surface (case 2, condition 1).

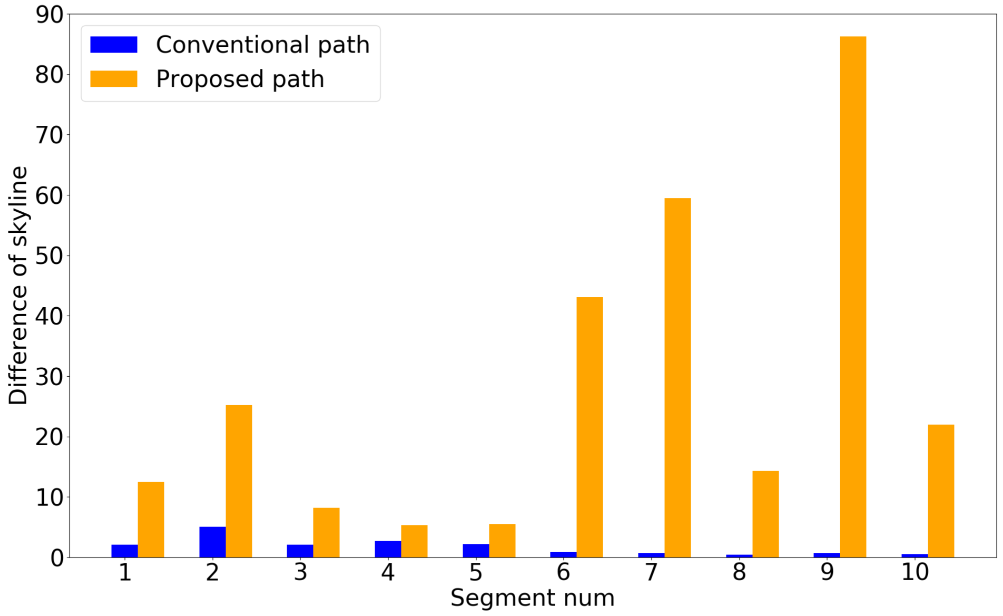

図 5.34: Sum of the difference of skyline in trajectories on the Moon surface (case 2, condition 1).

最後に，図 5.35，図 5.36 に従来手法，図 5.37，図 5.38 に提案手法の場合の，経路上の各区間の終点から観測されるスカイラインを示した。特に経路の前半での，スカイラインの存在位置（左図）の違いが顕著である。従来手法経路の区間 2〜6 では，経路の右側（図の左下，方位角 0°）方向 のスカイラインの存在位置が非常に遠くに扇型状に描かれている。これは，当該方向にローバの存在位置よりも標高の低い地点しか存在せず，地平線が観測できていないことを示している。右図においても，方位角 300° から 0° の区間ではスカイラインが観測できないことが見て取れる。

一方で，提案手法経路では，区間 4 以外では経路の右側方向のスカイラインの存在位置がごく近くにあり，実際にスカイラインの形を見ると，従来手法の場合と比較して仰角が 0 になっている方位角が少ないことが見て取れる。これは，前述の通り，尾根の巻き方が異なることに起因している。従来手法経路は尾根の右側を通過しているが，経路から見て右側は概して一様な下り斜面になっており，スカイラインとして観測できる地形がほぼ存在しない。それに対し，提案手法経路は尾根の左側を通過することで，当該の尾根とさらにその左側の尾根に挟まれた谷間を通っている（図 5.39）。これにより，左右両側にスカイラインとして観測できる地形が存在するようになり，スカイラインの変化量が大きい経路となっている。

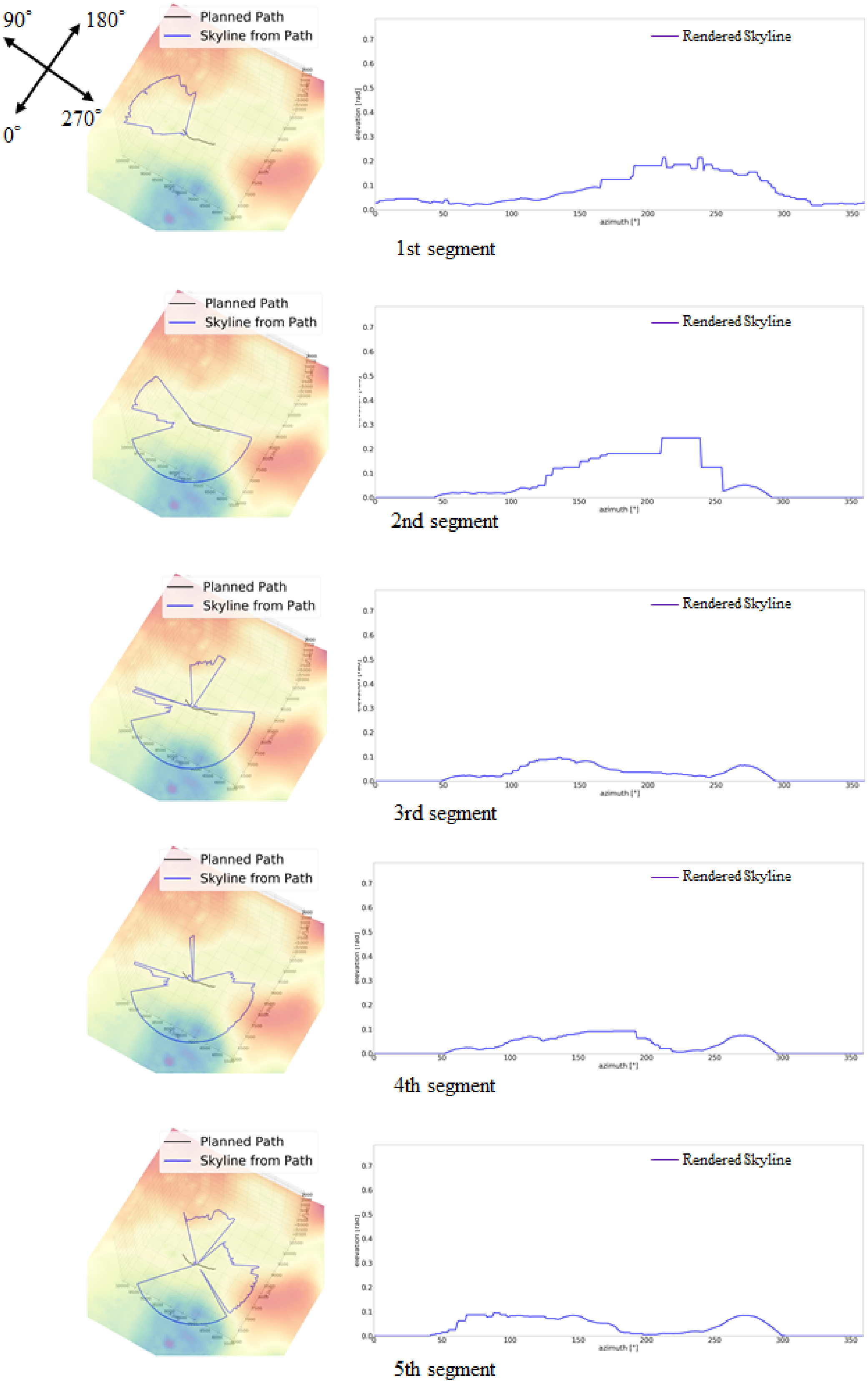

図 5.35: Skylines from the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 1) (segment 1-5).

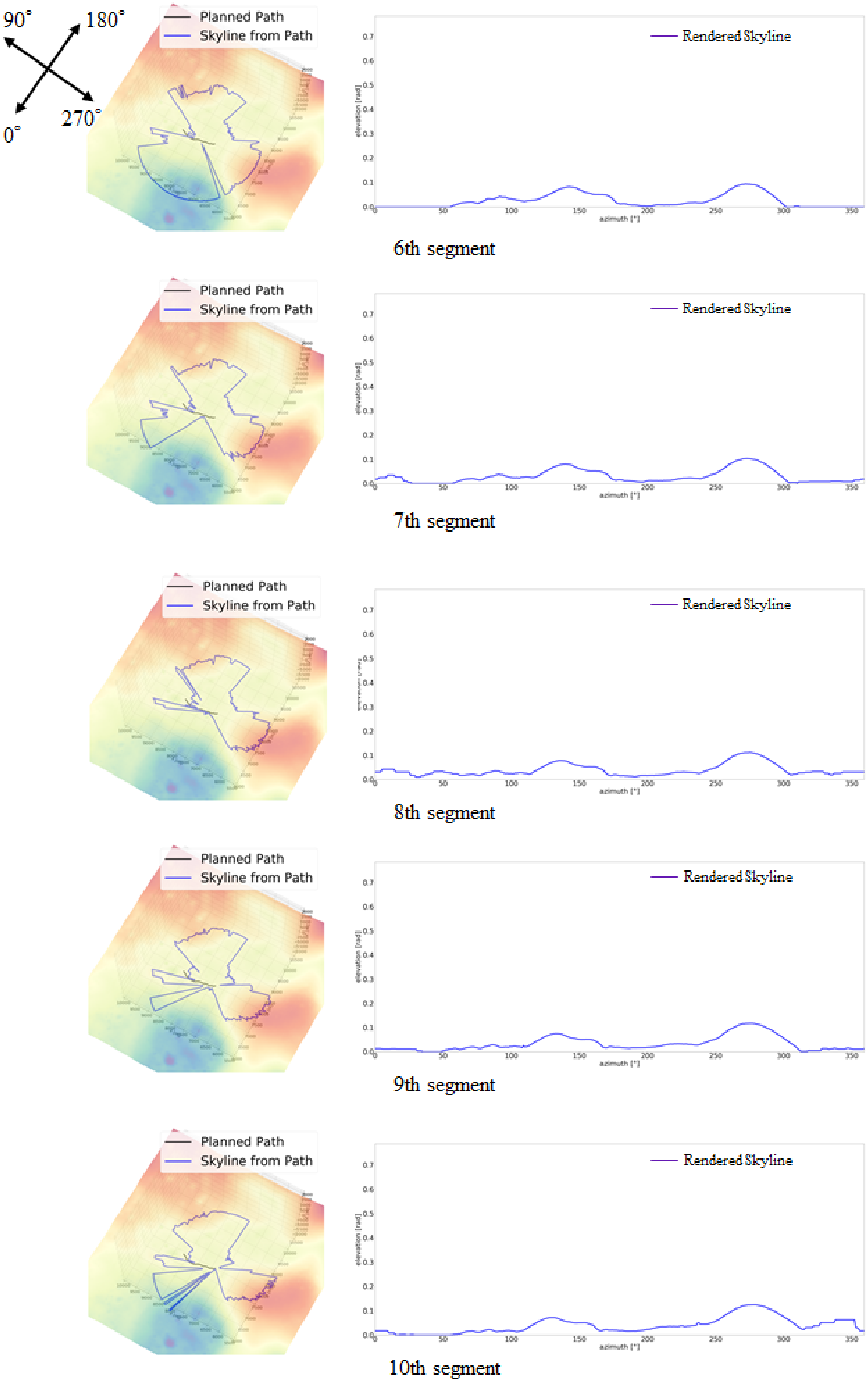

図 5.36: Skylines from the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 1) (segment 6-10).

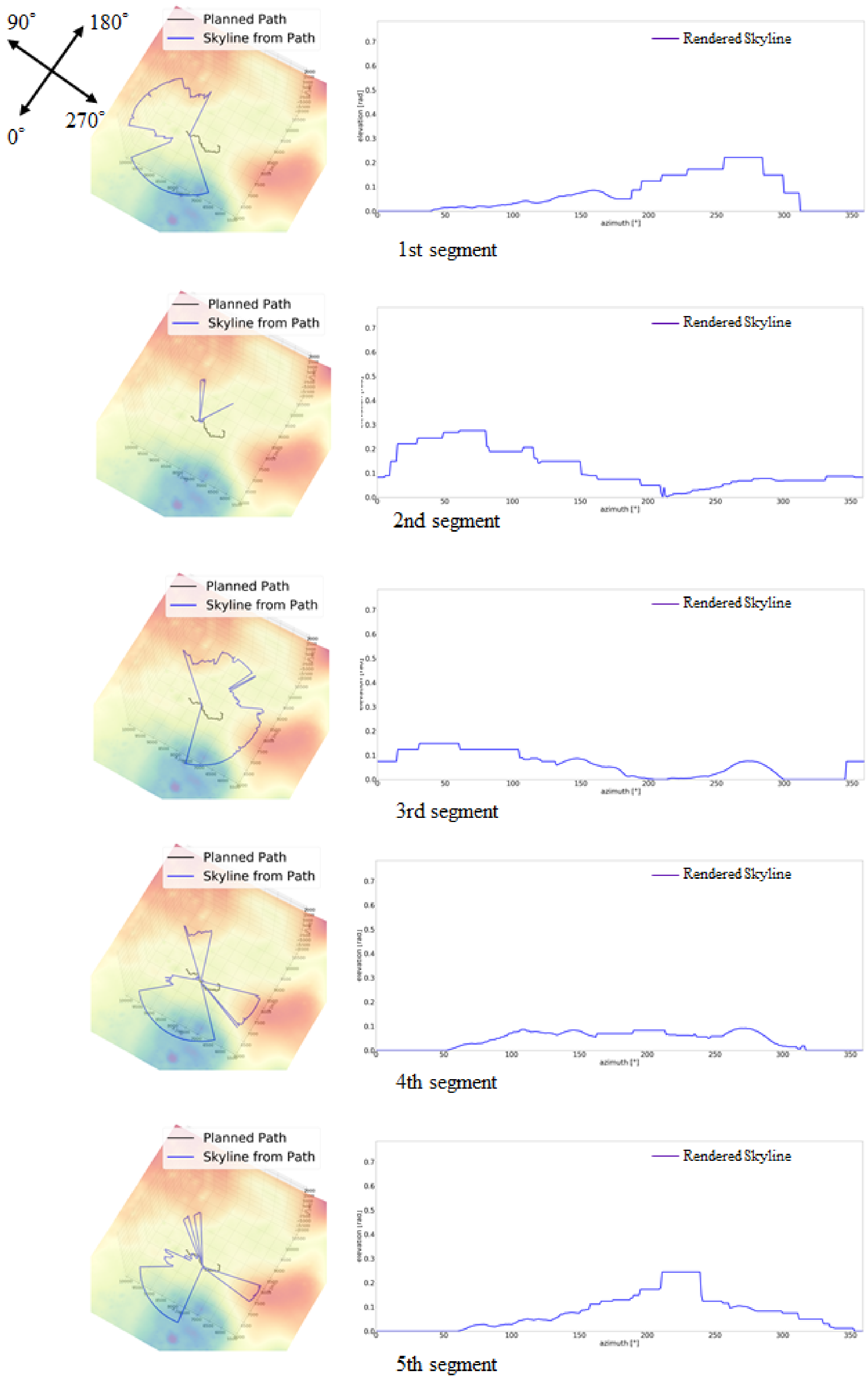

図 5.37: Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 1) (segment 1-5).

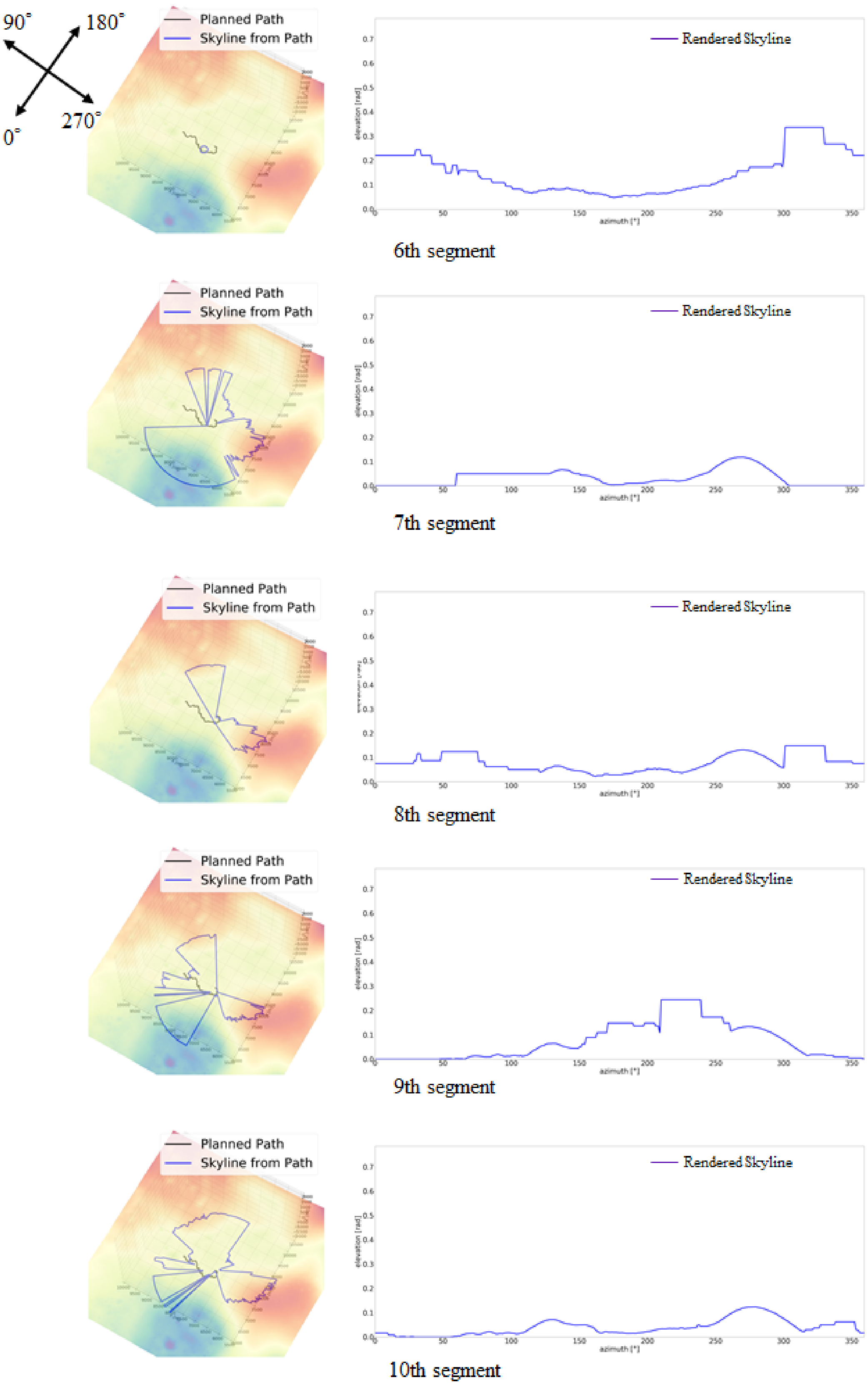

図 5.38: Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 1) (segment 6-10).

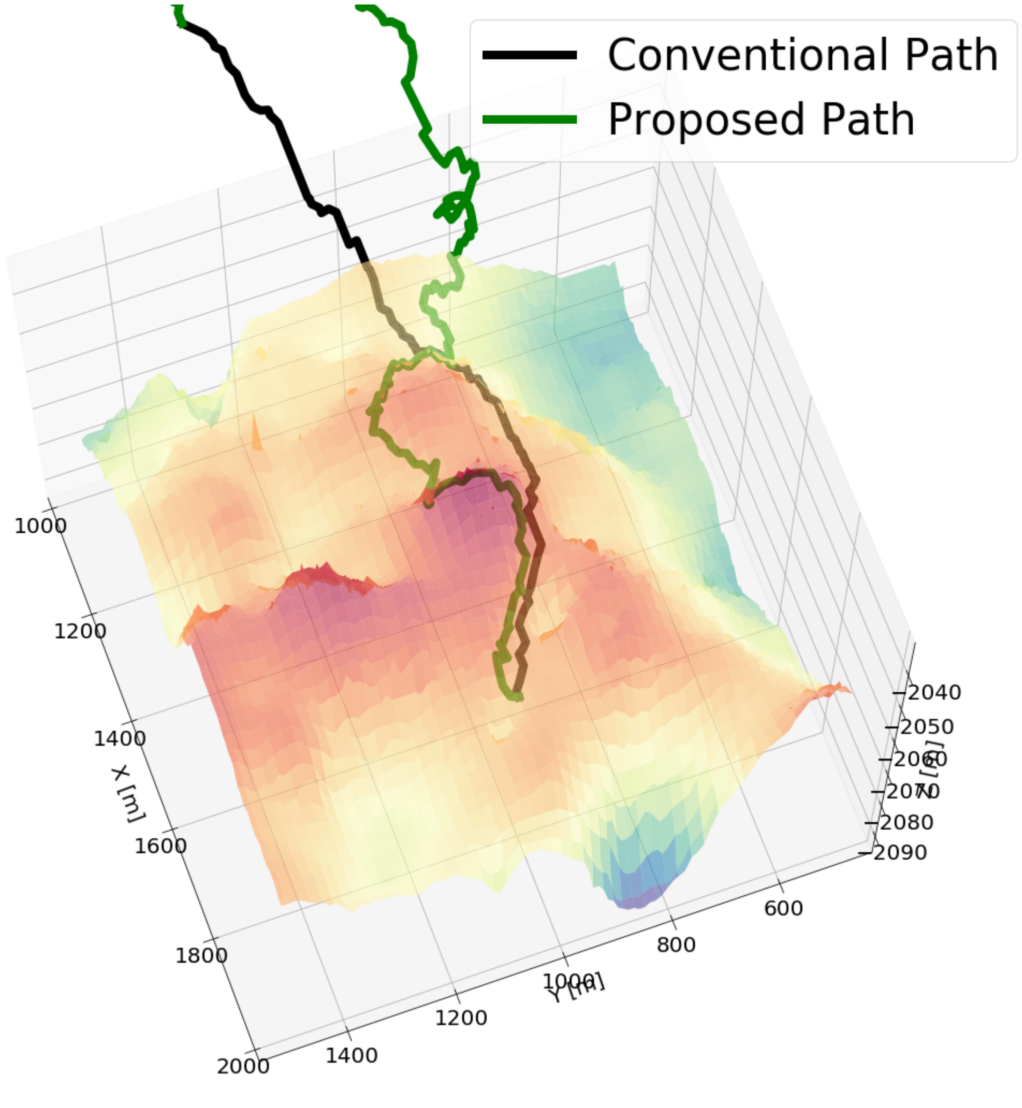

図 5.39: Terrain characteristic of 2 paths on the Moon surface (case 2).

条件 2：等距離分割

経路を 200 m ずつに分割した場合について，誤差の平均値と分散を図 5.40，5.41 に示した。条件 1 の場合と同様に，仮想地形のケースや前述のケース 1 と比較して，誤差は全体的に小さくなっている。しかし，最初の区間以外では提案手法による誤差の改善が見られ，平均誤差は最大で 57.9%，分散は 60.7% 減少した。

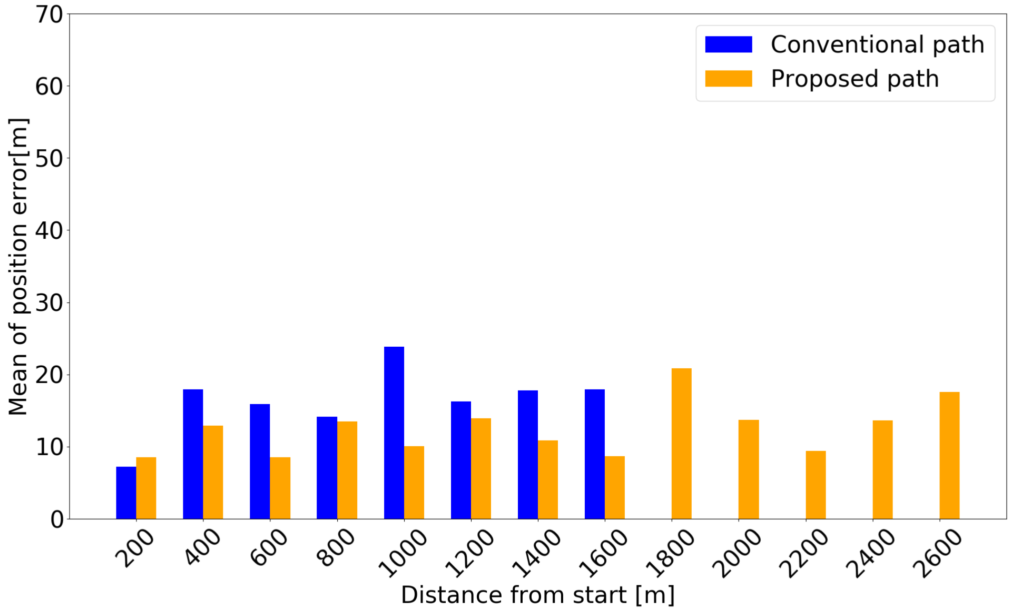

図 5.40: Mean of error of the localization on the Moon surface (case 2, condition 2).

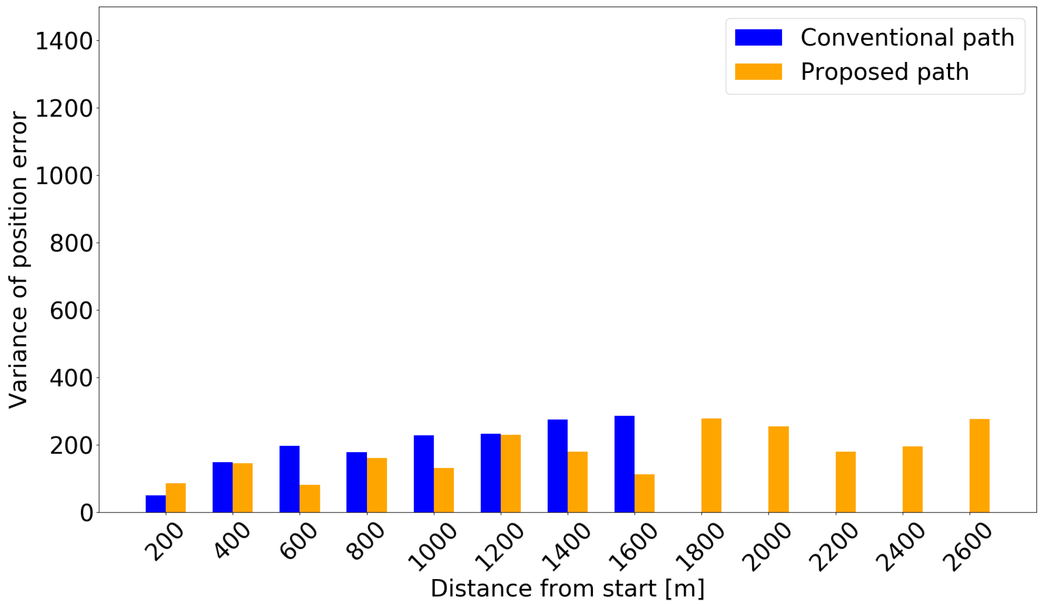

図 5.41: Variance of error of the localization on the Moon surface (case 2, condition 2).

図 5.42 に示したゴール到達率についても，やはり全体として高く現れており，いずれの経路

においても常に 60% 以上となっている。平均誤差が従来手法経路において大きく増加している 1200 m 地点においては，提案手法経路の到達率が従来手法を大きく凌駕しているが，その次の地点では従来手法経路でも到達率が 80% 以上に回復しており，2 つの経路に有意な差はないと考えるべきである。最終的な経路の終点への到達率についても，従来手法で 83.0%，提案手法で 83.1% とほぼ等しくなっている。このことは，前述の通り，月南極域においてはスカイラインマッチングによる位置推定が容易であることが主因であると考えられる。

また，図 5.43 および図 5.44 にも，条件 1 と同様の傾向が現れている。いずれの経路においても到達位置は目標位置の近くに集中しており，細かい地形が豊富に存在する月面上では位置推定が精度よく実行可能であるということが示されている。

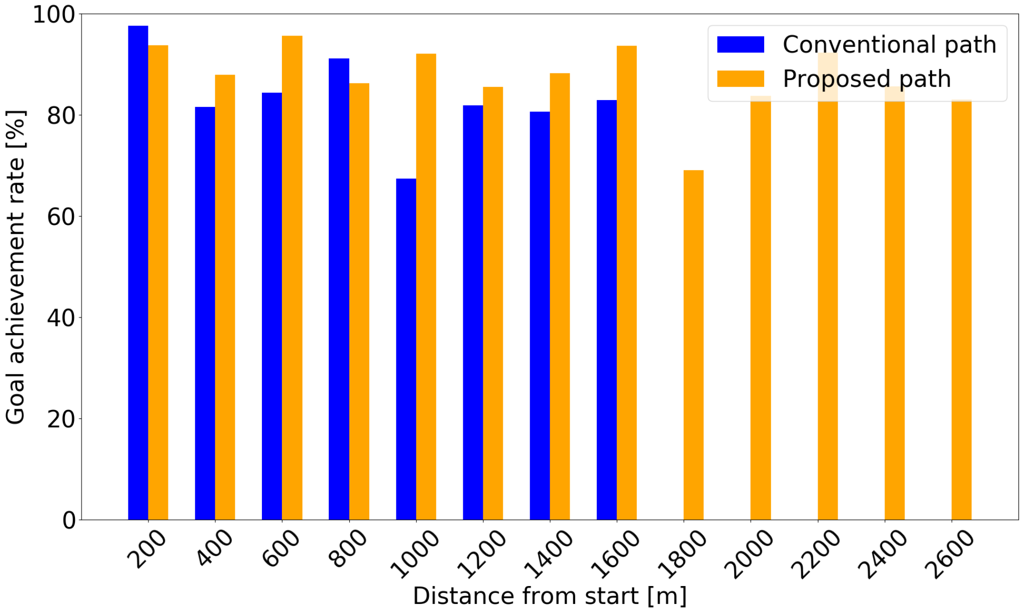

図 5.42: Goal reach rate on the Moon surface (case 2, condition 2).

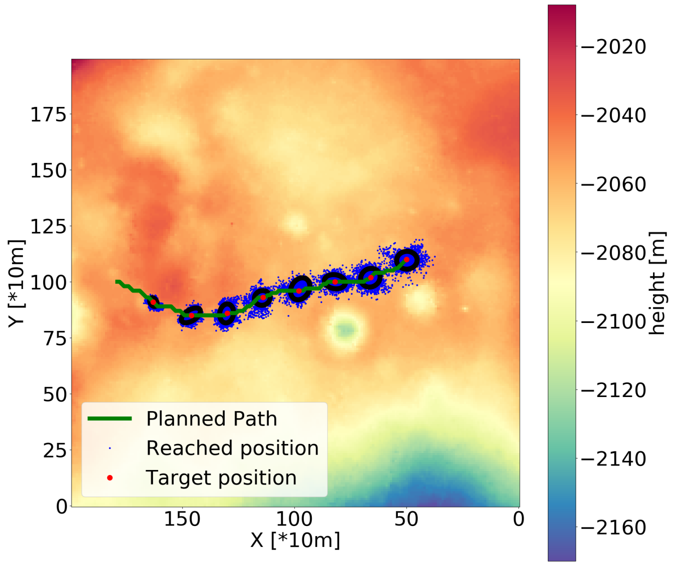

図 5.43: Reached position on the conventional path on the Moon surface (case 22, condition 2).

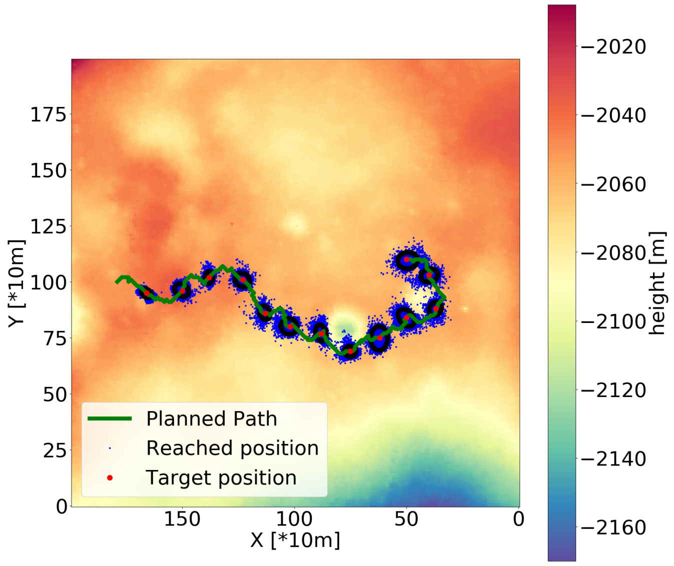

図 5.44: Reached position on the proposed path on the Moon surface (case 2, condition 2).

図 5.45，5.46 は，経路上およびローバ軌跡上におけるスカイライン変化量である。条件 1 の場合と同様に，提案手法経路の終盤で特に変化量が増大している。実際，2200 m 地点では位置

推定誤差が低下しており，スカイライン変化量の増加がこれに寄与しているとも考えられるが，前述の通り，経路を通じてスカイラインが大きく変化していても，位置推定の実行位置で推定が容易になっているとは限らないことに注意が必要である。

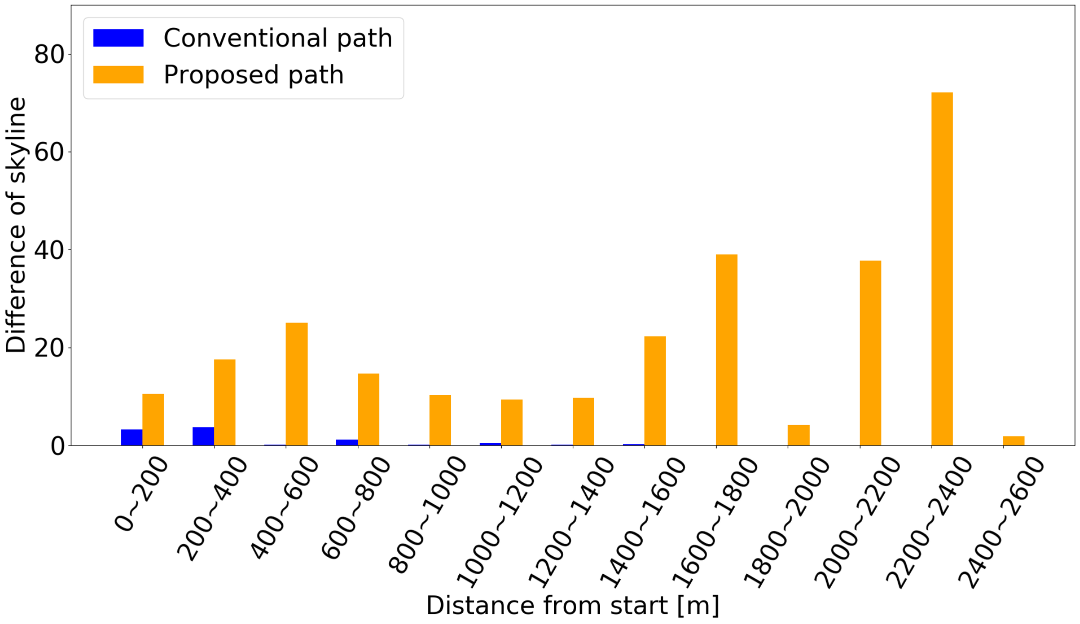

図 5.45: Sum of the difference of skyline in paths on the Moon surface (case 2, condition 2).

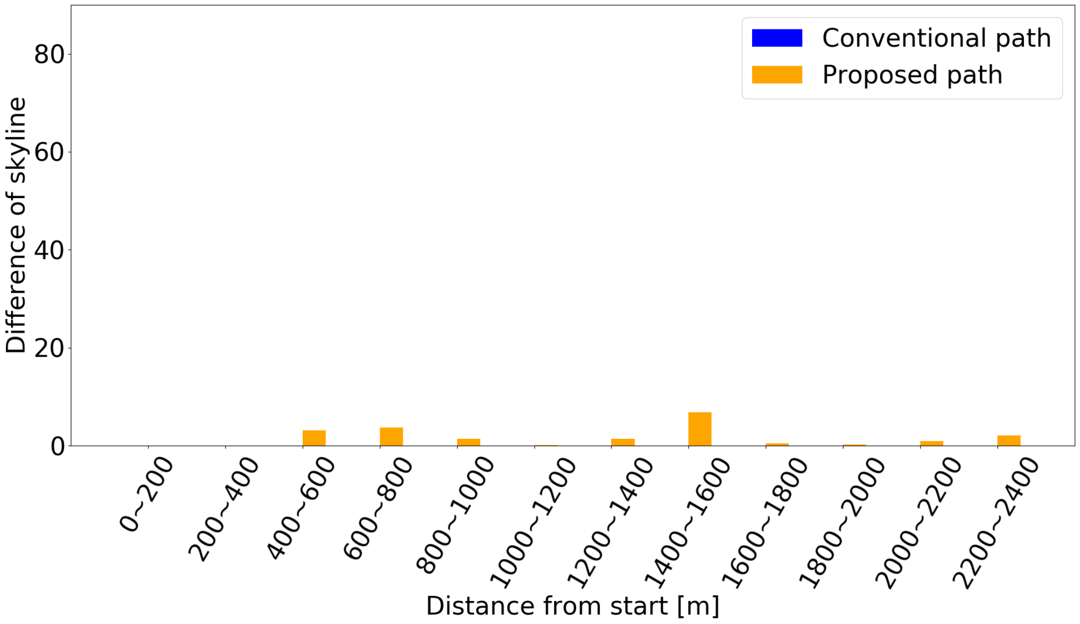

図 5.46: Sum of the difference of skyline in trajectories on the Moon surface (case 2, condition 2).

最後に，経路上から観測されるスカイラインを図 5.47〜図 5.51 に示した。提案手法経路について（図 5.49，5.50，5.51）目を向けると，特に区間 7，8，11 などでスカイライン上に地形が大きく現れていることが見て取れる。実際，これらの区間では位置推定誤差が非常に小さくなっており（5.40），特徴物の近くを通過することでスカイラインに地形的な特徴を反映し，スカイラインの変化を大きくすることが，スカイラインマッチングによる位置推定において重要であることが改めて確認できる。しかしながら，前述の通り，経路の終点への到達率という観点では，従来手法と提案手法とで大きな差はなく，従来手法経路でも十分な追従性があると考えることもできる。位置推定精度をどこまで考慮する必要があるかは今後の課題の 1 つである。

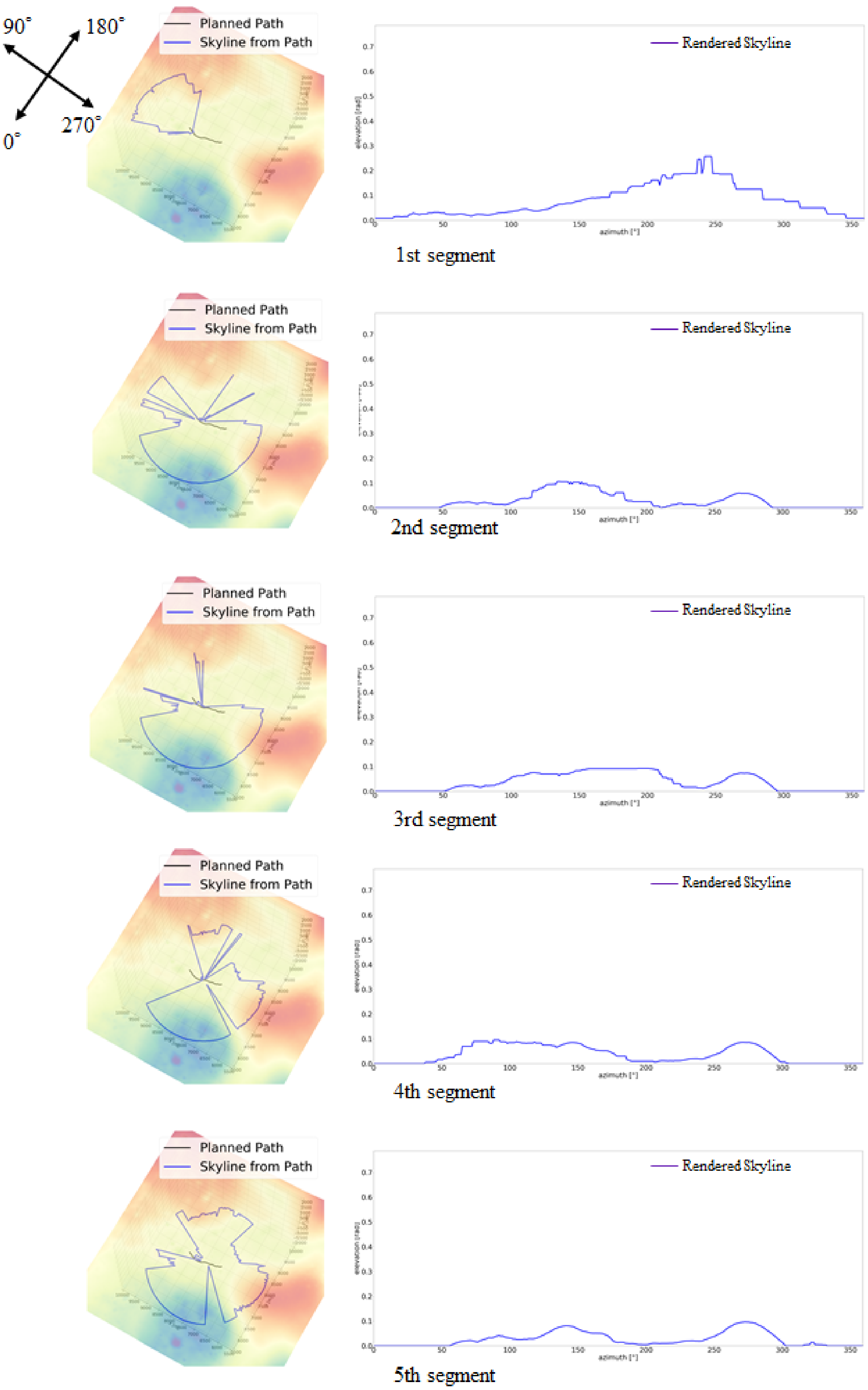

図 5.47: Skylines from the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 1-5).

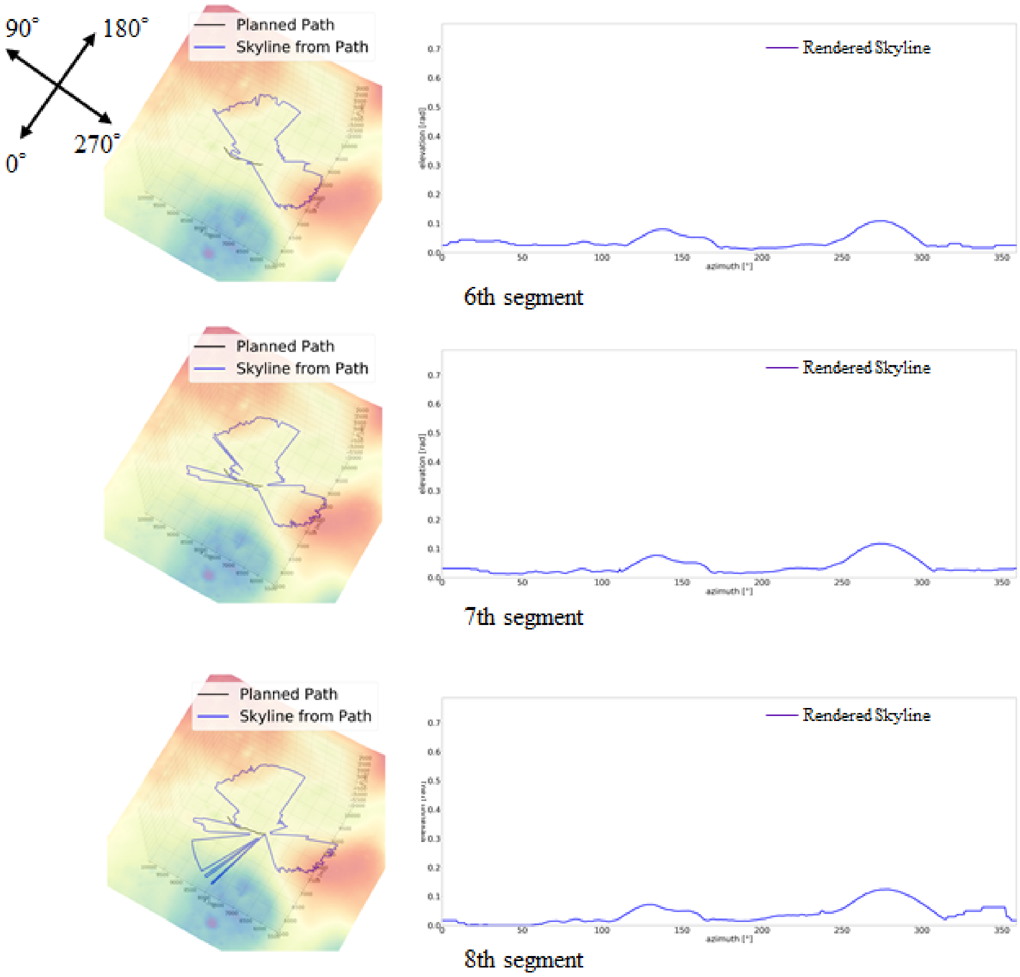

図 5.48: Skylines from the conventional path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 6-8).

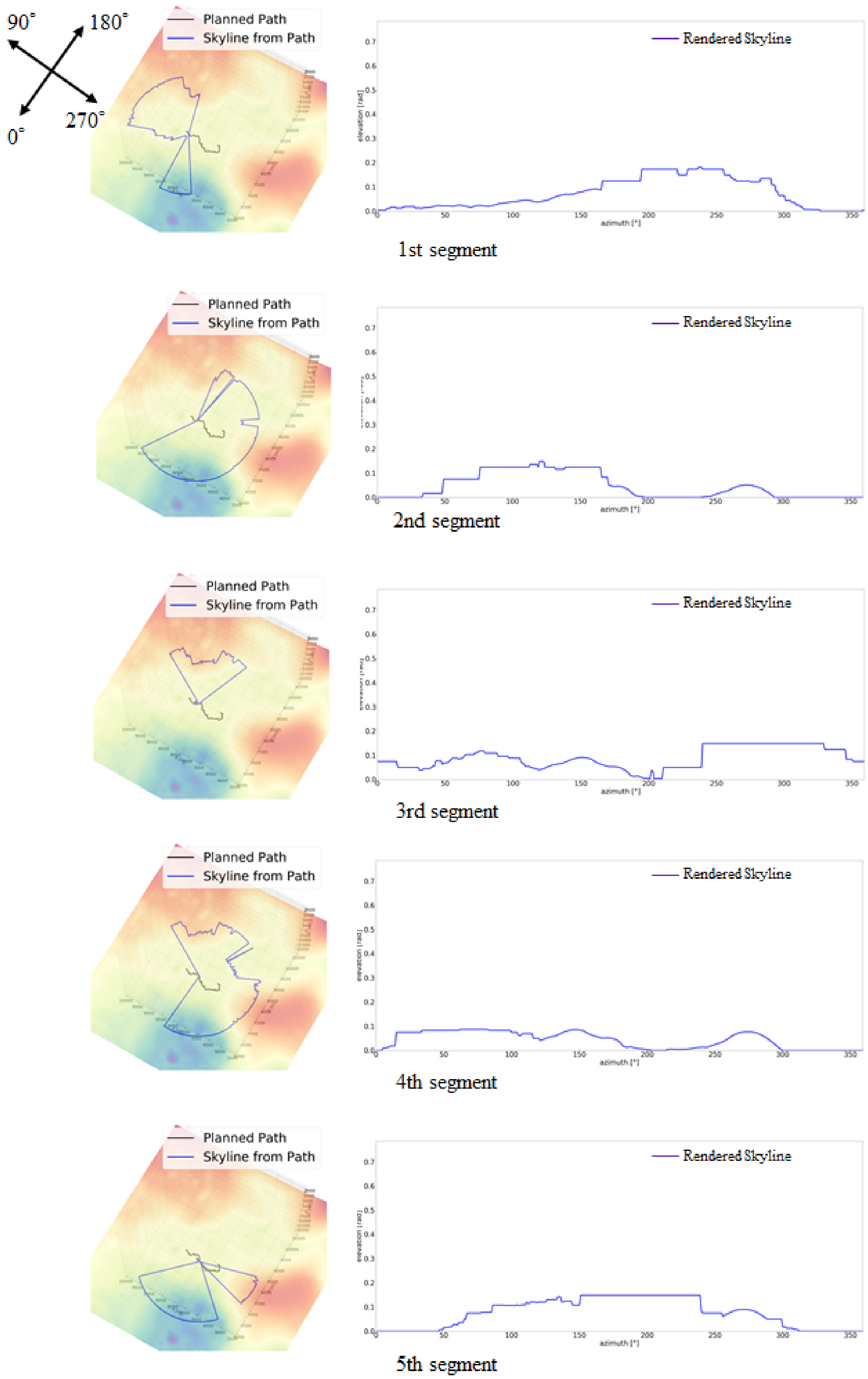

図 5.49: Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 1-5).

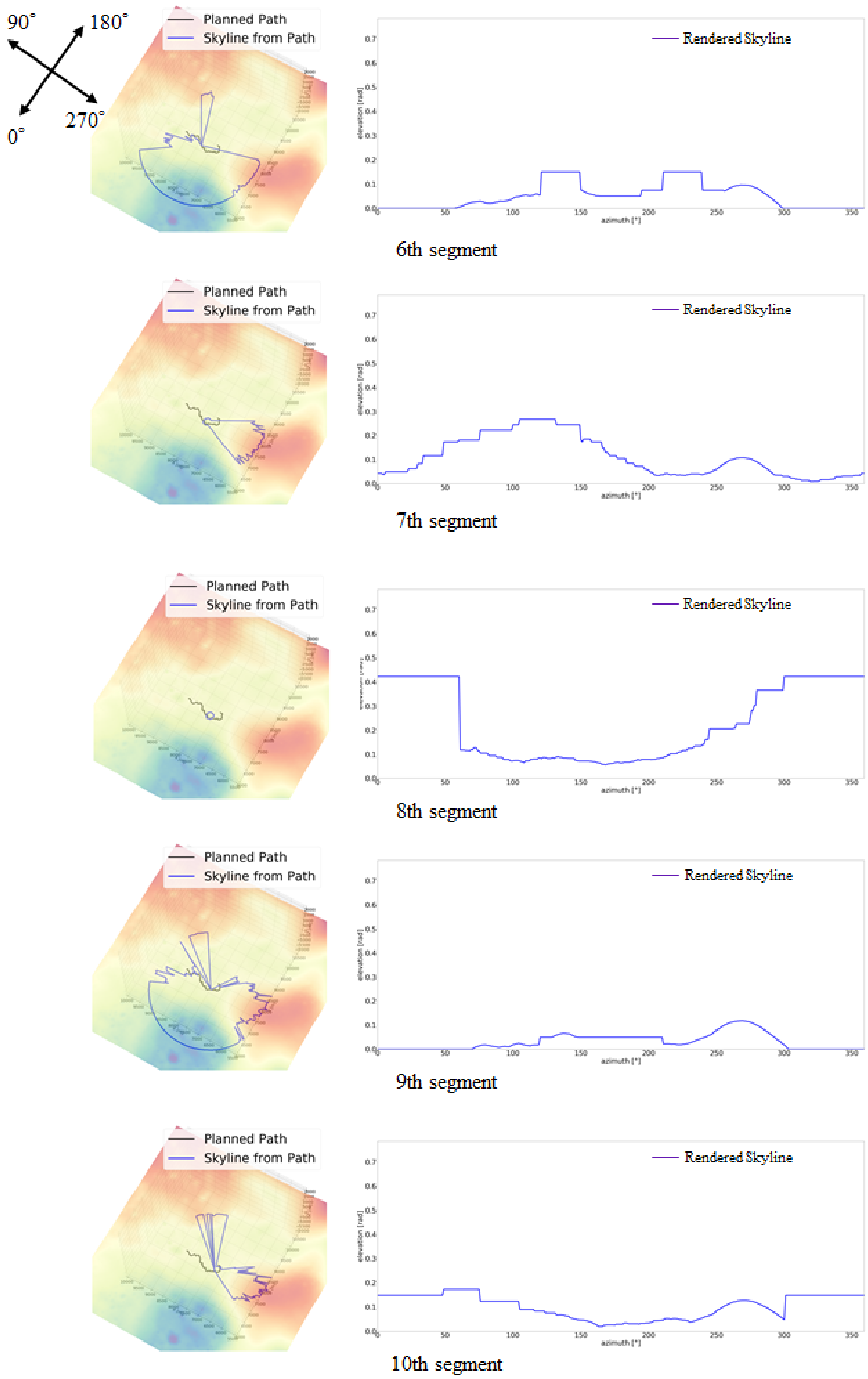

図 5.50: Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 6-10).

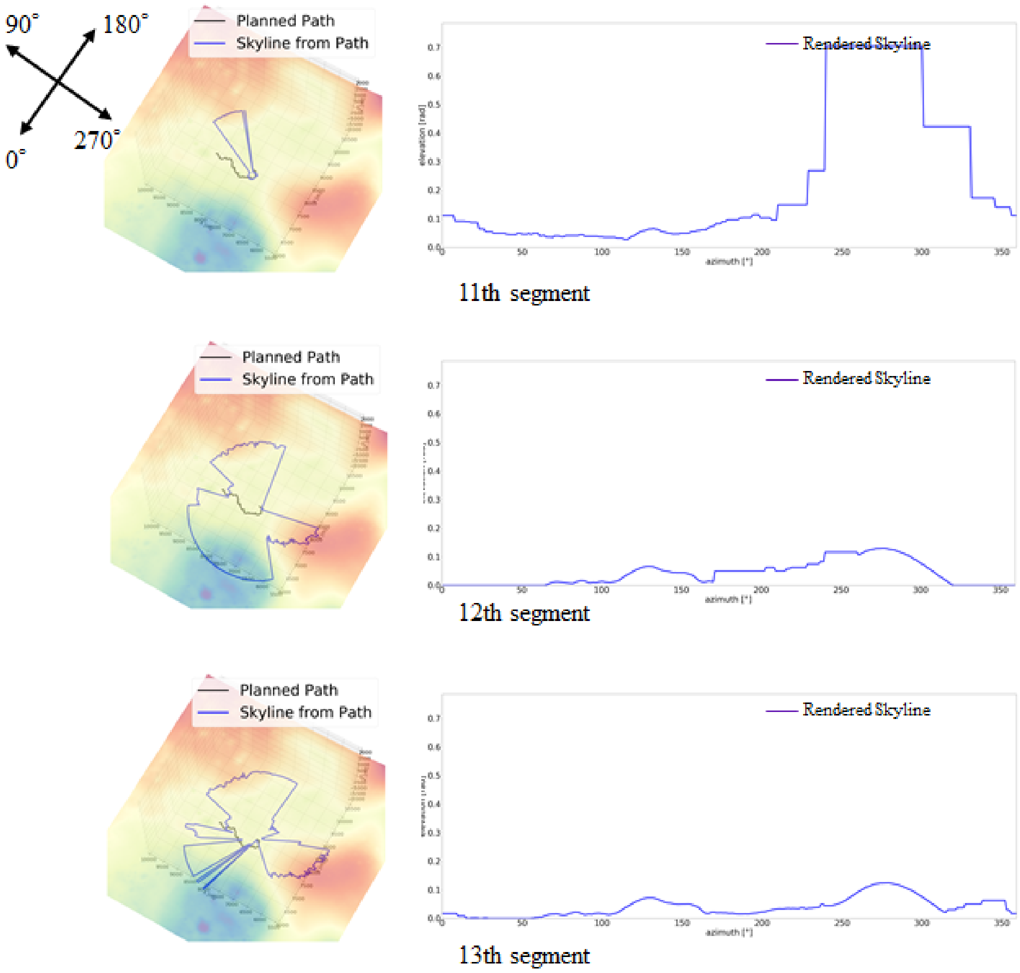

図 5.51: Skylines from the Proposed path on the Moon surface (case 2, condition 2) (segment 11-13).

5.3　ケース 3：火星表面（クレータ内部）

5.3.1　使用した地形情報

ケース 1，2 では，スカイラインとして観測可能な地形が多様に存在する地形を取り扱ったが，一様な地形条件の下でも検証をおこなうため，図 5.52 のような火星表面に存在するクレータ内部での経路計画を実施した。大規模なクレータの底部においては，クレータの縁が確実にスカイラインとして観測される一方で，他の地形が地平線上に現れにくいため，どこから観測してもスカイラインが似通ってしまうことが考えられる。

DEM データは，ケース 1 と同様に HiRISE によるものを用いた [28]。解像度についても同様に，0.98 m/pixel の精度を持つデータを 4.9 m/pixel に間引きしている。

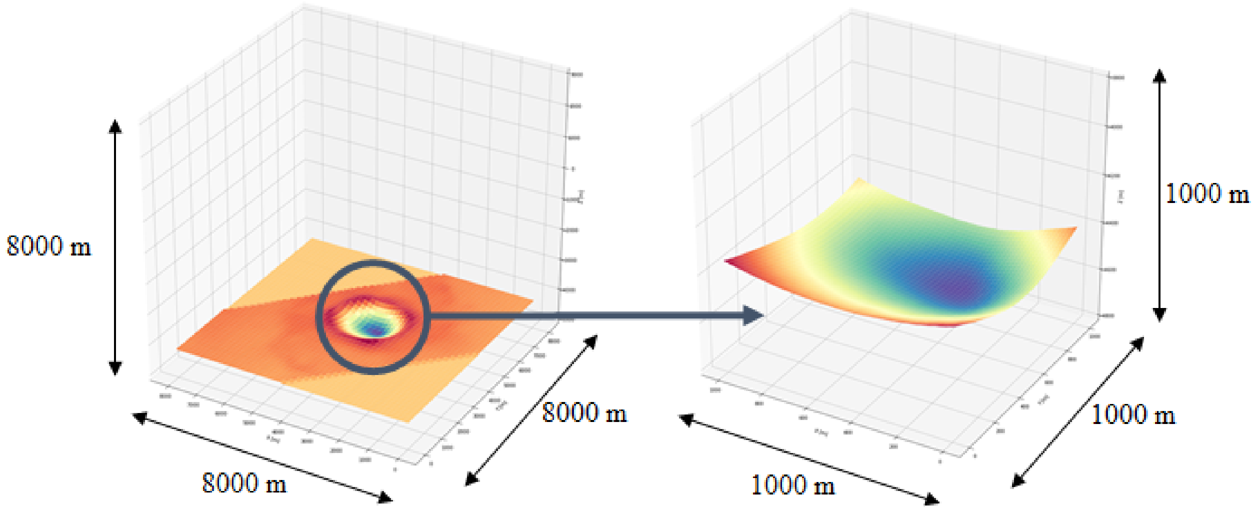

図 5.52: Crater on northern plains of the Mars (case 3).

5.3.2　経路計画シミュレーション

前項で述べたクレータ内部において従来手法および提案手法によって経路計画をおこなった結果を図 5.53 に示す。ここでは，クレータの底付近から縁方向へ登っていくような経路を想定している。

経路長は，従来手法経路が 916 m，提案手法経路が 946 m となった。いずれの経路も，始点と終点とをほぼ直線状に結んだ経路となり，形状という点でも経路長という点でも非常によく似た結果が得られた。このことは，スカイラインが一様であるために，提案手法によって位置推定精度を改善する余地がごく少ないことが原因であると考えられる。

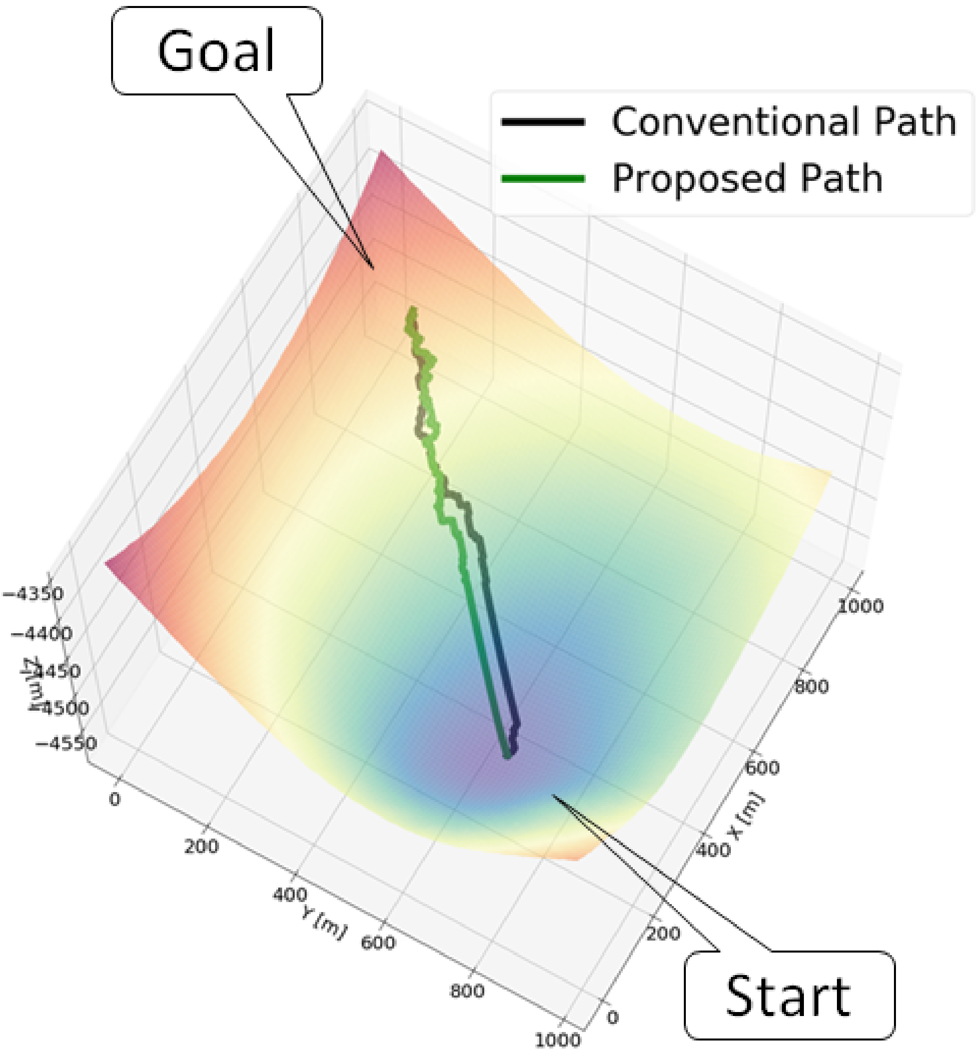

図 5.53: 2 paths on the Mars surface (case 3).

図 5.54〜5.57 に，各経路上から観測されるスカイラインを示した。従来手法経路の場合（図 5.54，5.55）も提案手法経路の場合（図 5.56，5.57）も，クレータの縁のみがスカイラインとして観測されていることがわかる。したがって，スカイラインの形にもほとんど変化が見られない。

このように，位置を変えてもスカイラインとして観測される地形が変わらない場合には，経路による提案手法は従来手法とほぼ同じ経路を導くということがわかった。こういったケースでは，経路を変更することによる位置推定精度の向上が見こまれないため，ケース 1 などのような大回りの経路をとることによる利益が少ない。このことを確かめるため，ここまで扱った各ケースにおける，経路全体を通じた距離あたりのスカイラインの変化量を，図 5.58 および表 5.1 に示した。他のケースと比べ，本ケースは従来手法経路と提案手法経路との変化量の差が非常に小さいことがわかる。これは，クレータ内という地形的な特性のために，経路の通る位置を変更してもスカイラインの見え方が大きく変わらないことを示唆している。また一方で，提案手法でも経路長を重視した直線的な経路が得られているため，位置推定精度の向上が難しい地形においても提案手法は最適な経路を導くことに成功していると言える。

このケースについては，得られた経路が従来手法と提案手法とでほぼ同一であったため，経路追従シミュレーションは実施しなかった。

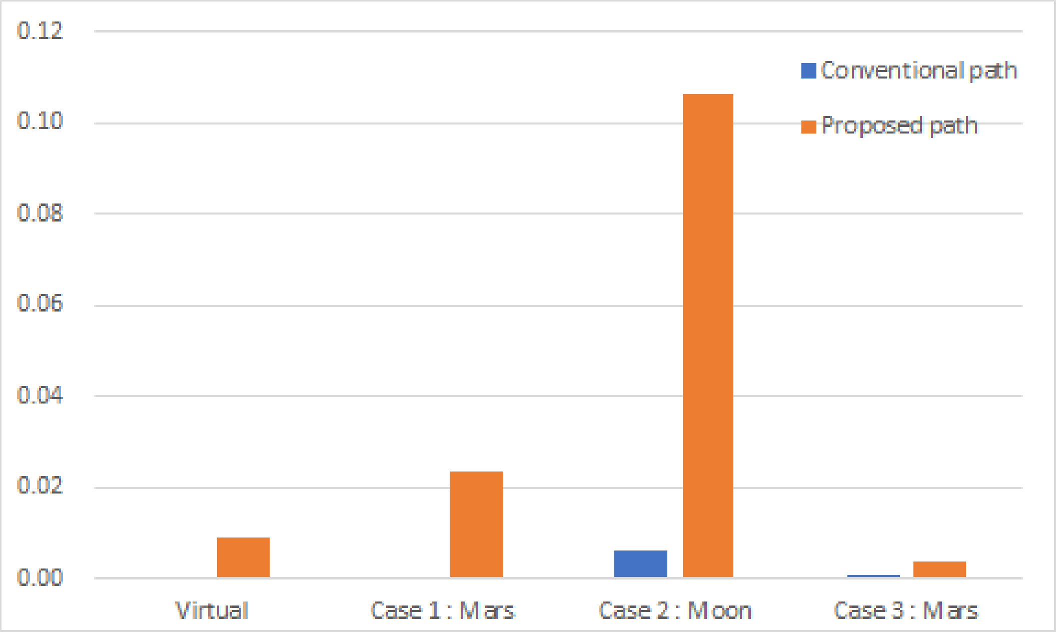

図 5.58: The difference of skyline per distance in paths on each cases.

表 5.1: The difference of skyline per distance in paths on each cases.

Terrain type	Conventional path	Proposed path
Virtual	2.1×10^{-4}	9.0×10^{-3}
Case 1：Mars	3.2×10^{-5}	2.4×10^{-2}
Case 2：Moon	6.2×10^{-3}	1.1×10^{-1}
Case 3：Mars	7.6×10^{-4}	3.7×10^{-3}

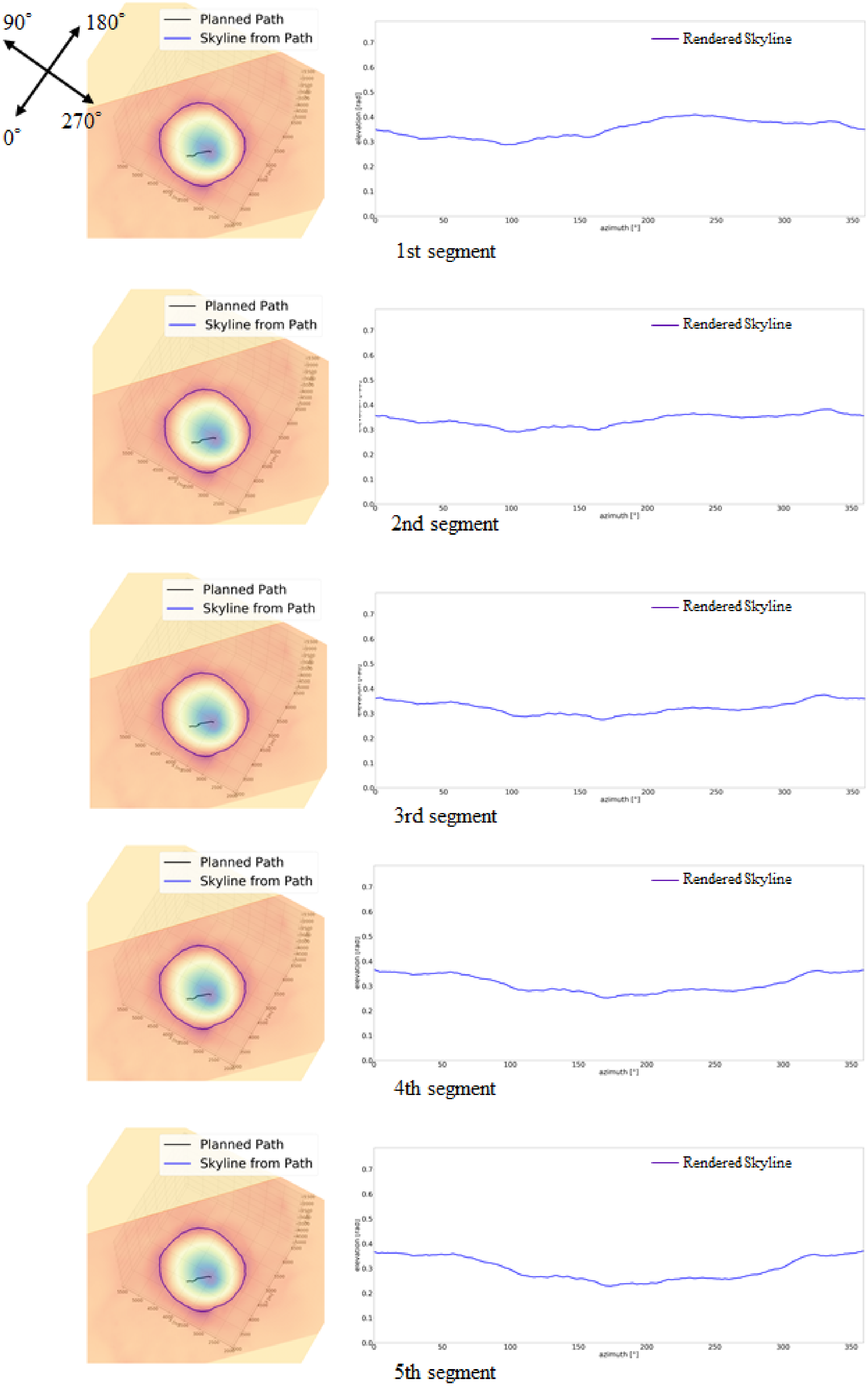

図 5.54: Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 3, condition 1) (segment 1-5).

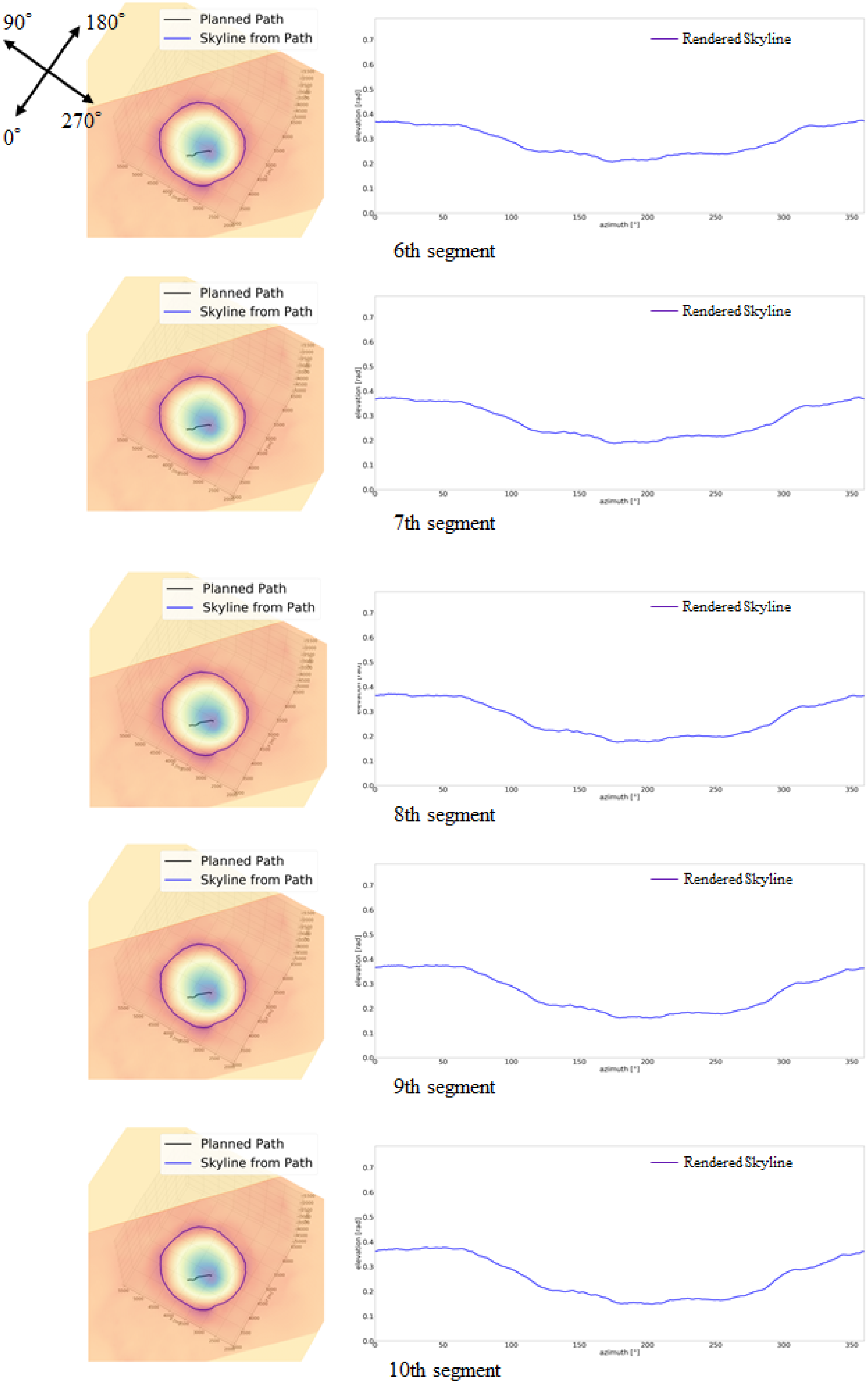

図 5.55: Skylines from the conventional path on the Mars surface (case 3, condition 1) (segment 6-10).

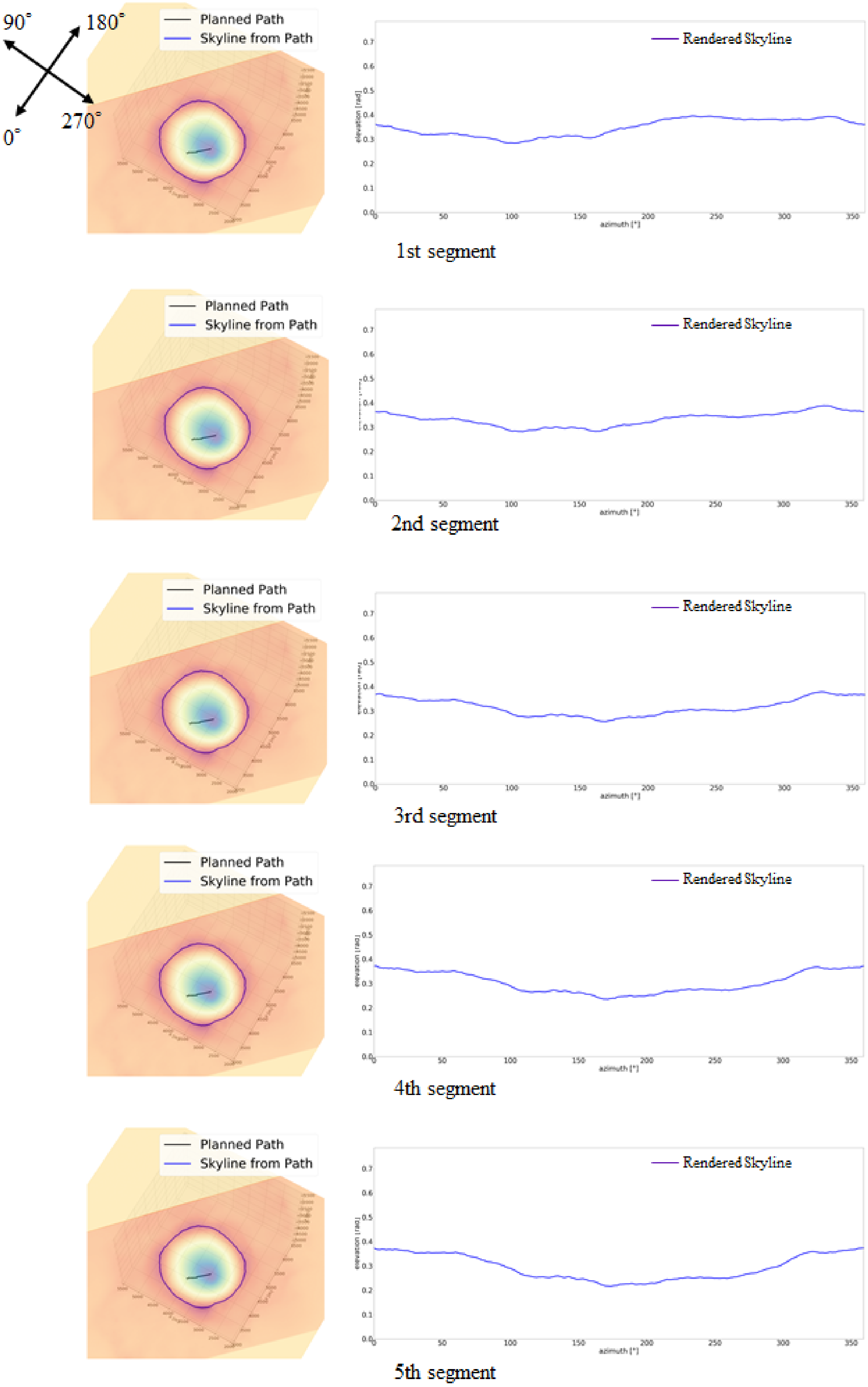

図 5.56: Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 3, condition 1) (segment 1-5).

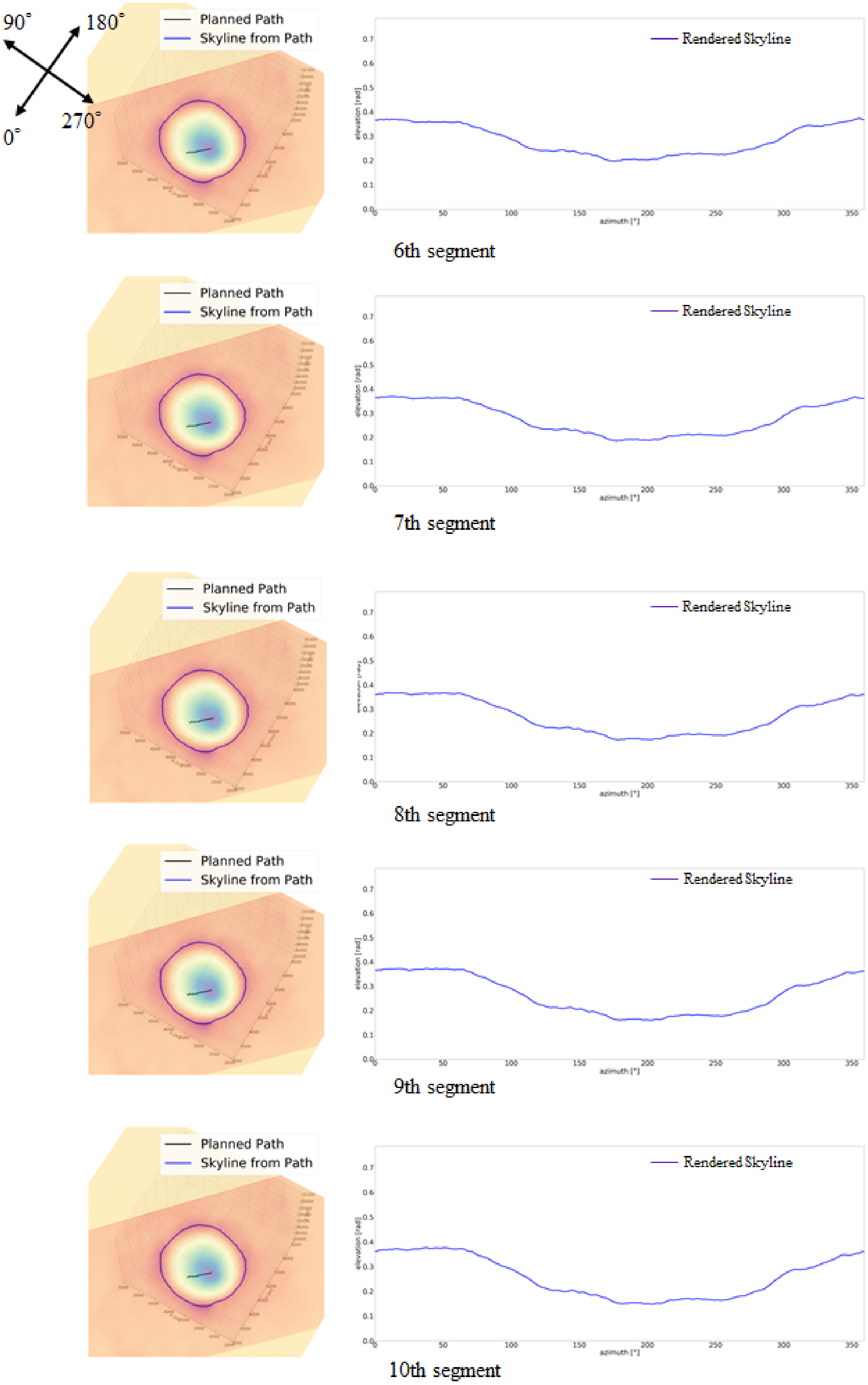

図 5.57: Skylines from the Proposed path on the Mars surface (case 3, condition 1) (segment 6-10).

第 6 章

結論

6.1 本研究のまとめ

本研究では，位置推定の精度を考慮した経路計画手法を提案することを目的とし，特にスカイラインマッチングによる位置推定を容易にする経路計画手法を提案した。

まず，スカイラインマッチングによる位置推定のアルゴリズムについて紹介し，それを元に，スカイラインマッチングによる位置推定のしやすさについて議論するため，「スカイラインの変化量」を指標として新たに定義した。さらに，ダイクストラ法を用いた経路計画手法に対し，この指標を評価関数に組み込むことで，提案手法として提示した。

この提案手法の有効性を確認するため，距離と傾斜角のみを考慮した経路計画を従来手法として想定して比較をおこなった。まず，丘陵とクレータを有する簡単な仮想地形を作成して従来手法と提案手法を用いて経路計画および経路追従のシミュレーションによる検証をおこなった。さらに，同様のシミュレーションを火星表面および月表面の DEM データを用いて実施し，提案手法によって計画された経路において，従来手法によるものと比較して位置推定誤差が小さくなることを確認した。同様に，誤差の分散やゴール到達率も提案手法による経路を追従することで改善されるという結果も得られた。これらの検証結果に対し，経路を通じたスカイラインの変化量や地平線の見え方を用いて考察をおこなうことで，提案手法の有効性を示した。

6.2 今後の課題

本研究では，提案手法による経路計画について，DEM データを用いたシミュレーションをおこなうに留まった。伊豆大島裏砂漠など，DEM が利用可能かつローバの走行試験に適した環境下で，経路計画およびローバ走行による経路追従・位置推定の実験をおこない，それらの精度を検証することが求められる。特に，本研究でおこなったシミュレーションでは，スカイラインを実際に観測することが不可能であったため，DEM から計算されるスカイラインにノイズを付加することで模擬したが，この仮定は実際に観測されるスカイラインとは乖離していることも考えられる。パノラマカメラを用いてスカイラインの抽出をおこないつつ，それを用いて位

置推定を実施し，改めて提案手法の有効性を検証する必要がある。

また，本研究における提案手法では経路全体を通じてスカイラインの変化量が最大になるように最適化をおこなっているが，実際には自己位置推定を実施する地点で，位置推定が容易になっていることが重要である。そこで，経路上のどこで位置推定をおこなうかについても最適化することで，さらに位置推定および経路追従の精度を向上することができる可能性がある。

さらに，月面におけるシミュレーションでは，位置推定が容易な経路を選択するために，傾斜が大きい領域にローバが入り込んでしまう可能性があることが見出された。本研究において提案した経路計画手法でも，傾斜角は考慮しているが，計画経路から多少外れて移動した場合のリスクの大きさについても考えることが求められる。同様に，位置推定についても，経路上における推定精度だけでなく，そこから外れた場合の推定精度を考慮することで，さらに計画経路から大きく外れにくい経路を求めることができる可能性もある。

発表文献

- 前中脩人，橋本樹明，“航法難易度を考慮した月惑星探査ローバの経路計画”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，広島県広島市，2019 年 6 月 7 日

参考文献

[1] 大槻真嗣, 若林幸子, 石上玄也, 須藤真琢. Jaxa の探査ローバ開発の現状. 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 5, pp. 408–411, 2014.

[2] China's chang'e-4 probe soft-lands on moon's far side. http://www.xinhuanet.com/english/2019-01/03/_137716841.htm. 最終閲覧 2019 年 8 月 14 日※ cnsa の http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6805049/content.html にはアクセス不可？

[3] Mars curiosity rover. https://mars.nasa.gov/msl/. 最終閲覧 2019 年 8 月 14 日.

[4] Gslv-mk iii - m1 / chandrayaan-2 mission. https://www.isro.gov.in/launcher/gslv-mk-iii-m1-chandrayaan-2-mission. 最終閲覧 2019 年 8 月 14 日.

[5] Exomars 2020: progress and challenges. https://www.esa.int/Our_Activities/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars/ExoMars_2020_progress_and_challenges. 最終閲覧 2019 年 8 月 14 日.

[6] Mars exploration rover (opportunity). https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/missions/solarsystem/MEROppy.html. 最終閲覧 2019 年 8 月 14 日.

[7] Mahmoud Tarokh. Hybrid intelligent path planning for articulated rovers in rough terrain. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 159, No. 21, pp. 2927–2937, 2008.

[8] Genya Ishigami, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida. Path Planning for Planetary Exploration Rovers and Its Evaluation. *Terrain*, No. April, pp. 10–14, 2007.

[9] E. J. Speyerer, S. J. Lawrence, J. D. Stopar, P. Gläser, M. S. Robinson, and B. L. Jolliff. Optimized traverse planning for future polar prospectors based on lunar topography. *Icarus*, Vol. 273, pp. 337–345, 2016.

[10] Adam Kaplan, Nathaniel Kingry, Paul Uhing, and Ran Dai. Time-Optimal Path Planning with Power Schedules for a Solar-Powered Ground Robot. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 1235–1244, 2017.

[11] Jennifer L. Heldmann, Anthony Colaprete, Richard C. Elphic, Ben Bussey, Andrew McGovern, Ross Beyer, David Lees, and Matt Deans. Site selection and traverse planning to support a lunar polar rover mission: A case study at Haworth Crater. *Acta Astronautica*, Vol. 127, pp. 308–320, 2016.

[12] Masataku Sutoh, Masatsugu Otsuki, Sachiko Wakabayashi, Takeshi Hoshino, and Tatsuaki Hashimoto. The right path: Comprehensive path planning for lunar exploration rovers. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 22, No. 1, pp. 22–33, 2015.

[13] Hiroka Inoue, Masahiro Ono, Sakurako Tamaki, and Shuichi Adachi. Active localization for planetary rovers. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Vol. 2016-June, pp. 1–7, 2016.

[14] Kyohei Otsu, Ali-Akbar Agha-Mohammadi, and Michael Paton. Where to Look? Predictive Perception With Applications to Planetary Exploration. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 2, pp. 635–642, 2018.

[15] Sanjiv Singh, Reid Simmons, Trey Smith, Anthony Stentz, Vandi Verma, Alex Yahja, and Kurt Schwehr. Recent progress in local and global traversability for planetary rovers. In *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No. 00CH37065)*, Vol. 2, pp. 1194–1200. IEEE, 2000.

[16] Kyohei Otsu and Takashi Kubota. Visual Odometry for Planetary Exploration Rovers in Untextured Terrains. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 32, No. 9, pp. 825–831, 2014.

[17] Yang Cheng, Mark Maimone, and Larry Matthies. Visual odometry on the mars exploration rovers. In *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 1, pp. 903–910. IEEE, 2005.

[18] Weishu Gong. Discussions on localization capabilities of msl and mer rovers. *Annals of GIS*, Vol. 21, No. 1, pp. 69–79, 2015.

[19] Andrew J Davison, Ian D Reid, Nicholas D Molton, and Olivier Stasse. Monoslam: Real-time single camera slam. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, No. 6, pp. 1052–1067, 2007.

[20] Bach Van Pham, Artur Maligo, and Simon Lacroix. Absolute map-based localization for a planetary rover. 2013.

[21] F. Cozman and E. Krotkov. Automatic mountain detection and pose estimation for teleoperation of lunar rovers. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, No. March, pp. 2452–2457, 1997.

[22] Fabio Cozman, Eric Krotkov, and Carlos Guestrin. Outdoor visual position estimation for planetary rovers. *Autonomous Robots*, Vol. 9, No. 2, pp. 135–150, 2000.

[23] Rongxing Li, Brent A. Archinal, Raymond E. Arvidson, Jim Bell, Philip Christensen, Larry Crumpler, David J. Des Marais, Kaichang Di, Tom Duxbury, Matt P. Golombek, John A. Grant, Ronald Greeley, Joe Guinn, Andrew Johnson, Randolph L. Kirk, Mark Maimone, Larry H. Matthies, Mike Malin, Tim Parker, Mike Sims, Shane Thompson,

Steven W. Squyres, and Larry A. Soderblom. Spirit rover localization and topographic mapping at the landing site of Gusev crater, Mars. *Journal of Geophysical Research E: Planets*, Vol. 111, No. 2, pp. 1–13, 2006.

[24] Paul Furgale, Pat Carle, and Timothy D. Barfoot. A comparison of global localization algorithms for planetary exploration. *IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings*, No. November, pp. 4964–4969, 2010.

[25] Li Wei and Sukhan Lee. 3D peak based long range rover localization. *Proceedings of 2016 7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, ICMAE 2016*, pp. 599–604, 2016.

[26] Sebastiano Chiodini, Marco Pertile, Stefano Debei, Lorenzo Bramante, Enrico Ferrentino, Alfredo Giovanni Villa, Ivano Musso, and Marco Barrera. Mars rovers localization by matching local horizon to surface digital elevation models. *4th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2017 - Proceedings*, No. June, pp. 374–379, 2017.

[27] J. F. Bell, S. W. Squyres, K. E. Herkenhoff, J. N. Maki, H. M. Arneson, D. Brown, S. A. Collins, A. Dingizian, S. T. Elliot, E. C. Hagerott, A. G. Hayes, M. J. Johnson, J. R. Johnson, J. Joseph, K. Kinch, M. T. Lemmon, R. V. Morris, L. Scherr, M. Schwochert, M. K. Shepard, G. H. Smith, J. N. Sohl-Dickstein, R. J. Sullivan, W. T. Sullivan, and M. Wadsworth. Mars Exploration Rover Athena Panoramic Camera (Pancam) investigation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 108, No. E12, 2003.

[28] Hirise—high resolution imaging science experiment. https://www.uahirise.org. 最終閲覧 2019 年 8 月 14 日.

[29] Analyst's notebook. http://an.rsl.wustl.edu. 最終閲覧 2019 年 8 月 14 日.

[30] Eric E Palmer, James N Head, Robert W Gaskell, Mark V Sykes, and Brian McComas. Mercator—independent rover localization using stereophotoclinometry and panoramic images. *Earth and Space Science*, Vol. 3, No. 12, pp. 488–509, 2016.

[31] Patrick JF Carle, Paul T Furgale, and Timothy D Barfoot. Long-range rover localization by matching lidar scans to orbital elevation maps. *Journal of Field Robotics*, Vol. 27, No. 3, pp. 344–370, 2010.

[32] Edsger W Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, Vol. 1, No. 1, pp. 269–271, 1959.

[33] Alan Ettlin and Hannes Bleuler. Rough-terrain robot motion planning based on obstacleness. *Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV'06. 9th International Conference on*, pp. 1–6, 2006.

[34] Genya Ishigami, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida. Path planning and evaluation for

planetary rovers based on dynamic mobility index. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 601–606, 2011.

[35] Steven M LaValle. *Planning algorithms.* Cambridge university press, 2006.

[36] Peter E Hart, Nils J Nilsson, and Bertram Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol. 4, No. 2, pp. 100–107, 1968.

[37] Anthony Stentz, et al. The focussed dˆ* algorithm for real-time replanning. In *IJCAI*, Vol. 95, pp. 1652–1659, 1995.

[38] 吉河章二, 西口憲一. 実データとフラクタルモデリングによる模擬月面の生成. 計測自動制御学会論文集, Vol. 37, No. 3, pp. 262–267, 2001.

[39] Ken Perlin. An image synthesizer. *ACM Siggraph Computer Graphics*, Vol. 19, No. 3, pp. 287–296, 1985.

[40] Ken Perlin. Improving noise. In *ACM transactions on graphics (TOG)*, Vol. 21, pp. 681–682. ACM, 2002.

[41] Timothy Barfoot, Paul Furgale, Braden Stenning, Patrick Carle, Laura Thomson, Gordon Osinski, Michael Daly, and Nadeem Ghafoor. Field testing of a rover guidance, navigation, and control architecture to support a ground-ice prospecting mission to Mars. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 59, pp. 472–488, 2011.

[42] Lro lola elevation model 118m (ldem gdr). https://astrogeology.usgs.gov/search/details/Moon/LRO/LOLA/Lunar_LRO_LOLA_Global_LDEM_118m_Mar2014/cub. 最終閲覧 2019 年 8 月 14 日.

謝辞

修士課程に入学してからこの修士論文を執筆するまでの 2 年半の間，本当に多くの方にお世話になりました。この場を借りてお礼を申し上げます。

まず，誰よりも指導教員である橋本樹明教授に，深くお礼を申し上げます。同時に，多大なるご迷惑をおかけしてしまったことについて，お詫び申し上げます。私が研究を進め，修士論文の提出までこぎつけることができたのは，ひとえに橋本先生のご指導によるものでした。お忙しい中，論文や資料の添削をおこなっていただいたこと，打ち合わせで研究内容にご助言をいただいたこと，感謝の言葉しかありません。不出来な学生でしたが，ご指導いただき，本当にありがとうございました。

研究室ミーティングの場では，久保田孝教授，坂井真一郎教授，大槻真嗣准教授からもご指導をいただきました。中でも，大槻先生にいただいたご助言は，私が研究テーマを固めるきっかけにもなりました。その後も，不躾なご連絡にもご対応いただくなど，大変お世話になりました。ありがとうございました。

研究室秘書の本田百代様には，特に書類や事務手続きの面でお世話になりました。研究室生活を全うできたのは，本田様のご助力あってのことだったと思います。ありがとうございました。

研究室の先輩，同期，後輩の皆様には，迷惑をかけてばかりでした。研究室が怖くなり，足が遠のいてしまったこともありましたが，研究に復帰することが出来たのは，皆様の懐の深さがあってこそだと思っています。ありがとうございました。

学部生時代から付き合いの続く，サークルの友人たち。研究室生活がつらくなることもありましたが，週末に一緒に山に行くことが大きな癒しになっていました。東大 OLK のメンバーおよび全国の関係者たちと，オリエンテーリングというスポーツに感謝します。

最後に，いつも支えてくれた家族に感謝を申し上げます。特に両親には，25 年間育てていただいたことへの最上の感謝を，この場を借りて伝えさせていただきます。ありがとうございました。