

修士論文

自律型水中ロボットによる 複雑な海底地形の画像マッピングのための リアルタイム撮影評価と経路計画手法

Real-time quality evaluation and path-planning
for imaging rough terrain
by Autonomous Underwater Vehicle

東京大学 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻

47106638 久米絢佳

指導教員 浦環教授

平成 24 年 2 月

目次

1	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	海底画像観測	1
1.3	先行研究	2
1.4	目的	3
1.5	論文の構成	4
2	提案手法の概要	7
3	撮影度判定手法	9
3.1	メッシュの生成	9
3.1.1	地形情報の選別	9
3.1.2	平滑化	9
3.1.3	三角メッシュ化	10
3.1.4	メッシュの簡略化	10
3.1.5	メッシュの分割	11
3.2	撮影度判定手法	14
3.2.1	撮影情報	14
3.2.2	メッシュの撮影度判定	14
3.3	最適画像の選択	16
4	経路計画手法	18
4.1	概要	18
4.2	グループ内ウェイポイントの生成方法	18
4.2.1	撮影点生成	18
4.2.2	撮影点の撮影判定	19
4.2.3	ウェイポイント選択	20
4.3	グループ内での経路計画	21
4.4	グループ間での経路計画	23
4.4.1	AUV の行動制限時間を設けた場合	25
4.5	経路の改善	25
4.6	ウェイポイントの数が少ない場合	26
5	AUV Tri-TON	32

5.1	ナビゲーション	32
5.2	制御	32
5.3	ペイロード	32
5.4	地形計測手法	33
5.4.1	光切断法原理	33
5.4.2	画像処理	34
5.4.3	光切断の分解能	34
5.4.4	実装	34
6	水槽実験	40
6.1	AUV の測位と測位精度の検証	40
6.2	AUV の行動と行動制約	40
6.3	実験 1	41
6.3.1	初期観測フェーズの観測結果	41
6.3.2	計算フェーズの結果	42
6.3.3	最適画像の選択	42
6.4	実験 2	54
6.4.1	初期観測フェーズの地形計測結果	54
6.4.2	初期観測フェーズの画像観測結果	54
6.4.3	計算フェーズの結果	55
6.4.4	再観測フェーズの結果	55
6.4.5	最適画像の選択	56
6.5	考察	56
6.5.1	実験 1	56
6.5.2	実験 2	56
7	実海域データへの適用	80
7.1	撮影度判定手法の適用	80
7.2	経路計画手法の適用	80
7.2.1	実験 1 地形情報のみが手に入った場合	80
7.2.2	実験 1 考察	81
7.2.3	実験 2 あらかじめ画像が撮影されている場合	82
7.2.4	実験 2 考察	82
8	総合考察	99
8.1	撮影度判定手法	99

8.2	経路計画手法	100
8.3	計算時間	101
8.4	今後の課題	101
9	結論	104
	参考文献	105
	謝辞	109

図目次

1.1	AUV Sirius [30]	4
1.2	AUV Tri-Dog1	5
1.3	Mosaic image taken by Tuna-Sand [53]	5
1.4	An image taken by Tri-Dog 1	6
2.1	Outline of the proposed method	8
2.2	Function of the proposed method	8
3.1	Volonoi diagram and Delaunay triangulation	12
3.2	Edge collapse	12
3.3	Definition of QEM	13
3.4	Mesh division	13
3.5	Seafloor pictures taken by Tri-TON left: a normal picture right: a picture without flash	17
3.6	Outline of the mesh evaluaton method	17
4.1	Outline of the path planning	27
4.2	Outline of making waypoint candidate	28
4.3	Making waypoint candidate of downward camera	28
4.4	Making waypoint candidate of forward camera	29
4.5	Waypoint candidate and coverage	29
4.6	ψ of waypoint candidate of forward camera	29
4.7	Subtour-elimination constraints	30
4.8	3opt method	30
4.9	Initial waypoint	31
4.10	Trace of 3opt method	31
5.1	AUV Tri-TON	35
5.2	Arrangement of Tri-TON	35
5.3	Robot coordinate and focal points	36
5.4	Arrangement of cameras and sheet lasers	37
5.5	Light-sectioning method	38
5.6	Resolution and distance from target(Forward camera)	38
5.7	Resolution and distance from target(Downward camera)	39
6.1	Trajectory of Tri-Dog1	43
6.2	Observed X	43

6.3	Observed Y	44
6.4	Observed yaw	44
6.5	Observed yaw margin	45
6.6	Tank and start point [4]	45
6.7	Given waypoints(mission 1)	46
6.8	Observed depth and height(mission 1)	46
6.9	Thruster command value and observed speed(x)(mission 1)	47
6.10	Thruster command value, observed speed and coordinate(y)(mission 1)	47
6.11	Observed yaw(mission 1)	48
6.12	Observed roll and pitch(mission 1)	48
6.13	Trajectory, view points and waypoints of the initial observation phase(mission 1)	49
6.14	Results of the terrain measurement after denoising(mission 1)	50
6.15	2D mesh of the terrain measurement after denoising(mission 1)	50
6.16	Seafloor pictures taken by the downward camera during the initial observation phase(mission 1)	51
6.17	Results of the mesh evaluation(mission 1)	51
6.18	Texture mapping results(mission 1)	52
6.19	Mapping results colored by path(mission 1)	52
6.20	Gaps of y between 1st path and 2nd path(mission 1)	52
6.21	Texture mapping results of best selection(mission 1)	53
6.22	Mapping results of best selection colored by path(mission 1)	53
6.23	Tri-TON at re-observation phase	58
6.24	Specification of the targets	58
6.25	Target arrangement(mission 2)	59
6.26	Target face(mission 2)	59
6.27	Target 1	60
6.28	Target 2	60
6.29	Given waypoints(mission 2)	61
6.30	Observed depth and height(mission 2)	61
6.31	Thruster command value and observed speed(x)(mission 2)	62
6.32	Thruster command value, observed speed and coordinate(y)(mission 2)	62
6.33	Observed yaw(mission 2)	63

6.34	Observed roll and pitch(mission 2)	63
6.35	Trajectory of the initial observation phase(mission 2)	64
6.36	Results of the terrain measurement before denoising(mission 2) .	65
6.37	Results of the terrain measurement after denoising(mission 2) . .	65
6.38	Seafloor pictures taken by the downward camera during the initial observation phase(mission 2)	66
6.39	Seafloor pictures taken by the forward camera during the initial observation phase(mission 2)	66
6.40	Pictures of the targets taken during the initial observation phase(mission 2)	67
6.41	Results of the mesh evaluation(Top view)(mission 2) Green mesh: covered by forward camera, Blue mesh: covered by downward camera, Red mesh: uncovered	68
6.42	Results of the mesh evaluation(Front view)(mission 2)	68
6.43	Caluculated waypoints and actual waypoints(mission 2)	69
6.44	Trajectory and pictures taken at the waypoints dournig the re-observation phase(mission 2)	70
6.45	Seafloor pictures taken by the downward camera during the re-observation phase(mission 2)	71
6.46	Seafloor pictures taken by the forward camera during the re-observation phase(mission 2)	71
6.47	Results of the mesh evaluation after re-observation phase(Top view)(mission 2)	72
6.48	Results of the mesh evaluation after re-observation phase(Front view)(mission 2)	72
6.49	Simulated results of the mesh evaluation(Top view)(mission 2) .	72
6.50	Simulated results of the mesh evaluation(Front view)(mission 2) .	73
6.51	Texture mapping results after re-observation phase(Top view)(mission 2)	73
6.52	Texture mapping results after re-observation phase(Front view)(mission 2)	73
6.53	Texture mapping results of best selection(Top view)(mission 2) .	74
6.54	Texture mapping results of best selection(Front view)(mission 2) .	74
6.55	Improved results of the terrain measurement after denoising (Threshold of denoising is changed)(mission 2)	75

6.56	Simulated results of the mesh evaluation of the simulation (Threshold of denoising is changed)(Top view)(mission 2)	75
6.57	Simulated results of the mesh evaluation of the simulation (Threshold of denoising is changed)(Front view)(mission 2)	76
6.58	Caluculated waypoints of the simulation (Threshold of denoising is changed)(mission 2)	76
6.59	Simulated results of the mesh evaluation after re-observation phase (Threshold of denoising is changed)(Top view)(mission 2)	77
6.60	Simulated results of the mesh evaluation after re-observation phase(Threshold of denoising is changed) (Front view)(mission 2)	77
6.61	Caluculated waypoints (Threshold of view point screening = 6) (mission 2)	78
6.62	Simulated results of the mesh evaluation after re-observation phase (Threshold of view point screening = 6)(Top view)(mission 2) . .	79
6.63	Simulated results of the mesh evaluation after re-observation phase (Threshold of view point screening = 6)(Front view)(mission 2) .	79
7.1	Point cloud of actual chimney taken by AUV Tuna-Sand [25] . .	83
7.2	3D mesh of the chimney in Fig.7.1	83
7.3	Making 3D mesh of the chimney	84
7.4	Case of single view point	84
7.5	Results after distanse judgement	84
7.6	Results after coverage judgement	85
7.7	Results after angle judgement	85
7.8	Angle evaluation	85
7.9	Results without angle judgement after obstacle judgement	86
7.10	Results after all mesh evaluation	86
7.11	Case of several view points	86
7.12	Right: Results after all mesh evaluation Left: Results without angle judgement	87
7.13	Caluculated waypoints (Experiment 1)	87
7.14	Simulated results of the mesh evaluation (Top view) Green mesh: covered by forward camera, Blue mesh: covered by downward camera, Red mesh: uncovered (Experiment 1)	88
7.15	Simulated results of the mesh evaluation (Front view) (Experiment 1)	89

7.16	Simulated results of the mesh evaluation (Threshold of the angle = 50[deg])(Top view) (Experiment 1)	89
7.17	Simulated results of the mesh evaluation (Threshold of the angle = 50[deg])(Front view) (Experiment 1)	89
7.18	Caluculated waypoints (Threshold of view point screening = 6) (Experiment 1)	90
7.19	Simulated results of the mesh evaluation(Threshold of view point screening = 6)(Top view) (Experiment 1)	90
7.20	Simulated results of the mesh evaluation(Threshold of view point screening = 6)(Front view) (Experiment 1)	91
7.21	View points of initial observation (Experiment 2)	92
7.22	Mesh evaluation after initial observation(Threshold of the angle = 45[deg]) (Top view)(Experiment 2)	94
7.23	Mesh evaluation after initial observation (Threshold of the angle = 45[deg]) (Front view)(Experiment 2)	94
7.24	Mesh evaluation after initial observation (Threshold of the angle = 50[deg]) (Top view)(Experiment 2)	95
7.25	Mesh evaluation after initial observation (Threshold of the angle = 50[deg]) (Front view)(Experiment 2)	95
7.26	Caluculated waypoints(Experiment 2)	96
7.27	Mesh evaluation after re-observation (Threshold of view point screening = 6, Thershld of the angle = 50[deg]) (Top view) (Experiment 2)	97
7.28	Mesh evaluation after re-observation (Threshold of view point screening = 6, Theroshld of the angle = 50[deg]) (Front view) (Experiment 2)	97
7.29	Coverage ratio and number of viewpoints (Threshold of the angle = 45[deg]) (Experiment 2)	98
8.1	Simulation data (100m ²)	102
8.2	Simulation results	103

表目次

4.1	Trace of 3opt method	27
5.1	Specification of the AUV Tri-TON	36
5.2	Camera arrangement of Tri-TON	36
5.3	Specification of the cameras and lasers of Tri-TON	37
6.1	Performance of the AUV Tri-TON	43
6.2	Aquired data of initial observation phase(mission 1)	50
6.3	The measurements after denoising(mission 2)	64
6.4	The measurements before denoising(mission 2)	65
6.5	Aquired data of initial observation phase (mission 2)	68
6.6	Caluculated waypoints(mission 2)	69
6.7	Caluculated waypoints (Threshold of view point screening = 6) (mission 2)	78
6.8	Coverage ratio of mission 2	79
7.1	Caluculated waypoints (Experiment 1)	88
7.2	Caluculated waypoints (Threshold of view point screening = 6) (Experiment 1)	91
7.3	Coverage ratio (Experiment 1)	92
7.4	View points of initial observation (Experiment 2)	93
7.5	Caluculated waypoints (Experiment 2)	96
7.6	Coverage ratio and number of viewpoints(Experiment 2)	97
8.1	Specifications of Computers	102
8.2	Simulation results	103

1 序論

1.1 はじめに

海は地球上の 70% を占め, かつ平均深度も 3800m と深い。さらに, 深海の環境は人間にとて厳しいものであり, 特殊な訓練を受けたダイバーであっても長時間滞在することは難しい。しかし, 資源探査や生物や地質学などの学術研究, 防災, 軍事など様々な目的で海底の調査は必要とされている。

特に, 海底熱水鉱床 [52] の調査は重要とされている。海底熱水鉱床は, 海底のうち海嶺などマグマ活動のある場所に海水が染みこみ, 熱せられた海水によってマグマや地殻に含まれていた有用な元素が抽出され, 熱水が海底に噴出して冷却されることによって生成される鉱床である。銅, 亜鉛, 鉛, 銀, 金を始めレアメタルなど貴重な金属を含有しているため, 新な金属鉱物資源の供給源として注目されているのである。海底熱水鉱床の周辺は地形や生態系にも特徴がある。チムニーと呼ばれる海底熱水噴出孔から噴出される熱水に解けている金属などが沈殿してできる煙突状の構造物が存在する。また, シロウリガイやハオリムシなどの化学合成生物群集と呼ばれる光合成に依存しない生態系が存在する [40]。日本においても, 小笠原諸島や, 沖縄トラフに 10箇所以上の海底熱水鉱床が発見されている [37]。海底調査といえば音響調査がメインに行われているが画像調査も同様に重要である [34]。例えば熱水鉱床開発においては, 周辺の生態系などに対する影響を考慮しなければならない。そのためには音響調査だけではなく, 画像による生態系の分布調査が必要不可欠である。しかし, 広域の画像調査には課題が残っている。

そこで本研究では, 自律型水中ロボット (AUV, Autonomous Underwater Vehicle) による複雑な地形の海底画像観測のための手法を確立する。

1.2 海底画像観測

海中での光波の減衰の大きさやマリンスノーによる光の散乱によって, 海中では一度に広域の写真を撮影することができない。そのため, ROV や水中曳航体, 有人潜水艇 (HOV: Hunam Occupied Vehicle) を用いて長時間の観測を行う。例えば JAMSTEC の深海曳航調査システム Deeptow [19] では, 黒島海丘にて八重山地震の原因調査のための画像観測を行っている [46]。

画像観測の AUV も数多く研究されてきている。例えば, シドニー大学の所有する Sirius(Fig.1.1) は, グレートバリアリーフの画像観測に用いられている [20, 30]。また, 東京大学生産技術研究所の所有する Tri-Dog1(Fig.1.2) は, 鹿児島湾のたぎりで

サツマハオリムシの群集の観測を行っている [24, 42, 43]。海底面の全貌を明らかにするためには写真を多く撮影してモザイクする必要があるが、それには一定高度で一定間隔に画像を撮影する必要があるため、AUV のような長時間の単調作業を行うためのロボットが適切である。ROV ではケーブルがあるため稼動範囲が制限されてしまうし、HOV では安全面と稼動時間に問題がある。しかし、人が常に監視しなければならない分、ROV や HOV は人がリアルタイムに情報を確認することができる。すなわち、撮影中に撮り逃した場所があればその場所を撮影することができる。一方、AUV は全自動で動くためリアルタイムに人間が結果を確認することはできない。よって重要な場所の撮影を逃してしまう可能性がある。

Fig.1.3 は、AUV Tuna-Sand [26] によって撮影された海底モザイク画像である [53]。この画像に空いている穴は、潮流によって AUV が決められたウェイポイントを通過できなかったために発生した。また、地形によってはオクルージョンが発生して、決められたウェイポイントを通って撮影できたとしても撮影できない箇所が発生する可能性がある。例えば、Fig.1.4 は、2011 年に AUV Tri-Dog1 が鹿児島湾にて撮影した写真の内の 1 枚である。画像中のバッテリーについて、上面しか撮影されておらず横面の情報がない。

従来の画像観測用 AUV は障害物回避などの自律的な行動は行ってきたが、与えられたミッションの完成度についてオンラインで考慮することはなかった。つまり、画像を撮影するための AUV であっても画像が適切に撮影されているか否かは AUV が回収されて始めてわかるものであり、画像が撮影されなかった場所については改めて AUV のミッションを組み再撮影する必要があった。それでは撮り漏らしの少ない海底画像を生成するにはコストがかかってしまうため、本研究ではミッション中に AUV が画像が適切に撮影されているか判断し、オンラインで経路計画を行い再撮影するシステムを開発した。

1.3 先行研究

計測できなかった場所に対して次の計測地点を考える問題を Next Best View Problem と言い、1980 年代からコンピュータービジョンやロボティクスの分野で研究が行なわれている [10, 27, 28]。レンジファインダで三次元計測を行いながらリアルタイムに未計測の場所を計測する視点を生成する研究も行なわれている [48]。また、2 次元地図が与えられた場所で移動ロボットが経路生成を行い三次元計測をした後、不十分な箇所をもう一度三次元計測するという研究も行なわれている [7]。医療分野でのカメラの視点選択の研究も行われている [8]。オペレーションズリサーチを実際のロボットに適用するという研究では、トラック配送問題の解法を実際にロボットに適用

した研究がある [29] . AUV での先行研究として , 水中調査の際のソナーの視点選択に関する研究が行われている [18] . この研究では , 事前に経路を生成する手法でありまた対象のデータは地形情報である . また , 障害物を回避して全ての場所を通る経路計画を行う研究もある [9, 15] . プロファイリングソナーのデータを利用して予めラフな 3D モデルを生成し , プロファイリングソナーでの詳細調査のための短時間でカバー率の高い効率の良い経路を生成する研究がある [17] .

1.4 目的

本研究では画像観測用のホバリング型 AUV での使用を想定した一度の潜航で漏れのない画像マップを生成するための経路計画の手法を提案する . 先述のように , AUV での観測は効率的な面もある一方 , リアルタイムに人間が確認できないため複雑な海底環境では漏れのない海底画像マップを生成するのは難しい . 対象とするミッションは海底熱水地帯や沈没船 , 災害調査など凹凸のある物体が存在し画像の抜けが発生する場所の観測を始めとする全ての画像観測である . オクルージョンが発生しないような場所であっても , 障害物回避や潮流の影響で決められたウェイポイントを通ることができなかったり , フラッシュ漏れなどの事態が起き撮影できていない箇所が発生する場合があるためである .

満たすべき条件としては ,

- 観測中は人間の管制を受けない .
- 従来の AUV の潜航時間内にミッションが終了する .
- 地形情報が全くわからない場合や , 海底写真がフラッシュ漏れで写らなかった場合などの予期せぬ事態にも対応できる .

がある . これらを満たすためには従来の画像観測用 AUV の課題である自己位置推定や障害物回避などのナビゲーションの他に ,

- 撮影範囲 , 未撮影範囲を AUV が判定する .
- AUV が新経路を生成する .

という 2 つの新たな要求を満たす必要がある . このどちらの手法もリアルタイムかつ , 高速に行わなければならない . なぜなら AUV の潜航時間は限られているからである . しかも , AUV は限られた計算資源しか持たないため , 効率的に高速に処理が行われる必要がある .

本研究では第一に地形計測の結果からリアルタイムに 3 次元マップを生成し , 画像観測の結果からそのマップのどこが撮影されており , どこが未撮影なのかを明らかに



Fig. 1.1: AUV Sirius [30]

する手法を提案する。そして、明らかになった未撮影箇所を撮影するための経路を生成する方法を提案する。加えて、同一箇所を複数の写真が撮影している場合の写真の選択方法についても提案する。また提案手法の有効性を検証するために、実海域で得られたチムニーの点群データでのシュミレーションを行うとともに実際に AUV に向かう異なる 2 台のカメラを搭載し、水槽実験を行った。

1.5 論文の構成

本章では背景として従来の海底の画像観測、特に自律型水中ロボットによる画像観測の手順と問題点を述べ、本研究での目的を記した。第 2 章では提案手法の概要を説明する。第 3 章では手法の中の未撮影範囲判別手法について説明する。第 4 章では提案手法の中の経路計画手法について説明する。第 5 章では水槽実験に用いた AUV Tri-TON について説明する。第 6 章では提案手法に基づき水槽実験した結果を示す。第 7 章にて実海域データへ提案手法を適用した結果を示す。第 8 章で総合考察を行い、第 9 章で結論を述べる。



Fig. 1.2: AUV Tri-Dog1

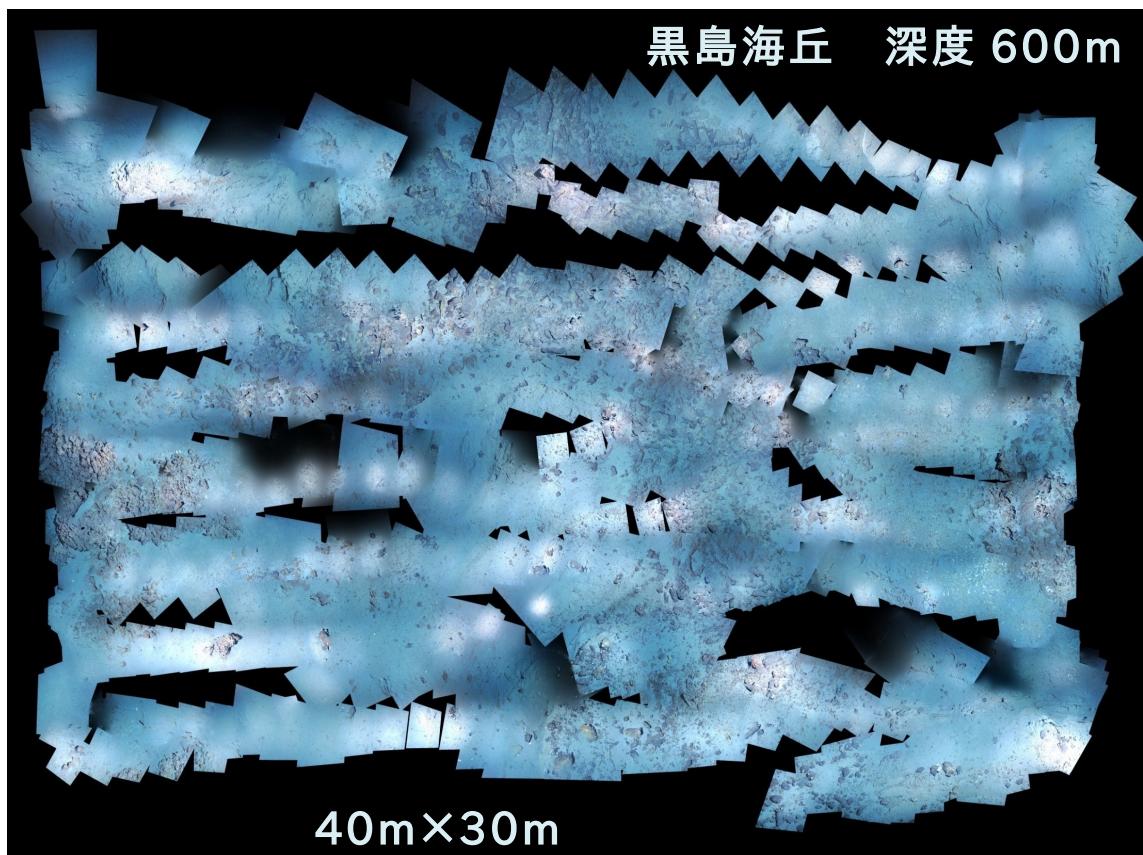


Fig. 1.3: Mosaic image taken by Tuna-Sand [53]



Fig. 1.4: An image taken by Tri-Dog 1

2 提案手法の概要

提案手法の概要を Fig.2.1 に示す。まず従来手法と同様に決められた経路を通って撮影と地形計測を行う。次に得られた地形情報から 3 次元メッシュを生成し AUV との位置関係及び画像撮影情報を元にそれぞれのメッシュが撮影できているかどうかを判別する(撮影度判定)。その結果を受けて撮影できていないメッシュを撮影する経路を計画し(経路計画)、従来の画像観測用 AUV と同様のウェイポイントトラッキングによって再観測を行う。

本手法の前提条件は以下である。

- AUV はホバリング型。
- AUV は 1 台以上のカメラと地形計測用のセンサーを持つ。
- 自己位置推定・障害物回避は従来手法を用いる。

提案手法の位置付けを Fig.2.2 に示す。提案手法は、従来の画像観測用の AUV の持つナビゲーションのプログラムと画像観測、地形計測用のプログラムにメッシュ評価・経路生成プログラムを追加する。メッシュ評価経路生成プログラムは次の 4 つの機能を有する。

- 地形情報と画像情報の蓄積
- 3 次元メッシュの生成
- メッシュの撮影・未撮影の評価
- 経路生成

撮影度判定の際には、地形計測画像観測用のプログラムから情報を受けとり蓄積する。計算を行い、新しく生成した経路をナビゲーションプログラムに渡す。

なお、手法としては単一のカメラでも適用可能であるが、実験としては前向きと下向きのカメラの二台を用いた。従来手法では下向きのカメラもしくは下向きのステレオカメラを用いて観測を行っているが、複雑な環境においては前向きのカメラが必要であると考えられる。次章以降では具体的な提案内容である撮影度判定手法及び経路計画手法についてそれぞれ説明する。

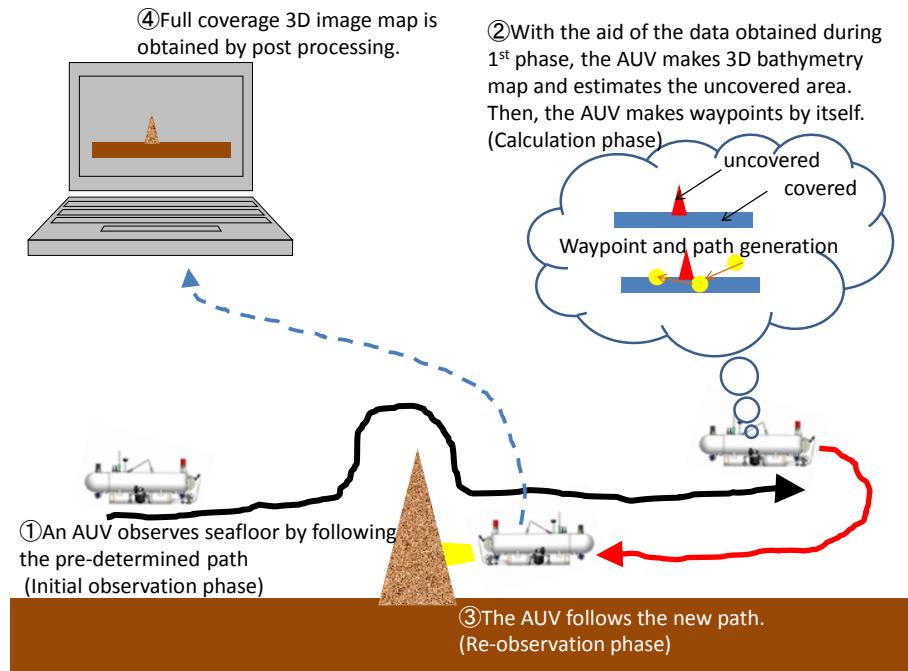


Fig. 2.1: Outline of the proposed method

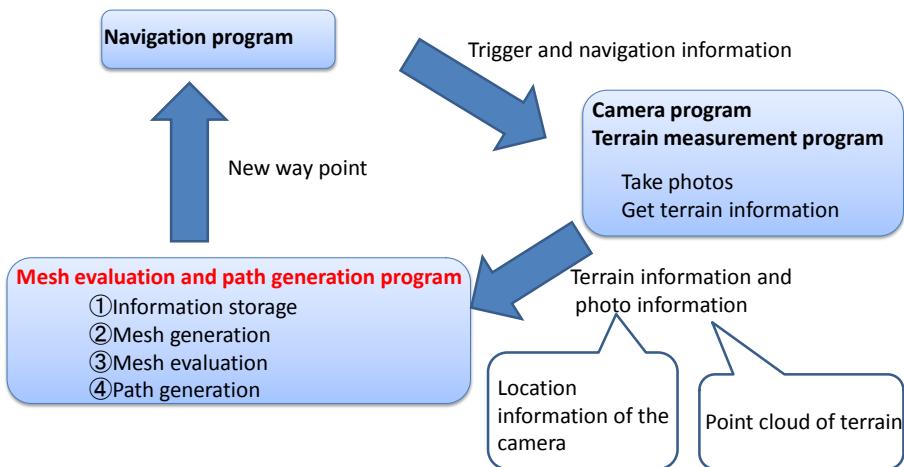


Fig. 2.2: Function of the proposed method

3 撮影度判定手法

撮影度判定手法では、まず地形計測センサーから得た点群を3次元メッシュ化する。次にそれぞれのメッシュがカメラで撮影できているかどうかを判定する。

3.1 メッシュの生成

メッシュの生成は次のような手順で行う。

- 地形情報の中から撮影範囲のものを選択し、ノイズを除去する。
- 平滑化を行う。
- 三角メッシュ化する。
- メッシュの簡略化を行う。
- メッシュの分割を行う。

3.1.1 地形情報の選別

まず地形情報の中から今回撮影するべき範囲のものを選択する。撮影範囲をAUV座標系におけるx座標 x_{\min} 以上 x_{\max} 以下、y座標 y_{\min} 以上 y_{\max} とする。その場合ある地形情報 $T(x, y, z)$ が存在する時、

$$x > x_{\min} \quad (3.1)$$

$$x < x_{\max} \quad (3.2)$$

$$y > y_{\min} \quad (3.3)$$

$$y < y_{\max} \quad (3.4)$$

となる場合のみその地形情報を使用する。次に地形情報の中には泡などによってノイズが含まれることが多いためノイズ除去を行う。今回は閾値 d 内に k 個の点がなければその点は使用しないとする。本実験では $d = 100[\text{mm}]k = 5$ を用いる。

3.1.2 平滑化

メッシュの平滑化をSunの手法[31]によって行う。Sunの手法は、2段階の手順に分けることができる。まずノイズの含まれた面を近傍の面の法線の重み付き平均によってフィルターする。次に、点の位置をノイズ除去後の面に合せて変更する。その際には最小二乗法を用いる。

3.1.3 三角メッシュ化

メッシュの生成はドロネー三角形分割によって行う。計算量と完成するメッシュの妥当性から、多くの場合にこの方法が使われている [14, 36, 55]。ドロネーの三角形分割を行えば、点群から全ての点を利用しつつ重なりのない三角形の集合が生成される。ドロネーの三角形について説明する [11, 35]。2点 p, q のユークリッド距離を $d(p, q)$ で表す。平面上に指定された有限個の点の集合 $P = p_1, p_2, \dots, p_n$ に対して、

$$V(p_i) = \{p \in \mathbf{R}^2 \mid d(p, p_i) < d(p, p_j) \text{ for } j = 1, 2, \dots, n; j \neq i\} \quad (3.5)$$

を p_i のボロノイ領域という。2つのボロノイ領域の境をなす線分はボロノイ辺、ボロノイ辺の端点はボロノイ点と呼ばれる。2つのボロノイ領域がボロノイ辺を共有するとき対応する母点を線分で結んでできる図形はドロネー網と呼ばれる。Fig.3.1 に、ボロノイ図とドロネー網の図を示す。オレンジ色がボロノイ図であり、青色がドロネー網、水色の点が母点である。Fig.3.1 のような2次元空間であれば、特殊な場合を除きドロネー網は三角形となる。このようにドロネー三角形はボロノイ図の双対グラフとして定義されるが、次の二つの原理も満たしている。

- 外接円原理
 - ドロネー三角網を構成する各要素三角形の外接円内に他の母点が入らない。
- 最小角最大化原理
 - 他のいかなる組合せで母点をつないでも生成される三角形内の全要素三角形中の最小角の多さは、ドロネー三角形のそれより大きくない。

三角メッシュ化は、観測点を母点とするドロネー網を作り、それによって得られる三角形をメッシュとして分割する。なお、三角メッシュ化は、qhull [3, 5] を用いて2次元で行った。

3.1.4 メッシュの簡略化

メッシュ数が多いと後の撮影度判定の計算量が増大する。そのため、メッシュ数を減らさなければならない。この際にできるだけ元のメッシュと形状が変化しないように、Quadric Error Metric 法によりメッシュの簡略化を行った [13, 47]。メッシュの簡略化はエッジ消去と呼ばれる局所的な位相操作によって行われる。具体的には Fig.3.2 に示すように、あるエッジ e とその両端の頂点 v_1, v_2 の隣接する領域において、 e を消去して新しい頂点 v_3 を作る。この操作を連続的に実行することでメッシュの簡略化ができる。

新しい頂点である v_3 は、メッシュの各頂点における隣接面との距離の自乗和 (Quadric Error Metric) の最小化に帰着する。これによって計算コストを抑えること

が可能になった。

Fig.3.3 にあるようにある三角形面を含む平面は、平面の法線ベクトル \mathbf{n} を用いて、

$$\mathbf{n}^T \mathbf{x} + d = 0 \quad (3.6)$$

と表せる。すると、ある点 \mathbf{p} との距離は、

$$|\mathbf{n}^T \mathbf{x} + d| \quad (3.7)$$

と表せる。頂点 v のまわりの面に対するこの距離の自乗を集めたものを、その頂点の QEM として定義する。 $area(f)$ を面 f の面積、 \mathbf{A} を 3×3 の対称行列、 \mathbf{b} を列ベクトル、 c をスカラーとした時、

$$\begin{aligned} Q^v(\mathbf{v}) &= \sum_{f \ni v} area(f) |\mathbf{n}_f^T \mathbf{v} + d_f|^2 \\ &= \mathbf{v}^T \mathbf{A} \mathbf{v} + 2\mathbf{b}^T \mathbf{v} + c \end{aligned} \quad (3.8)$$

という 2 次式で表せる。面の面積による重み付けは、三角形の大きさによって QEM の大きさが変化することを防ぐためである。各頂点には、 $Q^v = (\mathbf{A}, \mathbf{b}, c)$ を構成する 10 個の数が与えられ、これがメッシュの形状を表現する。エッジ消去の時は、二つの頂点が持つ QEM(Q^{v1}, Q^{v2}) を加算したものを新しい頂点に引き継ぐ。

この方法は、もとのメッシュの頂点を全て保存しておき位相操作の各段階でその近傍にある頂点座標を集めて最小二乗法によって最適値を決定する方法 [16] に比べ、遜色ない結果が得られることが確認されている。なおメッシュの簡略化処理は、QSlim Simplification Software [12] を用いて行った。

3.1.5 メッシュの分割

後の撮影度判定ではメッシュ 1 つ 1 つが撮影されているか判定する。そのためあまりに大きいメッシュであると判別ができないため次のような方法でメッシュを分割した。

Fig.3.4 のような頂点 $v1(x_1, y_1, z_1), v2(x_2, y_2, z_2), v3(x_3, y_3, z_3)$ を持つメッシュを考える。 $v1v3$ の長さが閾値 r より長い時、

$$v4_x = \frac{x_1 + x_3}{2} \quad (3.9)$$

$$v4_y = \frac{y_1 + y_3}{2} \quad (3.10)$$

$$v4_z = \frac{z_1 + z_3}{2} \quad (3.11)$$

となる頂点 $v4$ を新しく追加し、メッシュにも三角形 $(v1, v2, v4)$ と $(v2, v3, v4)$ をそれぞれ追加する。すべてのメッシュのすべての辺が r 以下になった時分割を終了する。

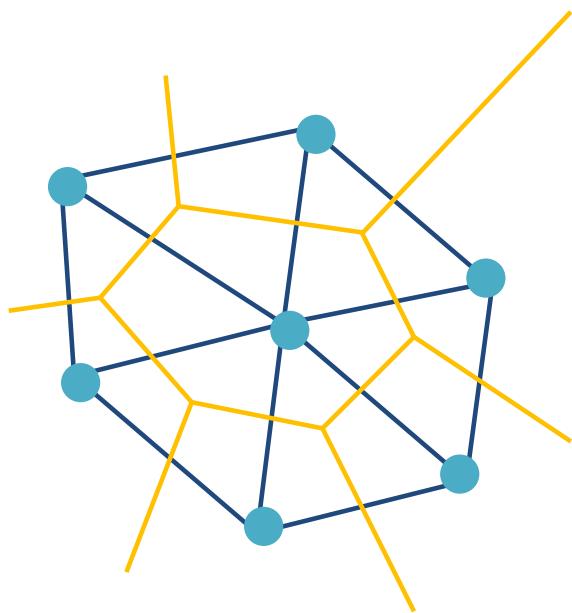


Fig. 3.1: Volonoi diagram and Delaunay triangulation

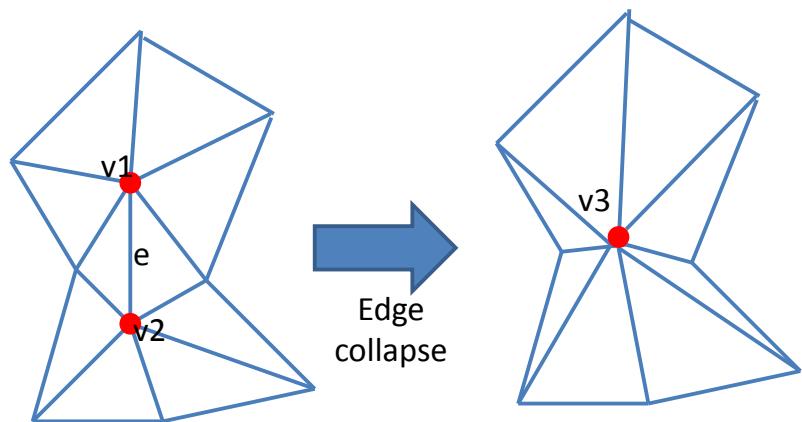
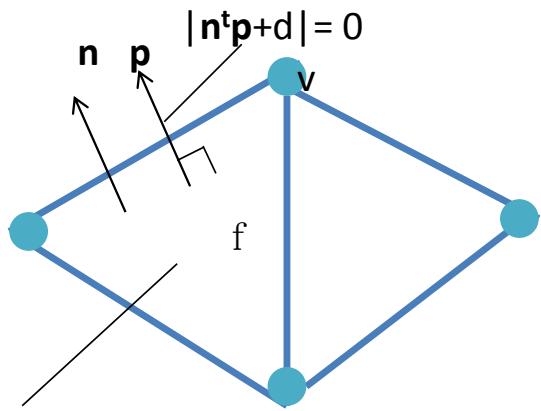


Fig. 3.2: Edge collapse

今回の実験では $r = 50[\text{cm}]$ を用いた .



$$n^t x + d = 0$$

Fig. 3.3: Definition of QEM

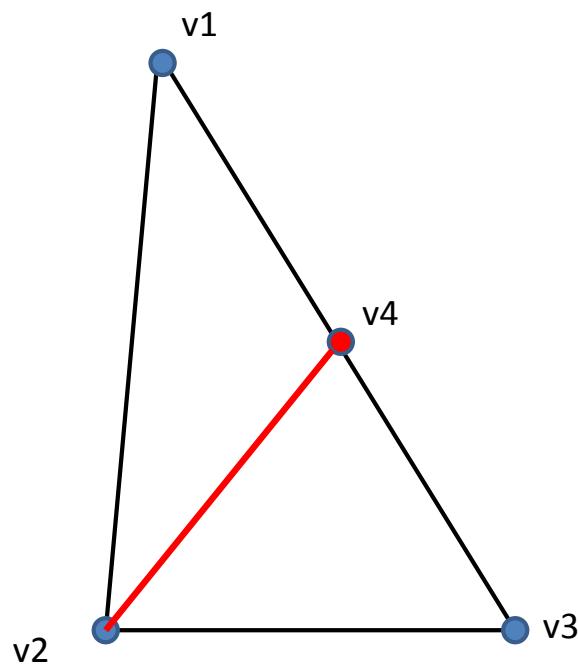


Fig. 3.4: Mesh division

3.2 撮影度判定手法

生成されたメッシュと海底画像の撮影情報を用いて，1つ1つのメッシュが撮影されているのか判定していく．リアルタイムで処理し，新たな経路を生成して再撮影を行うことを考え厳密性よりも速度を重視した．そのためメッシュ全体での判定を行わず，メッシュの重心座標をメッシュの代表点として全ての判定を行っている．

3.2.1 撮影情報

撮影情報として，海底画像を撮影した時の AUV の位置情報を用いる．ただし，撮影された海底画像の内フラッシュがついていない画像については事前に除外する．除外の方法は以下である．

- 画像のサイズを 8 分の 1 にする
- 全画素の明るさを調べる
- 閾値以上の明るさのものがあればフラッシュがついていると判別する

画像のサイズを小さくする理由は全ての画素を調べる際に計算量を少なくするためである．なお，後処理で画像マッピングをすることを考慮して画像の保存は元の大きさで行う．今回の実験では閾値は 5(最大 255) を用いた．実際に実験で撮影された画像を Fig.3.5 に示す．左がフラッシュ有りと判断された画像であり，右がフラッシュ無しと判断された画像である．

3.2.2 メッシュの撮影度判定

撮影度判定の概要を Fig.3.6 に示す．各画像撮影時のカメラの位置姿勢情報を元にメッシュが撮影済みかどうかを判断する．

次の 4 つの条件を満たす画像がある場合，当該メッシュはその画像によって撮影されていると判定する．なお，メッシュの重心座標を \mathbf{m} ，法線ベクトルを \mathbf{n} ，カメラの撮影位置を \mathbf{p} ，カメラの視線ベクトルを \mathbf{c} とする．

まず第一にカメラからの距離が一定以上近くなければならない (Fig.3.6①)．閾値を d_{max} とした時，

$$d = |\mathbf{m} - \mathbf{p}| < d_{max} \quad (3.12)$$

を満たさない場合はその写真ではメッシュは撮影されていないと判断される．

次に画像中のメッシュの位置が一定以上近くなければならない (Fig.3.6②)．写真の端は歪みの影響などを受けやすいためである．カメラ座標系でのメッシュの重心を cx_g, cy_g, cz_g とし，画像座標の長辺方向の閾値を h_{max} ，短辺方向の閾値を v_{max} とし

た時 ,

$$\left| \frac{cz_g}{cx_g} \right| < h_{max} \quad (3.13)$$

$$\left| \frac{cy_g}{cx_g} \right| < v_{max} \quad (3.14)$$

を満たさない場合はその写真ではメッシュは撮影されていないと判断される .

第三にメッシュの法線ベクトルのカメラの視線ベクトルに対する向きである (Fig.3.6③) . 法線ベクトルと視線ベクトルのなす角の余弦に対する閾値を S_{min} とした時 ,

$$\frac{\mathbf{n} \times \mathbf{c}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{c}|} > S_{min} \quad (3.15)$$

を満たさない場合はその写真ではメッシュは撮影されていないと判断される .

最後にカメラとメッシュとの間に遮蔽物が存在しないという条件である (Fig.3.6④) .

メッシュと視線ベクトルを結ぶ線分周辺のメッシュ k に対して以下の判定を行う . メッシュ k の法線ベクトルを \mathbf{n}_k , 各頂点の位置ベクトルをそれぞれ $\mathbf{v1}_k$, $\mathbf{v2}_k$, $\mathbf{v3}_k$ とする .

初めにメッシュ k 平面とカメラの視線ベクトルの交点座標を計算する . これがメッシュ k の内部であればメッシュとカメラの間に遮るものがあることになる . まずメッシュ k 平面と \mathbf{m} , \mathbf{p} の距離の比 $h_m : h_p$ を求める .

$$h_m = |\mathbf{n}_k \times (\mathbf{m} - \mathbf{v1}_k)| \quad (3.16)$$

$$h_p = |\mathbf{n}_k \times (\mathbf{p} - \mathbf{v1}_k)| \quad (3.17)$$

交点はメッシュとカメラを $h_m : h_p$ に内分する点である . この時点で h_m と h_p が異符号であった場合 , 交点はメッシュとカメラの間にないことになるため遮っていないことがわかる . 符号が同一であった場合交点 \mathbf{i} は次のように求められる .

$$\mathbf{i} = \frac{h_p \times \mathbf{m} + h_m \times \mathbf{p}}{h_m + h_p} \quad (3.18)$$

次に交点 \mathbf{i} がメッシュ k の内部にあるか調べる .

$$\mathbf{n1}_k = \mathbf{v1}_k - \mathbf{i} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{n2}_k = \mathbf{v2}_k - \mathbf{i} \quad (3.20)$$

$$\mathbf{n3}_k = \mathbf{v3}_k - \mathbf{i} \quad (3.21)$$

とした時に ,

$$\mathbf{n1}_k \times \mathbf{n2}_k > 0 \cap \mathbf{n2}_k \times \mathbf{n3}_k > 0 \cap \mathbf{n3}_k \times \mathbf{n1}_k > 0 = true \quad (3.22)$$

もしくは

$$\mathbf{n1}_k \times \mathbf{n2}_k < 0 \cap \mathbf{n2}_k \times \mathbf{n3}_k < 0 \cap \mathbf{n3}_k \times \mathbf{n1}_k < 0 = \text{ture} \quad (3.23)$$

を満す場合に i はメッシュ k の内部にあり視線を遮っている。全ての周辺メッシュにおいて視線を遮っていないと判定された場合、カメラとメッシュの間には遮蔽物が存在しないと判断する。なおこの計算はメッシュ数の 2 乗に比例して計算量が増えるため時間削減のため最後に判定を行う。

一度ある画像で撮影されたと判定されたメッシュに関しては他の画像については判定を行わないものとする。撮影度判定時点では最適な画像を選択しているわけではなく、あくまでも撮影できているか否かを判断するために行っているからである。

3.3 最適画像の選択

3.2 節の撮影度判定手法はオンラインで AUV 自身が地形を撮影できたかできていないかの判別を行うための手法である。その際にはあるメッシュが複数の画像で撮影されていたとしても、最適な画像を選択するわけではなく写っている画像が一枚でもあれば検索を終了する。しかし、AUV を回収してから後処理で 3D マップを生成する際にはできるだけクオリティの高い画像を選択する必要がある。そこで、3.2 節と同様の判定を行い最適画像を選択する。メッシュの写真に対する撮影クオリティ q は、3.2 節の記号を用いると、

$$q = \kappa \left(3 - \frac{d}{d_{max}} - \frac{|cz_g|}{|cx_g|} - \frac{|cy_g|}{|cx_g|} + \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{c}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{c}|} \right) \quad (3.24)$$

と表せ、 q が大きいほどクオリティが高いといえる。ただし κ は、メッシュと画像の間に遮るもののがなければ 1、あれば 0 となる。それぞれの項は、距離は近いほど良く、画像の中心にある程良く、類似度は高い方が良いため上記のような式になった。また、それぞれのパラメーターについて重み付けをすることも可能である。

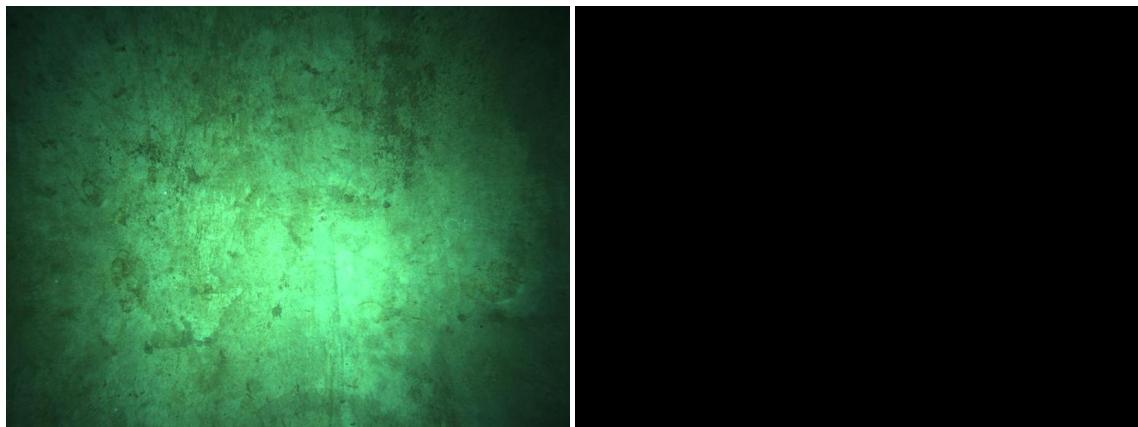


Fig. 3.5: Seafloor pictures taken by Tri-TON left: a normal picture right: a picture without flash

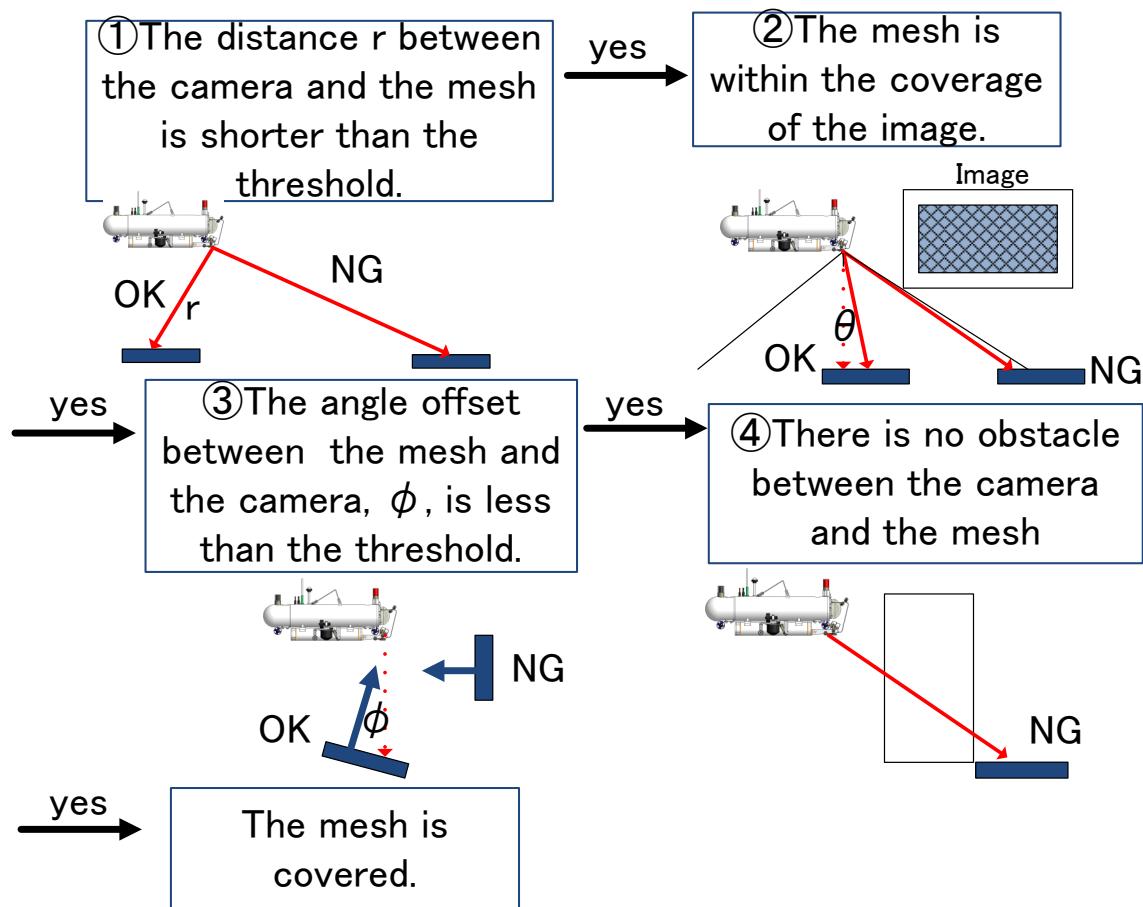


Fig. 3.6: Outline of the mesh evaluation method

4 経路計画手法

4.1 概要

経路計画手法の目的は、撮影度判定によって判明した未撮影メッシュを少ない移動コストで観測するための経路を求めることがある。AUVは前進と上下運動、ヨー回転が可能であるとする。経路は水平方向の位置 x, y と水深 z および方位 ψ からなるウェイポイントの集合とする。経路計画の概要を Fig.4.1 に示す。まずは隣接している未撮影メッシュごとにグループ化する。その際に面積が閾値 δ より小さいグループは削除する。今回は、 $\delta = 5000[\text{mm}^2]$ を用いた。次に各グループ内でウェイポイントとそれらを結ぶ経路を生成する。最後にグループ間での経路を求める。AUV内で短時間で経路計画を完了する必要があるため、計算量に制約がある。よって最適解ではなく、実行可能解を求める。

4.2 グループ内ウェイポイントの生成方法

グループ内のウェイポイントは次のように生成する。

- メッシュ 1 つずつにそのメッシュを撮影するのに適した点である撮影点を生成する。
- 全ての撮影点でその撮影点が撮影できるメッシュを求める。
- 撮影点の中から適切なウェイポイントを選択する。

4.2.1 撮影点生成

初めにそれぞれの未撮影メッシュ $M_i(x_i^m, y_i^m, z_i^m)$ に対して適切な撮影点 $p_i(x_i, y_i, z_i, \psi_i)$ を求める。適切な撮影点とは、ある未撮影メッシュが撮影できるような AUV の位置のことである。Fig.4.2 に概要を示す。黄色の四角が AUV であり、三角形がメッシュである。赤色の線がカメラの視線ベクトルである。まず、メッシュと下向きカメラの法線ベクトルの余弦が閾値より大きければ、メッシュは下向きカメラで撮影し得ると判断する。その場合、下向きカメラで撮影できるような撮影点を設定する。メッシュの真上距離 D に下向きカメラがあるような AUV の位置のことである。Fig.4.3 にメッシュと撮影位置の関係を示した。撮影点生成時点では方位 ψ は求めず、経路生成の際に方位変換の少ない方位に決定する。そのため AUV の位置自体は現時点では求められない。撮影点を求めて、撮影点とメッシュの間に遮蔽物が存在

する可能性があるため，遮蔽物が間に存在するかどうかを判定する．もし間に遮蔽物が存在しなければ， M_i は下向きカメラの撮影点候補を持つものとする．つまり，撮影点は

$$x_i = x_i^m \quad (4.1)$$

$$y_i = y_i^m \quad (4.2)$$

$$z_i = z_i^m + D \quad (4.3)$$

となる．下向きカメラの撮影点をまず調べるのは，下向きのカメラは heading の向きに関係なく撮影できるため撮影しやすいと考えられるからである．下向きカメラで撮影点が生成できなければ，次は前向きカメラで撮影を行うことを考える．前向きカメラの場合は，xy 平面でのカメラの視線ベクトルとメッシュの法線ベクトルが近くなる必要がある．そのため，メッシュの法線ベクトルの xy 成分によってまず heading を決定する． M_i の法線ベクトルを (m_x, m_y, m_z) とする．ただし， $m_z > 0$ とする．

$$\psi_i = \pm \arctan \frac{m_y}{m_x} \quad (4.4)$$

ただし， ψ_i はこの向きにカメラが存在した場合のカメラの視線ベクトルとメッシュの法線ベクトルのなす余弦が正となる符号を選択する．次に z_i を決定する．カメラのとりつけピッチ角を c_a とする．その時，

$$z_i = z_i^m + D \sin(c_a) \quad (4.5)$$

とする．

$$D2 = D \cos(c_a) \quad (4.6)$$

とした時に， x_i と y_i は

$$x_i = x_i - D2 \cos \phi \quad (4.7)$$

$$y_i = y_i - D2 \sin \phi \quad (4.8)$$

とする．この撮影点とメッシュの間に遮蔽物がないかを判定し，もしなければ M_i は前向きカメラの撮影点を持つものとする．

4.2.2 撮影点の撮影判定

全ての撮影点に対して，未撮影メッシュがどれだけ撮影できるか調べる．撮影の可否は撮影度判定手法と同条件により判定する．下向きカメラに関しては，撮影方向を定めないため撮影範囲の判定については長辺方向と短辺方向の区別を設けず，両方を

短辺方向の値で判定した。また、前向きカメラの撮影点を持つものに関しては下向きカメラの位置も一意に定まるため前向きカメラだけではなく下向きカメラも存在するものとして判定を行った。つまり、下向きカメラの撮影点を持つメッシュに関しては一つの撮影点で一つのカメラの判定を行い、前向きカメラの撮影点を持つメッシュに関しては一つの撮影点で二つのカメラの判定を行った。撮影点 p_i で未撮影メッシュ M_j が撮影できれば $s_{ij} = 1$ 、撮影できなければ $s_{ij} = 0$ とする。 p_i における撮影可能メッシュ数 $t_i = \sum_j^n s_{ij}$ とする。撮影点と未撮影メッシュ、撮影可能メッシュ、撮影可能メッシュ数の関係を Fig.4.5 に示す。

4.2.3 ウェイポイント選択

α を一度の撮影で撮影すべき最低メッシュ数とする。少ない回数で全てのメッシュを撮影することができれば移動コストは小さくなる。集合被覆問題 [38] を参考に、 N をグループ内未撮影メッシュの集合としたときウェイポイント生成問題は以下のように定式化される。

$$\min \sum_{j=1}^n f_j \quad (4.9)$$

$$\max \sum_{j=1}^n \min \left\{ \sum_{i=1}^n s_{ji} f_i, 1 \right\} \quad (4.10)$$

ただし、

$$\sum_{i=1}^n s_{ij} f_i \geq \alpha \quad (j \in f_j = 1) \quad (4.11)$$

$$f_j \in \{0, 1\} \quad (j \in N) \quad (4.12)$$

である。 f_j は p_j をウェイポイントに選ぶ場合 1 で選ばない場合 0 とする。式 4.9 は、ウェイポイントを選択する数を最小にするという意味である。式 4.10 は、撮影メッシュ数を最大にするという意味である。式 4.11 は、一度に撮影されるメッシュ数は α 以上という意味である。式 4.12 は、 f_j は 0 か 1 であるという意味である。

この問題の実行可能解を求めるために、以下の方法でウェイポイントを決定する。

1. t の中で t_k が最大となる撮影点 p_k をウェイポイントに追加する。 t_k, s_k をリストから削除する。
2. $s_{ij} = (1 - s_{kj})s_{ij}$ のように残り全ての s について更新。 t も更新。
3. 1,2 をくりかえし、残りの $\sum s = 0$ か、一度に撮影できるメッシュ数が α 未満となった時点で終了する。

また, グループ全体の価値 v を以下のように設定する. ただし, $area_i$ は M_i の面積であり, val_i は M_i の優先度である. 優先度は目標によって変化させる. 例えば壁面の情報が重要な場合はメッシュの法線ベクトルによって優先度を変化させる. ある場所を重点的に調べたければ, メッシュの座標によって優先度を変化させねば良い. 今回の実験では優先度は全て等しいものとする. よって面積によってグループの価値は決定される.

$$v = \sum_{i=1}^n val_i area_i \quad (4.13)$$

4.3 グループ内での経路計画

次に, グループ内での経路計画を行う. 即ち先述のように生成されたウェイポイントをたどる順番を決める. ウェイポイント w_i から w_j に移動する際のコストを c_{ij} は, w_i と w_j の xy 方向の距離を a_{ij} と, w_j において回転する角度を b_{ij} としたとき定数 W を用いて,

$$c_{ij} = a_{ij} + Wb_{ij} \quad (4.14)$$

と表せる. ただし W は直線移動と回転移動の速度によって決定する. R をグループ内のウェイポイント集合とする. 一度通ったウェイポイントは通らずに全てのウェイポイントを通るために, ウェイポイントの順番並びかえ問題は非対称巡回セールスマント問題 [54] を参考に, 次のように定式化される.

$$\min \sum_{i=1}^r d_{ij} c_{ij} \quad (4.15)$$

ただし,

$$\sum_{j:j \neq i} d_{ij} \leq 1 \quad (4.16)$$

$$\sum_{i:i \neq j} d_{ij} \leq 1 \quad (4.17)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in R - S} d_{ij} + \sum_{i \in S} \sum_{j \in R - S} d_{ji} \neq 1 \quad (S \subset R, S \neq \emptyset, S \neq R) \quad (4.18)$$

$$\sum_{i=1}^r \sum_{j:j \neq i} d_{ij} = r - 1 \quad (4.19)$$

$$d_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i \in R, j \in R, i \neq j) \quad (4.20)$$

である。 d_{ij} は $w_i w_j$ を通った場合 1, 通らない場合は 0 となる。式 4.15 は, コストを最小化するという意味である。式 4.16 は, どのウェイポイントも到着点となるのは 1 回未満であることを表している。ある一つのウェイポイントはスタート地点となるため到着点にはならず他のウェイポイントは全て一度ずつ到着点となる。式 4.17 は, どのウェイポイントも出発点となるのは 1 回未満であることを表している。ある一つのウェイポイントは最終地点となるため出発点とならず他のウェイポイントは全て一度ずつ出発点となる。式 4.18 は, 部分巡回路除去制約 [45] と呼ばれる, 路がつながっていないといけないという条件である。Fig.4.7 に, 部分巡回路の例を示す。このような経路が生成されれば, 例えウェイポイントを一度ずつしか通っておらずかつ全てのウェイポイントから出発する路は 1 つであり全てのウェイポイントに到着する路は 1 つであっても求めたい経路にはならない。したかって式 4.18 のような集合 S に含まれるウェイポイントの内一つは集合 S に含まれないウェイポイントへ向うもしくは集合 S に含まれないウェイポイントから来る路が存在するという条件が必要となる。式 4.19 は, ウェイポイントからウェイポイントへの移動はウェイポイントの総数から 1 を引いた数であるという条件である。最初の地点に戻る必要がないため, 最後のウェイポイントからはどこにも向かわないとある。式 4.20 は, d_{ij} は全て 0 か 1 であるという意味である。

下向きカメラの撮影点がウェイポイントになった場合は, ψ が決っていない。下向きカメラの撮影点のウェイポイント $w_m(x^m, y^m, z^m)$ の ψ は, その直前のウェイポイント $w_f(x^f, y^f, z^f)$ からの回転コストが最小となるように決定される。ウェイポイントの向きについての図を Fig.4.6 に示す。ピンク色が下向きカメラの撮影点のウェイポイントである。前のウェイポイントからピンク色のウェイポイントに移動するとそのままの姿勢で撮影を行う。すなわち,

$$\psi = \arctan \frac{y^m - y^f}{x^m - x^f} \quad (4.21)$$

となるような ψ を決定し, それに合せて AUV の位置も決定する。そのため, 前のウェイポイントが変ればウェイポイントの位置姿勢は変化する。このような非対称性により, 従来用いられている巡回セールスマン問題の解法の内の多くは利用できない。この問題の実行可能解を求めるために, 以下の方法で順番を決定する。巡回セールスマン問題では nearest-neighbor 法 [39] と呼ばれる構築的解法である。この方法は一度決定したウェイポイントを変更することができないため計算コストが少ない。また, 今回は巡回セールスマン問題とは違い巡回せずに最後の点で終了するため nearest-neighbor 法の最後の方に長距離の路が発生する問題が起こりにくいと考えられるため選択した。

1. ウェイポイント群の重心から最も離れたウェイポイントをスタート地点とする。
2. まだ通っていないウェイポイントの中で現在地から最も低コストで行けるウェ

イポイントを次の地点とする .

3. 2 を繰り返し通っていない場所がなくなったら終了 .

4.4 グループ間での経路計画

最後にグループ間での経路計画を行う . グループ i の価値を v_i , 内部の移動コストを $cost_i$ とする . 各グループはスタート地点とゴール地点を持つものとする . グループ i のゴール地点からグループ j のスタート地点に移動する場合のコストを C_{ij} とする . 制限時間を $limit$ とする . U をグループの集合とする . 一度通ったグループは通らないとするとき , 時間内の価値を最大化する問題は次のように定式化される .

$$\max \sum_{i=1}^u h_i v_i \quad (4.22)$$

ただし ,

$$\sum_{i=1}^u h_i cost_i + \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^u q_{ij} C_{ij} \leq limit \quad (4.23)$$

$$h_i \in \{0, 1\} \quad (i \in U) \quad (4.24)$$

$$\sum_{j:j \neq i} q_{ij} \leq 1 \quad (4.25)$$

$$\sum_{i:i \neq j} q_{ij} \leq 1 \quad (4.26)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in U - S} q_{ij} \geq \min\{\sum_{i \in S} h_i, 1\} \quad (S \subset U, S \neq \emptyset, S \neq U) \quad (4.27)$$

$$\sum_{i=1}^u \sum_{j:j \neq i} q_{ij} = \sum_{i=1}^u h_i - 1 \quad (4.28)$$

$$\sum_{i:i \neq j} ((1 - h_i) \sum_j q_{ij}) = 0 \quad (4.29)$$

$$\sum_{j:j \neq i} ((1 - h_j) \sum_j q_{ij}) = 0 \quad (4.30)$$

$$q_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i \in U, j \in U, i \neq j) \quad (4.31)$$

である . h_i はグループ i を経路に含める場合は 1 , 含まない場合は 0 である . q_{ij} はグループ i から j へ移動する場合は 1 , 移動しない場合は 0 である . 式 4.22 は , 価値

を最大にするという意味である。式 4.23 は、経路に含まれるグループ内の移動コストとグループ間の移動コストの合計が制限以内であるという条件である。式 4.24 は、 h_i は 0 か 1 であるという条件である。式 4.25 は、あるグループは最大 1 回到着地点となるという条件である。今回はグループの中には経路に含まれないグループが存在する。また、経路の始めのグループは到着地点とならない。式 4.26 は、あるグループは最大 1 回出発地点となるという条件である。今回はグループの中には経路に含まれないグループが存在し、経路の最後のグループは出発地点とはならない。式 4.27 は、部分巡回路除去制約条件である。 $\min\{\sum_{i \in S} h_i, 1\}$ は、集合 S の中の全てのグループが経路に含まれない場合は q_{ij} は 0 であるために付加された。式 4.28 は、グループからグループへ移動する回数は、経路で通るグループの数より 1 少ない回数であるという条件である。式 4.29 は、経路中に含まれるグループ i が出発地点となることはあっても、経路に含まれないグループは出発地点とならないという条件である。 $1 - h_i$ はグループ i が経路に含まれる場合は 0、含まれない場合は 1 となる。 $\sum_j q_{ij}$ はグループ i が経路に含まれかつ経路の最後のグループでない場合は 1、経路の最後のグループとなるもしくは含まれない場合は 0 となる。よって、経路に含まれないグループが出発地点とならない限り、かつ、経路に含まれるグループから出発する移動が存在しないということがない限り左辺は必ず 0 となるはずである。式 4.30 は、経路中に含まれるグループ i が到着地点となることはあっても、経路に含まれないグループは到着地点とならないという条件である。 $1 - h_i$ はグループ i が経路に含まれる場合は 0、含まれない場合は 1 となる。 $\sum_j q_{ij}$ はグループ i が経路に含まれかつ経路の最初のグループでない場合は 1、経路の最初のグループとなるもしくは含まれない場合は 0 となる。よって、経路に含まれないグループが到着地点とならない限り、かつ、経路に含まれるグループへ到着する移動が存在しないということがない限り左辺は必ず 0 となるはずである。式 4.31 は、 q_{ij} は 0 か 1 であるという条件である。また、今回は簡単化のため $limit = \infty$ とする。

実行可能解を求めるために、以下の方法で順番を決定する。グループ内のウェイポイント経路生成と同様に nearest-neighbor 法を参考にした。

1. AUV の現在地点をスタート地点とする。
2. まだ通っていないグループの中で現在地 (ゴール地点) から最も低コストでスタート地点へ行けるグループを次のグループとする。
3. 2 を繰り返し全てのグループを通れば終了。

4.4.1 AUV の行動制限時間を持つ場合

AUV の行動時間に制限を設ける場合 , この問題は NP 困難なので良い近似を与える高速な解法の構成が難しい . そこで , この場合は動的計画法 [49] によって厳密解を求める . 制限時間内で総価値が最も高い経路を求めるためには以下の方法で経路を決定する .

- $dp[s][v]$ をグループ集合 s を通り , 現在グループ v にいるような経路の最小コストとする .
- 初期値として全ての $dp[s][v]$ について $+\infty$ を入れる .
- より良いコストを見つけるごとに値を更新していく .
- 更新を繰り返すと値が改善されない状態になるため , その時の $dp[s][v] \leq \text{limit}$ であるような経路のうちで最も総価値が高いものを解とする .

計算時間は $2^N N^2$, 必要メモリは $2^N N$ に比例する . そのため普通の計算機においてもグループ数が 20 より多い場合には計算に時間がかかる .

4.5 経路の改善

一度生成された経路を改善し , より低コストな経路を生成する . 今回は 3-opt 法 [54] を非対称経路に用いる場合の方法を使って経路探索を行った . 模式図を Fig.4.8 に表した . 非対称とはウェイポイント a からウェイポイント b への移動コストとウェイポイント b からウェイポイント a への移動コストが異なるということである . 3-opt 法とは巡回路のなかから 2 都市間を結ぶ経路 (a-b , c-d , e-f in Fig.4.8) を 3 つ選択し , 入れ替えを行うことによってコストを削減していく方法のことである . C_{ab} を a から b への移動コストとすると ,

$$C_{ab} + C_{cd} + C_{ef} > C_{ad} + C_{eb} + C_{cf} \quad (4.32)$$

を満たす場合に巡回路を赤線のように入れかえる . この方法ではスタート地点から a 間 , b から c 間 , d から e 間 , f から最後のウェイポイント間のコストの変化がないため上記の計算だけでコストの見積りが可能であり計算量が少ない . 計算回数はウェイポイント数を n とした時 , $\frac{1}{6}(n-3)(n-4)(n-5)$ である . もう一つの入れ替え候補である ad , ec , bf と入れ替えた場合は c から b の間でウェイポイント間のコストが b から c の場合と異なるために再計算しなければならない . よって今回は上記の入れ替えのみを行うものとした .

実海域データに対して求めたウェイポイントの内の一つの経路改善前の経路とチムニーの図を Fig.4.9 に示す . Fig.4.10 に , ウェイポイントが改善されてる経路を示

す．下の数字は初期の経路のコストに対する割合である．17% の削減が行われている．Table.4.1 に，ウェイポイントの変遷を示す．初期経路の順番をウェイポイント番号とした時それぞれどのような並び順となるかを示している．ただし，表中の黄色の部分は Fig.4.8 のウェイポイント a までの部分，水色の部分が b から c，緑色の部分が d から e，オレンジ色の部分が f から最後までに対応している．

4.6 ウェイポイントの数が少ない場合

ウェイポイントの数が少ない場合，短時間で最適解を求めることができる．グループ内の経路生成 (4.3)，グループ間の経路生成 (4.4) の処理は行わず，全探索を行う．ウェイポイント w_i から w_j に移動する際のコストを c_{ij} とする．スタート地点から w_i に移動する際のコストを c_{si} とする． T をウェイポイント集合とする．この場合の AUV の移動コストを最小とする問題は次のように定式化される．

$$\min \sum_{i=1}^t o_{ij} c_{ij} + o_{si} c_{si} \quad (4.33)$$

ただし，

$$\sum_i o_{si} = 1 \quad (4.34)$$

$$\sum_{j:j \neq i} o_{ij} \leq 1 \quad (4.35)$$

$$\sum_{i:i \neq j} o_{ij} \leq 1 \quad (4.36)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in T - S, j \neq i} o_{ij} \geq 1 \quad (S \subset T, S \neq \phi, S \neq T) \quad (4.37)$$

$$\sum_{i=1}^t \sum_{j:j \neq i} o_{ij} = t - 1 \quad (4.38)$$

$$o_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i \in T, j \in T, i \neq j) \quad (4.39)$$

である．ただし， o_{ij} は w_i, w_j を通る場合 1，通らない場合 0 となる．式 4.33 は，コストを最小化するという意味である．式 4.34 は，スタート地点からは一度だけ出発するという条件である．式 4.35 は，ウェイポイントは最大 1 回到着地点となるという条件である．一つのウェイポイントはスタート地点からの到着地点となる．式 4.36 は，ウェイポイントは最大 1 回出発地点となるという条件である．一つのウェイポイントは最終地点となるためどこにも移動する必要がない．式 4.37 は，部分巡回路除去制約

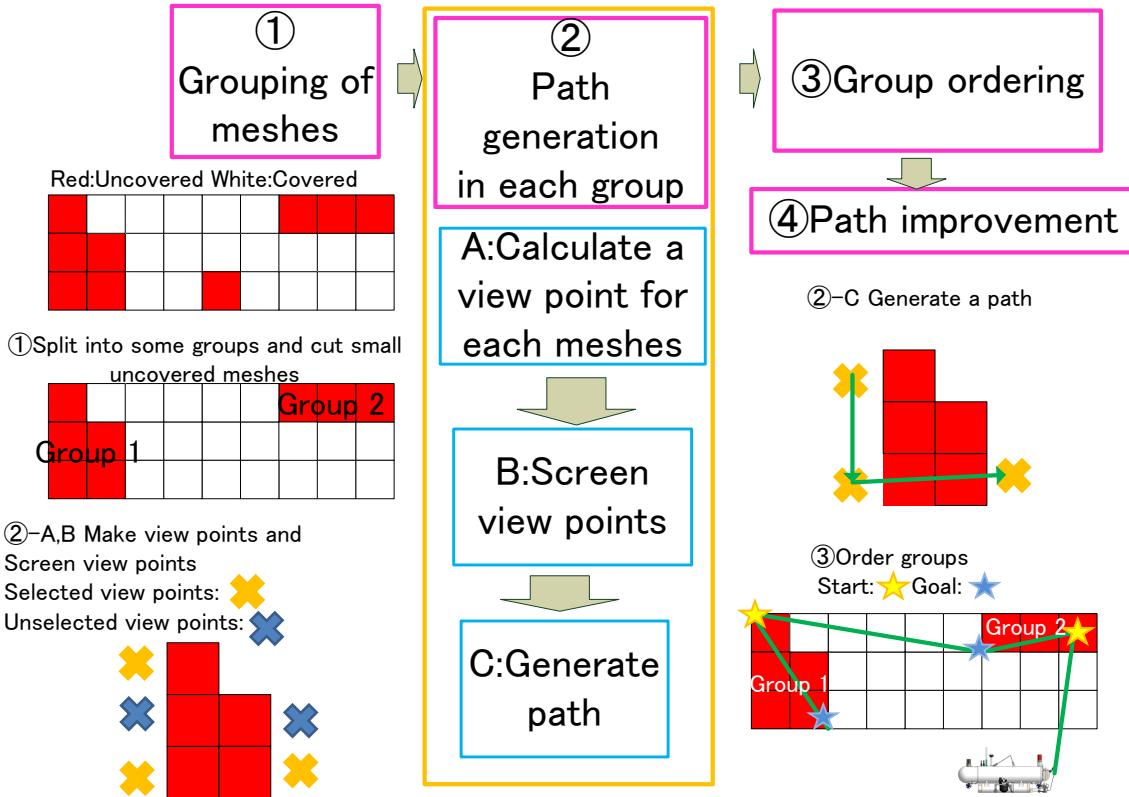


Fig. 4.1: Outline of the path planning

Table 4.1: Trace of 3opt method

path	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	1	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	2	3	15
3	1	7	8	9	10	11	12	13	14	2	3	4	5	6	15
4	1	2	3	7	8	9	10	11	12	13	14	4	5	6	15
5	1	2	14	4	5	3	7	8	9	10	11	12	13	6	15

である。式 4.38 は、ウェイポイントからウェイポイントへの移動はウェイポイントの数より 1 少ない数行われるという条件である。式 4.39 は、 o_{ij} は 0 か 1 であるという条件である。

全探索なので、全ての場合についてのコストを計算しコスト最小の経路を選択する。計算コストは $T!$ に比例するためウェイポイントが多い場合には全探索はできない。なお、今回の実験ではウェイポイント数 $k < 8$ の場合に全探索を行った。

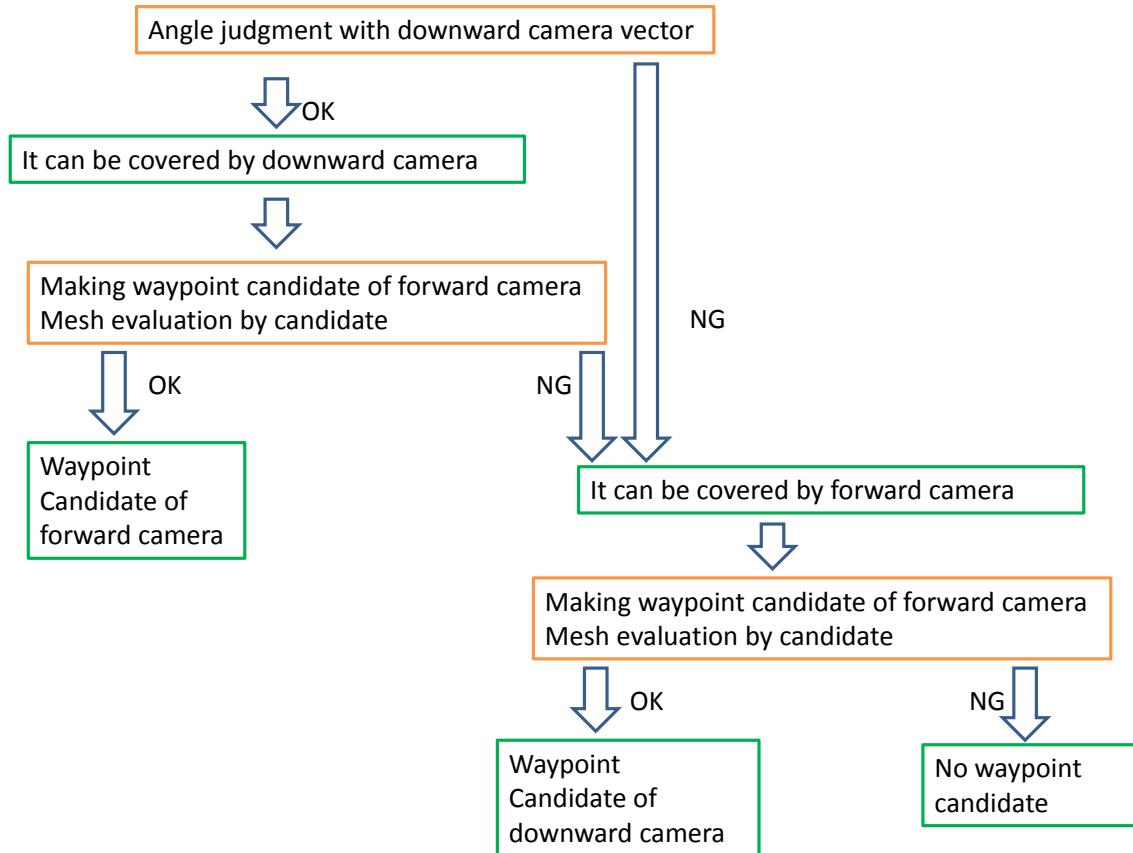


Fig. 4.2: Outline of making waypoint candidate

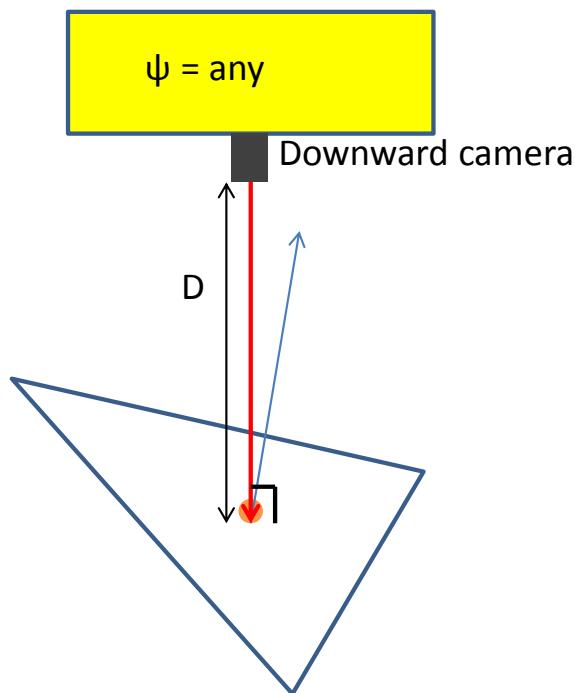


Fig. 4.3: Making waypoint candidate of downward camera

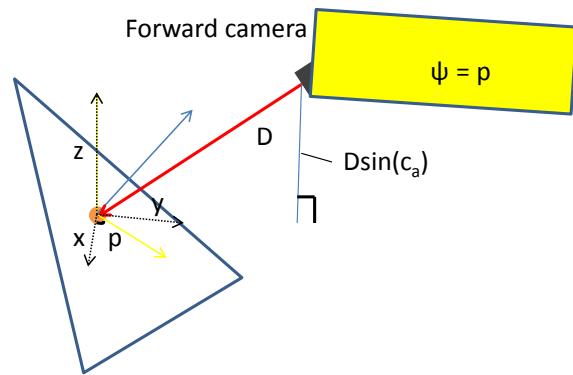


Fig. 4.4: Making waypoint candidate of forward camera

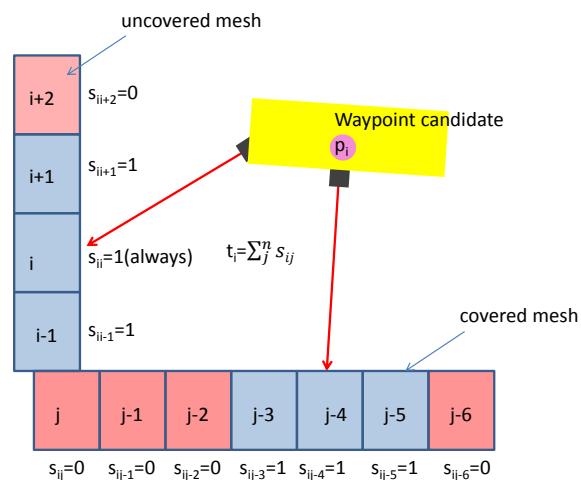


Fig. 4.5: Waypoint candidate and coverage

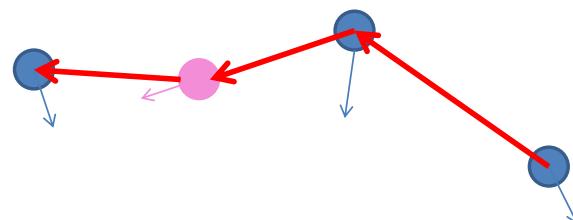


Fig. 4.6: ψ of waypoint candidate of forward camera

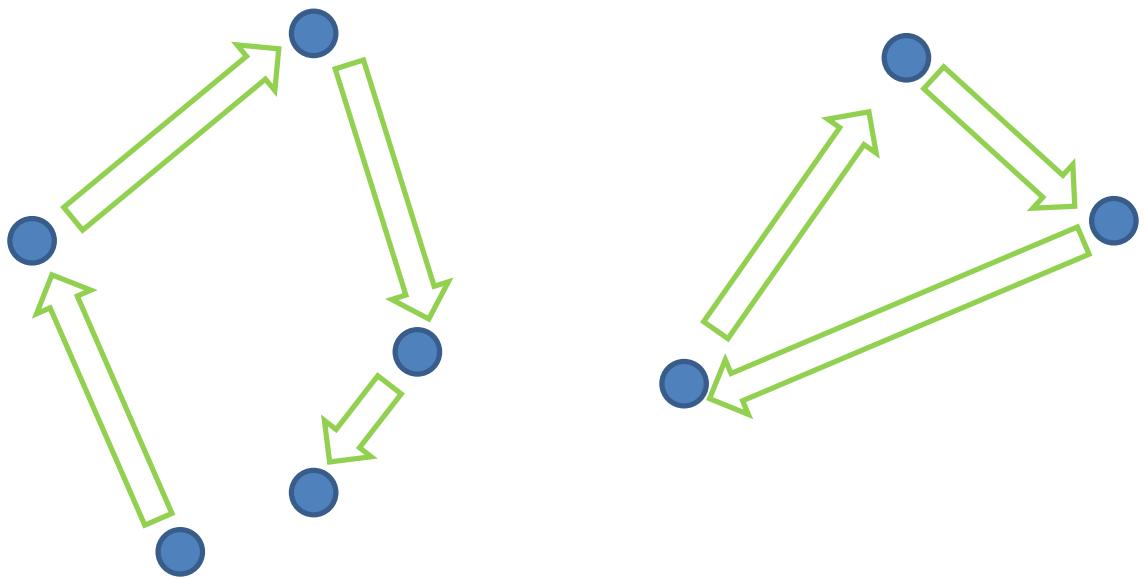


Fig. 4.7: Subtour-elimination constraints

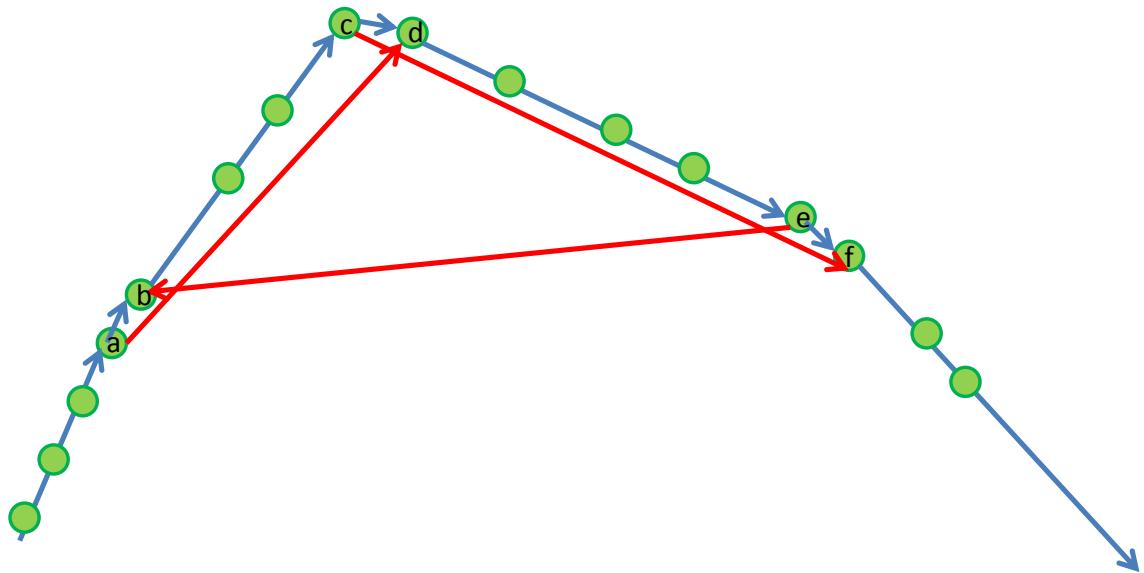


Fig. 4.8: 3opt method

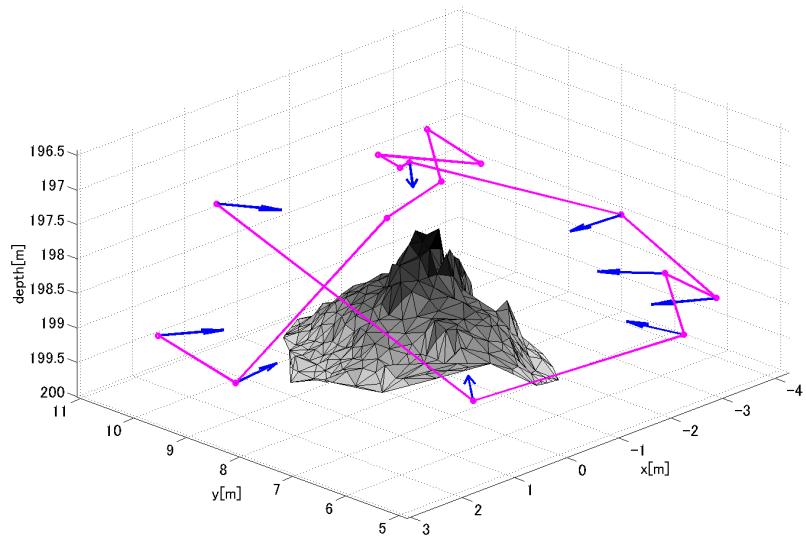


Fig. 4.9: Initial waypoint

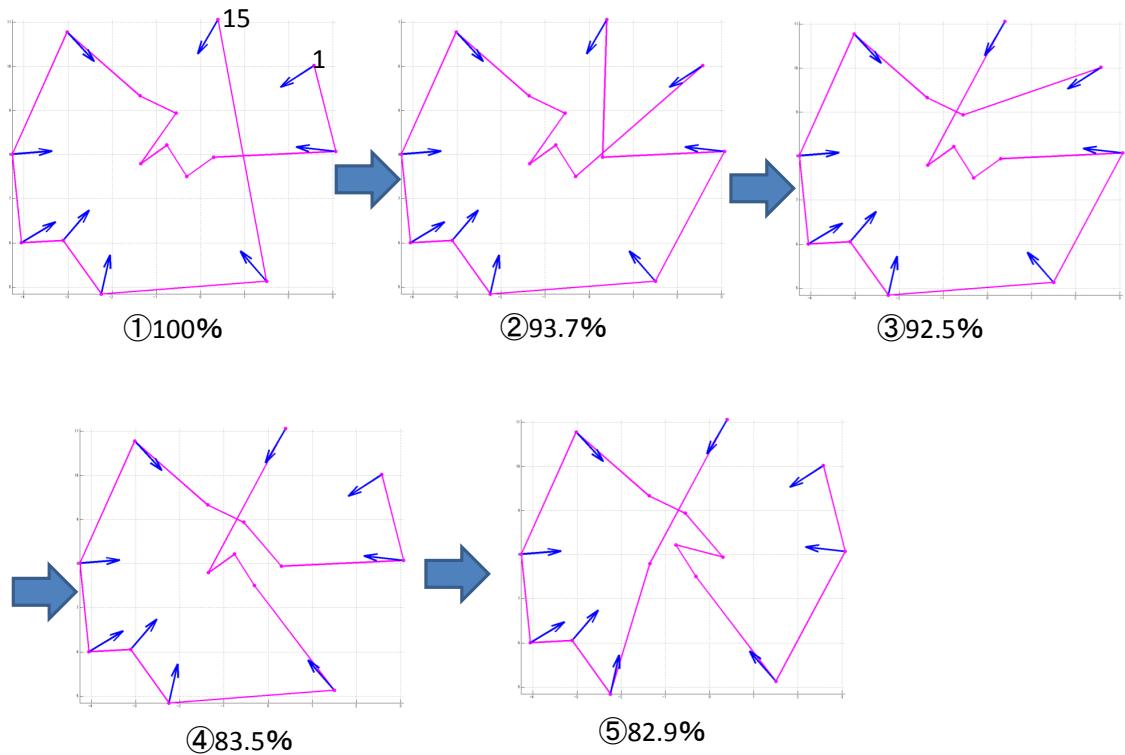


Fig. 4.10: Trace of 3opt method

5 AUV Tri-TON

本節では水槽実験に用いた AUV について述べる。AUV Tri-TON は 2011 年に東京大学生産技術研究所巻研究室にて制作されたホバリング型の AUV である [44]。Tri-TON のミッションは、熱水チムニー等の複雑な地形を持つ海底付近で移動しつつ、画像観測を行うことである。安定した姿勢で観測できるように、重いバッテリーは下部の圧力容器に納め、さらに浮力材を上部にまとめてロール・ピッチの安定性を確保する。外観写真を Fig.5.1 に、一般配置図を Fig.5.2 に、大きさ及び性能に関する情報を Table.5.1 に示す。

5.1 ナビゲーション

ナビゲーションに用いるセンサとしては、海底ステーションとの位置関係を計測する ALOC [23, 44] の他に、対地速度と高度を計測する DVL(Doppler Velocity Log)、方位角速度を計測する一軸の FOG(Fiber Optical Gyro)、姿勢センサ、深度計を装備している。実海域では水平位置と方位は ALOC、DVL、FOG によってパーティクルフィルタにより求める。また、前方下部に搭載するスキャンニングソナーにより障害物探知を行う。

5.2 制御

Tri-TON はサーボスラスター 2 台、ヒーブスラスター 2 台、スウェースラスター 1 台を搭載している。制御は、PID 制御を行っている。垂直方向に関しては深度高度の制御ができる。水平方向に関しては DVL による速度制御を行っている。方位は FOG による方位制御及び角速度制御を行っている。

5.3 ペイロード

画像観測用にカメラとフラッシュを備えるほか、光切断による地形計測用にシートレーザーを装備している。通常の海底面に加えて熱水チムニーを始めとする凹凸物の側面を観測するため、下向きではなく前向きにも配置する。マリンスナーの影響を抑えるため、カメラとフラッシュの距離を最大限に離している。ロボット原点とカメラの関係を Fig.5.3 と Table.5.2、カメラ、レーザー、フラッシュの情報を Table.5.3 に示す。Fig.5.3 において、赤色の丸が原点であり、青い丸がそれぞれのカメラの焦点である。カメラとレーザーの関係を Fig.5.4 に示す。ロボット原点から海底とチムニーまでの距離は約 2.0m である。

5.4 地形計測手法

Tri-TON の地形計測はシートレーザーとカメラを用いた光切断法 [41] によって行う。連続的に撮影を行うことで連続的に形状の計測が可能であるため安定した測定が可能である。測距の分解能は、カメラの分解能とシートレーザー装置に対するカメラの相対位置によって決まる。

東京技術生産技術研究所浦研究室のメンバーは 2003 年から光切断法を AUV の環境センサ及び観測手段として用いている [22, 50]。

5.4.1 光切断法原理

Fig.5.5 に示すようなカメラの CCD 面の中心位置を基準とする座標系においてシートレーザーが XZ 平面上の点 $Q(0,0,z_q)$ に固定されているものとする。レーザーの傾きを α とする。カメラ画像座標系は画像中心を原点として水平方向を l 軸、垂直方向を m 軸とする。画像の範囲は水平方向を $\pm l_c[\text{pixel}]$ 、垂直方向を $\pm m_c[\text{pixel}]$ とする。カメラの垂直画角を θ_c 、水平画角を ϕ_c とする。

光切断法の演算はカメラ画像上の点 $p(l_p, m_p)$ から基準座標上の点 $P(x_p, y_p, z_p)$ への写像である。カメラの視線ベクトル OP は XZ 平面に対する角度 θ_p 及び XZ 平面に対する角度 ϕ_p は画角とピクセルの関係から、

$$\tan \theta_p = \frac{\tan \theta_c}{l_c} l_p \quad (5.1)$$

$$\tan \phi_p = \frac{\tan \phi_c}{m_c} m_p \quad (5.2)$$

となる。基準座標系上の点 P の座標は、

$$\mathbf{P} = x_p \begin{bmatrix} 1 \\ \tan \theta_p \\ -\tan \phi_p \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

となる。レーザー光の軌跡である XY 平面上の平面 S は基準座標を Y 軸回りに α 回転させ、基準座標原点から Z 軸に Z_q 平行移動させたことと同じであるため、回転行列 R を用いて表すと、

$$\mathbf{R}(0, \alpha, 0) \mathbf{S} + \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ j \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \cos \alpha \\ j \\ i \sin \alpha + z_q \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

となる。また、点 P はレーザー平面 S 上にあることから、

$$x_p \begin{bmatrix} 1 \\ \tan \theta_p \\ -\tan \phi_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \cos \alpha \\ j \\ i \sin \alpha + z_q \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

となり、これを解くと、

$$x_p = \frac{z_q}{\tan \theta_p - \tan \alpha} \quad (5.6)$$

となる。よって基準座標系上の点 P の座標は

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \frac{z_q}{\tan \theta_p - \tan \alpha} \begin{bmatrix} 1 \\ \tan \theta_p \\ -\tan \phi_p \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

となる。X 方向の分解能は m に依存し、画面の上部ほど高分解能である。一方 Y 方向の分解能は 1, m の両方に依存する。m が小さく 1 が 0 に近い、つまり画面中央上部ほど高分解能である。

5.4.2 画像処理

画像処理は VisualStudio2003 と OpenCV1.0 を用いて行った。まずリアルタイムに複数カメラからの情報を処理するため、画像を 1/4 の大きさに縮小し、緑色成分だけを取りだす。次に歪み補正を行う。歪み補正は、Zhang の手法 [32] によって行った。その後 2 値化を行い、レーザーが照射している画素を求め、光切断を行った。

5.4.3 光切断の分解能

Fig.5.6 に前カメラの光切断の精度、Fig.5.7 に下カメラの光切断の精度を示す。赤色の線が垂直方向の距離であり、青色の線がカメラからの直線距離である。下カメラは下向き鉛直に設置されているため、直線距離と垂直方向の距離は一致している。前カメラとレーザーは前方 2m でロボット下面の高さを計測できるように設計されているため、垂直距離 1m 程度でも 2cm 程度の分解能になる。

5.4.4 実装

提案手法のプログラムの実装については、Visual Studio 2003, Open CV, boost を用いた。

メッシュの表示には Meshlab [2], Blender [1](テクスチャマッピング), Matlab [51](ウェイポイントの表示など) を用いた。

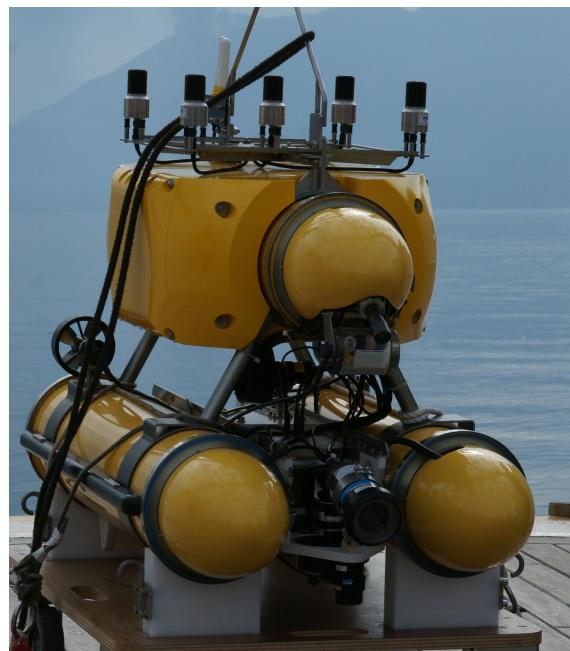


Fig. 5.1: AUV Tri-TON

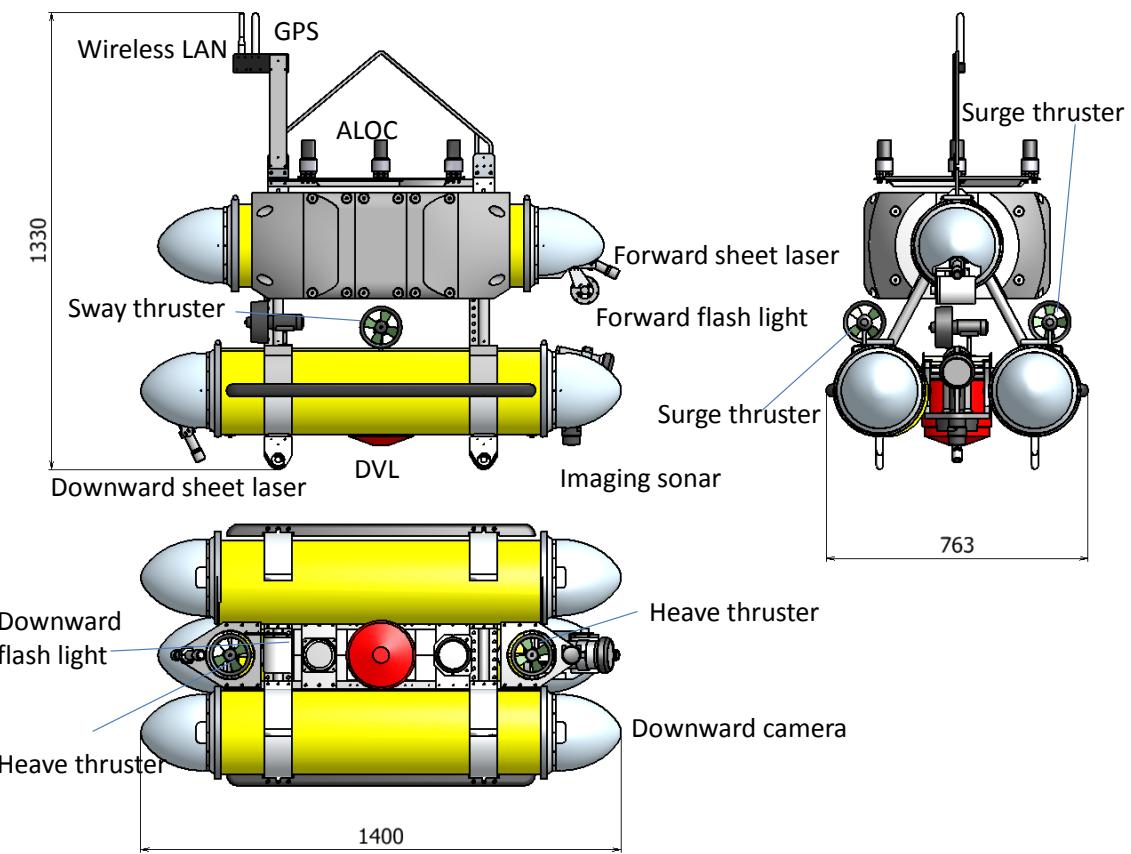


Fig. 5.2: Arrangement of Tri-TON

Table 5.1: Specification of the AUV Tri-TON

Vehilce	
Size	1.4m(L) \times 0.75m(H) \times 0.6m(W)
Mass	229.4kg
Max.depth	800m

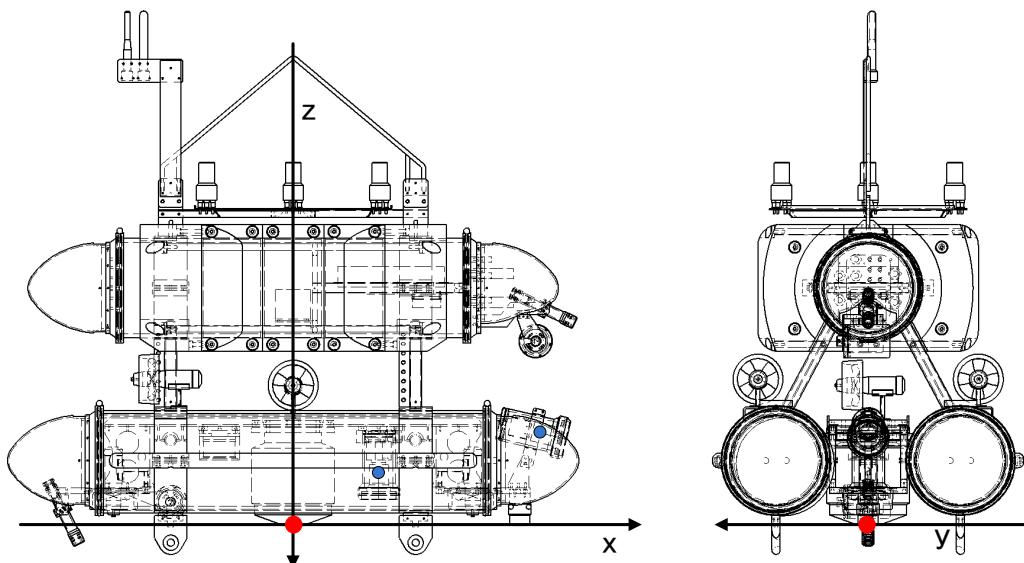


Fig. 5.3: Robot coordinate and focal points

Table 5.2: Camera arrangement of Tri-TON

		x[mm]	y[mm]	z[mm]	angle[deg]
Forward	Camera	584	0	231	-13.2
	Laser	615	0	531	-25.5
	Flash light	594	0	451	-
Downward	Camera	210	0	166	-90
	Laser	-565	0	38	-63.7
	Flash light	-300	0	58	-

Table 5.3: Specification of the cameras and lasers of Tri-TON

Camera model	Lumenera USB Camera Lu165
Resolution(pixel)	1392(H) × 1040(V)
Sensor unit cell size(μm)	6.45 × 6.45
View angle in water(forward camera)(deg)	64.4 × 50.4
View angle in water(downward camera)(deg)	66.0 × 51.8
Laser model	Greenlyte-MV_EXCEL
Laser wavelength(nm)	532
Laser illuminating angle(deg)	90(in air) 67(in water)
Flash light model	ヒカル小町6
Flash light GN	12
Flash illuminating angle(deg)	80(H) × 90(V)

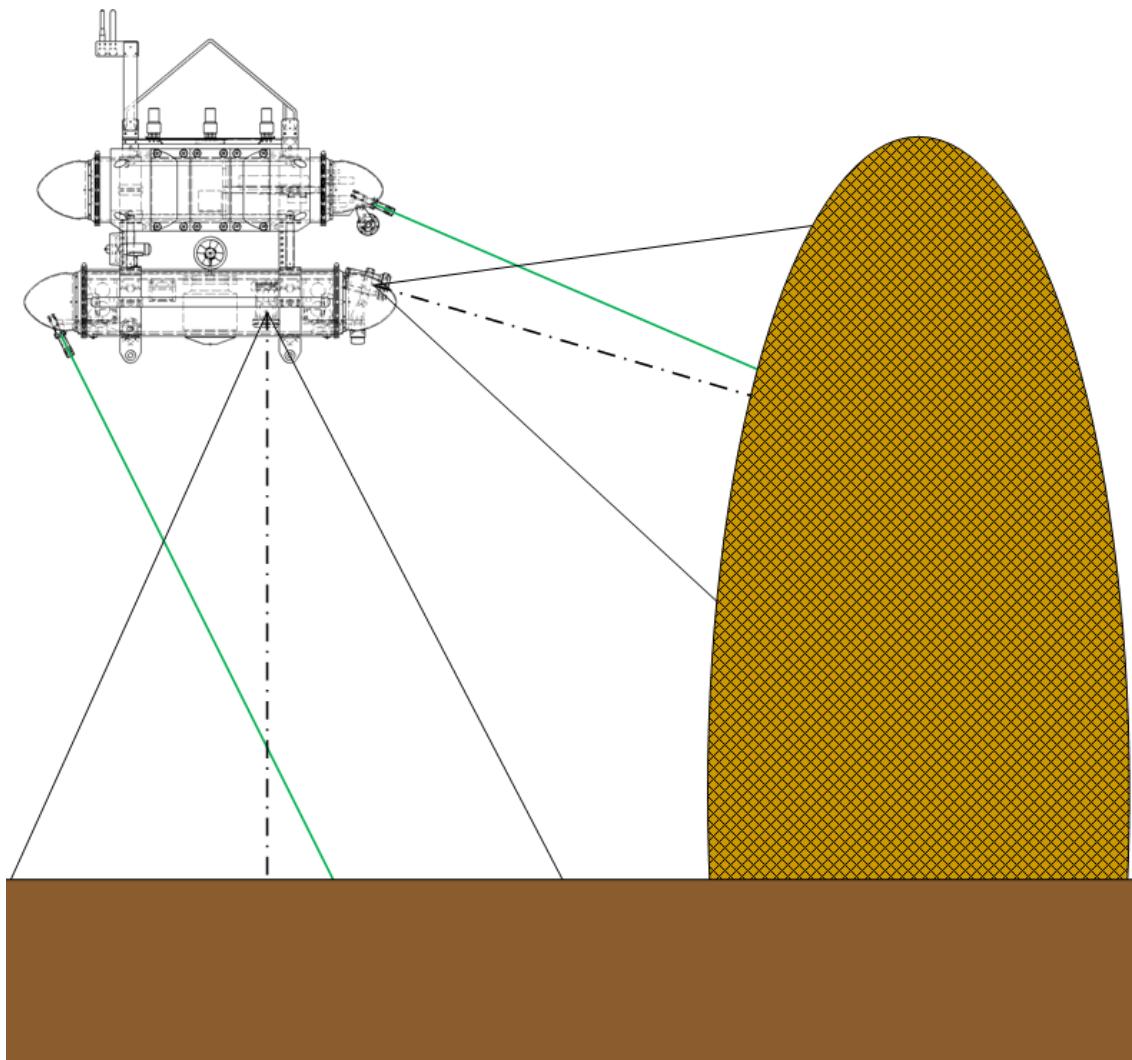


Fig. 5.4: Arrangement of cameras and sheet lasers

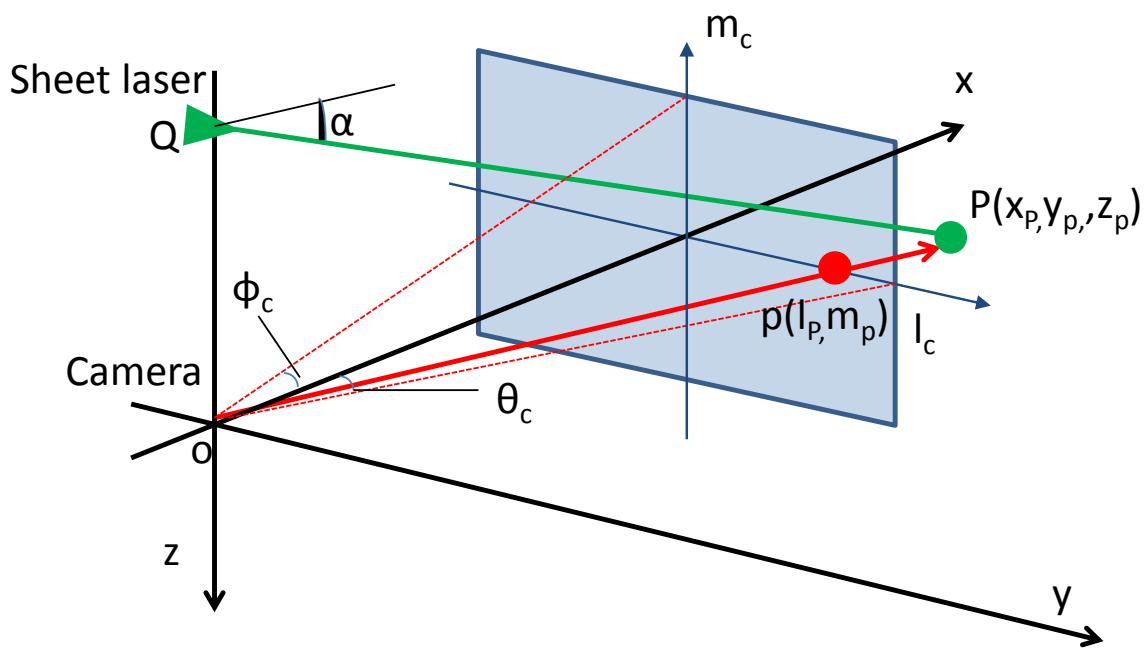


Fig. 5.5: Light-sectioning method

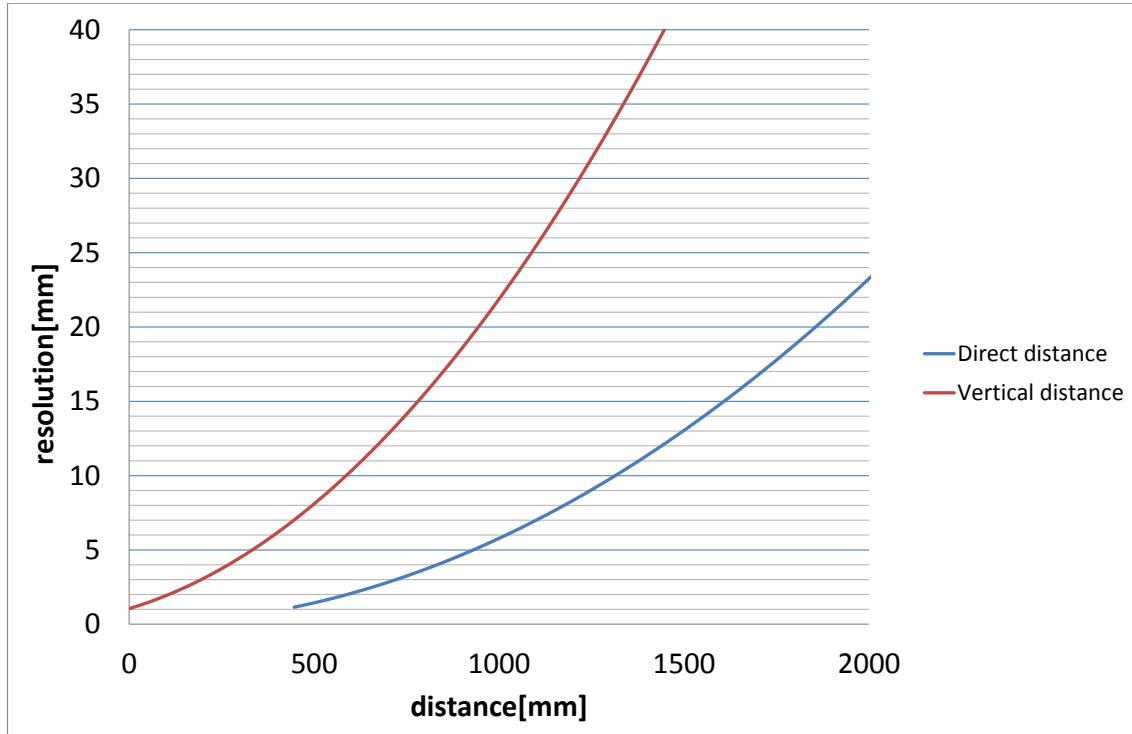


Fig. 5.6: Resolution and distance from target(Forward camera)

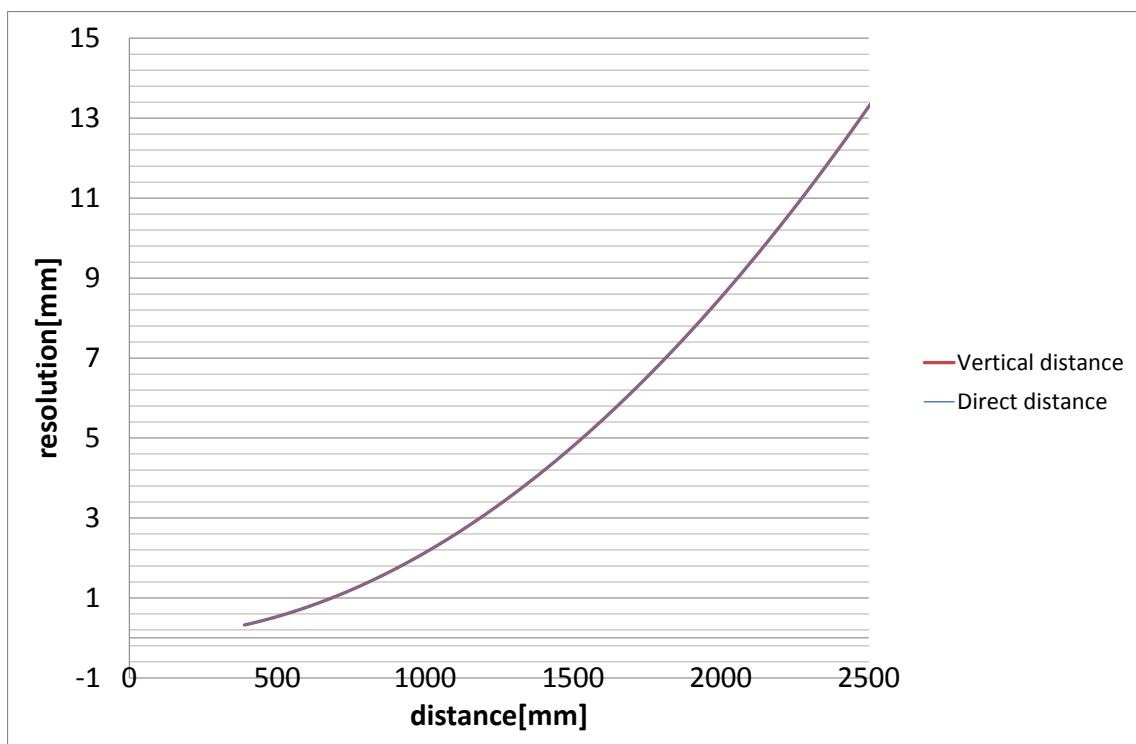


Fig. 5.7: Resolution and distance from target(Downward camera)

6 水槽実験

提案手法の有効性を示すため，AUV を用いた水槽実験を東京大学生産技術研究所の海洋工学水槽にて行った．日程は 2011 年の 12 月 5 日から 22 日であった．

実験の手順は以下である．

- 初期観測フェーズ
 - あらかじめ決められたウェイポイントに沿って撮影を行う．
 - 高さに関しては高度制御 2.0m 一定．
- 計算フェーズ
 - 初期観測フェーズにて観測された地形情報と画像情報から未撮影箇所を求める，再撮影経路を作成する．
 - 計算中は静止するように制御を行う．
- 再観測フェーズ
 - 計算フェーズにて求めたウェイポイントを通り撮影を行う．

6.1 AUV の測位と測位精度の検証

今回の実験においては水槽なので Tri-TON は ALOC は用いず，一軸の FOG と DVL，深度計のみによって測位を行う．また，障害物回避も行わない．Tri-TON と同様のホバリング型 AUV である Tri-Dog1 [33] の実海域での測位結果によって，一軸の FOG と DVL，深度計による位置測位精度の検証を行う．Fig.6.1 は，2009 年に鹿児島湾にて行われた実験の内の一つの航跡である．青色の航跡がパーティクルフィルターによって推定された実際に使用した航跡である．ピンク色の航跡が DVL と FOG のみで推定した場合の航跡である．Fig.6.2 は x 方向の変化を，Fig.6.3 は y 方向の変化を，Fig.6.4 は方位の変化を示した．また，Fig.6.5 にはパーティクルフィルターによって推定された方位と DVL，FOG によって推定された方位の差を示した．この方位の誤差の蓄積によって x,y 方向の差は生じたと考えられる．今回の実験はおおむね 20 分以内に終了する短時間の mission であるため，誤差は 2[deg] 程度以内に収まると考えられる．

6.2 AUV の行動と行動制約

Table.6.1 に，Tri-TON の速度や撮影間隔の情報を示す．水槽の概要と AUV のスタート地点について Fig.6.6 に示す．赤い丸が AUV のおおよそのスタート地点であ

り，正面消波ビーチの方向を向いてスタートする。AUV の安全対策として AUV の移動に制限を設けた。制約は以下の 3 点である。

- 深度 1.0m 以上かつ 3.5m 以下
 - AUV は障害物回避が不可能なため撮影物に衝突しないような深度設定を行った。
- x は 0m 以上かつ 12m 以下
- y は -3.4m 以上かつ 3.4m 以下
 - AUV は障害物回避が不可能なため壁面に衝突しないように行動制約を設けた。

また，ウェイポイントからウェイポイントの移動については，常に上下運動，回転運動と前進運動だけを行うものとする。高度の変更，方位の変更，前進方向の移動の順に行う。

6.3 実験 1

実験 1 では何も撮影物のない水槽を対象に撮影を行った。床は深度一定であると考えられる。撮影範囲は x 方向に 0m から 10m まで y 方向に -1.5m から 1.5m の $30[m^2]$ である。初期観測フェーズのウェイポイントとして Fig.6.7 を設定した。AUV の深度高度と水深の変化を Fig.6.8 に示す。mode は 50 の時初期観測フェーズ，51 の時計算フェーズである。x 方向のスラスタへの指令値 (refVx) と実際の速度 (vx) を Fig.6.9 に，y 方向のスラスタへの指令値 (refVy) と実際の速度 (vy)，実際の y 座標を示した図を Fig.6.10 に示す。方位の変化を Fig.6.11 に，AUV のロールピッチの変化を Fig.6.12 に示す。

6.3.1 初期観測フェーズの観測結果

初期観測フェーズの航跡を Fig.6.13 に示す。緑色が海底画像を撮影した場所であり，ピンク色がウェイポイントである。初期観測フェーズの地形計測の結果を Fig.6.14 及び 2 次元メッシュ化した結果を Fig.6.15 に示す。地形計測の結果の点群の高さの平均は 4915.5[mm]，標準偏差は 18.4[mm] である。Fig.6.8 の水深の標準偏差が 29.5[mm] であることを考えると，この差はセンサーの誤差に起因すると考えられる。センサーの誤差は，DVL が壁面の影響を受けたことが原因と考えられる。

初期観測フェーズの下カメラの画像の一覧を Fig.6.16 に示す。

6.3.2 計算フェーズの結果

計算時間は 35 秒であった。計算に使用したデータを Table.6.2 に示す。判定結果を Fig.6.17 に示す。青色のメッシュが下向きカメラで撮影されたと判定されたメッシュである。撮影された総面積をメッシュの総面積で除したカバー率は 99.99% になった。なお撮影されていないメッシュは端のメッシュで Fig.6.17 では見ることができない。テクスチャマッピングの結果を Fig.6.18 に示す。テクスチャマッピングに使用した画像は最適画像ではなく始めに撮影されていると判定された画像である。テクスチャマッピングに使用された画像を撮影経路ごとに色分けした結果が Fig.6.19 である。ピンク色と赤色が Fig.6.7 の 1 から 2, 緑色が 3 から 4, 水色が 5 から 6, 黄色が 7 から 8 の経路で撮影された画像である。メッシュの撮影判定は画像情報の一番始めから検索していくのでこのような結果になったと考えられる。赤いメッシュと赤いメッシュの間は海底画像を 1 枚撮りもらした場所である。よって他の経路の画像が選択されたと考えられる。また, Fig.6.20 は Fig.6.18 の中心部分を拡大した図である。黄色の線は直線であるので本来なら一直線になるはずがそれが生じている。ずれの大きさは, 11[cm] である。同じ経路同士ではそれがほとんど見られない。

ほぼ全てのメッシュが撮影されたため、新しいウェイポイントは生成されなかった。よって撮影漏れのない場合は正しく撮影漏れがないと判断できることがわかった。

6.3.3 最適画像の選択

最適画像を選択した場合のテクスチャマッピングの結果を Fig.6.21 に示す。画像の選択以外は特別な処理をしていないが、Fig.6.18 と比較して暗い部分が減っている。これは画像の端の方が選択されなくなったためであると考えられる。

最適画像のテクスチャマッピングに使用された画像を撮影経路ごとに色分けした結果が Fig.6.22 である。ピンク色が Fig.6.7 の 1 から 2, 緑色が 3 から 4, 水色が 5 から 6, 黄色が 7 から 8, 赤色が 9 から 10, 紫色が 11 から 12 の経路で撮影された画像である。リアルタイムで計算した結果では水色の画像はほとんど使用されていなかつたのに比較して、緑色やピンク色の画像の代わりに水色や紫色、赤色の画像が使用されている。ピンク色の部分で一枚とり漏らしている部分については確かに黄色の写真が選択されている。

以上の結果と経路を照合して考えると最適画像の選択は妥当であると言える。

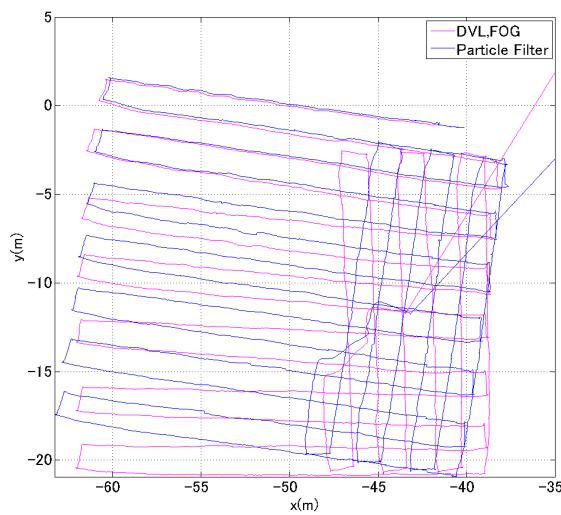


Fig. 6.1: Trajectory of Tri-Dog1

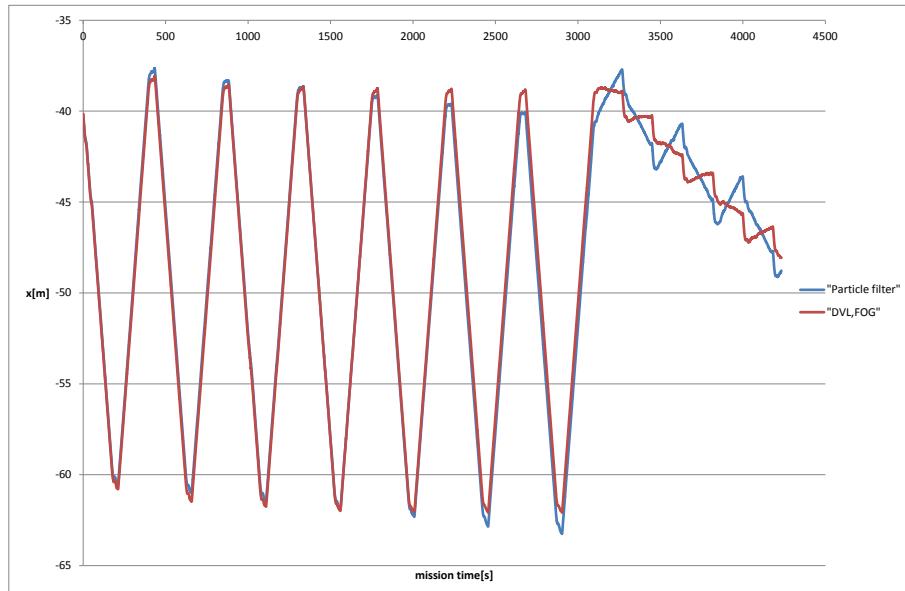


Fig. 6.2: Observed X

Table 6.1: Performance of the AUV Tri-TON

Speed	about 10cm/s
Sampling cycle(laser)	1 sec
Sampling cycle(seafloor)	7 sec

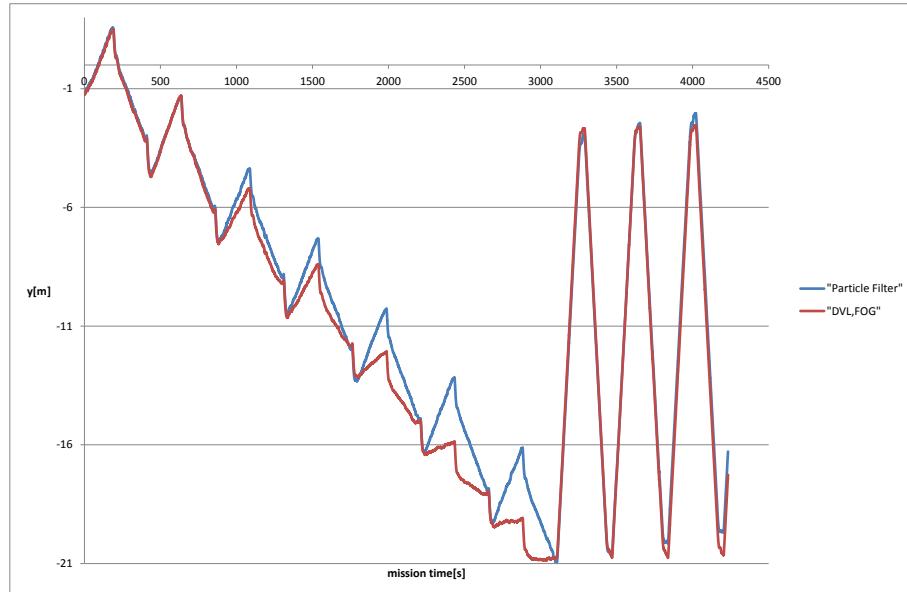


Fig. 6.3: Observed Y

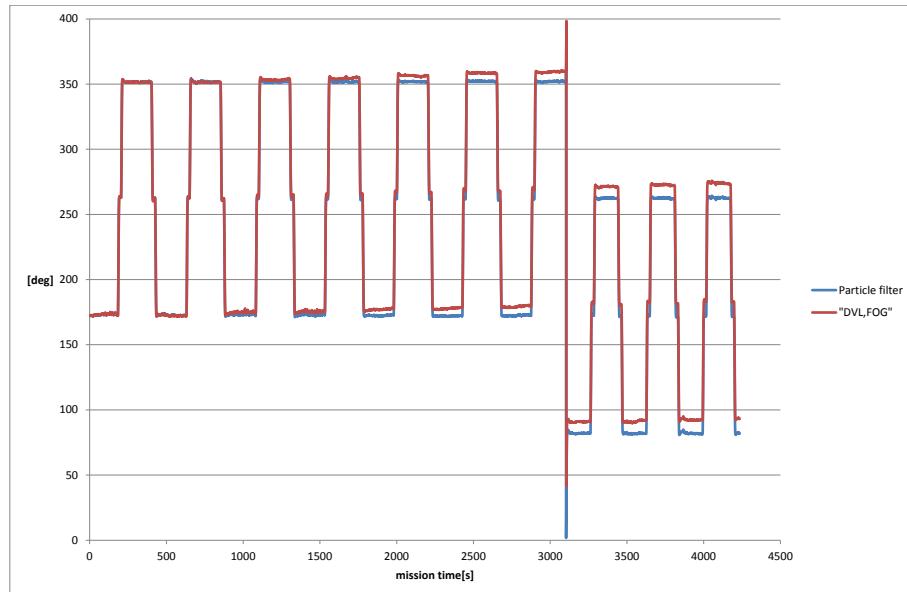


Fig. 6.4: Observed yaw

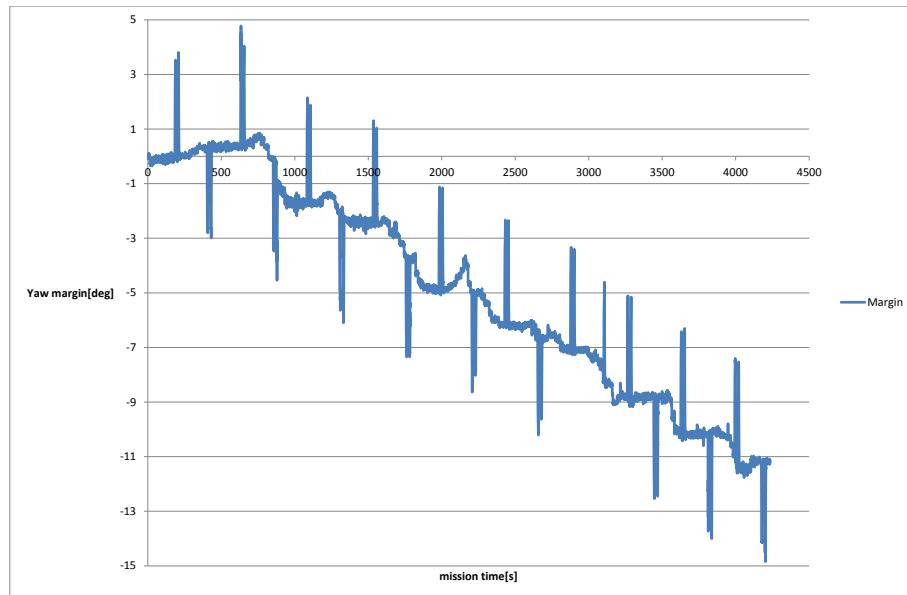


Fig. 6.5: Observed yaw margin

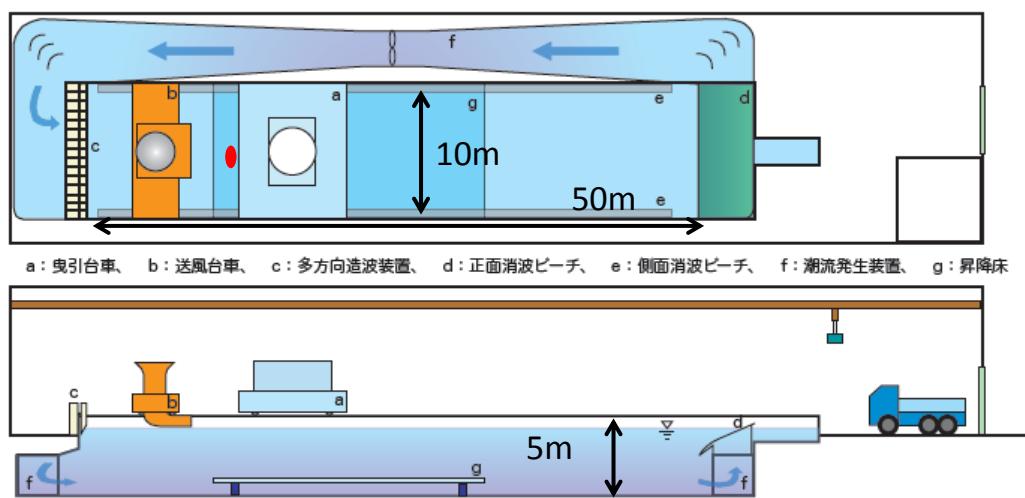


Fig. 6.6: Tank and start point [4]

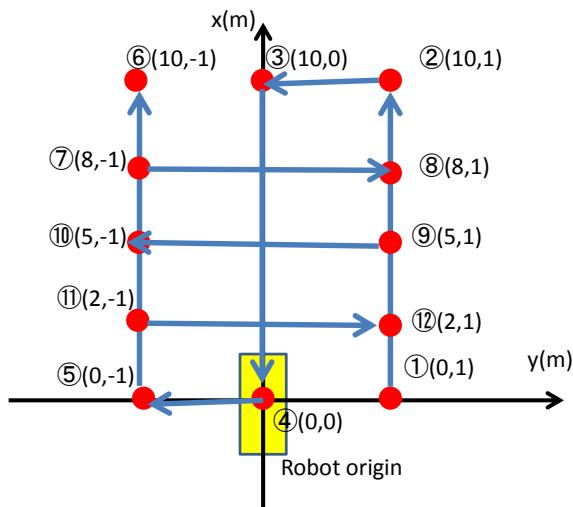


Fig. 6.7: Given waypoints(mission 1)

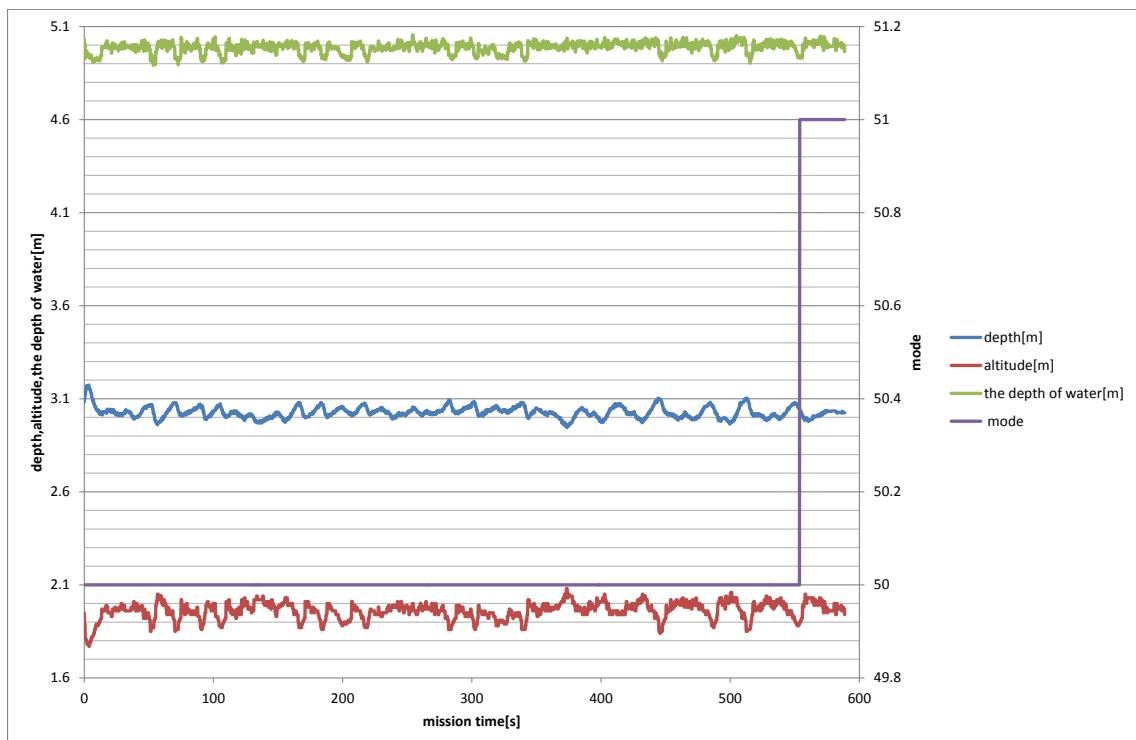


Fig. 6.8: Observed depth and height(mission 1)

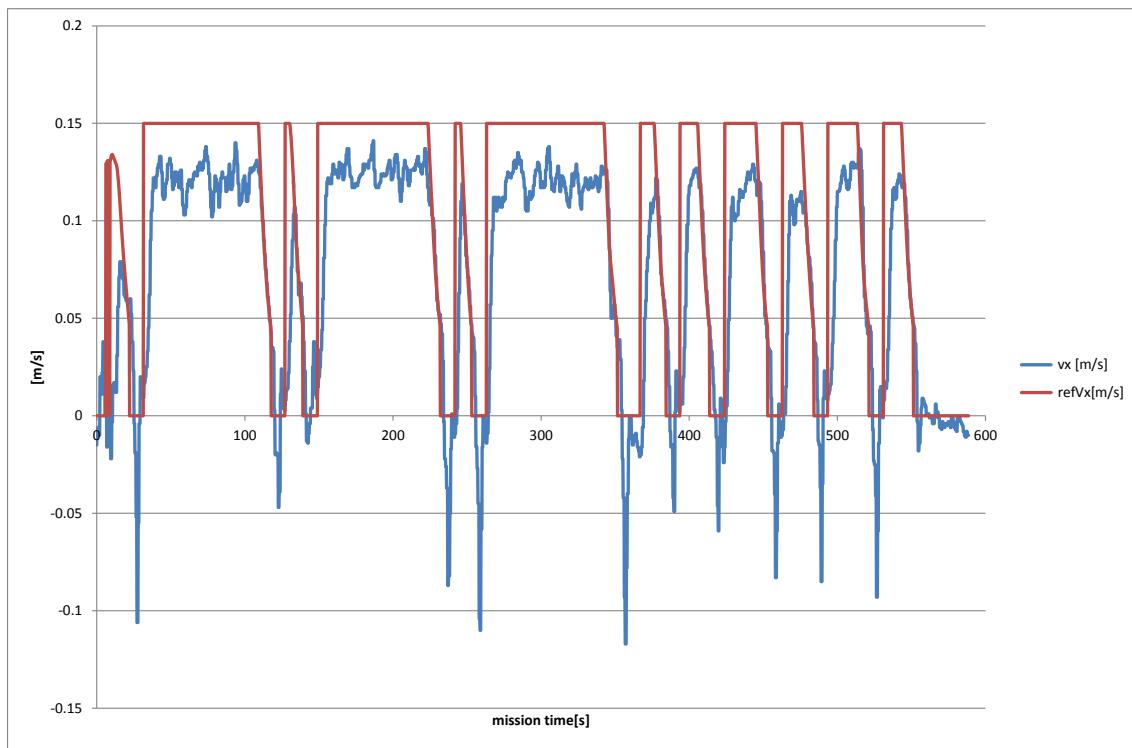


Fig. 6.9: Thruster command value and observed speed(x)(mission 1)

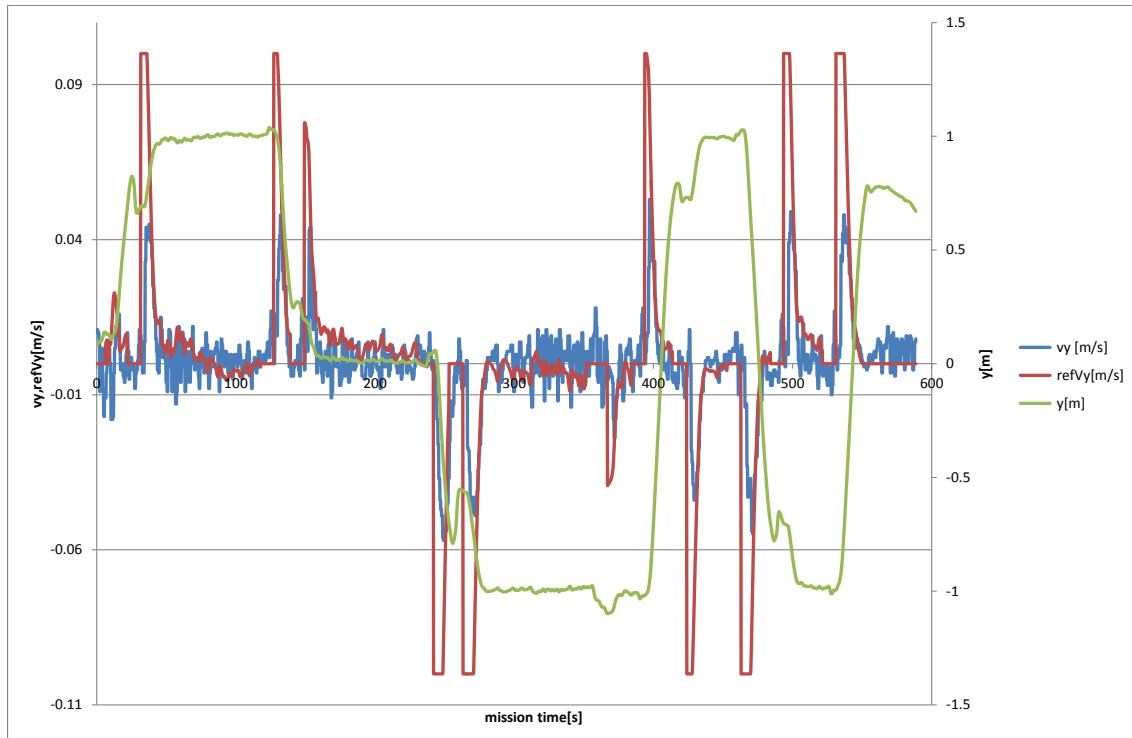


Fig. 6.10: Thruster command value, observed speed and coordinate(y)(mission 1)

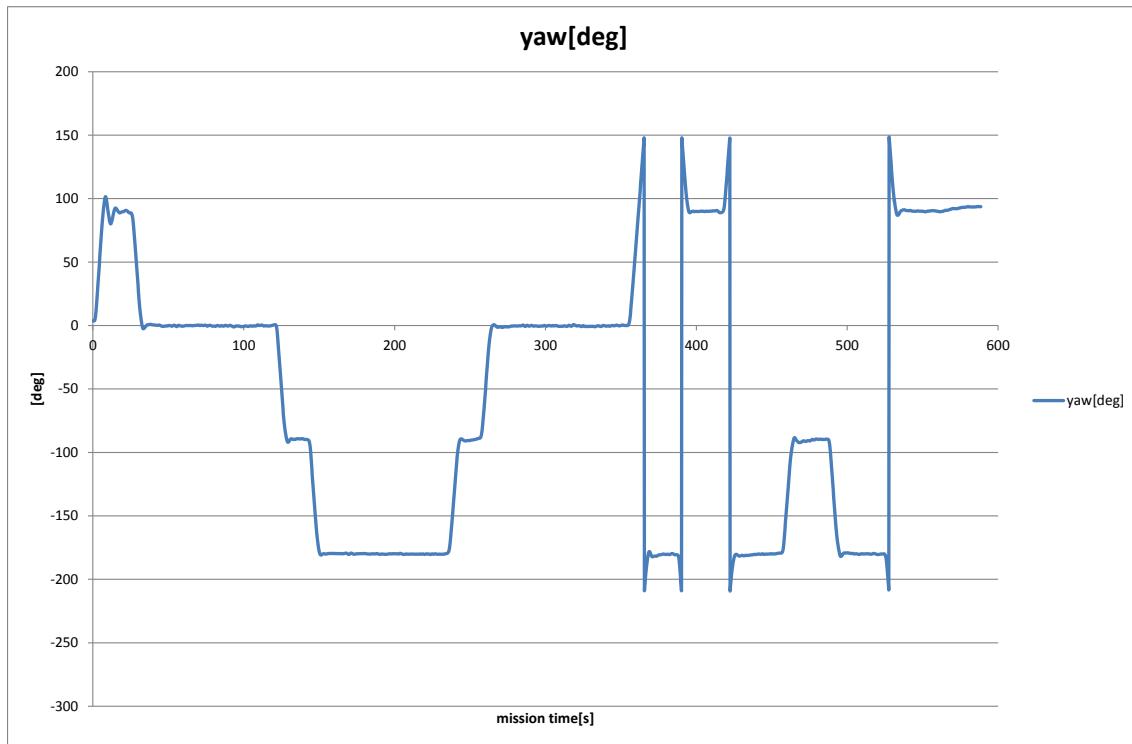


Fig. 6.11: Observed yaw(mission 1)

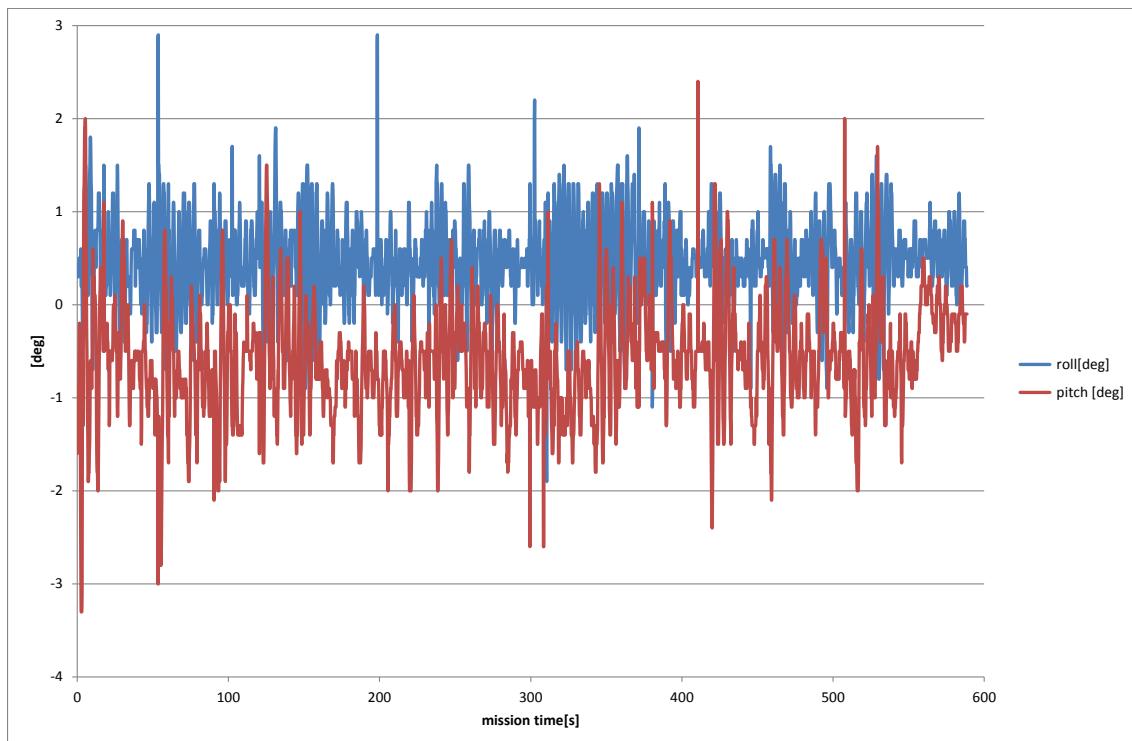


Fig. 6.12: Observed roll and pitch(mission 1)

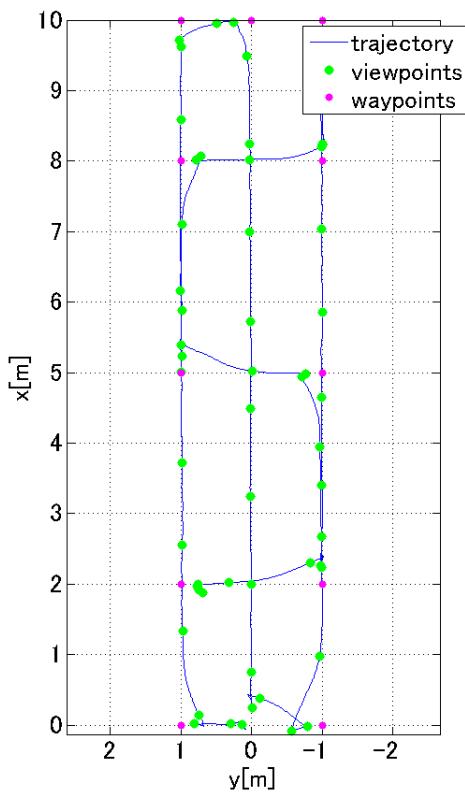


Fig. 6.13: Trajectory, view points and waypoints of the initial observation phase(mission 1)

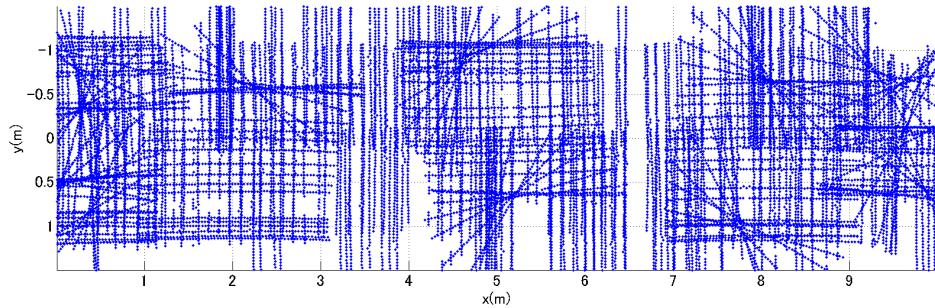


Fig. 6.14: Results of the terrain measurement after denoising(mission 1)

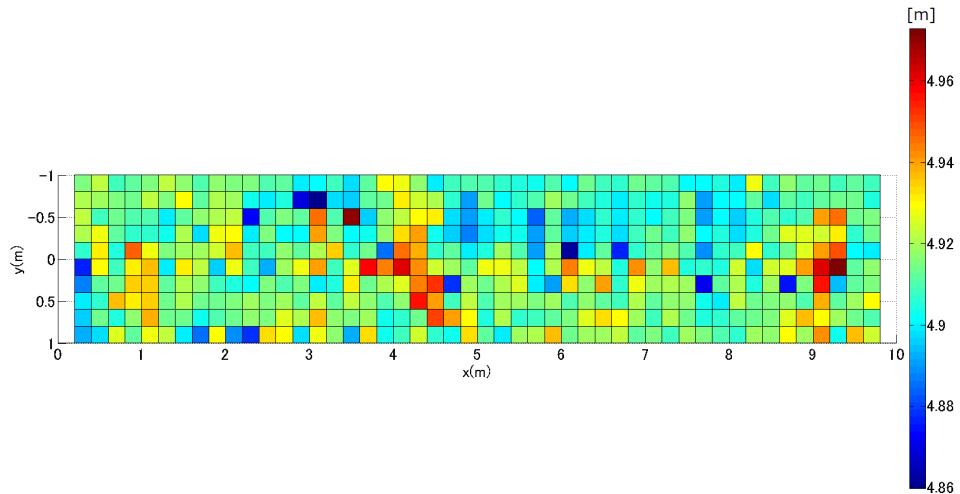


Fig. 6.15: 2D mesh of the terrain measurement after denoising(mission 1)

Table 6.2: Aquired data of initial observation phase(mission 1)

Number of seafloor images	108
Number of laser images	925(465(forward)+460(downward))
Number of bathymetric points before denoising	28358
Number of bathymetric points making mesh	1365
Number of mesh	1754

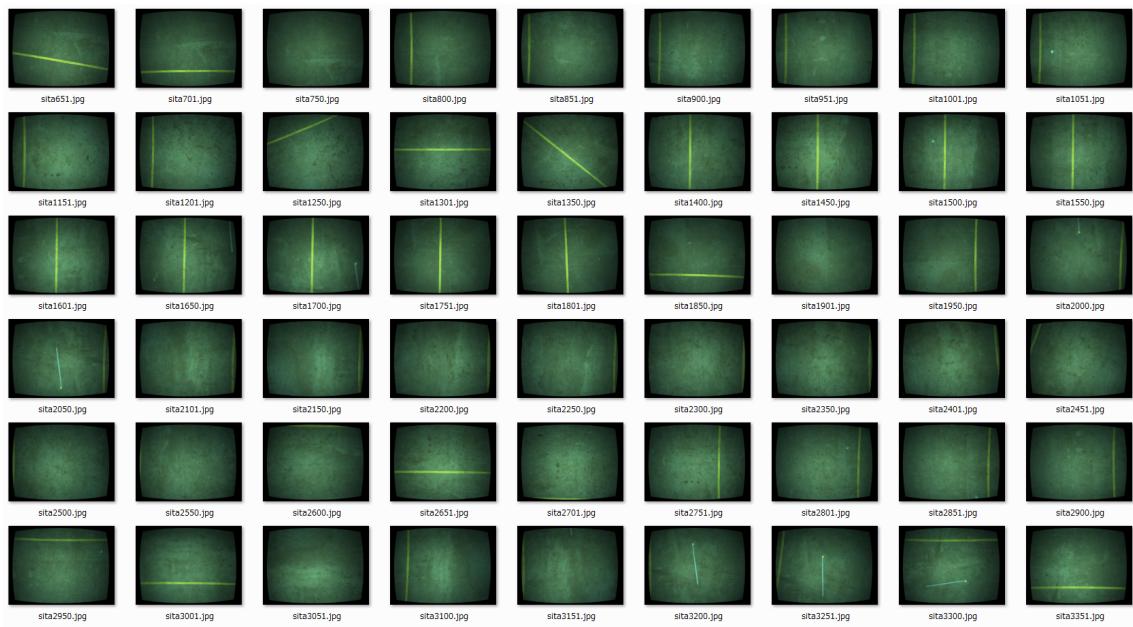


Fig. 6.16: Seafloor pictures taken by the downward camera during the initial observation phase(mission 1)

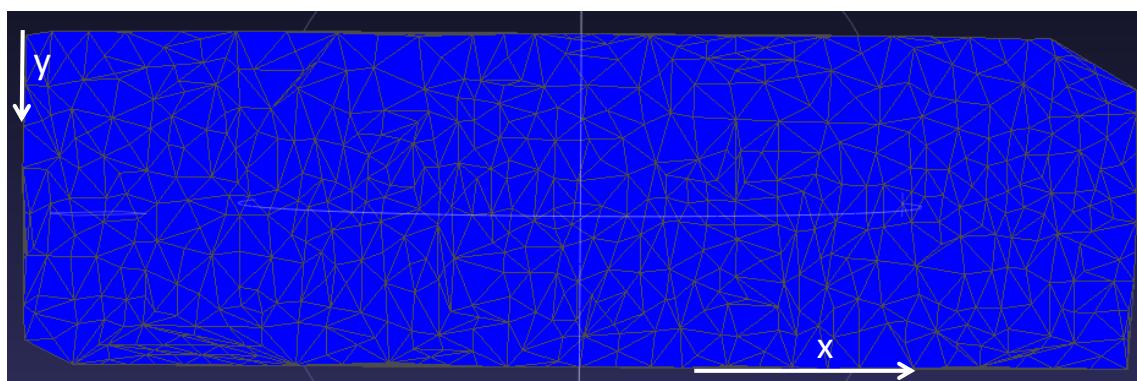


Fig. 6.17: Results of the mesh evaluation(mission 1)

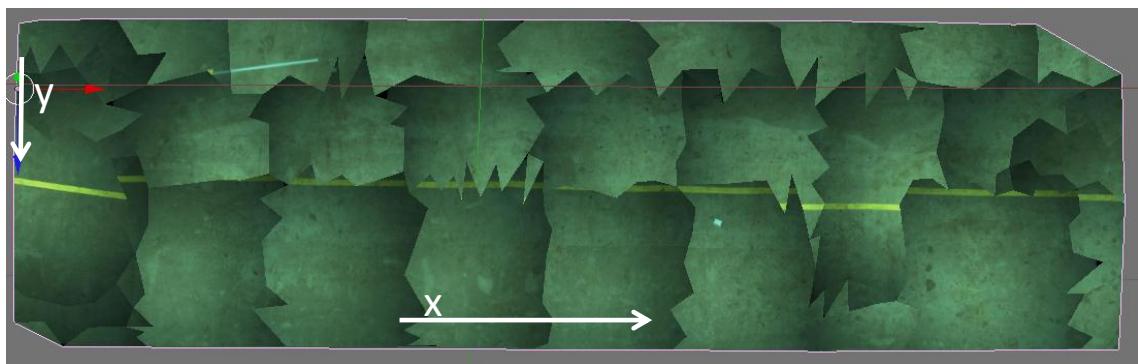


Fig. 6.18: Texture mapping results(mission 1)

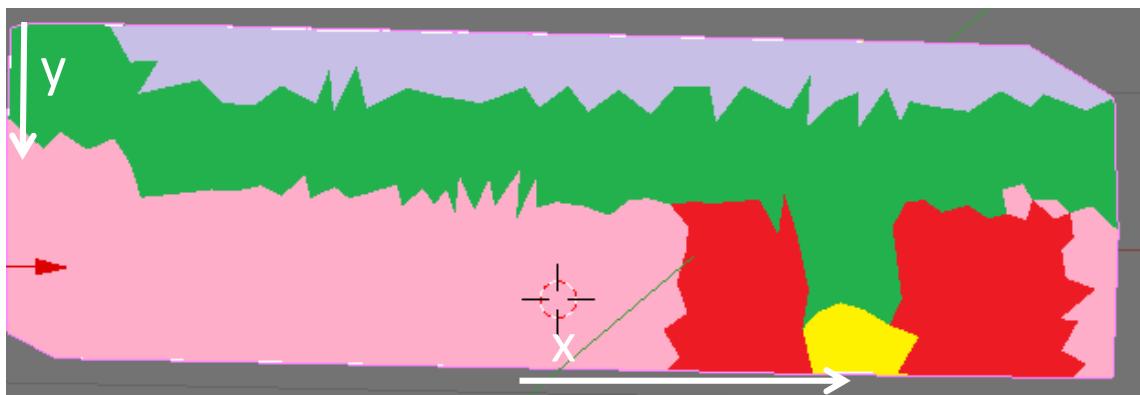


Fig. 6.19: Mapping results colored by path(mission 1)

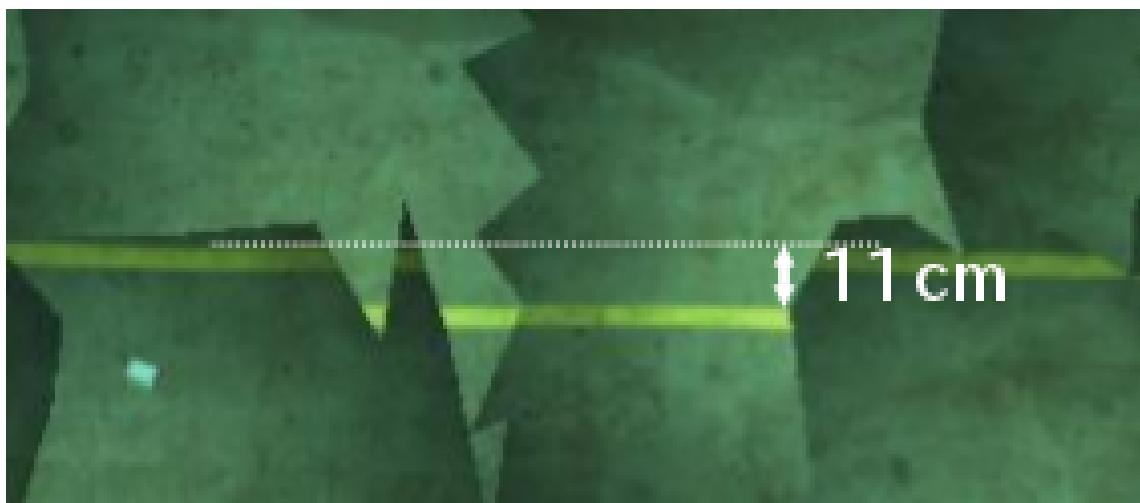


Fig. 6.20: Gaps of y between 1st path and 2nd path(mission 1)

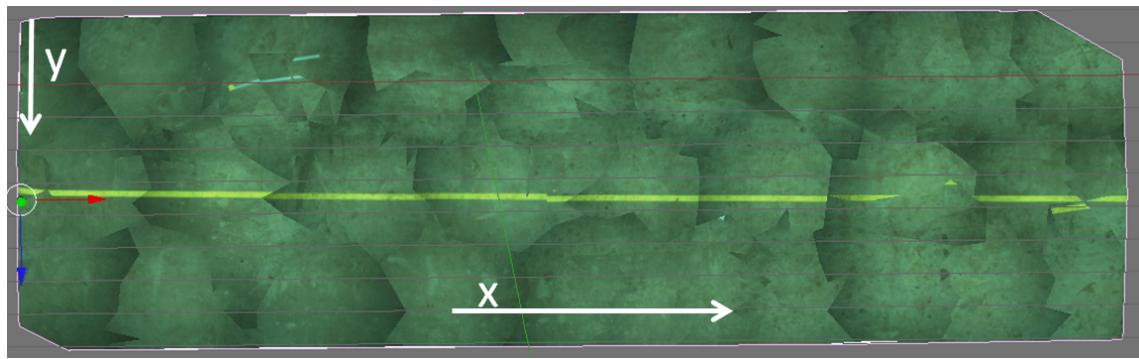


Fig. 6.21: Texture mapping results of best selection(mission 1)

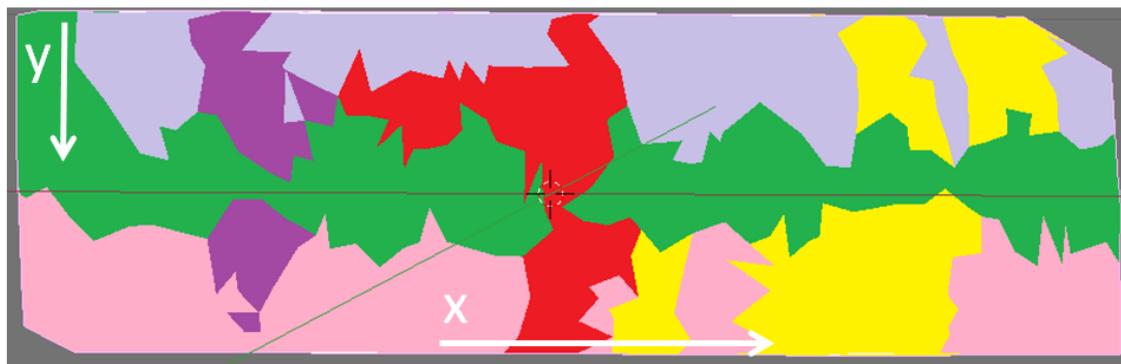


Fig. 6.22: Mapping results of best selection colored by path(mission 1)

6.4 実験 2

実験 2 では複数の撮影物を対象に撮影を行った。実験の様子を Fig.6.23 に示す。撮影範囲は x 方向に 0m から 10m まで y 方向に -1.5m から 1.5m の $30[m^2]$ である。撮影物の概要を Fig.6.24 に示す。撮影物は、一度の経路では撮影できない十分な大きさの壁面を持たせるためにこのような形状を選択した。また、平坦な面だけではなく傾斜の変化する円周の観測も可能であることを示すため、斜面と円周面を持つ形状にした。撮影物の配置については、Fig.6.25 のようにした。各面の名称を Fig.6.26 のように設定する。撮影物 1 の写真を Fig.6.27、撮影物 2 の写真を Fig.6.28 に示す。実際の画像観測用の AUV に設定されているウェイポイントと類似のウェイポイント設定を行った。初期観測フェーズのウェイポイントとして Fig.6.29 を設定した。AUV の深度高度と水深の変化を Fig.6.30 に示す。mode は 50 の時初期観測フェーズ、51 の時計算フェーズ、52 が再観測フェーズである。x 方向のスラスタへの指令値 (refVx) と実際の速度 (vx) を Fig.6.31 に、y 方向のスラスタへの指令値 (refVy) と実際の速度 (vy)、実際の y 座標を示した図を Fig.6.32 に示す。方位の変化を Fig.6.33 に、AUV のロールピッチの変化を Fig.6.34 に示す。

6.4.1 初期観測フェーズの地形計測結果

初期観測フェーズの地形計測の結果を Fig.6.36 に示す。route1 とはウェイポイント (0,1) から (10,1) まで、route2 とはウェイポイント (10,0) から (0,0) まで、route3 とはウェイポイント (0,-1) から (10,-1) までのことである。また、Fig.6.36 をノイズ除去した結果を Fig.6.37 に示す。今回の実験においてはノイズ除去が過剰であり撮影物の壁面の情報がノイズとして除去されている。Table.6.3 にノイズ除去後の地形計測結果と実測値の比較を示した。ノイズ除去前の地形計測結果と実測値の比較を Table.6.4 に示した。名称は Fig.6.24 による。この結果、リアルタイムでの地形計測は十分な精度でおこなわれていると言える。

6.4.2 初期観測フェーズの画像観測結果

初期観測フェーズの AUV の航跡を Fig.6.35 に示す。初期観測フェーズにおいて下カメラで撮影された画像の一覧を Fig.6.38 に、前カメラで撮影された画像の一覧を Fig.6.39 に示す。初期観測フェーズにおいて撮影対象物が撮影されている主な写真とその写真に写っている撮影物の面、その時の AUV の位置を Fig.6.40 に示す。なお面の名称は Fig.6.26 の通りである。撮影された面は面 1-c, 1-e, 2-b, 2-d, 2-e である。つまり、面 1-a, 1-b, 1-d, 2-a, 2-c が撮影されていない。

6.4.3 計算フェーズの結果

計算フェーズの総時間は 50 秒であった。これはミッション中に計算を行うにあたって十分短時間である。計算に使用したデータについて Table.6.5 に示す。判定結果を Fig.6.41, Fig.6.42 を示す。赤色が撮影されていないと判定されたメッシュであり、青色が下向きカメラで縁が前向きカメラで撮影されたと判定されたメッシュである。全体の面積に対する撮影されたメッシュの面積は 73% となった。この結果との結果を比べると、確かに撮影されていない面 1-a, 1-b, 1-d, 2-a, 2-c が全く撮影されていないと判別されている。撮影されている面 1-c, 1-e, 2-b, 2-d, 2-e に関しては撮影されていると判別されている。よって撮影判定は機能しているといえる。

生成されたウェイポイントを Table.6.6 及び Fig.6.43 に示す。Fig.6.43 においてピンク色の線が計算で求められたウェイポイント、青い矢印が AUV の方位であり緑色の線と赤い矢印が AUV の行動制約を加味して実際に命令されたウェイポイントである。また番号は Table.6.6 に対応している。ウェイポイントは全て撮影物の方向を向いて生成されており、高さは 4.0m 程度と撮影物の上端の高さ程度であるため生成されたウェイポイントは妥当でありこの通り撮影すれば撮りもしの部分が撮影できると予想される。

6.4.4 再観測フェーズの結果

再観測フェーズの AUV の航跡と各ウェイポイントにて撮影された画像の結果を Fig.6.44 に示す。この結果確かに撮影されていなかった面 1-a, 1-b, 1-d, 2-a, 2-c, 2-d を撮影できていることがわかる。再観測フェーズにおいて下カメラで撮影された画像の一覧を Fig.6.45 に、前カメラで撮影された画像の一覧を Fig.6.46 に示す。再観測フェーズ終了後の撮影度判定結果を Fig.6.47, Fig.6.48 に示す。全体の面積に対する撮影されたメッシュの面積は 82% となった。全体の面積に対する前カメラで撮影されたメッシュは、6.0% から 15.7% になった。また、計算結果通りのウェイポイントにて撮影を行った場合の撮影度判定結果を Fig.6.49, Fig.6.50 に示す。全体の面積に対する撮影されるはずのメッシュは 88%、前カメラで撮影されるはずのメッシュは 20.2% になる。Fig.6.47 と Fig.6.49 を比べてもわかる通り、AUV の行動制約によって撮影対象物下部が撮影できていないためにこの差は生じたと考えられる。面 1-a は撮影されていない結果となった。また、テクスチャマッピングを行った結果を Fig.6.51, Fig.6.52 に示す。

6.4.5 最適画像の選択

最適画像によるテクスチャマッピングの結果を Fig.6.53, Fig.6.54 に示す。再観測フェーズでは撮影物の下部を撮影するために AUV は高度を下げる観測を行ったため、再観測フェーズでの写真が多く選択されている。しかし写真の中心部分は露出オーバーのために白くなってしまっている。露出オーバーの写真を取り除く工夫が必要である。

6.5 考察

6.5.1 実験 1

実験 1 では、平坦な床を多数のウェイポイントを通り撮影することで決められた経路を通るだけで全ての面が撮影可能な場合である。実験 1 の結果から、一度で全ての面が撮影された時はリアルタイムに適切に撮影度判定が行われることがわかった。

また、Fig.6.14 と Fig.6.15 を比較すると、地形計測の値が平均から離れているのは AUV が回転を行っている時に計測された場所であると言える。これは AUV が回転のためにヒーブスラスタの制御を中止したための深度の変化が影響していると考えられる。Fig.6.18 と Fig.6.21 のテクスチャマッピングの結果では同一経路上ではほとんど位置の差は観測されないが、別の経路同士では差が観測される。これは位置誤差の蓄積もしくは画角などの値のずれが主原因であり、撮影度判定については適切に行われていると考えられる。なぜなら、撮影度判定が間違っている場合には前後の写真においてもずれが観測されるためである。よって画角やレーザー角をより正確に求めたり、リアルタイムな位置修正を行う必要があると言える。

6.5.2 実験 2

実験 2 では、撮影物を設置し決められた経路だけでは撮影が行われない場合である。実験 1 の Fig.6.8 と実験 2 の Fig.6.30 を比較して、実験 2 の方がばらつきが大きくかつ撮影物上に存在する際にも高度が 4.5[m] にしかならないのは DVL の性質であると考えられる。床面上に AUV が存在する際も撮影物の影響を受け、撮影物上に AUV が存在する際も床面の影響を受けているからである。リアルタイムに適切に撮影度判定と経路計画を行い撮影されていない面を撮影することができた。ただし、面 1-a が撮影されていない結果となった。原因は次の 2 つが考えられる。

- ノイズ除去が過剰であり、撮影対象物の形があいまいになつたためメッシュが様々な角度を持ってしまつた。
- 経路計画の際の一度に撮影すべきメッシュの閾値が大きく、面 1-a を撮影する

ウェイポイントが生成されなかった。

実験結果の改善策 まずは、地形計測の際のノイズ除去が過剰であった問題についての改善案についてシュミレーション結果を示す。地形計測のノイズ除去のパラメータを、近傍 50[cm] に 9 点以上の点があった場合にその点を使用するというように変化させた場合のノイズ除去後の点群の結果を Fig.6.55 に示す。この結果を見ると、壁面の情報が残っている。しかし、ノイズも残っている。例えば撮影物と撮影物の間などである。Fig.6.56 と Fig.6.57 に、初期観測が終了した時の撮影度判定のシュミレーション結果を示す。カバー率が 70% であり、前カメラカバー率は 5.1% である。Fig.6.58 に生成したウェイポイントの結果を示す。Fig.6.59Fig.6.60 に、再観測が終了した時の撮影度判定のシュミレーション結果を示す。カバー率が 85% となり、前カメラカバー率が 19.6% になった。Fig.6.56 を見てわかるように、ノイズ除去が適切に行われたために壁面が観測されており、壁面のメッシュが線形補間ではなく実際の点群を用いて作成されているためにメッシュにおいて正しく壁面が生成された。その結果壁面が同一の傾きで十分な広さを持ったため面 1-a も撮影する経路が生成されたと考えられる。

次に一度に撮影すべき最低メッシュ数についての改善案についてシュミレーション結果を示す。最低メッシュ数を 6 個にした経路計画の結果が Fig.6.61, Table.6.7 である。再観測が終了した時の結果を Fig.6.62, Fig.6.63 に示す。カバー率は 92%，前カメラカバー率は 24.3% になった。面 1-a の一部が撮影できているが、撮影できていない部分も存在する。これは、生成されたメッシュの面の傾きの関係で前カメラではなく下カメラに近い傾きになっているが、下カメラの撮影点生成でもメッシュの傾きの関係で撮影できないことになった部分である。メッシュと視線ベクトルの差の閾値は 45 度であるが、49 度にすると下カメラにて撮影できる。

また、ノイズ除去の改善と組みあわせることによってよりカバー率を向上させることができると考えられる。最後にカバー率の結果を Table.6.8 に示す。

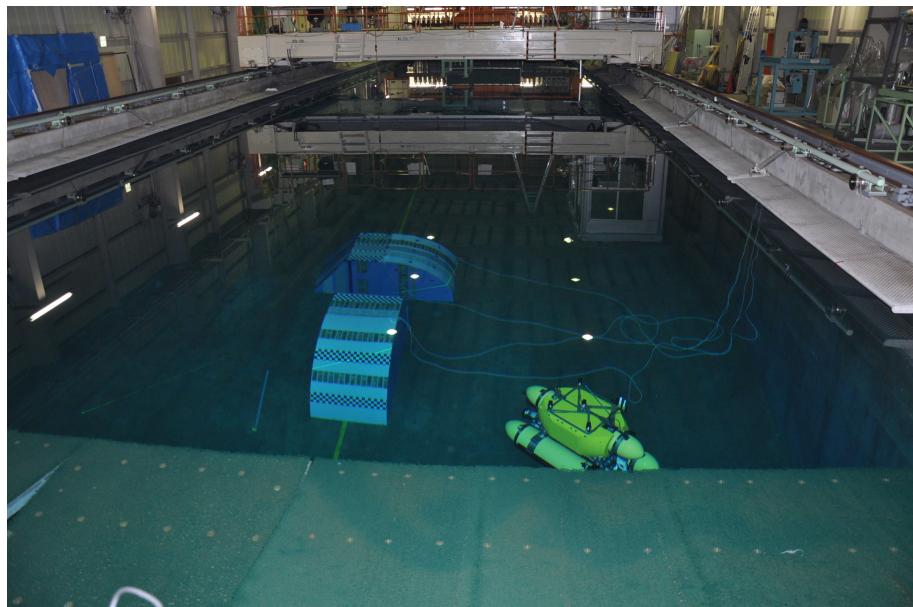


Fig. 6.23: Tri-TON at re-observation phase

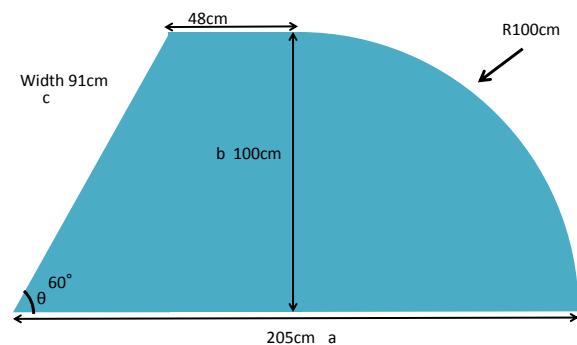


Fig. 6.24: Specification of the targets

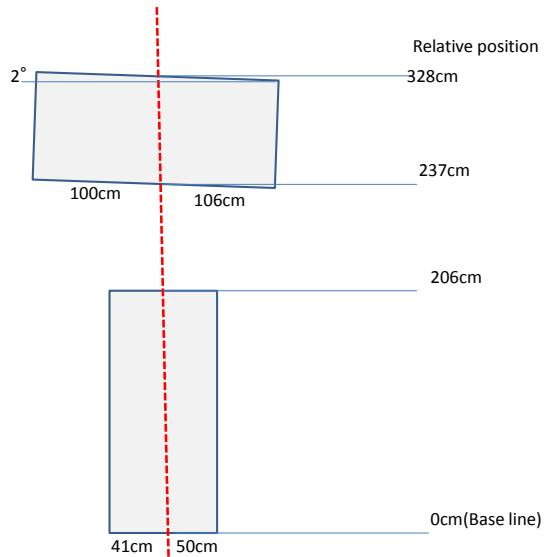


Fig. 6.25: Target arrangement(mission 2)

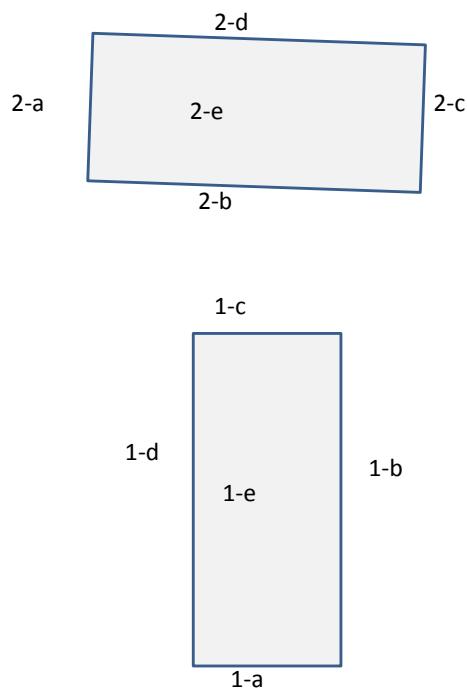


Fig. 6.26: Target face(mission 2)

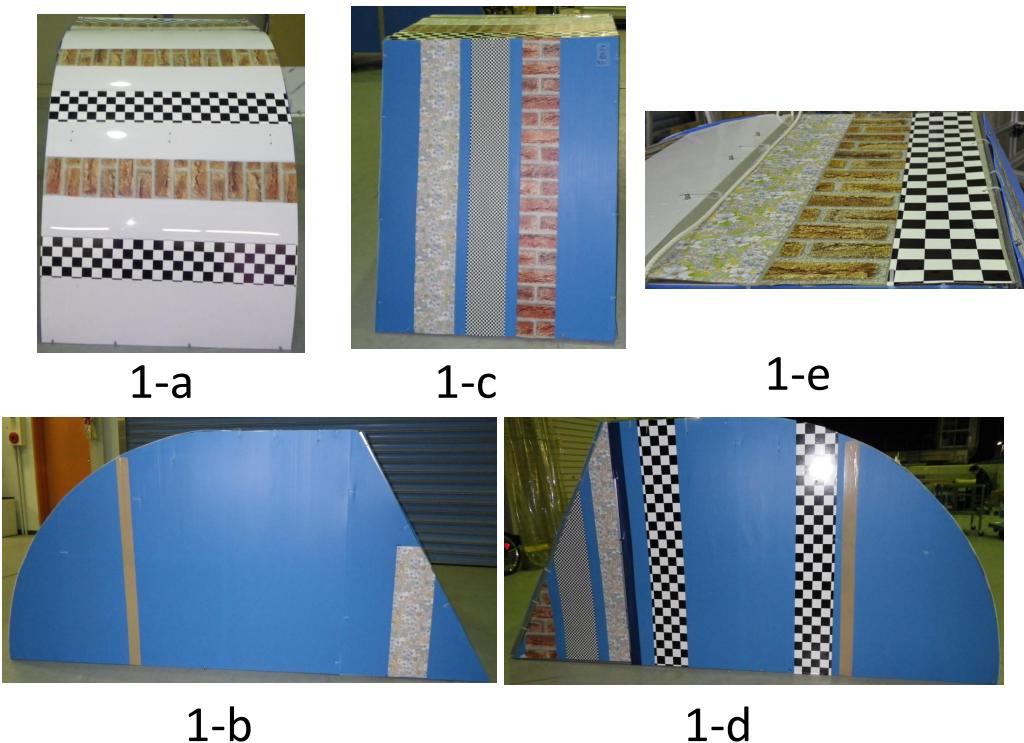


Fig. 6.27: Target 1

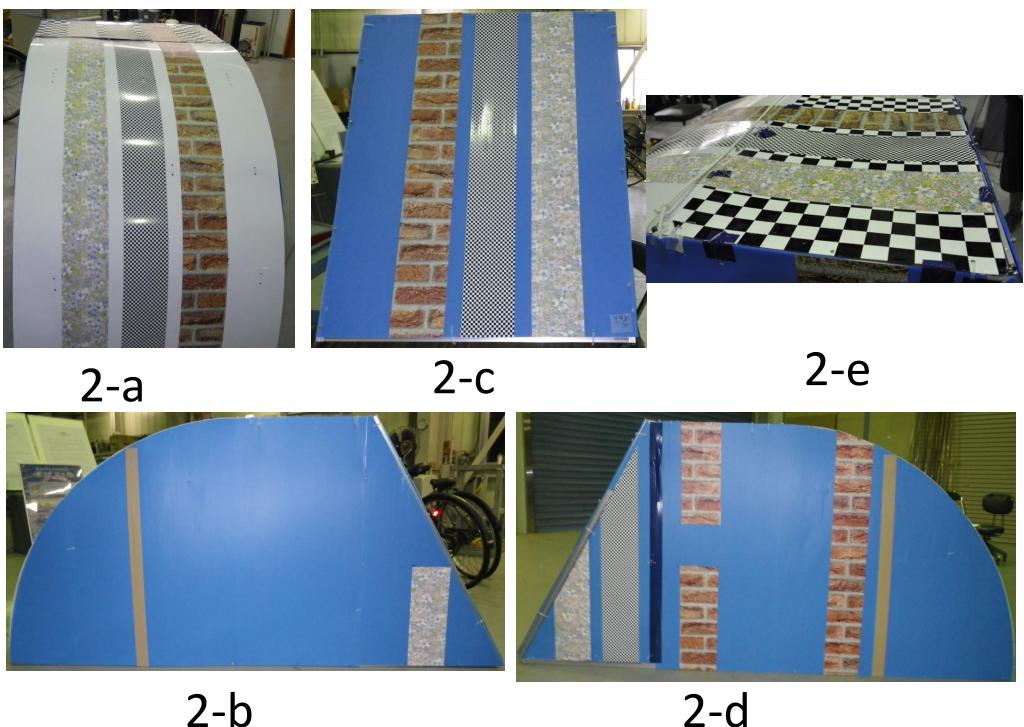


Fig. 6.28: Target 2

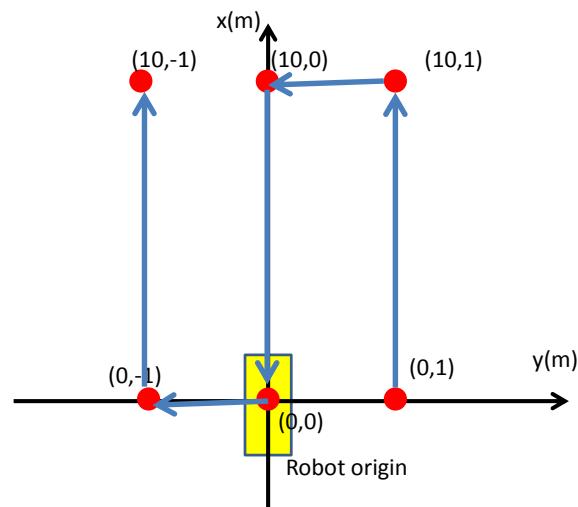


Fig. 6.29: Given waypoints(mission 2)

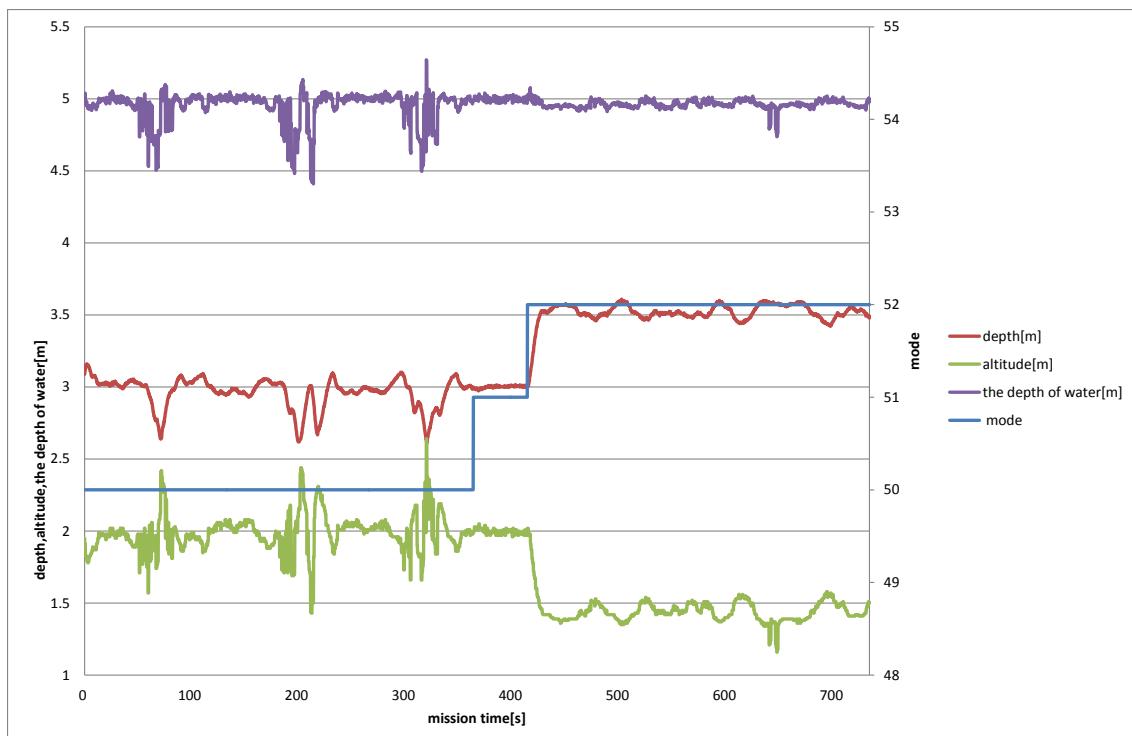


Fig. 6.30: Observed depth and height(mission 2)

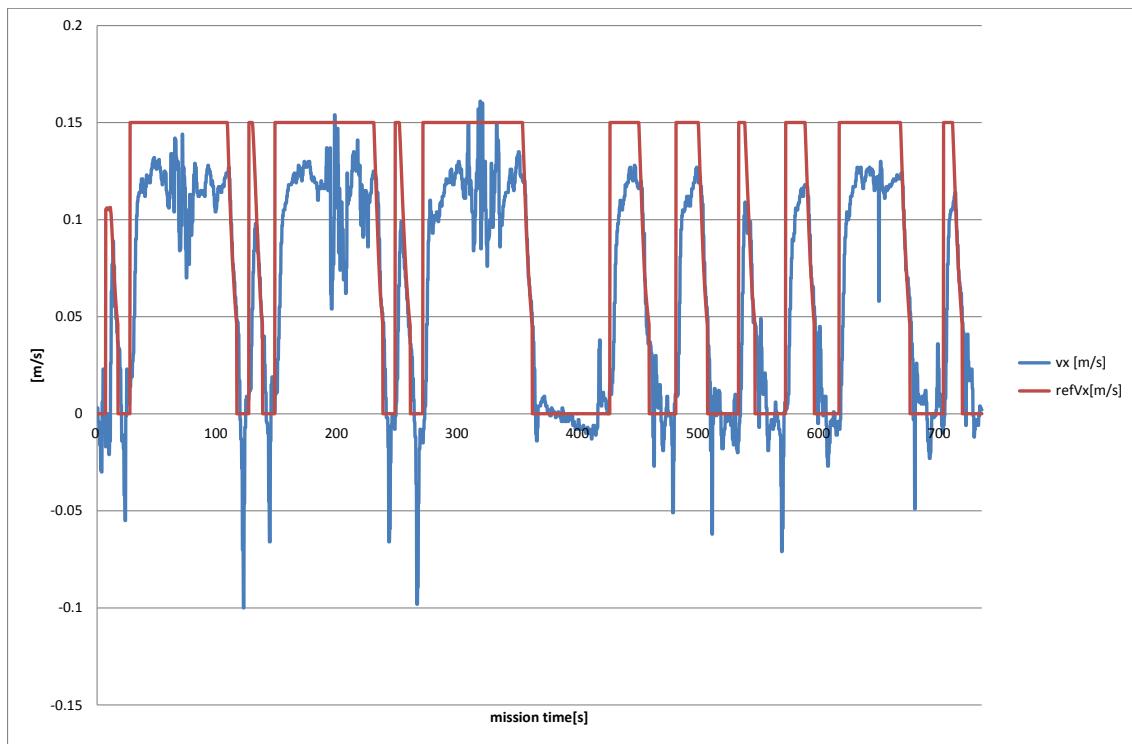


Fig. 6.31: Thruster command value and observed speed(x)(mission 2)

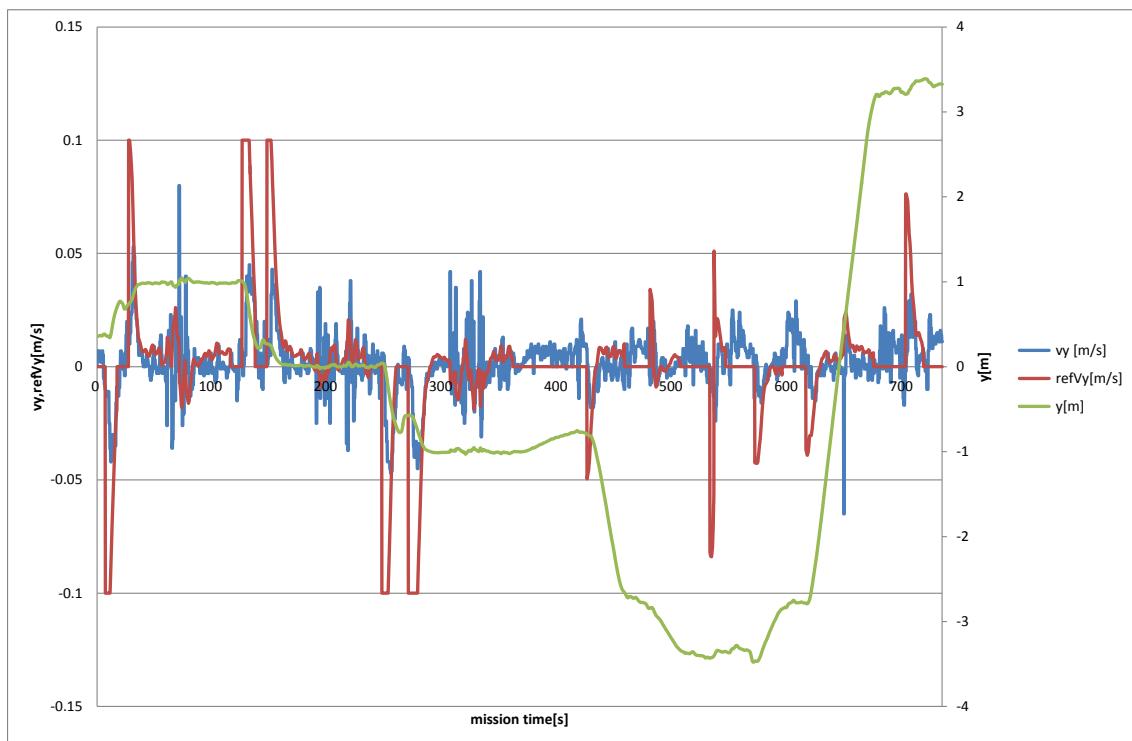


Fig. 6.32: Thruster command value, observed speed and coordinate(y)(mission 2)

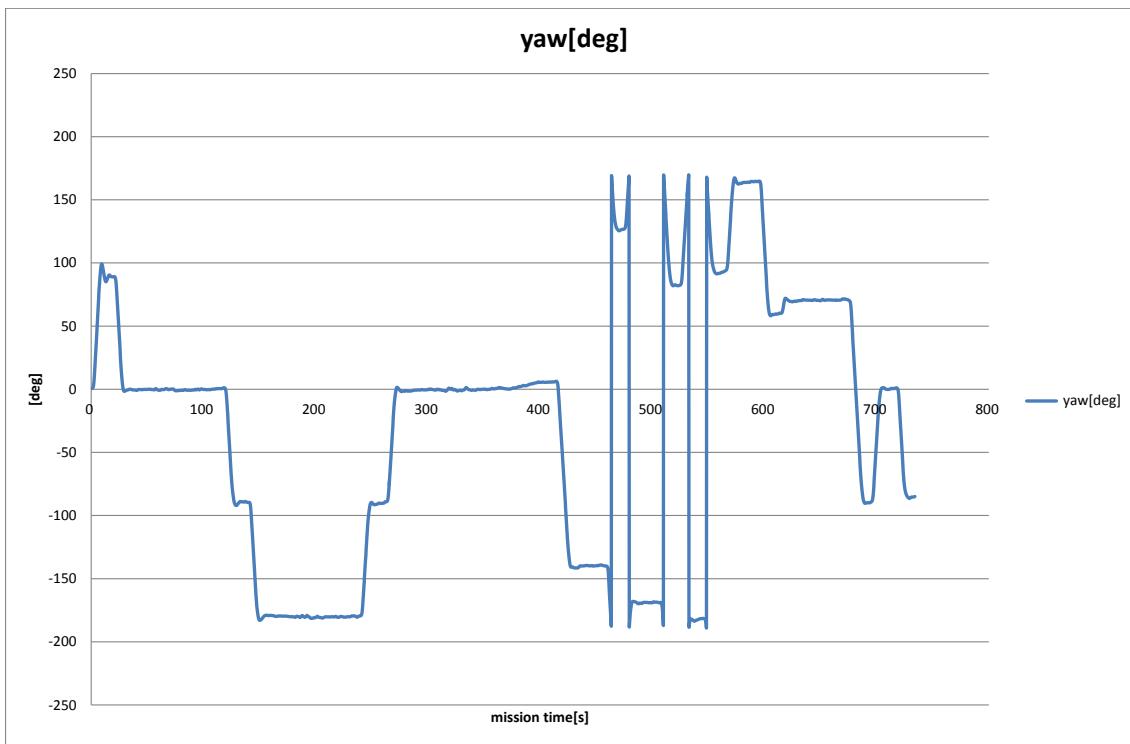


Fig. 6.33: Observed yaw(mission 2)

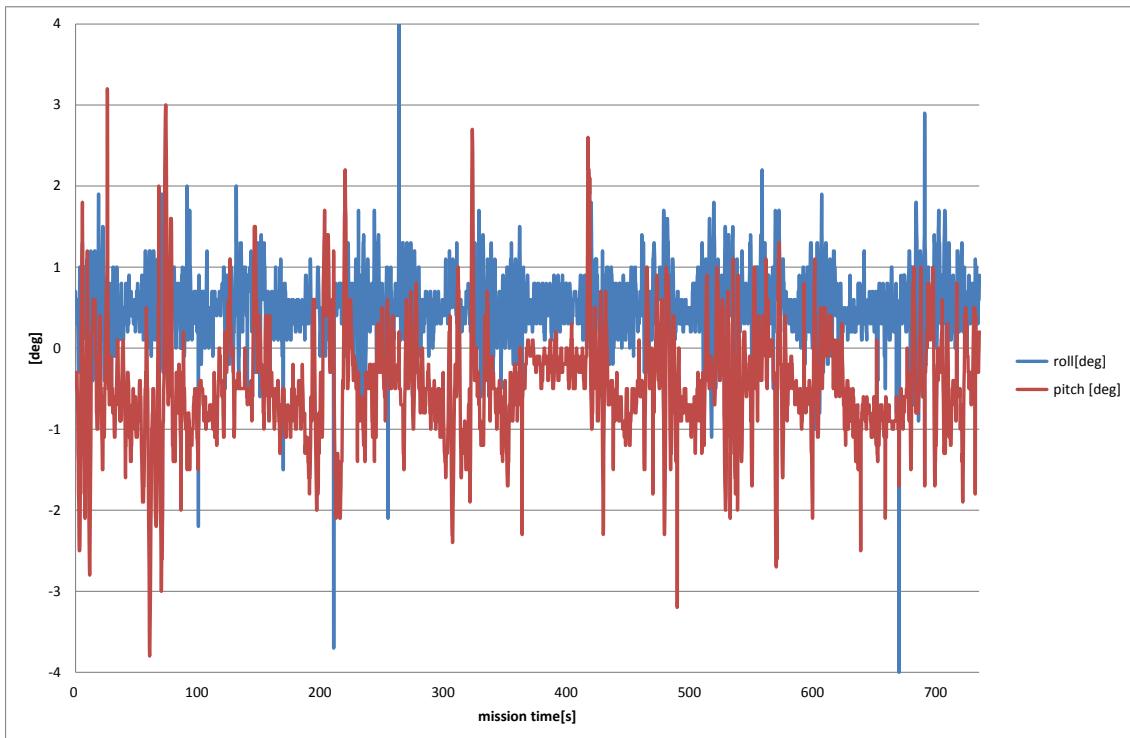


Fig. 6.34: Observed roll and pitch(mission 2)

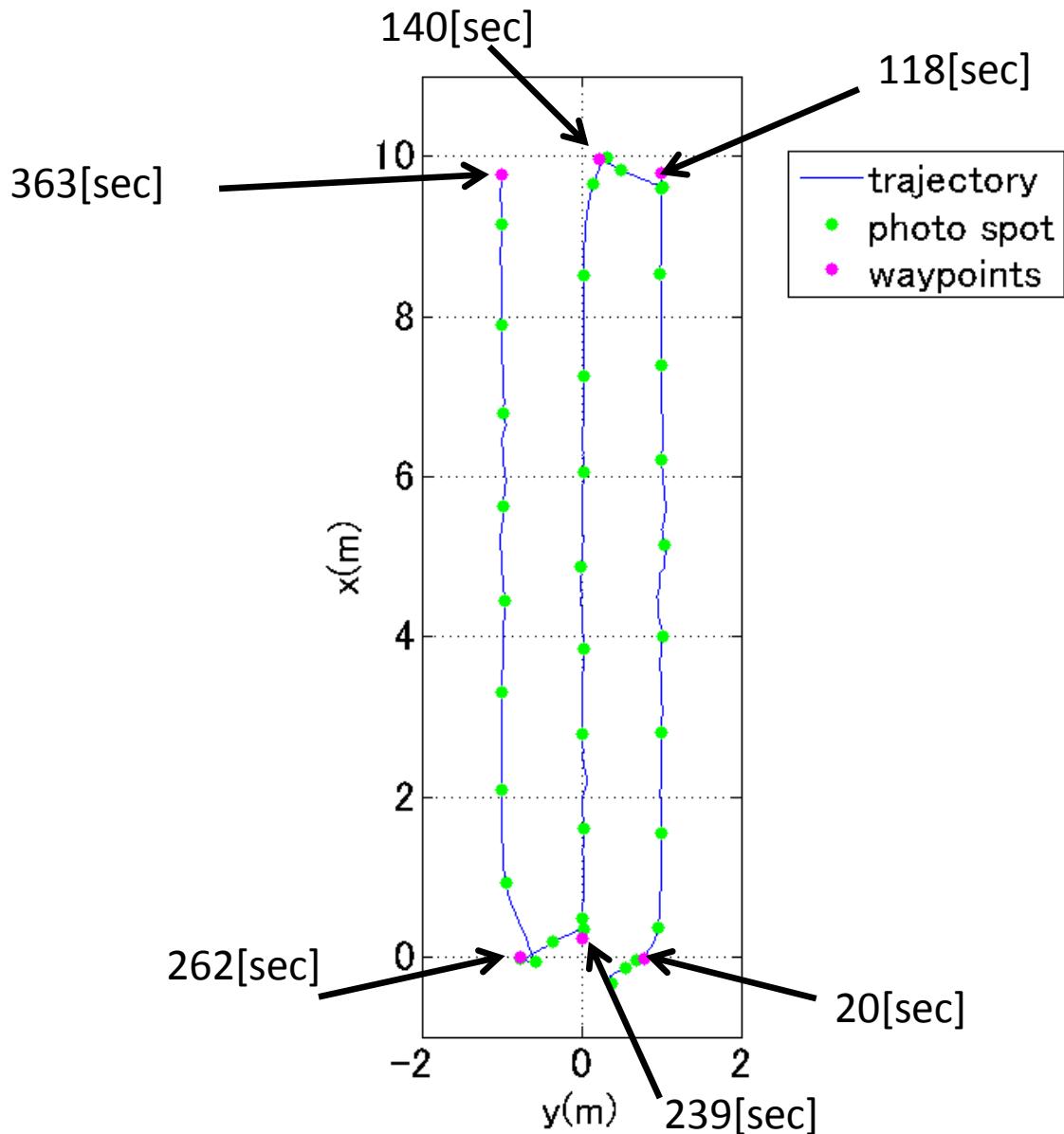


Fig. 6.35: Trajectory of the initial observation phase(mission 2)

Table 6.3: The measurements after denoising(mission 2)

Parameter	ground truth	measurements
Length of the target (a)[cm]	205	204
Length of the target (b) [cm]	100	99
Length of the target (c) [cm]	91	-
θ [degree]	60	-
Length of the gap between target 1 and 2[cm]	31	31
Vertical distance from floor[cm]	495	492

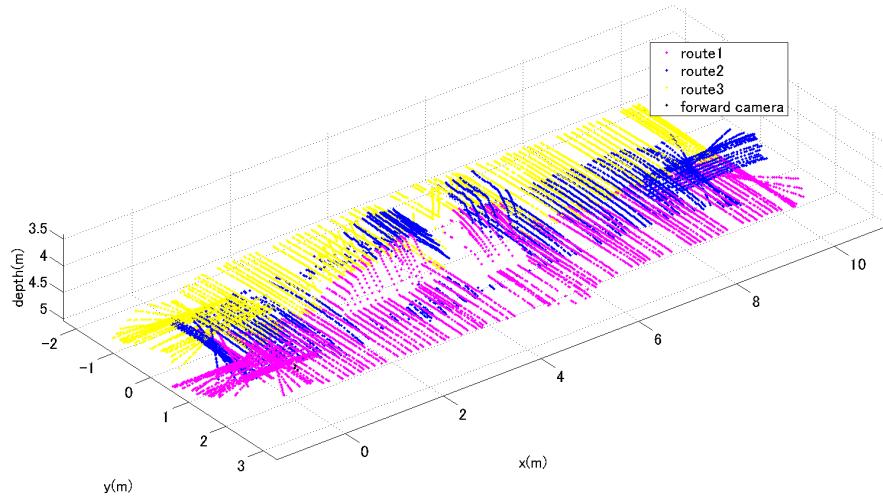


Fig. 6.36: Results of the terrain measurement before denoising(mission 2)

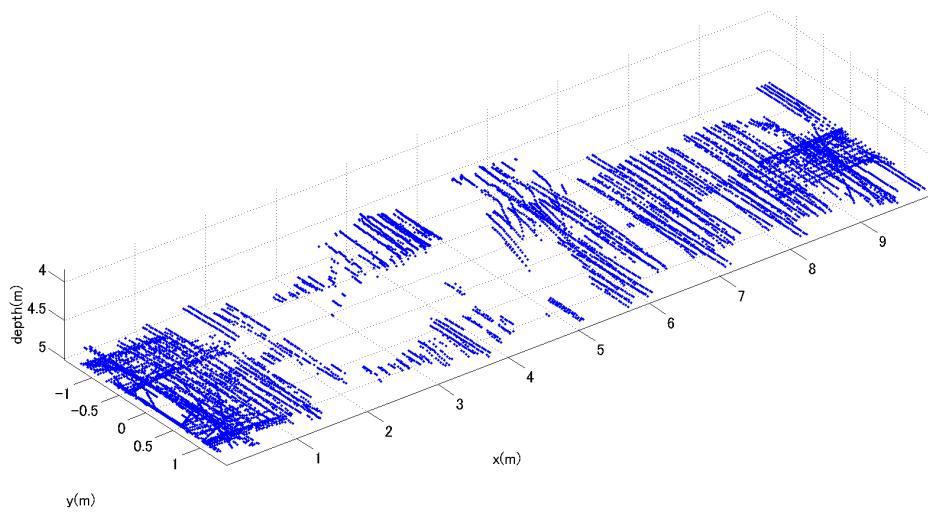


Fig. 6.37: Results of the terrain measurement after denoising(mission 2)

Table 6.4: The measurements before denoising(mission 2)

Parameter	ground truth	measurements
Length of the target (a)[cm]	205	204
Length of the target (b) [cm]	100	99
Length of the target (c) [cm]	91	97
θ [degree]	60	62
Length of the gap between target 1 and 2[cm]	31	19
Vertical distance from floor[cm]	495	492

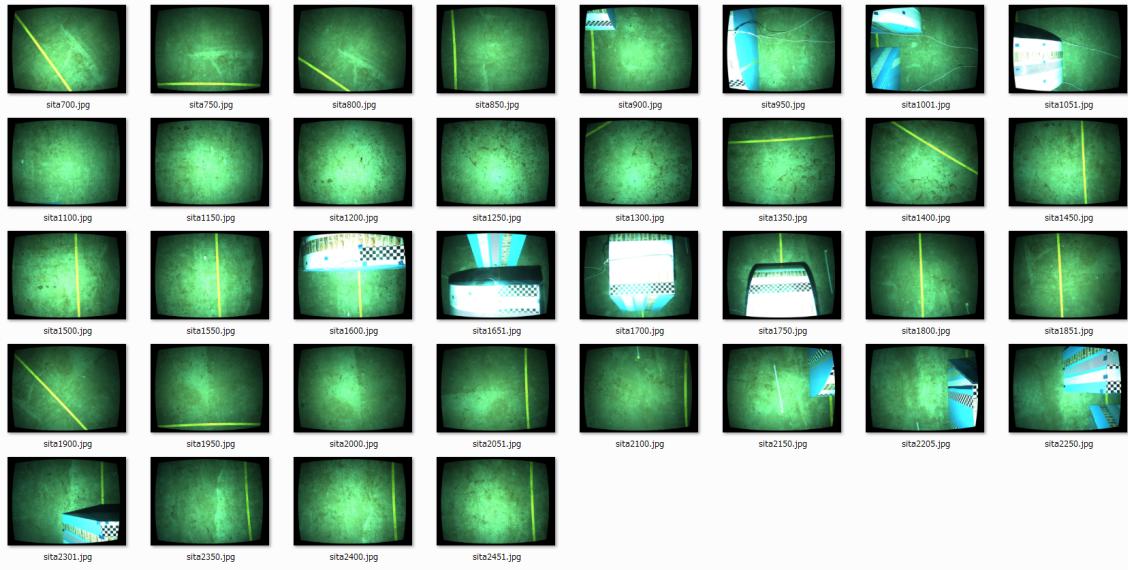


Fig. 6.38: Seafloor pictures taken by the downward camera during the initial observation phase(mission 2)



Fig. 6.39: Seafloor pictures taken by the forward camera during the initial observation phase(mission 2)

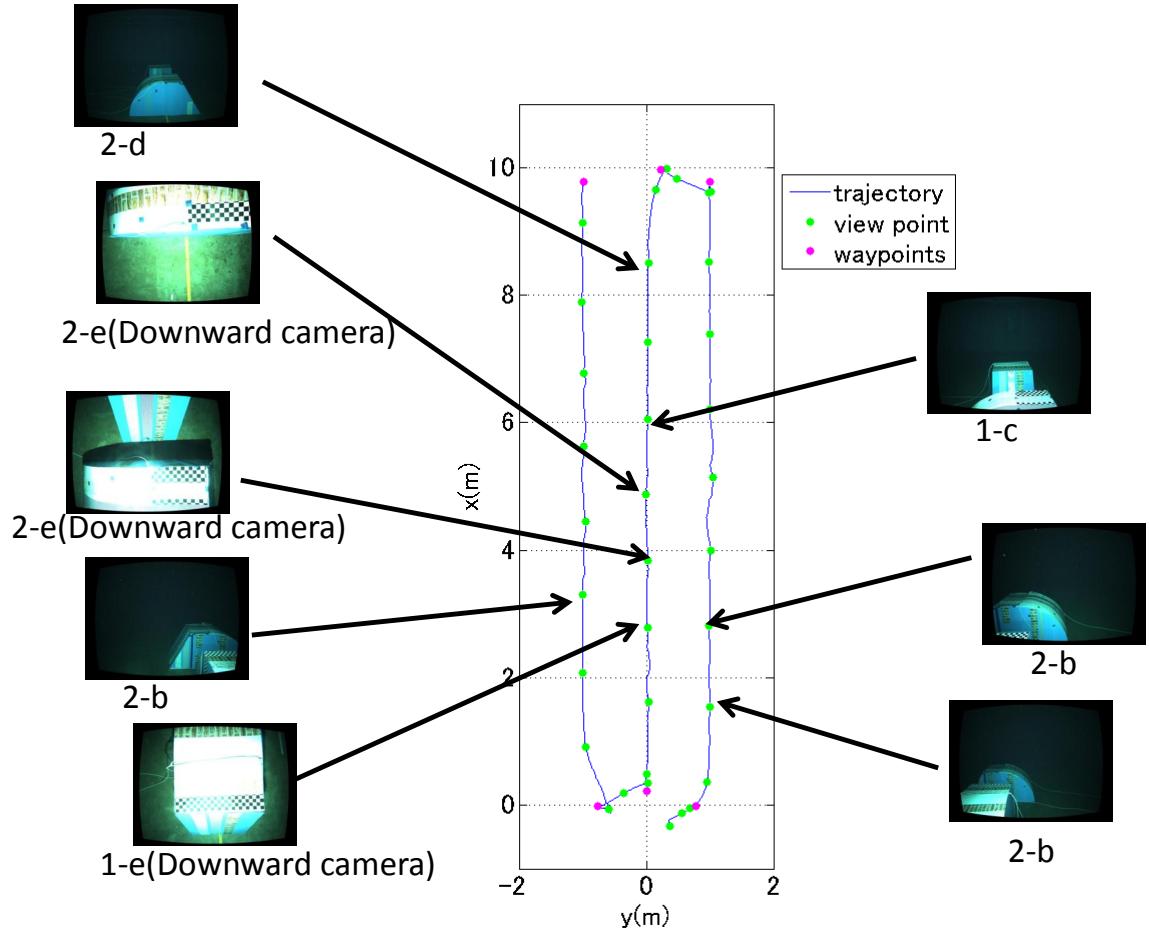


Fig. 6.40: Pictures of the targets taken during the initial observation phase(mission 2)

Table 6.5: Acquired data of initial observation phase (mission 2)

Number of seafloor images	72(36 \times 2 cameras)
Number of laser images	609(304(forward) + 305(downward))
Number of bathymetric points before denoising	16109
Number of bathymetric points after denoising	9146
Number of mesh	3054

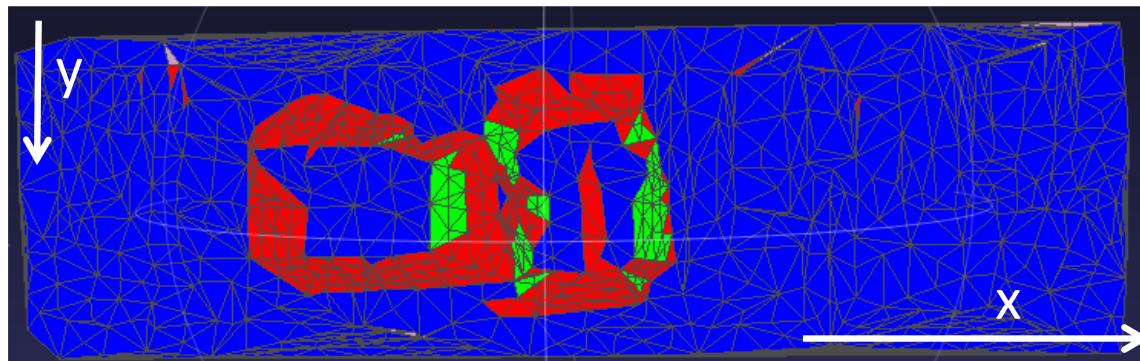


Fig. 6.41: Results of the mesh evaluation (Top view) (mission 2) Green mesh: covered by forward camera, Blue mesh: covered by downward camera, Red mesh: uncovered

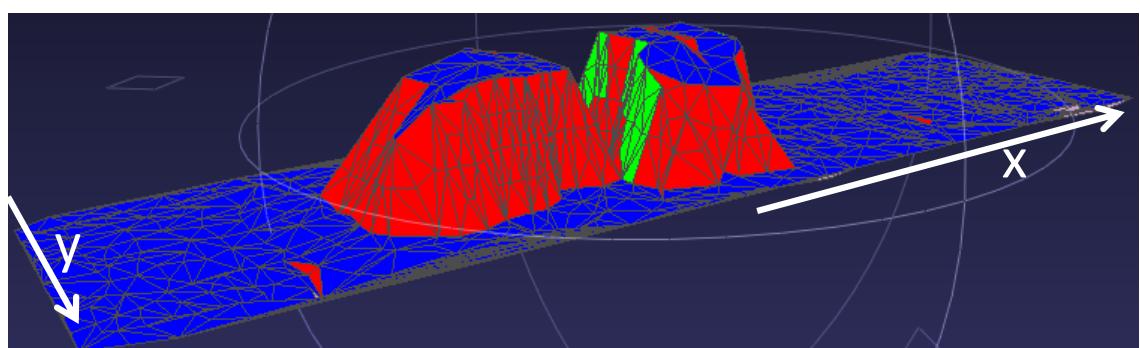


Fig. 6.42: Results of the mesh evaluation (Front view) (mission 2)

Table 6.6: Calculated waypoints(mission 2)

waypoint	x[m]	y[m]	depth[m]	yaw[deg]
1	7.1	-2.9	4.0	123.9
2	4.5	-3.4	4.0	80.8
3	3.5	-3.4	4.0	90.0
4	1.3	-2.8	3.9	57.1
5	3.4	3.4	4.5	268.7
6	5.0	3.5	4.4	272.4

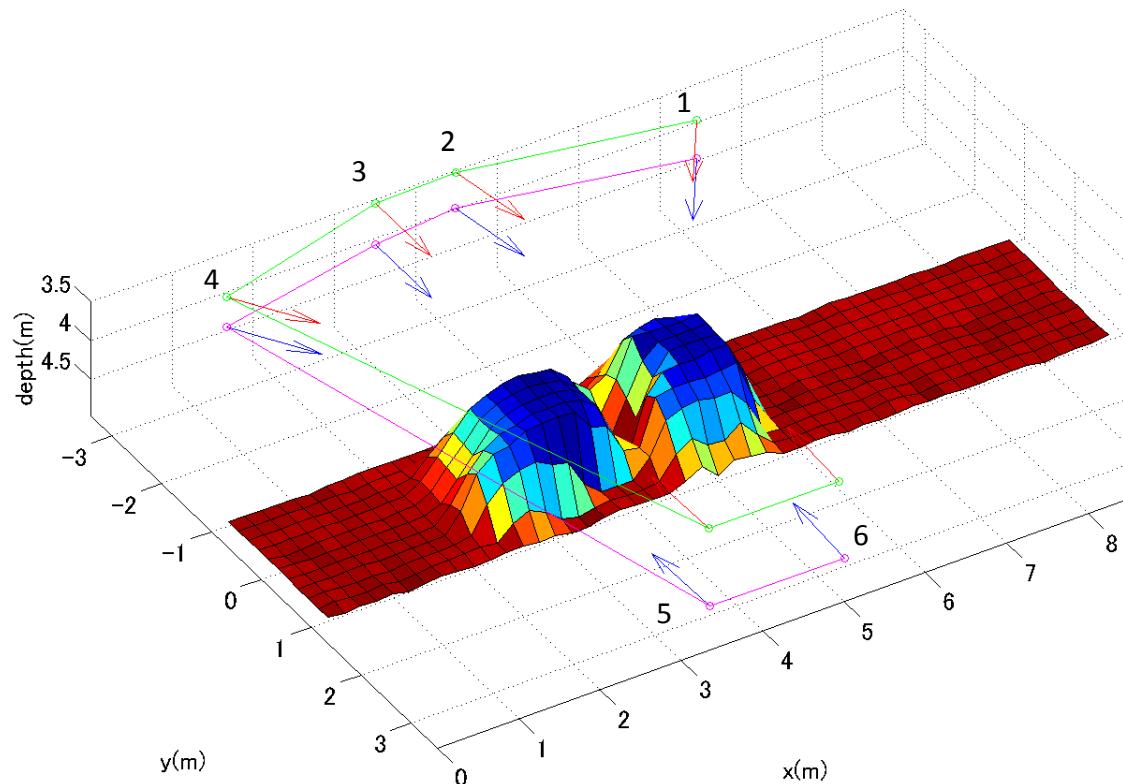


Fig. 6.43: Calculated waypoints and actual waypoints(mission 2)

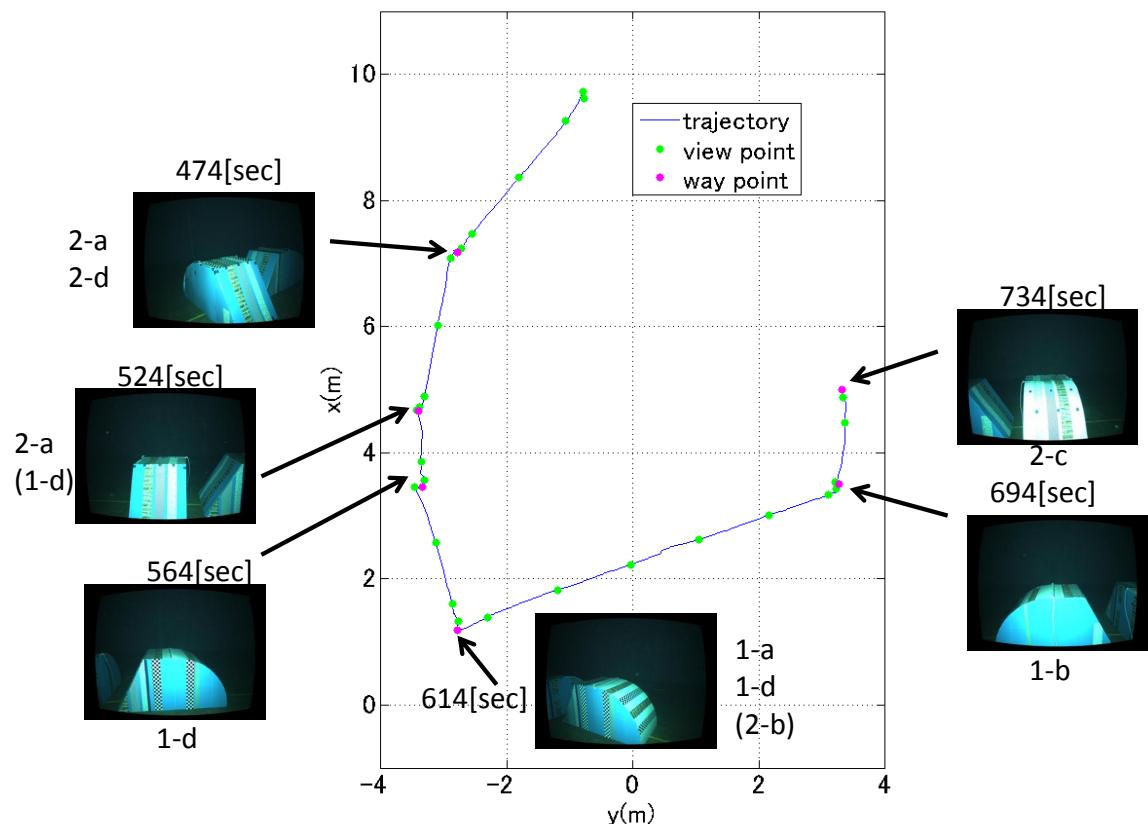


Fig. 6.44: Trajectory and pictures taken at the waypoints dournig the re-observation phase(mission 2)

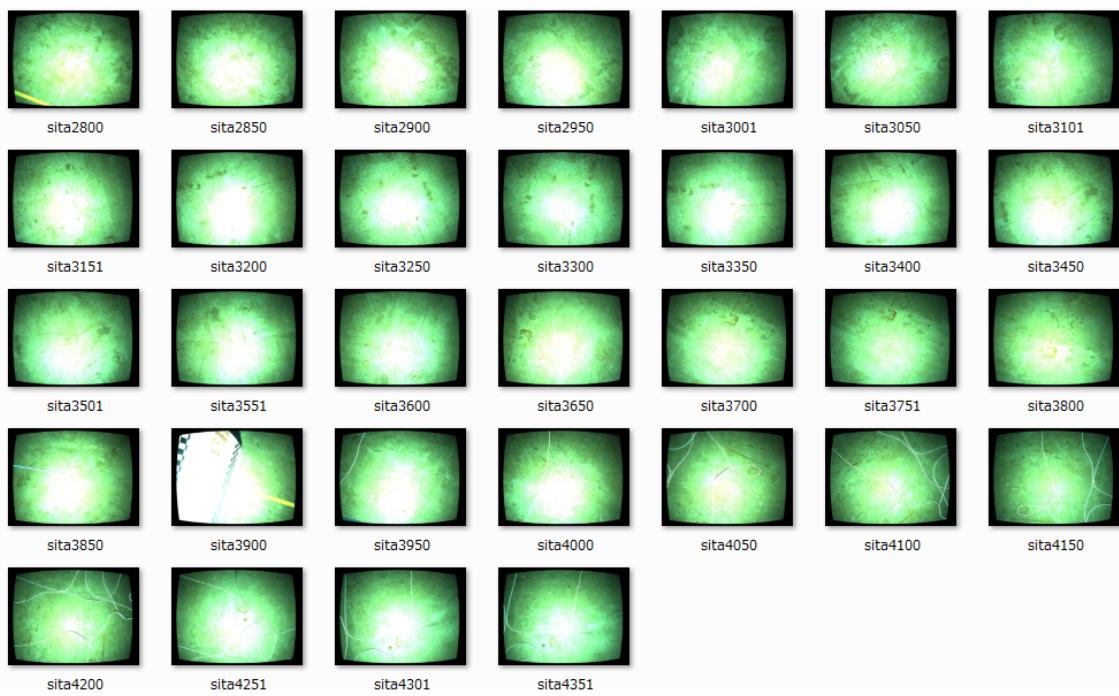


Fig. 6.45: Seafloor pictures taken by the downward camera during the re-observation phase(mission 2)

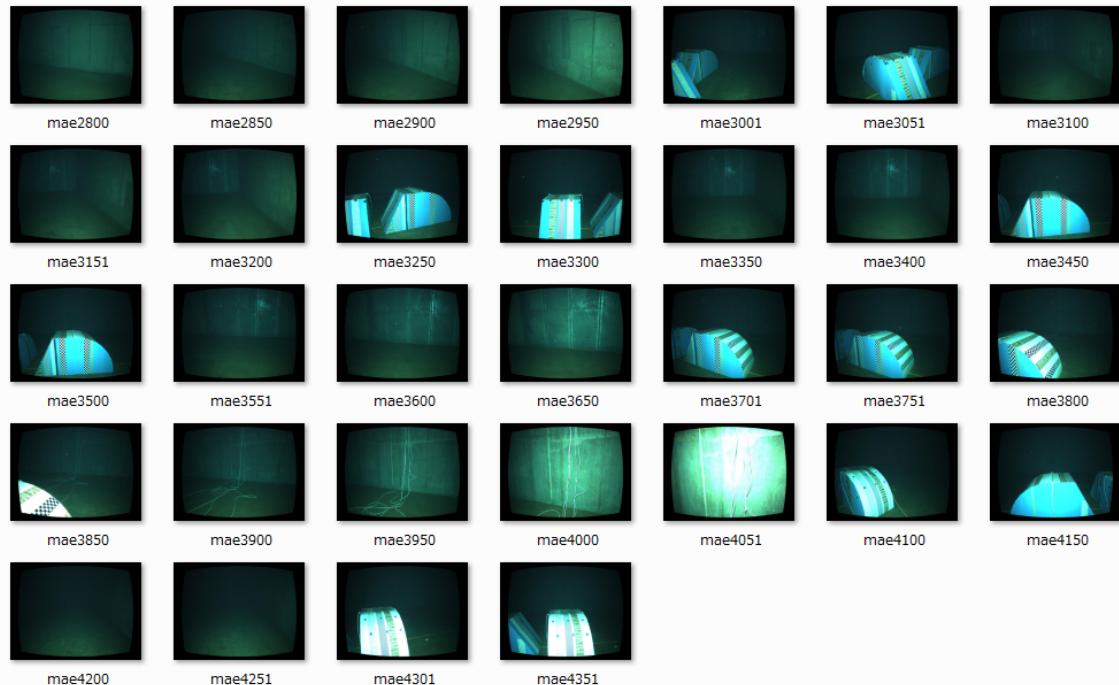


Fig. 6.46: Seafloor pictures taken by the forward camera during the re-observation phase(mission 2)

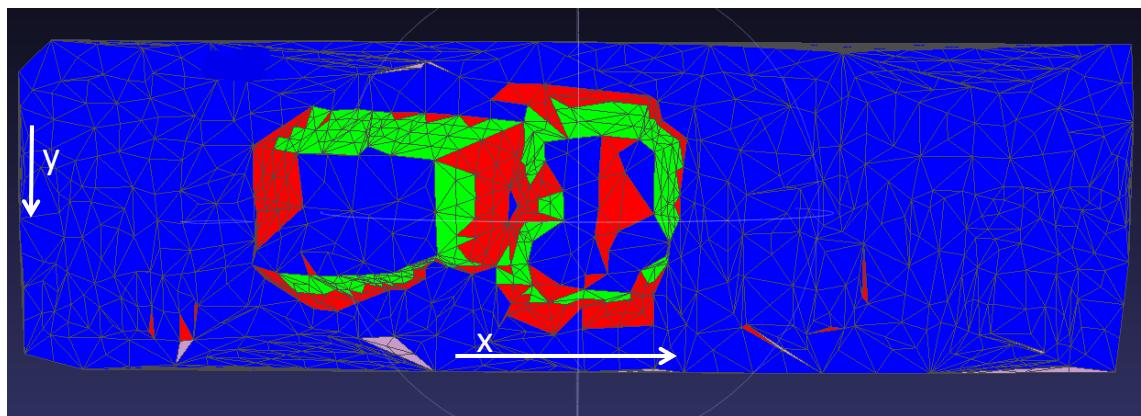


Fig. 6.47: Results of the mesh evaluation after re-observation phase(Top view)(mission 2)

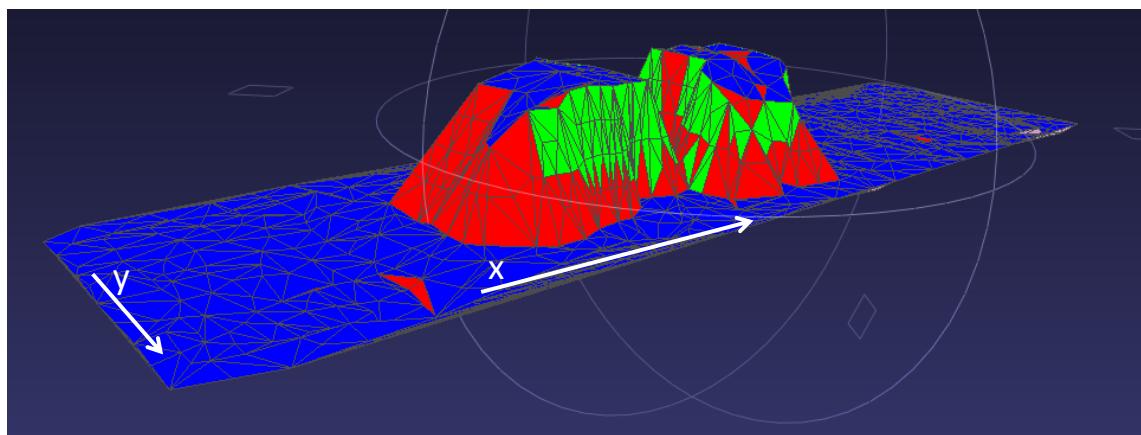


Fig. 6.48: Results of the mesh evaluation after re-observation phase(Front view)(mission 2)

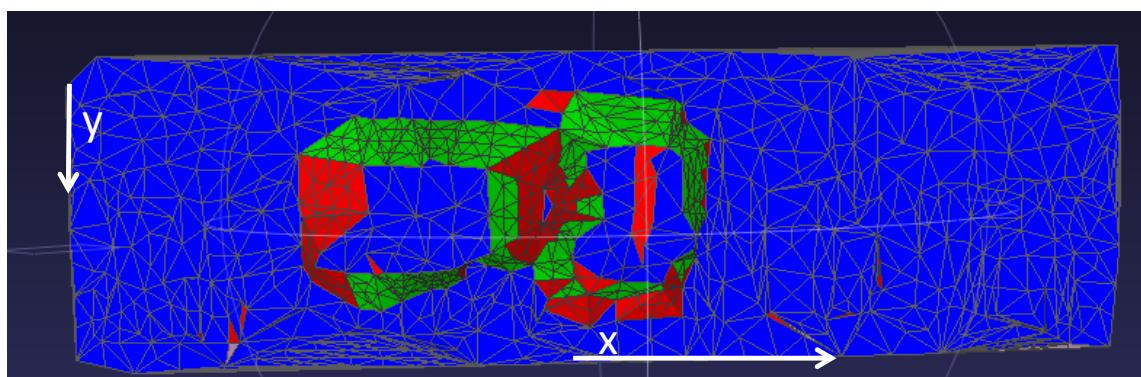


Fig. 6.49: Simulated results of the mesh evaluation(Top view)(mission 2)

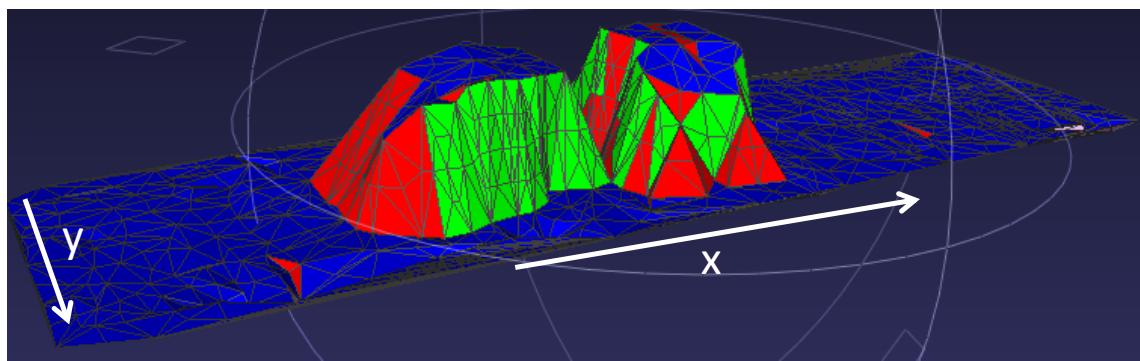


Fig. 6.50: Simulated results of the mesh evaluation(Front view)(mission 2)

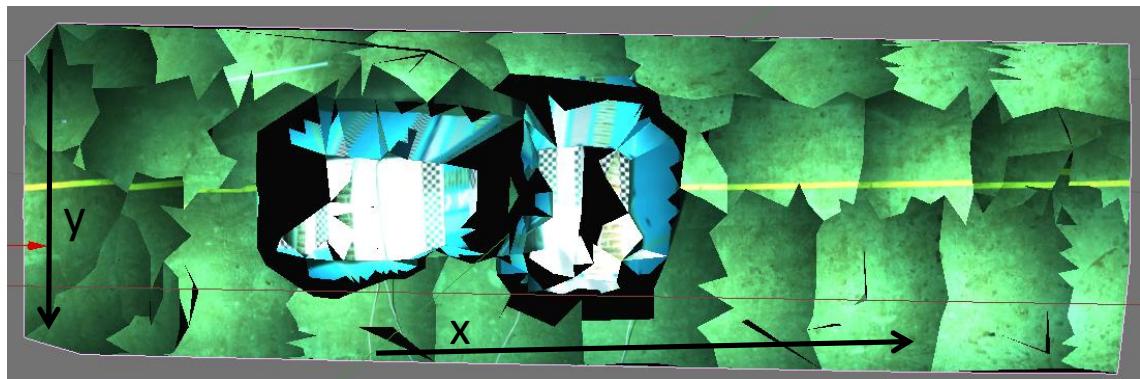


Fig. 6.51: Texture mapping results after re-observation phase(Top view)(mission 2)

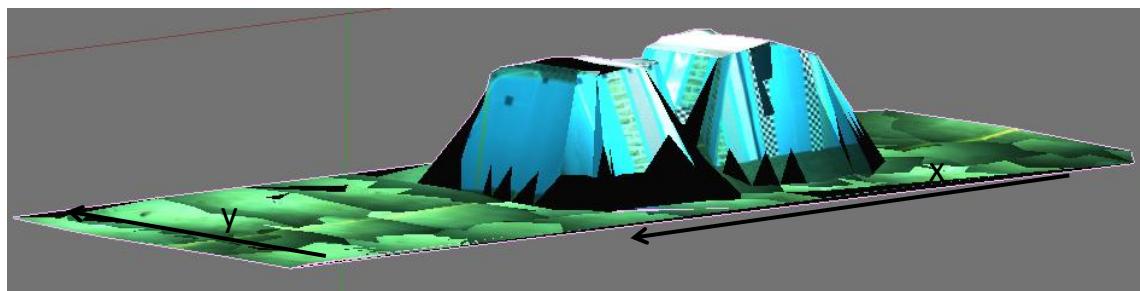


Fig. 6.52: Texture mapping results after re-observation phase(Front view)(mission 2)

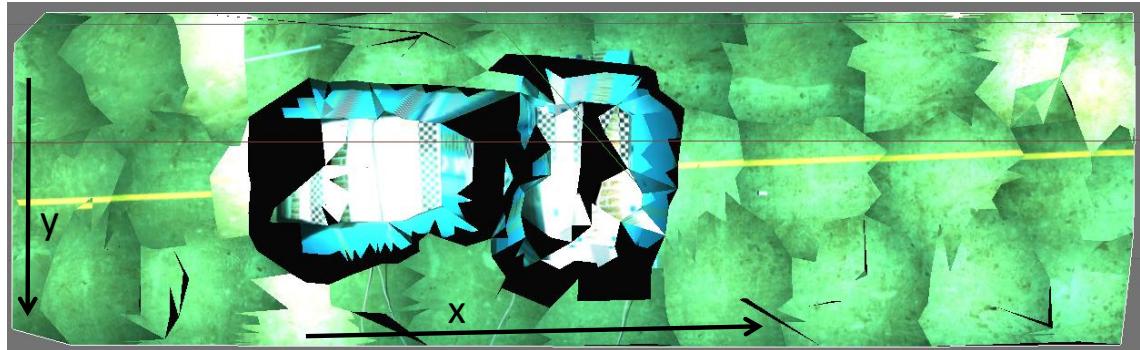


Fig. 6.53: Texture mapping results of best selection(Top view)(mission 2)

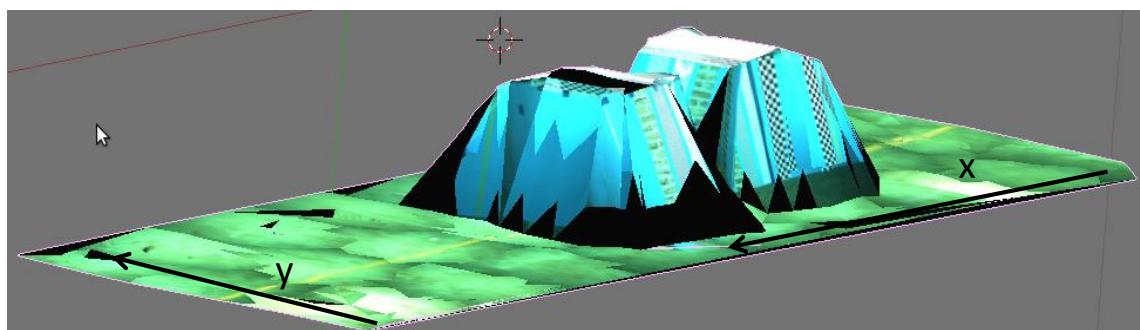


Fig. 6.54: Texture mapping results of best selection(Front view)(mission 2)

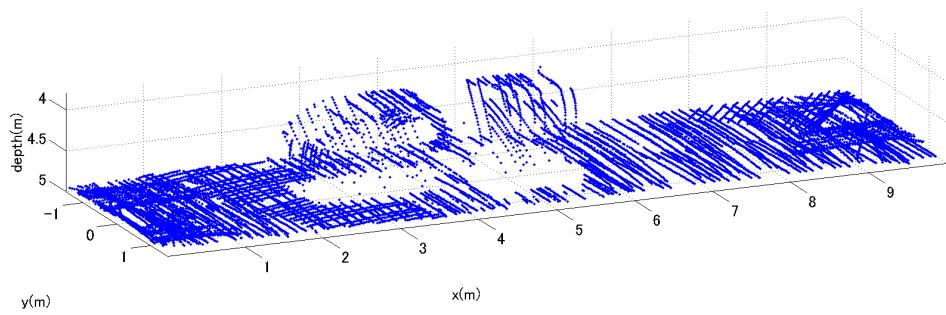


Fig. 6.55: Improved results of the terrain measurement after denoising (Threshold of denoising is changed)(mission 2)

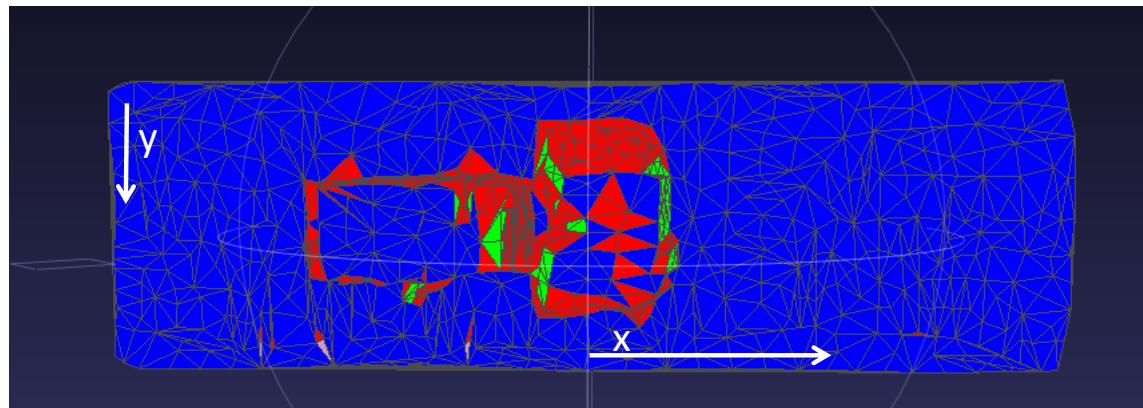


Fig. 6.56: Simulated results of the mesh evaluation of the simulation (Threshold of denoising is changed)(Top view)(mission 2)

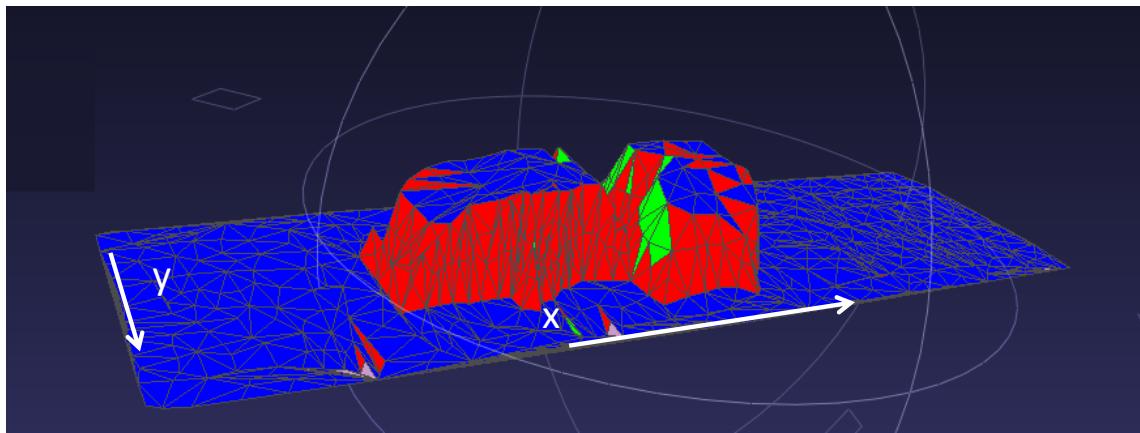


Fig. 6.57: Simulated results of the mesh evaluation of the simulation (Threshold of denoising is changed)(Front view)(mission 2)

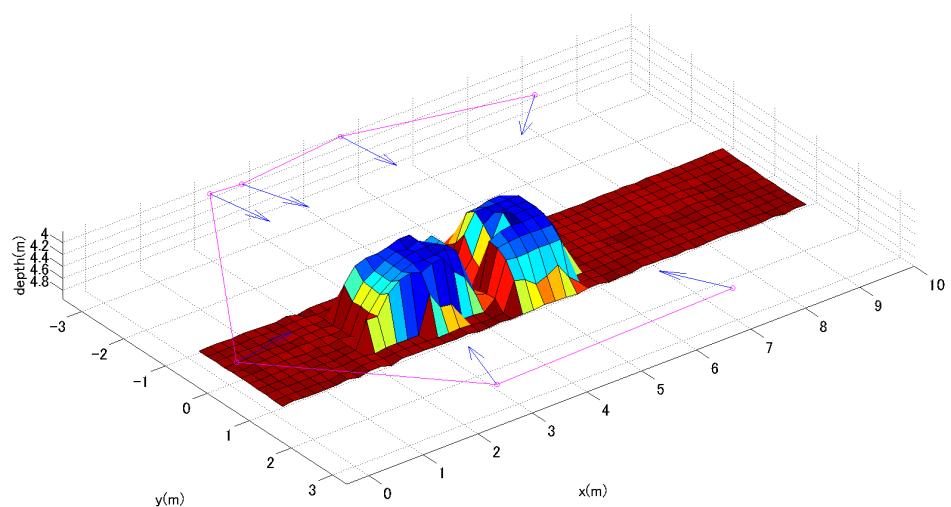


Fig. 6.58: Calculated waypoints of the simulation (Threshold of denoising is changed)(mission 2)

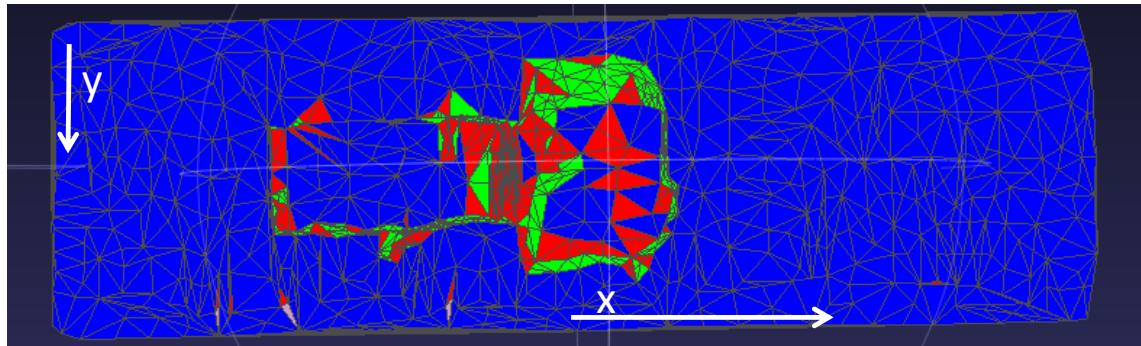


Fig. 6.59: Simulated results of the mesh evaluation after re-observation phase (Threshold of denoising is changed)(Top view)(mission 2)

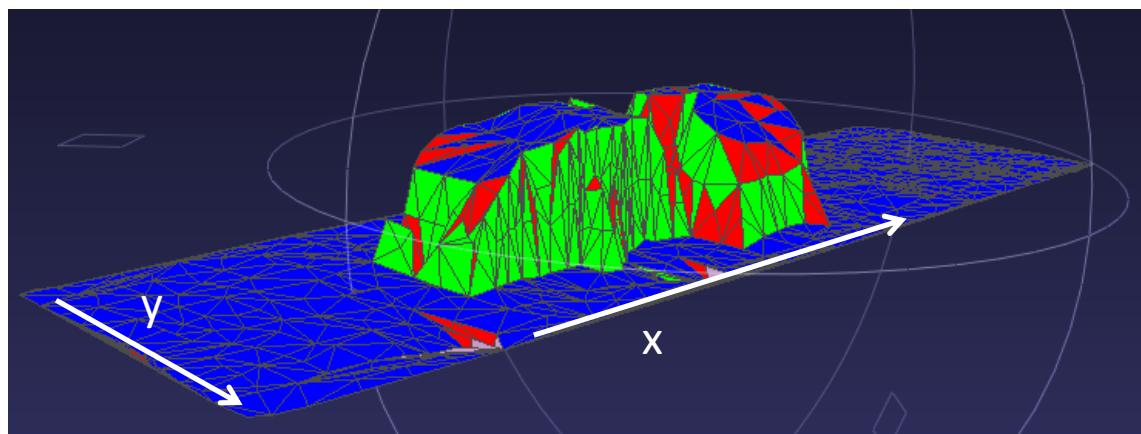


Fig. 6.60: Simulated results of the mesh evaluation after re-observation phase(Threshold of denoising is changed) (Front view)(mission 2)

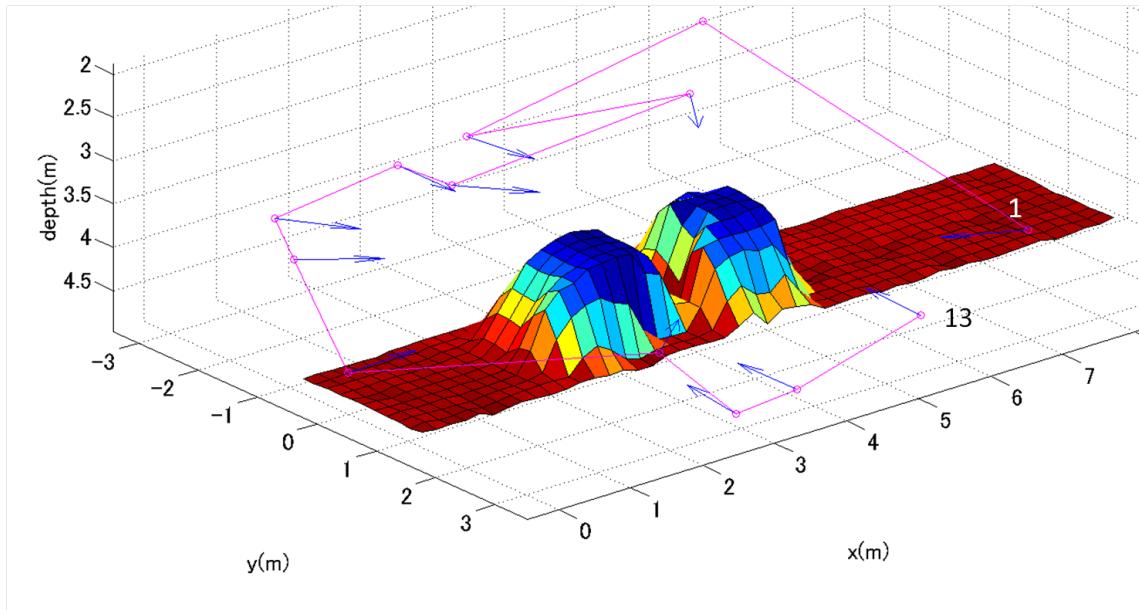


Fig. 6.61: Caluculated waypoints (Threshold of view point screening = 6) (mission 2)

Table 6.7: Caluculated waypoints (Threshold of view point screening = 6) (mission 2)

waypoint	x[m]	y[m]	z[m]	yaw[deg]
1	8.34	1.35	4.57	205.8
2	5.21	-0.33	1.88	208.2
3	4.48	-3.43	3.98	80.8
4	7.12	-2.87	3.99	123.9
5	3.11	-2.03	3.75	52.4
6	3.47	-3.36	4.03	90.0
7	1.26	-2.76	3.90	57.1
8	0.60	-1.65	3.85	38.1
9	-0.44	0.53	4.21	357.9
10	2.41	2.32	4.16	322.2
11	2.47	3.55	4.49	276.9
12	3.42	3.42	4.50	268.7
13	5.14	3.41	4.09	272.4

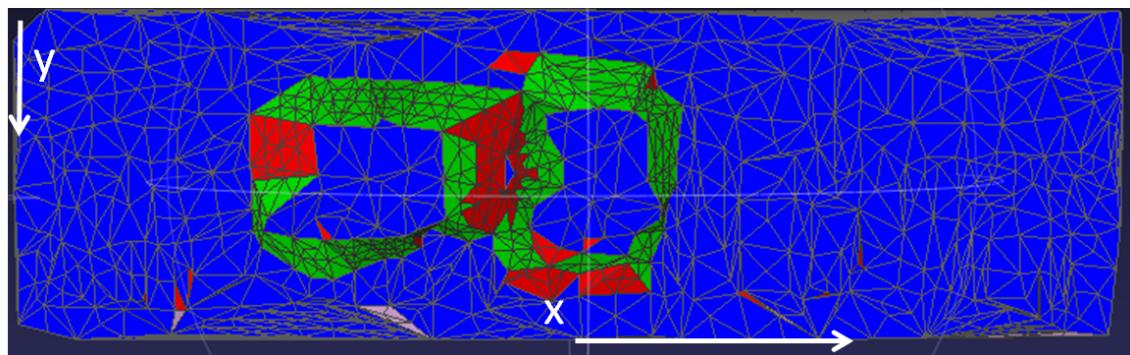


Fig. 6.62: Simulated results of the mesh evaluation after re-observation phase (Threshold of view point screening = 6)(Top view)(mission 2)

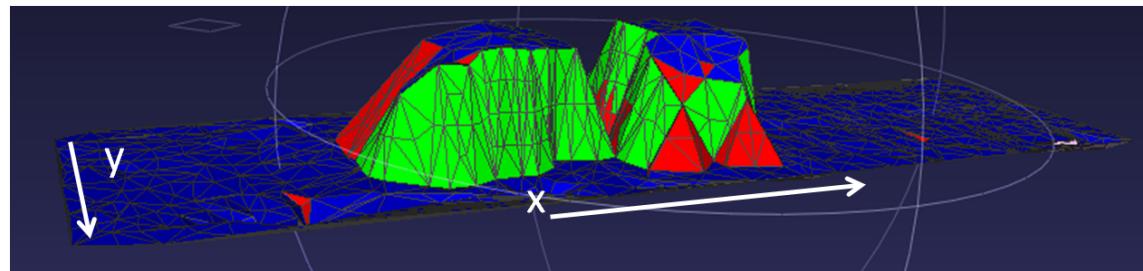


Fig. 6.63: Simulated results of the mesh evaluation after re-observation phase (Threshold of view point screening = 6)(Front view)(mission 2)

Table 6.8: Coverage ratio of mission 2

Experiment	phase	Coverage ratio	Coverage ratio of forward camera
Tank	initial	73	6.0
	re-observation	82	15.7
	simulation	88	20.2
Improvement for denoising	initial	70	5.1
	re-observation	85	19.6
Improvement for waypoint making	re-observation	92	24.3

7 実海域データへの適用

昨年の KT-1020 航海で撮影された鹿児島湾のチムニーの点群 [25] に対して撮影点を仮定し，提案手法を適用した．この点群は AUV Tuna-Sand によって撮影された．

7.1 撮影度判定手法の適用

元の点群を Fig.7.1 に，3 次元メッシュ化した後の結果を Fig.7.2 に示す．また，3 次元メッシュにするまでの過程を Fig.7.3 に示す．

仮定した撮影点を Fig.7.4 に示す．まず，距離判定を行う．距離の閾値は 3[m] である．結果を Fig.7.5 に示す．赤色が撮影されないと判定されたメッシュであり，緑色が距離判定では撮影されていると判定されたメッシュである．以下の結果でも同様の色を用いる．次に，画像中のメッシュの位置の判定を行う．結果を Fig.7.6 に示す．画像中の中心から 8 割の部分にあること条件とした．閾値は横方向が 0.47 縦方向が 0.38 である．その後に，メッシュとカメラの視線ベクトルの類似度判定を行う．結果を Fig.7.7 に示す．メッシュとカメラの視線ベクトルの差は 45[deg] であることを条件とした．閾値は， $\cos 45 = 0.71$ である．Fig.7.8 に，類似度で色分けした結果を示す．赤色が類似度マイナスであり，黒に近い程類似度が高い．最後に，障害物判定を行う．結果を Fig.7.9 に示す．ただし，この結果は類似度判定は行っていない．最終結果を Fig.7.10 に示す．

複数のカメラを動かした場合の想定した撮影点を Fig.7.11 に示す．Fig.7.12 の左側に撮影度判定を行った結果を示す．赤色が未撮影のメッシュであり，青色が下向きカメラで撮影されたもの，緑色が前向きカメラで撮影されたと判定されたものである．右側には類似度判定以外の全ての判定を行った結果を示す．チムニーは凹凸のある形状であるため，角度が様々であり，一つのカメラだけで撮影するのは難しいということがわかる．

7.2 経路計画手法の適用

7.2.1 実験 1 地形情報のみが手に入った場合

地形情報のみが手に入ったと仮定する．AUV Tri-TON で水槽実験と同様のパラメータでウェイポイント生成を行なった結果が Fig.7.13，Table.7.1 である．この経路で撮影を行った場合のシュミレーション結果を Fig.7.14，Fig.7.15 に示す．青色が下向きカメラで，緑色が前向きカメラで撮影されたメッシュであり赤色が未撮影メッシュである．カバー率は 68%，前カメラカバー率は 19.1% であった．

7.2.2 実験 1 考察

撮影度判定でわかるように、チムニーは凹凸の多い形状であるため、角度が様々である。よって角度判定によって一つの写真で撮影できるメッシュ数が少なくなってしまう。その場合水槽実験で行ったような多量のメッシュが撮影できない場合はウェイポイントとしないような場合には十分なウェイポイントが生成されず、7割の撮影率となったと考えられる。よって、カバー率向上のための策として次の3案が考えられる。

- 最低撮影メッシュ数を下げる。
- 角度判定の閾値を下げる。
- メッシュ生成の際に使用する点を減らし面を簡略化する。

今回は第3案については検討しない。なぜなら簡略化されたメッシュが実際のチムニーの撮影にどの程度役立つか評価が難しいからである。

角度判定の閾値を45度から50度に変更しウェイポイント生成を行なった結果は、45度でウェイポイント生成を行った結果と同様であった。この経路で撮影を行った場合のシュミレーション結果をFig.7.16, Fig.7.17に示す。この場合のカバー率は83%，前カメラカバー率は25.6%となる。

更に最低撮影メッシュ数を6とした場合のウェイポイント生成を行なった結果がFig.7.18, Table.7.2である。この経路で撮影を行った場合のシュミレーション結果をFig.7.19, Fig.7.20に示す。この場合のカバー率は85%，前カメラカバー率は27.2%となる。最低撮影メッシュ数を下げても、増加するのはメッシュが少ししか撮影できない撮影点のみなのであまりカバー率は増加しない。角度も多様であるので自然物を対象とする場合は角度判定の閾値を下げることが現実的な解であると考えられる。

Fig.7.14などを見てもわかるように、チムニーには確実に撮影できない面が存在する。一見撮影可能なように見えても近隣の面によって遮蔽されてしまうような面も存在する。角度判定の閾値を50度に、最低撮影メッシュ数を1にした場合のカバー率は91%，前カメラカバー率が32.9%となる。結果のまとめをTable.7.3に示す。実海域では障害物回避などの安全策のためによりカバー率は低下すると考えられる。

今回はチムニーの三次元スキャンを目的として得られた点群データを用いた。ノイズ除去なども後処理で正確に行っている。実海域で提案手法が用いられる場合には、よりノイズが多くかつ必要な点が少ない結果が得られると考えられる。その際には初期観測フェーズだけではチムニーの形状が正確にわからない恐れがある。そこで最低撮影メッシュ数を大きくして一度生成された経路を通りより正確な地形情報を得てからもう一度閾値を下げる経路計画を行うことを考える。一度だけで経路を生成するよりも多くの情報が手に入り撮影度判定をもう一度行うことでより情報量の多い三次元

マップが完成すると考えられる。なぜなら、画像が撮影されていない面については地形計測も十分ではないことが予想されるからである。

7.2.3 実験 2 あらかじめ画像が撮影されている場合

地形情報が手に入っている他に、あらかじめ Fig.7.21, Table.7.4 のような経路と撮影点で撮影が行われたことを仮定する。AUV Tri-TON で水槽実験と同様のパラメータで初期観測フェーズの撮影度判定を行った結果が Fig.7.22, Fig.7.23 である。角度判定の閾値を 50 度に変更した場合の結果が Fig.7.24, Fig.7.25 である。最低撮影メッシュ数を 6 として経路を生成した結果が Fig.7.26, Table.7.5 である。撮影度判定の結果が Fig.7.27, Fig.7.28 である。その時のカバー率は 87%，前カメラカバー率は 30% である。Tri-TON のカメラセッティングでは撮影できない部分も存在することも考えると、十分に撮影が行なわれると言える。

7.2.4 実験 2 考察

最低撮影メッシュ数と角度判定の閾値を変化させた場合のカバー率と撮影点数を Table.7.6 に示す。角度判定の値が縦軸であり、最低撮影メッシュ数が横軸である。また、15→3 は、一度最低撮影メッシュ数の閾値 15 で観測を行ってから閾値 3 で行ったという意味である。また、撮影点数は初期観測フェーズからの合計である。50 度において初めから閾値を 3 とした場合と一旦最低撮影メッシュ数を 15 にしてもう一度最低撮影メッシュ数 3 で観測した場合で撮影点の数が違うのは、もう一度撮影を行うとグループ分割の際の結果が異なるためである。結果、2 回行った場合には 1 回で行うよりも少ない撮影点が求められた。

Fig.7.29 に角度判定の閾値が 45 度の場合のカバー率と撮影点数の関係を示す。最低撮影メッシュ数を増やすとカバー率は上昇するが、左側程効率が悪いことがわかる。これは、最低撮影メッシュ数は小さくなればなる程新しく撮影できるのは狭い面積の場所のみになるためカバー率の増加が少なくなるためである。

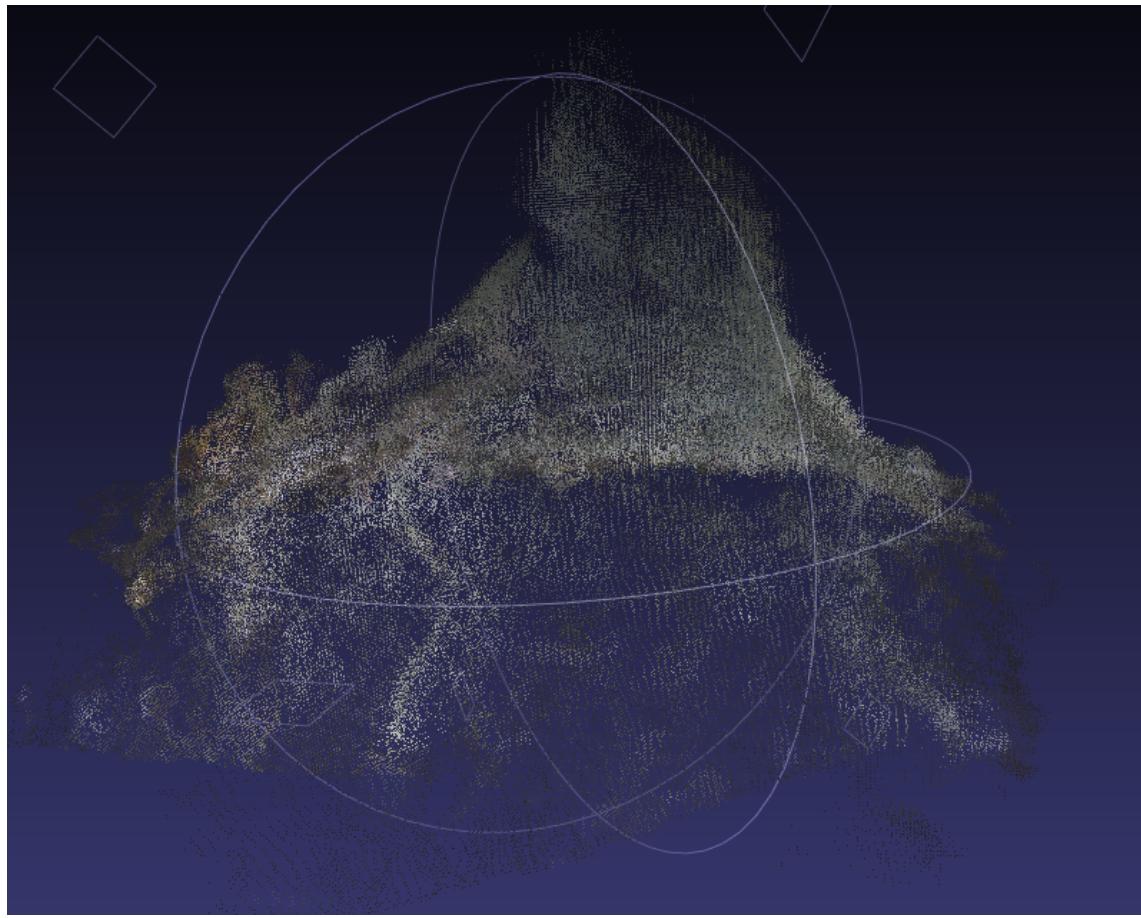


Fig. 7.1: Point cloud of actual chimney taken by AUV Tuna-Sand [25]

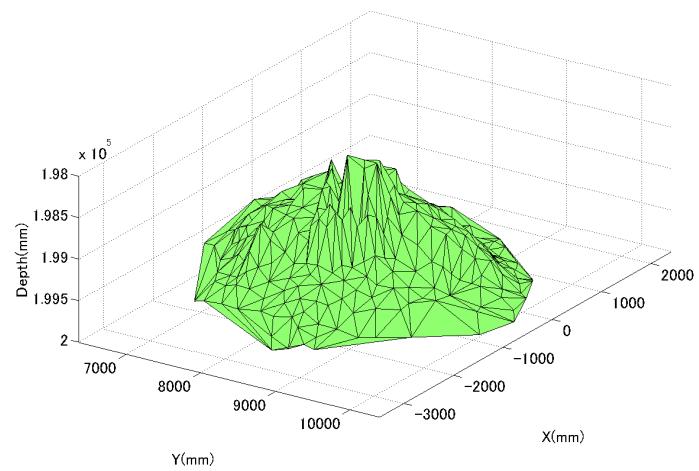


Fig. 7.2: 3D mesh of the chimney in Fig.7.1

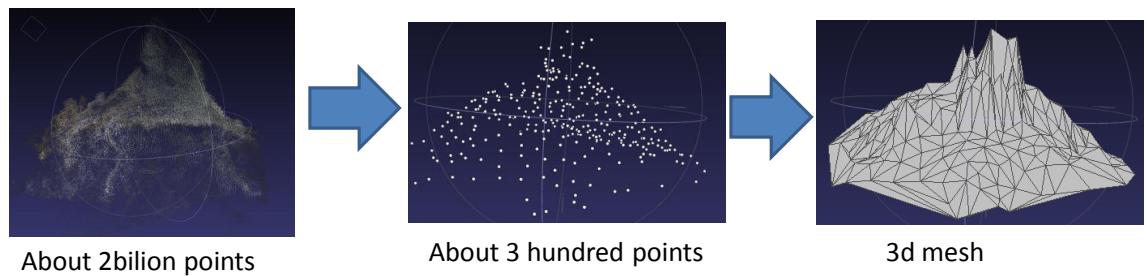


Fig. 7.3: Making 3D mesh of the chimney

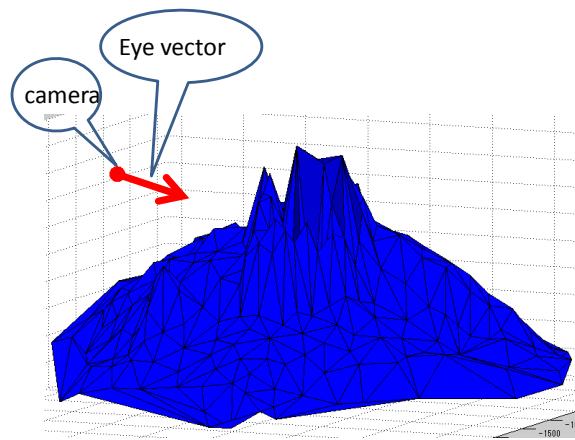


Fig. 7.4: Case of single view point

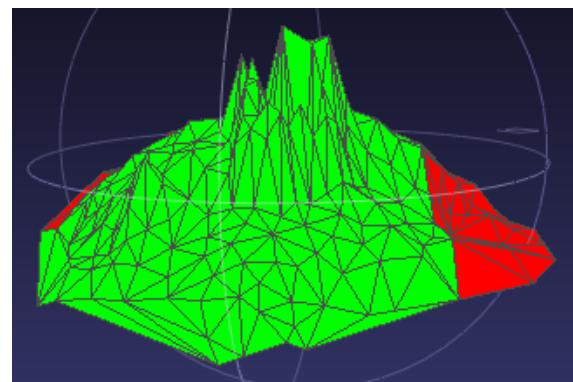


Fig. 7.5: Results after distance judgement

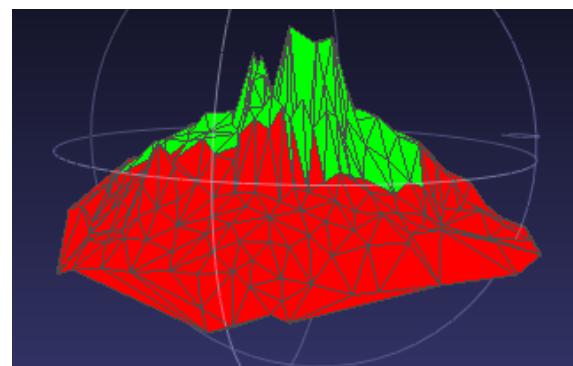


Fig. 7.6: Results after coverage judgement

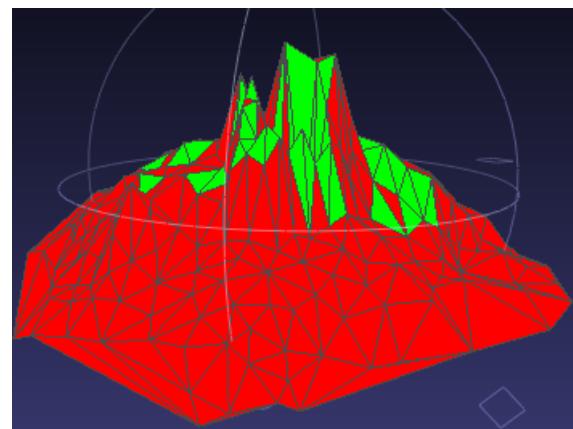


Fig. 7.7: Results after angle judgement

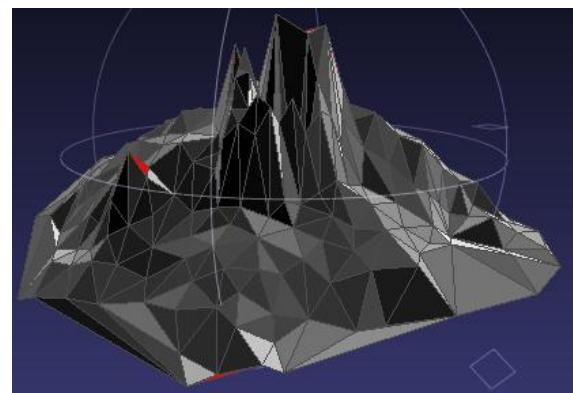


Fig. 7.8: Angle evaluation

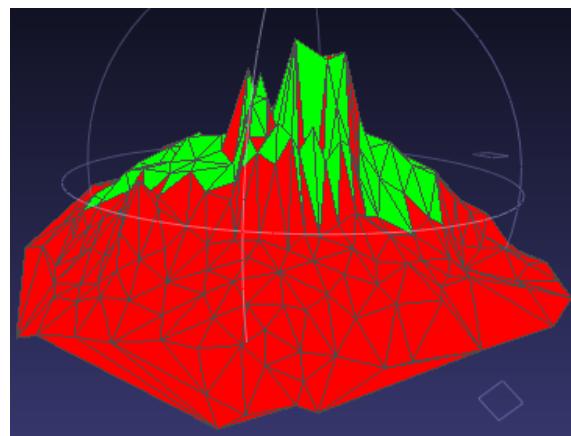


Fig. 7.9: Results without angle judgement after obstacle judgement

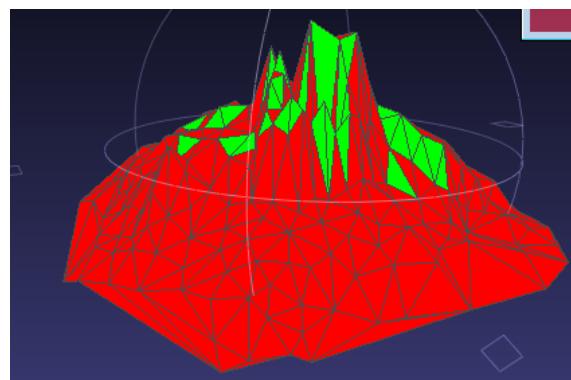


Fig. 7.10: Results after all mesh evaluation

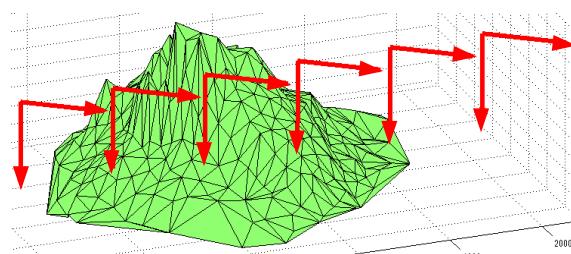
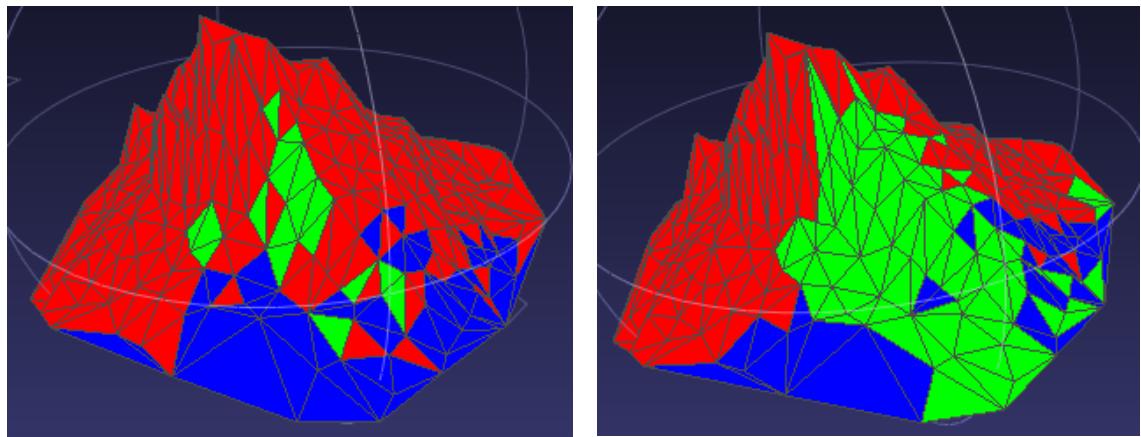


Fig. 7.11: Case of several view points



After all judgement

Without angle judgement

Fig. 7.12: Right: Results after all mesh evaluation Left: Results without angle judgement

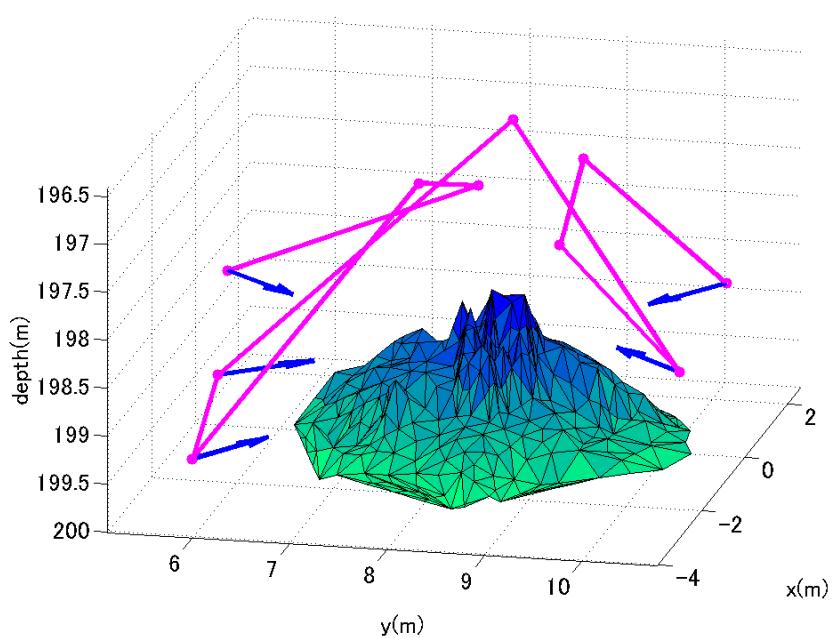


Fig. 7.13: Caluculated waypoints (Experiment 1)

Table 7.1: Caluculated waypoints (Experiment 1)

waypoint	x[m]	y[m]	z[m]	yaw[deg]
1	2.58	10.02	198.96	213.0
2	-0.23	9.17	196.93	196.8
3	-1.53	9.22	197.46	97.9
4	-3.02	10.78	198.27	312.7
5	-0.74	8.56	196.42	230.2
6	-3.11	6.06	198.57	49.3
7	-4.06	6.00	199.19	31.3
8	-1.32	7.73	196.97	195.0
9	-0.08	8.06	197.32	323.1
10	1.50	5.13	198.83	131.0

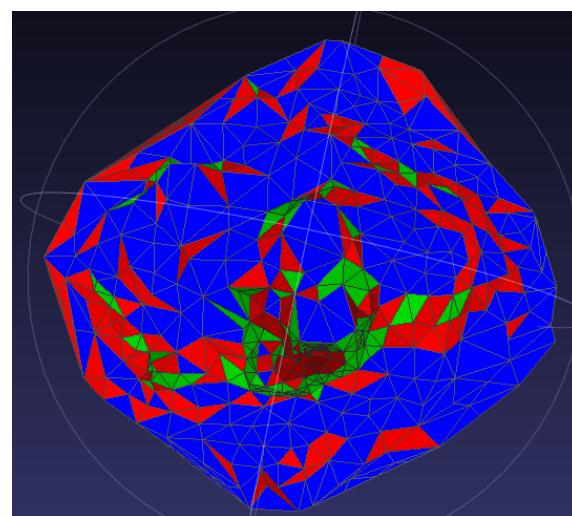


Fig. 7.14: Simulated results of the mesh evaluation (Top view) Green mesh: covered by forward camera, Blue mesh: covered by downward camera, Red mesh: uncovered (Experiment 1)

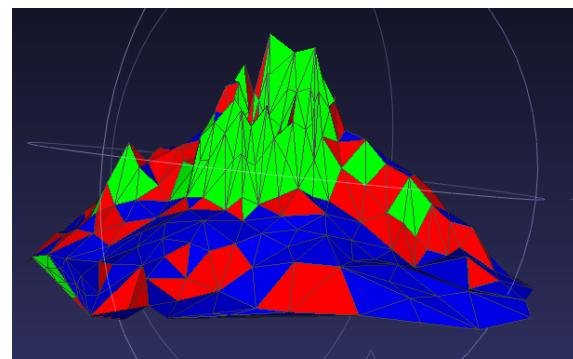


Fig. 7.15: Simulated results of the mesh evaluation (Front view) (Experiment 1)

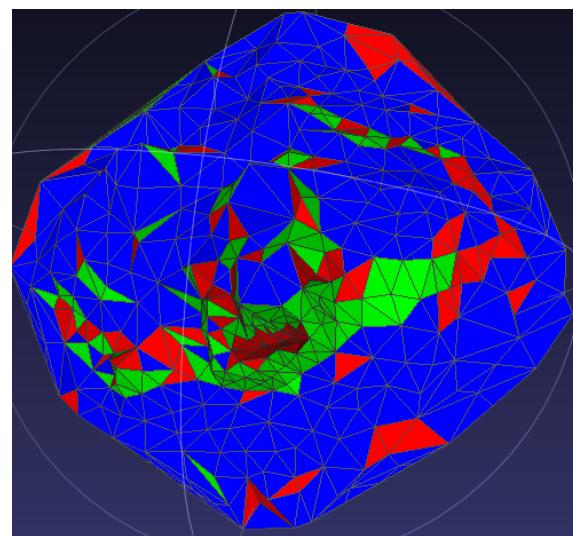


Fig. 7.16: Simulated results of the mesh evaluation (Threshold of the angle = 50[deg])(Top view) (Experiment 1)

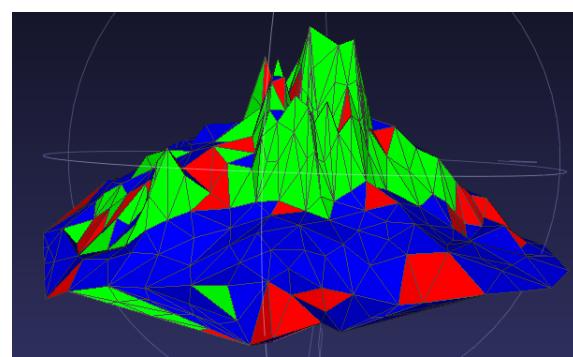


Fig. 7.17: Simulated results of the mesh evaluation (Threshold of the angle = 50[deg])(Front view) (Experiment 1)

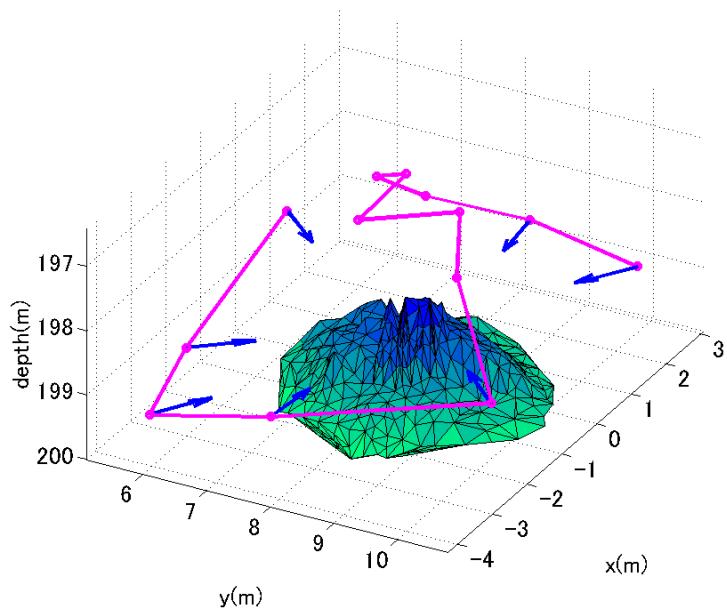


Fig. 7.18: Caluculated waypoints (Threshold of view point screening = 6) (Experiment 1)

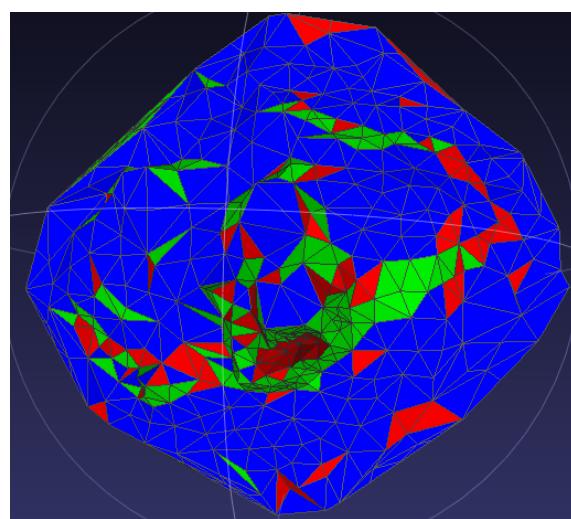


Fig. 7.19: Simulated results of the mesh evaluation (Threshold of view point screening = 6)(Top view) (Experiment 1)

Table 7.2: Calculated waypoints (Threshold of view point screening = 6) (Experiment 1)

waypoint	x[m]	y[m]	depth[m]	yaw[deg]
1	2.58	10.02	198.96	213.0
2	3.07	8.07	198.95	173.5
3	0.30	7.94	197.32	182.7
4	-0.31	7.51	196.84	215.6
5	-0.76	8.22	196.42	122.4
6	-1.35	7.79	196.97	215.5
7	-0.55	8.94	196.93	54.9
8	-1.37	9.33	197.46	154.3
9	-3.02	10.78	198.27	312.7
10	-4.27	8.01	198.61	4.7
11	-4.06	6.00	199.19	31.3
12	-3.11	6.06	198.57	49.3
13	1.50	5.13	198.83	131.0

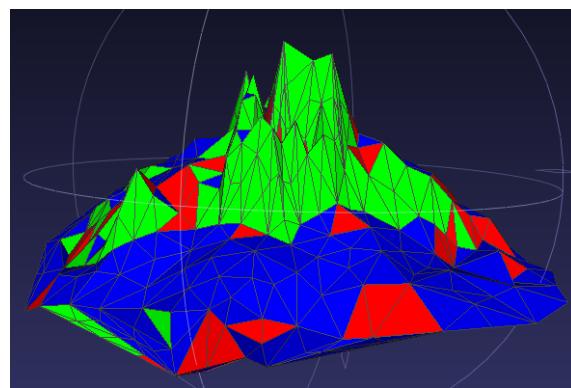


Fig. 7.20: Simulated results of the mesh evaluation (Threshold of view point screening = 6) (Front view) (Experiment 1)

Table 7.3: Coverage ratio (Experiment 1)

The angle[deg]	Number of mesh	Coverage ratio	Coverage ratio of forward camera
45	15	68	19.1
50	15	83	25.6
50	6	85	27.2
50	1	91	32.9

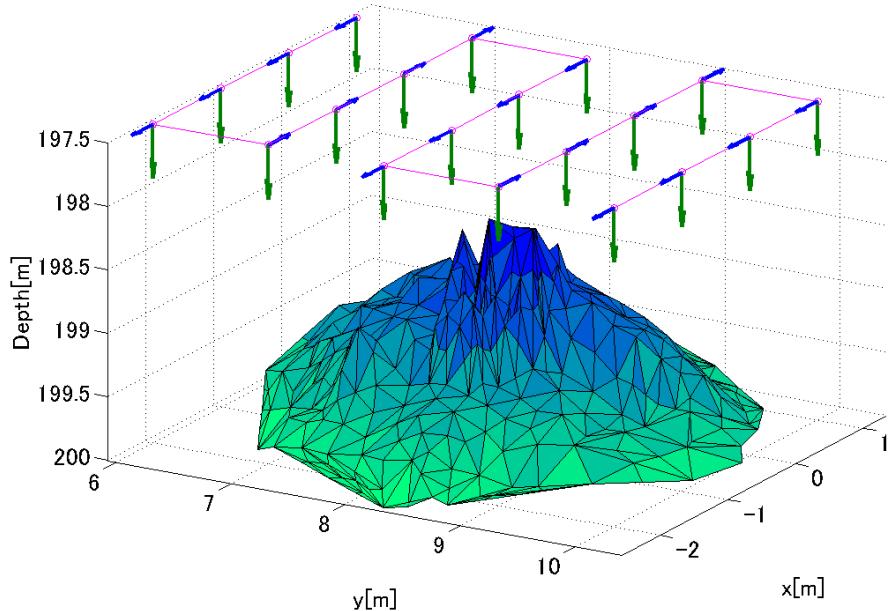


Fig. 7.21: View points of initial observation (Experiment 2)

Table 7.4: View points of initial observation (Experiment 2)

Viewpoint	x[m]	y[m]	depth[m]	yaw[deg]
1	1	6	197.5	180
2	0	6	197.5	180
3	-1	6	197.5	180
4	-2	6	197.5	180
5	-2	7	197.5	0
6	-1	7	197.5	0
7	0	7	197.5	0
8	1	7	197.5	0
9	1	8	197.5	180
10	0	8	197.5	180
11	-1	8	197.5	180
12	-2	8	197.5	180
13	-2	9	197.5	0
14	-1	9	197.5	0
15	0	9	197.5	0
16	1	9	197.5	0
17	1	10	197.5	180
18	0	10	197.5	180
19	-1	10	197.5	180
20	-2	10	197.5	180

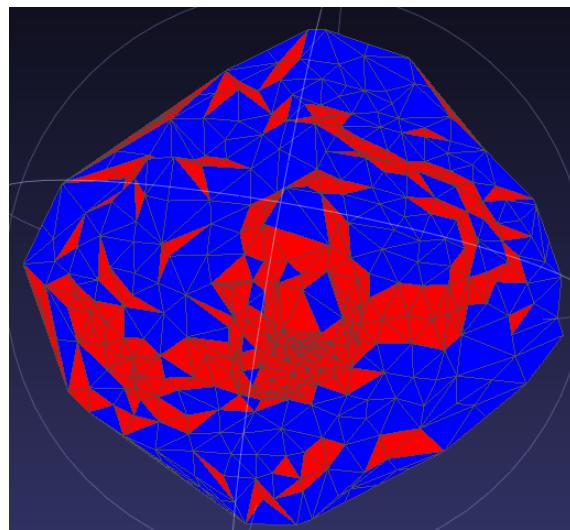


Fig. 7.22: Mesh evaluation after initial observation (Threshold of the angle = 45[deg]) (Top view)(Experiment 2)

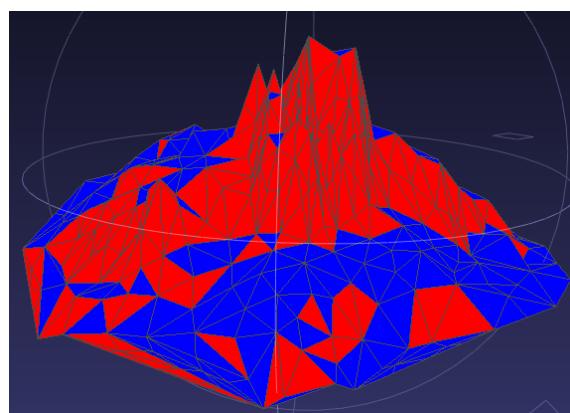


Fig. 7.23: Mesh evaluation after initial observation (Threshold of the angle = 45[deg]) (Front view)(Experiment 2)

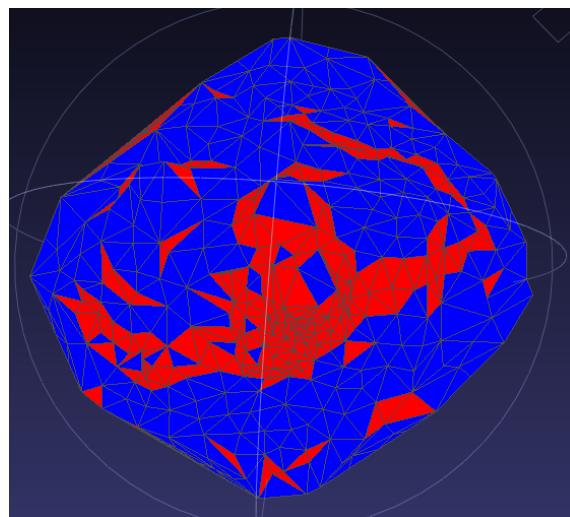


Fig. 7.24: Mesh evaluation after initial observation (Threshold of the angle = 50[deg]) (Top view)(Experiment 2)

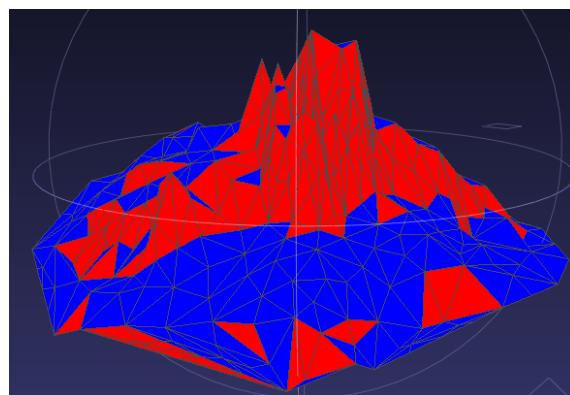


Fig. 7.25: Mesh evaluation after initial observation (Threshold of the angle = 50[deg]) (Front view)(Experiment 2)

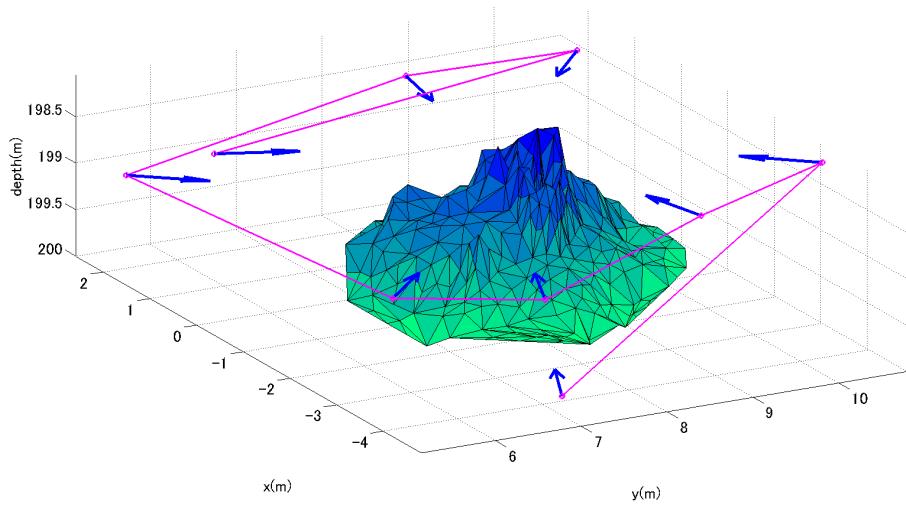


Fig. 7.26: Caluculated waypoints(Experiment 2)

Table 7.5: Caluculated waypoints (Experiment 2)

waypoint	x[m]	y[m]	depth[m]	yaw[deg]
1	-4.83	6.77	199.65	23.7
2	-3.02	10.78	198.27	312.7
3	-4.03	8.82	198.25	348.3
4	-4.02	7.01	198.88	21.5
5	-3.48	5.53	198.79	46.3
6	1.50	5.13	198.83	131.0
7	2.58	8.97	198.66	190.1
8	1.60	10.44	198.33	222.2
9	0.52	5.63	198.39	112.8

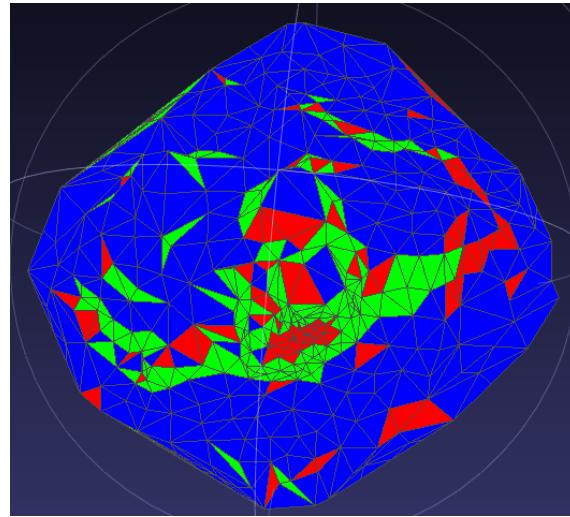


Fig. 7.27: Mesh evaluation after re-observation (Threshold of view point screening = 6, Thershld of the angle = 50[deg]) (Top view) (Experiment 2)

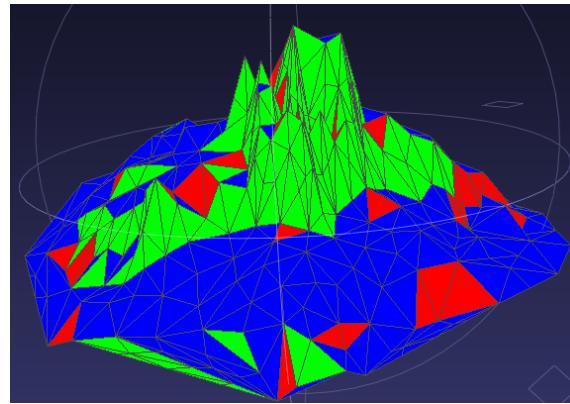


Fig. 7.28: Mesh evaluation after re-observation (Threshold of view point screening = 6, Thershld of the angle = 50[deg]) (Front view) (Experiment 2)

Table 7.6: Coverage ratio and number of viewpoints (Experiment 2)

		Threshold of view point screening				
		Initial	15	6	3	15->3
Threshold of angle						
45[deg]	Coverage ratio (all)	0.49	0.68	0.7	0.73	0.73
	Coverage ratio (Forward camera)	0	0.19	0.21	0.23	0.23
	Coverage ratio (Downward camera)	0.49	0.49	0.49	0.5	0.5
	Number of view points	20	25	27	33	33
50[deg]	Coverage ratio (all)	0.58	0.74	0.87	0.89	0.88
	Coverage ratio (Forward camera)	0	0.16	0.3	0.31	0.3
	Coverage ratio (Downward camera)	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
	Number of view points	20	23	29	36	33

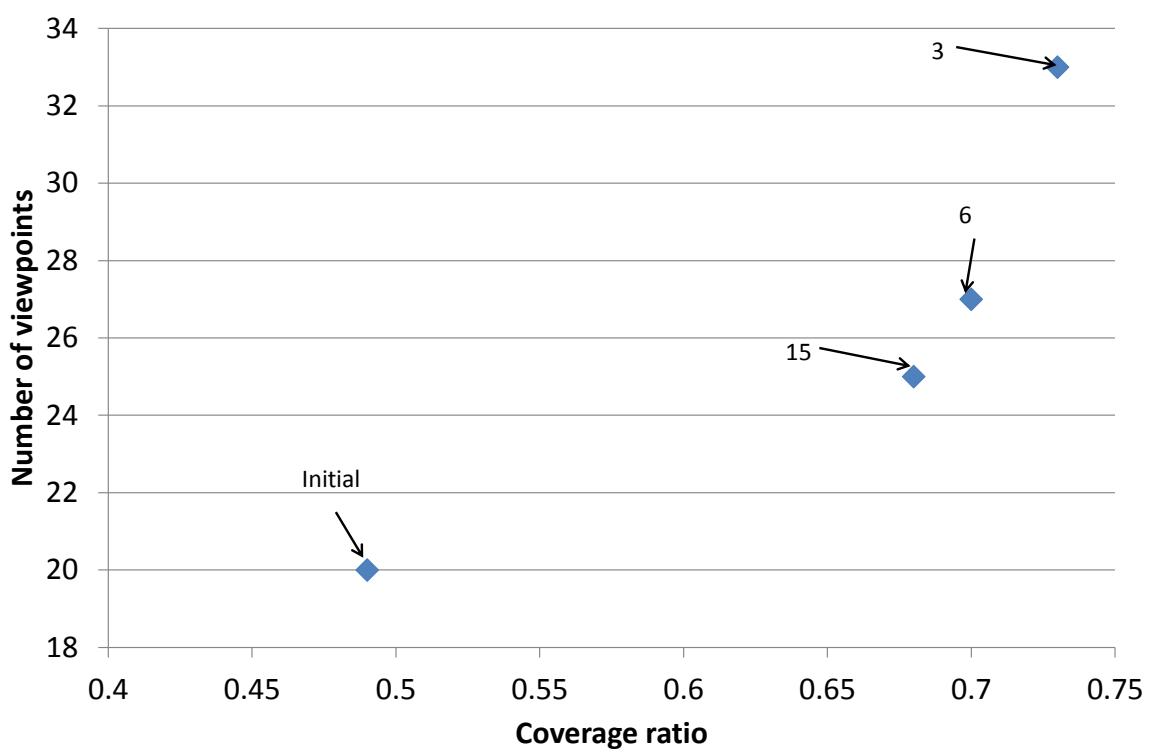


Fig. 7.29: Coverage ratio and number of viewpoints (Threshold of the angle = 45[deg]) (Experiment 2)

8 総合考察

本研究では AUV が複雑な海底を三次元マッピングする際にリアルタイムに画像を評価し、再撮影経路を生成する手法を提案し、水槽実験、実海域データによるシミュレーションを行った。撮影度判定と経路計画についてそれぞれ総合的に考察し、最後に全体を通しての課題を述べる。

8.1 撮影度判定手法

撮影度判定手法は、実海域で利用するに際して十分高速な速度で適切な判定が行われていることがわかった。最適画像選択では適切な画像が選択できることがわかった。また撮影度判定を通して下向きカメラだけではチムニーを撮影するのは困難であることもわかった。また、下向きと前向きのカメラが両方ある場合でも類似度判定によって撮影されないと判定されるメッシュが多いことがわかった。

メッシュ生成に関しては一旦地形計測点群の点数を削減し、その後に大きすぎるメッシュを小さくするために点を増やすことで撮影度判定に適切なサイズのメッシュを生成することに成功した。

メッシュ生成に用いたのは光切断法によって求めた点群であったが、光切断の際ににはカメラのフラッシュや周辺のライトなどによってノイズが発生しやすい。水槽実験ではレーザーが当った場所以外にも反射してしまいノイズとなった。そのようなノイズを提案手法のようなノイズ除去法で全て取り除くのは難しいため、水槽実験のようにノイズ除去が過多になったりノイズ除去しきれない場合がある。実海域では自然物を観測する際にはその種類のノイズは発生しないと考えられるがチムニーであれば泡が発生していてレーザーが当ることが考えられる。また、人工物の観測であれば今回のようにレーザーが反射してしまうことが考えられる。よって地形計測のノイズ除去は今後の課題であると言える。

その他の今後の課題は以下のようなものがある。

撮影度判定手法と最適画像選択についてはパラメータを考慮したり重み付けについてより考察すべきである。特に最適画像選択については露出オーバーの画像は評価を下げるなど画像の質なども考慮に入れる必要がある。

また、障害物判定の計算量が多く時間がかかるため高速化すべきである。そのためには今回は全てのメッシュに対して全ての画像の情報で当て嵌るものを検索していたが、全ての画像に対して全てのメッシュを検索すれば良いと考えられる。そうすることで画像に写り得るメッシュを計算する回数を減らすことができるためである。

8.2 経路計画手法

経路計画手法は、実海域で利用するに際して十分高速な速度で適切な経路が計画されることがわかった。

今後の課題は以下のようなものがある。

適切な撮影点の数　目標とするカバー率の設定によって適切なカバー率は異なる。例えば、水槽実験の際には一部の面が撮影できない判定結果が生成された。これはミッション終了の速度を優先し、撮影点の数を減らしたためである。AUVには制限時間があるため、撮影点を無限に設定することはできない。できるだけ多くのメッシュを撮影することを目標にした場合、解決策としては以下の二つが考えられる。一つめはAUVの制限を計算し動的計画法によってできるだけ多くのメッシュを撮影できるようにする方法である。二つめは一旦少数の撮影点で撮影を行い、もう一度撮影度判定を行い経路を計画するという方法である。これをAUVの制限時間の限り続ければ得られる情報が多い場所を優先的に通ることになる。また、地形計測も継続して行つていればより正確な地形が判明するため二度目の撮影度判定ではより正確な情報が手に入っていることが期待される。

海底形状を経路計画に組み入れること　経路計画は今回は障害物回避などを考慮せずただ水平方向の距離と方位のみで行ったため、生成したメッシュを用いて障害物に衝突したりなるべく障害物を乗りこえないような経路を計画することができればより再観測経路が安全かつ高速なものとなる。

水槽実験では撮影物の壁面を撮影するためにかなり低い高度のウェイポイントが生成されたが安全策のため実際にはその高さでの撮影は行われなかった。経路計画の際のウェイポイント生成の時点で安全策を考慮したウェイポイントを生成すればより良い経路が生成されると考えられる。例えば壁面下部は撮影されなかったが、安全策を考慮し低高度では撮影できないことがわかつていればより遠くから撮影することによって下部の撮影を行うことが可能であった。

計算量　経路の高速化の際に始点と最終点を変化させることができない手法を選択したため非効率的に見える経路が生成されることがあった。改善法をより良いものに変更することを検討すべきである。

ウェイポイント候補を生成するために全てのウェイポイントに関して全てのメッシュの撮影度判定を行っているが、計算量が多いため時間がかかっている。高速化を検討するべきである。例えば法線ベクトルが類似しており場所も近いメッシュをグループとして一つの平面と見なすことでウェイポイントの候補を生成する個数を減ら

すなどの方法が考えられる。

ウェイポイント候補からウェイポイントを選択する際のアルゴリズムについても、検討が必要である。

8.3 計算時間

今回の水槽実験では、対象範囲が $20m^2$ であった。実海域においてより広範囲を対象とする時、計算時間の増加が問題となる。

今回使用したデータをつなぎ合せ大きなメッシュを生成することでシミュレーションを行った。Fig.8.1 に、5 倍にした場合のメッシュの例を載せる。使用した PC のスペックを Table.8.1 に示す。メッシュ数と面積、計算にかかった時間を Fig.8.2、Table.8.2 に示す。なお、シミュレーションはメッシュ生成を除く撮影度判定と経路生成を陸上で行なった。Fig.8.2 を見ると、面積に比例して計算時間が増加するわけではなく面積が増えればより計算時間が増加することがわかる。しかし、AUV が一時間程度で観測できる $400m^2$ では計算時間が 10 分程度であることを考えると実海域でも十分に利用可能であると言える。ただし、より計算時間を短縮したい場合や観測面積を増やしたい場合は次のような改善案が考えられる。

- 搭載マシンの性能を上げる。
- 平坦な場所が続くところは計算対象外とするなど、計算に用いるメッシュを先に選別し減らしておく。
- ウェイポイント候補生成の部分について高速化を行う。

8.4 今後の課題

その他の今後の課題としては以下の四点が考えられる。

まずは様々なパラメータに関してより深い考察が必要である。しかしパラメータは海域や用途によって異なる値を使用する必要があるため、実験ごとに値を変化させなければならない。例えば防波堤などの人工物を観測する場合は平面的な場所が多いと考えられるため撮影度判定の閾値を厳しくすることができるが、チムニーのような複雑な形の物体を観測する場合には閾値は低く設定する必要がある。

また、リアルタイムに AUV の位置を修正すればより正確な経路計画を行なうことができる。今回は短時間のミッションしか行わなかったが、実海域での長時間のミッションを行うことを考えると重要となる。画像の撮影を行っているため、海底地形を基準とする Terrain Navigation [6] や、海底面の画像的特徴による地形照合 [21] のような手法を取り入れると良いと考えられる。

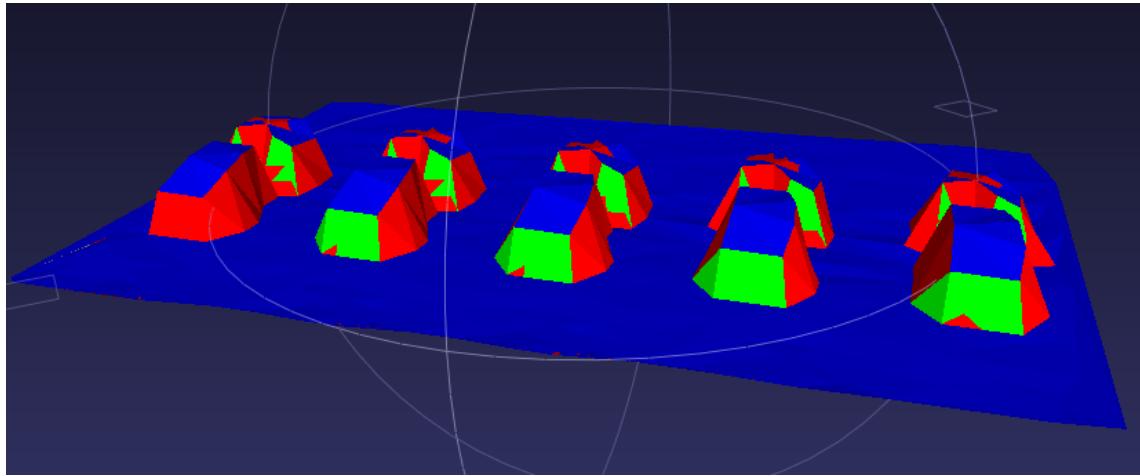


Fig. 8.1: Simulation data (100m²)

Table 8.1: Specifications of Computers

Laptop PC	
Processor	Intel Core i7 1.87GHz
Memory	8.00GB
OS	Windows 7 64bit
Tri-TON PC	
Processor	Intel Atom 1.60GHz
Memory	2.00GB
OS	WindowsXP

また，潮流がある場所での撮影のためには潮流を考慮したウェイポイントの生成を行わなければならない。潮流の影響で撮影できなかった場所について本手法で経路を計画しても潮流によって同様に流されてしまうためである。

最後に，今回は画像の撮影の可否についてのみ判定を行ったが，地形計測の密度についてもその判定を行えば3次元マッピングにおいてより精密な結果を得ることができると考えられる。地形計測のNext Best View問題については既に研究が存在するため[7,18]，本研究とその手法を組み合わせる方法を見つければ良い。

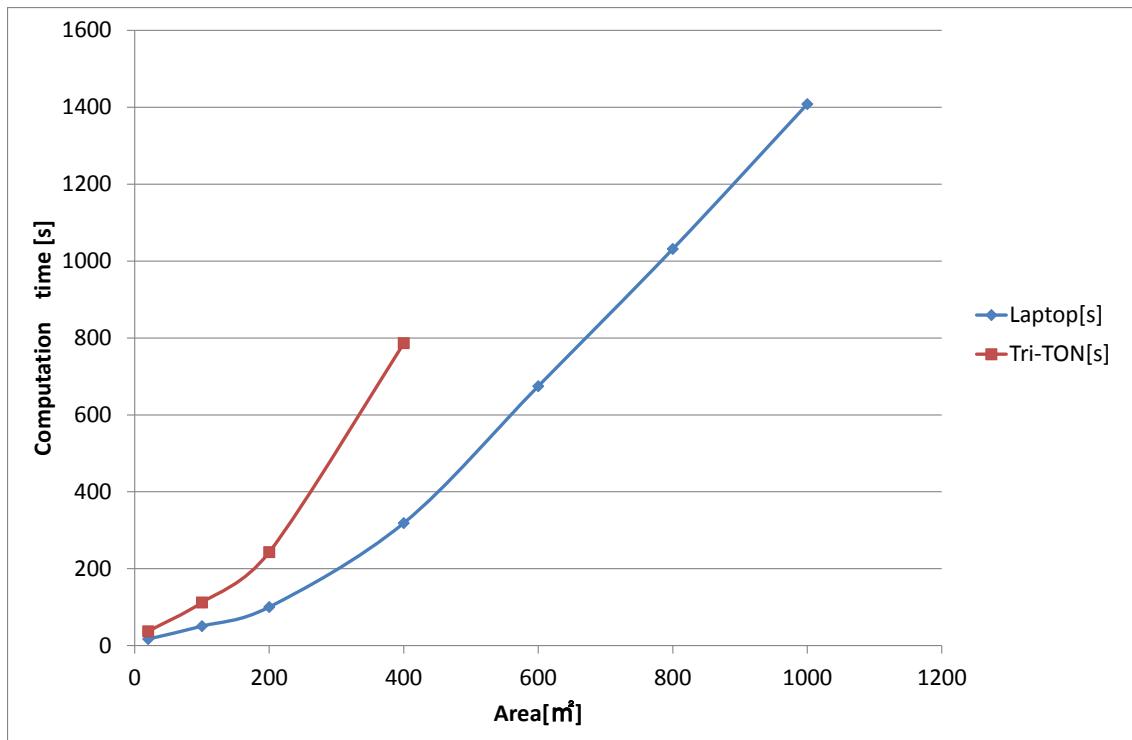


Fig. 8.2: Simulation results

Table 8.2: Simulation results

Mesh	area[m²]	Laptop[s]	Tri-TON[s]
1	20	17.1	37.2
5	100	50.7	112.2
10	200	100.4	243.1
20	400	318.7	786.6
30	600	674.7	
40	800	1031.5	
50	1000	1408.3	

9 結論

水中画像観測は単調かつ時間がかかる作業なので AUV によって実施することにメリットが大きい。しかし人がリアルタイムに撮影結果を確認することができないため、撮影する画像に漏れが発生していた。一度の潜航で漏れのない画像を取得できればより効率的な観測が実現する。そのため本研究では AUV が漏れのない画像観測を行うために、

- 地形情報と画像情報による未撮影箇所判別手法（撮影度判定手法）
- 再撮影経路生成手法（経路計画手法）

の 2 つの手法を提案した。

撮影度判定手法は AUV の位置情報と画像情報を用いて AUV が撮影した場所を正しく撮影済みであると判断し、未撮影箇所を正しく未撮影であると判断することに成功した。また、経路計画手法ではメッシュを効率的に撮影するウェイポイントの生成とそのウェイポイントを効率的に巡る経路の生成を実現した。計算時間も実ミッションに耐えうる時間で実現できた。以上の事項を実際に AUV に実装し水槽実験を行うことで確認できた。また、実海域で得られたチムニーの地形点群データによってシミュレーションすることで、実海域でも提案手法が有効であることを示した。

本研究によって画像観測用の AUV は撮影漏れなく画像観測が可能となった。この成果は水中資源探査を始めとする画像観測に広く応用可能であると考えられる。

以上のことから本研究の目的は達成されたと言える。

参考文献

- [1] Blender. www.blender.org.
- [2] Meshlab. meshlab.sourceforge.net.
- [3] Qhull code for convex hull, delaunay triangulation, voronoi diagram, and halfspace intersection about a point. <http://www.qhull.org/>.
- [4] 海洋工学水槽. http://seasat.iis.u-tokyo.ac.jp/rheem/iisoeb_1.pdf.
- [5] C. Bradford Barber, David P. Dobkin, and Hannu Huhdanpaa. The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Trans. Math. Softw.*, Vol. 22, pp. 469–483, December 1996.
- [6] N Bergman, L Ljung, and F Gustafsson. Vol. 3, pp. 33–40, 1999.
- [7] Paul S. Blaer and Peter K. Allen. View planning and automated data acquisition for three-dimensional modeling of complex sites. *J. Field Robot.*, Vol. 26, pp. 865–891, November 2009.
- [8] Ming-Yuen Chan, Wai-Ho Mak, and Huamin Qu. An efficient quality-based camera path planning method for volume exploration. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Visual Computing, Part II*, ISVC '08, pp. 12–21, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [9] Howie Choset and Philippe Pignon. Coverage path planning: The boustrophedon decomposition. In *International Conference on Field and Service Robotics*, 1997.
- [10] C. I. Connolly. The determination of next best views. In *Proceedings IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 432–435, 1985.
- [11] Mark de Berg, Mark Overmars Marc van Kreveld, et al. コンピュータ・ジオメトリ 計算幾何学:アルゴリズムと応用. 近代科学社, 2000.
- [12] Michael Garland. Qslim simplification software, 1999. <http://mgarland.org/archive/cmu/quadratics/qslim.html>.
- [13] Michael Garland and Paul S. Heckbert. Surface simplification using quadric error metrics. In *Computer Graphics(Proc.SIGGRAPH 97)*, pp. 209–216. ACM, 1997.
- [14] Markus Gross and Hanspeter Pfister, editors. *Point-Based Graphics*. Morgan Kaufmann, 2007.
- [15] Susan Hert, Sanjay Tiwari, and Vladimir Lumelsky. A terrain-covering algorithm for an auv. *Autonomous Robots*, Vol. 3, pp. 91–119, 1996.

- [16] H.Hoppe. Progressive meshes. In *Computer Graphics(Proc.SIGGRAPH 96)*, pp. 99–108. ACM Press, 1996.
- [17] Geoffrey A. Hollinger, Brendan Englot, Franz Hover, Urbashi Mitra, and Gaurav S. Sukhatme. Uncertainty-driven view planning for underwater surface inspection. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012.
- [18] Geoffrey A. Hollinger, Urbashi Mitra, and Gaurav S. Sukhatme. Active classification: Theory and application to underwater inspection. *CoRR*, Vol. abs/1106.5829, , 2011.
- [19] JAMSTEC. ディープトウ. <http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/ships/deepto.html>.
- [20] Matthew Johnson-Roberson, Oscar Pizarro, Stefan B. Williams, and Ian Mahon. Generation and visualization of large-scale three-dimensional reconstructions from underwater robotic surveys. *J. Field Robot.*, Vol. 27, No. 1, pp. 21–51, 2010.
- [21] Richmond K and Rock S.M. An operational real-time large-scale visual mosaicking and navigation system. In *Proc.OCEANS 2006*. IEEE, 2006.
- [22] H Kondo, T Maki, T Ura, et al. Structure tracing with a ranging system using a sheet laser beam. In *UT '04*, pp. 83–88, 2004.
- [23] T Maki, T Matsuda, T Sakamaki, and T Ura. Auv navigation with a single seafloor station based on mutual orientation measurements. In *Workshop on Sientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (Proc.Underwater Technology(UT))*, pp. 1–7. 2011 IEEE Symposium, 2011.
- [24] Toshihiro Maki, Ayaka Kume, and Tamaki Ura. Volumetric mapping of tube-worm colonies in kagoshima bay through autonomous robotic surveys. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Vol. 58, pp. 757–767, 2011.
- [25] T Nakatani, Shuhao Li, T Ura, et al. 3d visual modeling of hydrothermal chimneys using a rotary laser scanning system. *Underwater Technology*, 2011.
- [26] T Nakatani, T Ura, Y Ito, J Kojima, K Tamura, T Sakamaki, and Y Nose. Auv “tuna-sand” and its exploration of hydrothermal vents at kagoshima bay. In *(Proc.OCEANS 2008)-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, 2008.
- [27] D.R. Roberts and A.D. Marshall. Viewpoint selection for complete surface coverage of three dimensional objects. In *In Proc.of the British Machine Vision Conference*, pp. 740–750, 1998.

- [28] V. Sequeira, J. Goncalves, and M. I.I Ribeiro. Active view selection for efficient 3d scene reconstruction. *Pattern Recognition, International Conference on*, Vol. 1, p. 815, 1996.
- [29] Stanislav Slusny, Michal Zerola, and Roman Neruda. Real time robot path planning and cleaning. In *ICIC (2)*, Vol. 6216 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 442–449. Springer, 2010.
- [30] Michael Jakuba Stefan B.Williams, Oscar Pizarro and Neville Barrett. Auv benthic habitat mapping in south eastern tasmania. *FSR 2009*, 2009.
- [31] X. Sun, P.L. Rosin, R.R. Martin, and F.C. Langbein. Fast and effective feature-preserving mesh denoising. *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol. 13, No. 5, pp. 925–938, 2007.
- [32] Zhengyou Zhang and Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, pp. 1330–1334, 1998.
- [33] 近藤逸人. 自律型水中ロボットの観測行動に関する研究. PhD thesis, 東京大学, 2001.
- [34] 日本造船学会海中システム部会(編). 海中技術一般(改訂版). 成山堂書店, 1999.
- [35] 杉原厚吉. 計算幾何学的手法と画像解析：ボロノイ図の応用を中心として(<小特集>コンピュータビジョンにおける手法). 情報処理, Vol. 30, No. 9, pp. 1067–1075, 1989-09-15.
- [36] 杉原厚吉. 3次元単体メッシュ生成の課題:計算幾何学の立場から(数値計算における前処理の研究). pp. 124–134, 1999.
- [37] 飯笠幸吉. 日本近海に大鉱床が眠る. 技術評論社, 2010.
- [38] 今野浩, 鈴木久敏(編). 整数計画法と組合せ最適化. 日科技連出版社, 1982.
- [39] 村野剛教, 松本直樹. 巡回セールスマン問題の近似解法の比較. 電子情報通信学会技術研究報告. NLP, 非線形問題, Vol. 102, No. 625, pp. 1–6, 2003-01-27.
- [40] 藤倉克則, 奥谷喬司, 丸山正(編). 潜水調査船が見た深海生物. 東海大学出版会, 2008.
- [41] 尾上守夫, 池内克史, 羽倉弘之(編). 3次元映像ハンドブック, pp. 37–38. 朝倉書店, 2006.
- [42] 卷俊宏. 自律型水中ロボットによる構造物の観測. Master's thesis, 東京大学, 2005.
- [43] 卷俊宏. 海底環境の全自動観測の研究. PhD thesis, 東京大学, 2008.
- [44] 卷俊宏, 松田匠未, 小島淳一ほか. 海底熱水地帯の3次元画像マッピングシステムの開発. 第22回海洋工学シンポジウム. 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会,

2011.

- [45] 錦織昭峰. 巡回セールスマン問題の定式化に関する一考察 (組合せ (2)). 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, Vol. 2003, pp. 158–159, 2003-09-10.
- [46] 剛松本, 千春上地, 政昭木村, Takeshi MATSUMOTO, Chiharu UECHI, Masaaki KIMURA. 南西諸島宮古・八重山沖海域精密調査より求められた 1771 八重山地震津波波源での変動現象 / surface deformation at the origin area of the 1771 yaeyama earthquake tsunami observed by the precise survey off yaeyama districts, ryukyu area. JAMSTEC 深海研究 / JAMSTEC Journal of Deep Sea Research, No. 13, pp. 535 – 562, 1997 年 11 月.
- [47] 金井崇. 多重解像度メッシュの生成・編集処理技術. ものつくり情報技術統合化研究 第 2 回 理研シンポジウム 平成 14 年, pp. 14–18, 2002.
- [48] 大槻正樹, 佐藤幸男. 物体の形状計測におけるレンジファインダの視点選択. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol. 81, No. 6, pp. 1269–1277, 1998-06-25.
- [49] 岩本誠一. 動的計画論. 九州大学出版会, 1987.
- [50] 小川泰広. 自律型水中ロボットの等深線追従手法に関する研究. Master's thesis, 東京大学, 2011.
- [51] MathWorks 日本. Matlab and simulink for technical computing. <http://www.mathworks.co.jp/>.
- [52] 志賀美英. 海底熱水鉱床の分布と分類. 資源地質, Vol. 46, No. 3, pp. 167–186, 1996-06-30.
- [53] 中谷武志, 浦環, 坂巻隆, 伊藤弘志, 南宏樹, 正村達也. Auv “tuna-sand” による 黒島海丘メタン湧出域の海底画像マッピング. 海洋調査技術学会第 22 回研究成果発表会講演要旨集, pp. 24–25, 2010.
- [54] 山本芳嗣, 久保幹夫. 巡回セールスマン問題への招待. 朝倉書店, 1997.
- [55] 山本裕之, 内山晋二, 田村秀行. 3 次元形状モデリングのためのドロネー網生成法. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol. 78, No. 5, pp. 745–753, 1995-05-25.

謝辞

本研究は多くの方々に協力していただいたおかげで完成することができました。

浦環教授には、指導教員として研究にアドバイスをいただきました。発表の際の見せ方やアピールの仕方などもご指導いただきました。その他様々なためになるお話をいただき感謝しております。

巻俊宏准教授にも、特に感謝を述べたいと思います。巻准教授の製作する AUV Tri-TON を実験で使用させていただきました。実験のためだけのナビゲーションプログラム (ウェイポイントに方位を追加するなど) も製作していただきました。研究や発表のことについて毎日のようにアドバイスをいただきました。千葉での実験も手伝っていただきました。

東京大学生産技術研究所の浅田昭先生には、副指導教官として何度も面談をしていただき様々なアドバイスをいただきました。

技術専門職員の坂巻隆さんには、千葉実験での実験を手伝っていただきました。暑い日も寒い日も長時間お手伝いいただき大変感謝しております。

能勢義昭さんには、ハードウェア関係のことでご指導いただきました。

杉松治美特任研究員には様々な事務処理でお世話になりました。

JAMSTEC の中谷武志さんには実海域のデータをいただきました。

修士 1 年の安井風太君には、撮影物の製作の際に手伝いをしていただきました。

修士 2 年の松田匠未君、正村達也君には色々な場面でお世話になりました。二人の努力する姿勢は見習いたいと日々思っておりました。

また、普通なら就職している年齢の私を学校に通わせてくれた両親を始めとする家族にも感謝します。C++ や latex, 整数計画法などの質問に親身になって答えてくれた他学部の友人にも感謝します。その他たくさんの人のおかげで修士論文を完成させることができました。本当にありがとうございました。