

博士論文

LRFで測定したスキャンデータの立体視による
移動ロボット遠隔操作システムの開発

平成28年3月

藤原 始史

岡山大学大学院
自然科学研究科

LRFで測定したスキャンデータの立体視による 移動ロボット遠隔操作システムの開発

藤原 始史

論文要旨:

近年、阪神淡路大震災（1995年）や東日本大震災（2011年）といった大規模な自然災害が発生している．災害現場では人間のレスキュー隊員が二次災害に巻き込まれる危険から、これまでロボットを用いてレスキュー活動を行うことが検討されてきた．レスキューロボットの目的は、災害発生時に探索救助活動を行うことである．再現性のない災害に対応することは困難であるが、災害発生時に役立つ可能性のある要素技術を開発しておくことが迅速な災害対応のための一つの方法である．東日本大震災後に起きた津波の影響で運転停止となった福島第一原子力発電所の建屋内探索に投入されたロボットは遠隔操作型であり、遠隔操作のための要素技術は今後もレスキューロボットの根幹部分になると考えられる．そこで、本研究では、遠隔操作に関する要素技術に関して研究を行う．

レスキューロボットを遠隔操作するに当たり、まずロボット周囲の環境の距離感を把握することが重要である．本研究では、暗闇でも利用でき、正確な距離情報を取得できるという点でカメラの欠点を補えるLRF (Laser Range Finder) を視覚センサとして導入する．また、両眼視差による立体視はこれまで三次元スキャンデータに適用されていなかった．そこで、三次元スキャンデータに対して両眼視差による立体視を行うことを提案する．具体的には、LRFを用いた三次元スキャンを行って立体視用ディスプレイに三次元スキャンデータを表示する．立体視の評価実験環境として、大規模災害により倒壊した建物におけるレスキュー活動で想定される狭隘で複雑な環境を構築し、被災者の手を模擬した対象物を配置した．16人の参加者に対象物を探索するタスクを実行してもらい、発見した対象物数を比較した．結果として、立体視する場合で発見数が多く、三次元スキャンデータを立体視して距離感を把握することが、環境の認識しやすさに役立つことが分かった．

また、遠隔操作はリアルタイムに行う必要がある．そこで、遠隔操作に必要なセンサの条件を設定し、該当する装置が存在するかどうか先行研究を調査した．結果として、必要な条件を満たす装置が存在しなかったため、新しい「三次元レーザスキャナ」を開発することとした．開発したスキャナの大きな特徴は、環境やタスクに応じて垂直視野角を調整可能な点である．評価実験では、本スキャナが従来手法と同じ点密度でより高速な三次元スキャンを行えることを確認した．

さらに、ロボットを用いた探索や点検において、ロボットの周囲を見回すことが必

要になる．そこで，開発したスキャナの垂直視野角を大きくすることで，取得する三次元スキャンデータの範囲を拡大する．評価実験では，従来手法と比較してロボットの足元にある障害物を検出できる範囲が広くなることを確認した．また，表示デバイスとして広視野角のヘッドマウントディスプレイを導入し，広視野角のスキャナで取得した三次元スキャンデータを表示するのに適したインタフェースを構築した．

上記で開発した三次元レーザスキャナをロボットに搭載し，ヘッドマウントディスプレイによるインタフェースで構築した遠隔操作システムの評価試験を行った．提案システムを適切に評価するために，レスキューロボット用に標準化された，不整地のテストフィールドで参加者による遠隔操作実験を行った．実験では，参加者は決められた経路に沿ってロボットを遠隔操作するタスクを実施した．また，参加者はヘッドマウントディスプレイをかぶり，三次元スキャンデータとロボットのCGのみが表示される状況で遠隔操作を行った．結果として，本システムを用いて移動ロボットを遠隔操作できることが示された．したがって，提案するシステムはレスキューロボットの遠隔操作システムとして使用できる可能性があることが確認された．

また，将来的な課題として，水中探索への対応について取り組んだ．先行研究では水中計測専用のLRFとその計測手法について検討されているが，陸上で広く用いられている汎用LRFを水中に適用した例はなかった．構造や重量，価格の点から，同じセンサで水中も計測できることが望ましい．しかしながら，水中では光の屈折や減衰の影響により，LRFで測定したスキャンデータにゆがみや信頼性の低いデータ「ゴースト」が発生することが分かった．そこで防水用カバーと水それぞれの屈折率と屈折角を考慮してスキャンデータを補正する手法，およびLRFの受光強度を利用してゴーストを自動的に除去する手法を提案，実装した．実装したアルゴリズムを用いて水中で計測したスキャンデータを補正した結果，空気中で計測したスキャンデータに近づくことが確認され，提案手法の有効性が示された．

目次

1	緒言	1
1.1	レスキューロボットの研究背景	1
1.2	本研究の目的	3
2	提案する遠隔操作システム	4
2.1	距離感の提示	4
2.2	遠隔操作可能なリアルタイム性とロボットの周囲を見回せる広視野	5
2.3	水中探索への対応	6
3	三次元スキャンデータの立体視	9
3.1	三次元スキャンデータの立体視システムの構成	9
3.1.1	建物内探索ロボット	9
3.1.2	三次元スキャンデータの収集	9
3.1.3	三次元スキャンデータの立体視	10
3.1.4	立体視の効果が表れやすい条件	13
3.2	参加者による性能評価実験	16
3.2.1	実験の目的	16
3.2.2	実験環境	16
3.2.3	三次元スキャンデータ提示の視点	17
3.2.4	実験内容（タスク）	17
3.2.5	評価方法	18
3.2.6	実験結果	21
3.3	考察	21
3.4	本章のまとめ	23
4	高速な広視野角三次元レーザスキャナと広視野角インタフェース	24
4.1	高速な広視野角三次元レーザスキャナの設計	24
4.1.1	移動ロボットの遠隔操作における必要条件	24
4.1.2	従来の装置との比較	25
4.1.3	試作機の開発	26
4.1.4	センサの選定	27

4.1.5	サーボモータの選定	28
4.1.6	設計方針	28
4.1.7	機構の消費電力の計算	29
4.1.8	電源の検討	30
4.1.9	DCDC コンバータ・バッテリーの配置	31
4.1.10	ケーブル類の配置	32
4.1.11	ベアリングの強度計算	32
4.1.12	LRF レーザと機構の干渉	35
4.1.13	設計のまとめ	35
4.2	高速な広視野角三次元レーザスキャナの開発	37
4.2.1	三次元点群の座標変換	39
4.3	開発したリアルタイム三次元レーザスキャナの性能評価	43
4.3.1	三次元スキャンの点密度とスキャン速度の向上	43
4.3.2	三次元スキャンによる障害物検出範囲の向上	45
4.3.3	現状の課題	46
4.4	RANSAC アルゴリズムを用いた平面検出によるスキャン速度向上	48
4.4.1	RANSAC による平面領域の抽出	48
4.4.2	平面検出結果	53
4.4.3	RANSAC で検出した平面の統合	54
4.4.4	凸包による統合平面の描画	55
4.4.5	評価実験と結果：異なる点密度での検出平面の比較	59
4.4.6	評価実験と結果：異なる閾値での検出平面の比較	62
4.4.7	考察	62
4.5	Oculus Rift を用いた広視野角インタフェース	65
4.6	本章のまとめ	66
5	フィールドでの遠隔操作試験	67
5.1	評価実験方法の検討	67
5.1.1	レスキューロボット競技会の調査	67
5.1.2	実験内容の検討	69
5.1.3	実験環境と評価項目について	69
5.2	標準化フィールドでの遠隔操作実験	72
5.2.1	実験フィールド選定のためのテスト走行	72
5.2.2	遠隔操作実験	72
5.2.3	結果	74
5.2.4	判明した問題点	75

5.2.5	考察	77
5.3	本章のまとめ	79
6	汎用測域センサで測定した水中スキャンデータの補正手法	80
6.1	実験装置および実験環境	80
6.2	Top-URG の水中における計測精度・性能の検証	81
6.2.1	実験 (1) : 水の濁りを変化させた水中計測	81
6.2.2	実験 (2) : 対象物の位置と角度を変化させた水中計測	83
6.3	水中計測誤差の補正・修正手法	86
6.3.1	屈折率を用いた水中計測誤差の補正	86
6.3.2	受光強度を利用した信頼性の低いデータの除去	90
6.4	本章のまとめ	97
7	結言	98
7.1	まとめ	98
7.2	今後の課題	99
	謝辞	99
	参考文献	101
	論文リスト	114
A	原子力発電所における遠隔操作および環境地図提示実験	116
A.1	建物内探索ロボットシステムの構成	116
A.2	実験	117
A.2.1	復水器周りでの実験	117
A.2.2	原子炉格納容器内での実験	119
A.3	デモンストレーション	122
A.4	考察	122
A.5	結論	124
B	CT 装置の三次元スキャン結果	125
B.1	三次元スキャンの設定と手順	125
B.2	結果	125
C	OpenRTM-aist によるシステム構築	128
C.1	三次元スキャンモジュール	128
C.2	雲台モジュール	130

C.3	雲台モジュール使用時の処理時間計測	132
C.4	三次元オドメトリモジュールの作成	132
C.5	マニュアル走行モジュール	133
C.6	クローラモジュール	136
C.7	地図表示モジュール	137
C.8	RTC群の起動スクリプトの作成	137
C.9	作成・改良したモジュールの動作	138
C.10	Axisカメラ制御モジュール	139
C.11	Axisカメラ映像表示モジュール	141
C.12	Axisカメラ映像表示結果	141
C.13	Optカメラ制御モジュール	141
C.14	Optカメラ映像表示モジュール	142
C.15	Optカメラ映像表示結果	143
C.16	RTCでの色つき三次元スキャンの実装	143
C.17	カメラ撮影時間の短縮	144
C.18	OpenRTM-aistを用いたインタフェース画面	145
D	ROS (Robot Operating System) によるシステム構築	146
D.1	システムを構成するROSノード群	146
D.2	ROSノードの調整	149
D.2.1	通信負荷の改善	149
D.2.2	Axisカメラのパンチルトズームのジョイスティック操作	151
D.2.3	フリッパ角度のCGへの反映	151
D.3	ROSでの座標の補間	151
D.4	ROSを用いたインタフェース画面	152

目 次

3.1	Surveyor type robot with a 3D laser scanner. Upper right: side view in normal locomotion mode; Lower right: side view in extended flipper mode.	10
3.2	2-DOF stage for a 3D scan.	11
3.3	Range of the 3D scan with a fixed pitch angle at -30°	11
3.4	Configuration of the view frustum (left eye).	12
3.5	Example stereo image (the images for the right and left eyes are overlaid).	13
3.6	Confined space at the World Trade Center (WTC) response with three sets of victim remains [1].	17
3.7	Material resembling a human hand remain recognized five months after the WTC response [2].	17
3.8	Target (glove with padding) in the experiment.	17
3.9	Example of images used in the experiment.	18
3.10	Scenes used in the experiment. Top: 3D point cloud environments; Bottom: 3D point clouds (orange) and a mobile CG robot.	19
3.11	Comparison of viewpoints for 3D LRF data displays.	20
3.12	Experimental apparatus.	20
3.13	Box plot (maximum value, +SD, average, -SD, minimum value) of the average scores in the experiment.	21
4.1	Calculation of the “real-time” 3D scanning cycle T [s].	25
4.2	Principle of the former swing mechanism [3, 4].	26
4.3	Test model of a new swing mechanism.	27
4.4	Servomotor (ROBOTIS Dynamixel MX-28).	29
4.5	Avoidance of a LRF laser inference with the link where the angle of gradient of a LRF is 80°	29
4.6	Design of the new swing mechanism where the angle of gradient of a LRF is 30°	30
4.7	DCDC converter (COSEL ZUS250512).	32
4.8	Assembly of the DCDC converter.	32
4.9	Assembly of the battery holder.	33
4.10	Top: USB-3WAY. Bottom: Connection cable for Dynamixel DX/RX servomotors.	33

4.11	Assembly of a USB-3WAY and a connection cable for Dynamixel DX/RX servo-motors.	33
4.12	Locations of bearings.	34
4.13	Left: Link part (38 g). Right: LRF part (269 g).	35
4.14	Assembly of retaining rings of rotation shafts.	35
4.15	LRF laser inference with the base (60°).	36
4.16	LRF laser inference with the base (80°).	36
4.17	Real-time 3D laser scanner which we have developed.	38
4.18	Definition of constants and variables of the developed scanner.	38
4.19	Oscillating movement of LRF in one cycle of 3D scanning of the developed scanner in the case of $V = 60^\circ$	39
4.20	3D Scanning range of the developed scanner.	40
4.21	Variable definitions.	41
4.22	Linear interpolation of the motor rotation angle θ_m	42
4.23	Comparison of real-time 3D scanning by changing the vertical FOV and one cycle of 3D scanning. The case (b) indicates the result of the former swing mechanism [3]. The cases (c) and (d) indicate the results of our developed real-time 3D scanner. A, B and C indicate where their point densities are calculated.	44
4.24	Averaged point densities at A, B and C in Fig. 4.23. The blue bars indicate the result of the former swing mechanism [3]. The red and green bars indicate the results of our developed real-time 3D scanner.	44
4.25	Comparison of ranges of obstacle detections. The case (b) indicates the result of the former swing mechanism[3]. The case (c) indicates the result of our developed real-time 3D scanner.	46
4.26	Relationships between the motor rotation angle θ_m and the roll and pitch angles θ_r, θ_p , with $\alpha = 10, 40, 80^\circ$ from the left.	47
4.27	Normal vector which composes a plane.	50
4.28	Calculation of normal vectors in the point cloud.	51
4.29	An example of a wrong direction of a normal vector. (in the two-dimensional case)	52
4.30	Illustration of normal vectors.	52
4.31	Normal vectors which composes a plane ($\mathbf{n}$) and of the three points ($\mathbf{n}_{p0}, \mathbf{n}_{p1}, \mathbf{n}_{p2}$).	53
4.32	Distance between a point and an estimated plane.	53
4.33	Result of plane detection by RANSAC.	54
4.34	An example of integrated planes' table. Upper left: a table of planes with duplicated points. Upper right: a table of planes regarded as parallel. Bottom: an integrated planes' table.	55

4.35	Result of plane integration.	56
4.36	Integrated plane example.	57
4.37	Point projection onto the integrated plane.	57
4.38	Configuration of u, v axes and vectors e_u, e_v , angle θ_i in the implementation of Graham's scan.	59
4.39	A result of sorting points in ascending order of their angles in the implementation of Graham's scan.	59
4.40	Evaluation whether the order of vertices is counterclockwise or not in the imple- mentation of Graham's scan.	59
4.41	Drawing result of convex hulls. Left: floor plane. Right: ceiling plane.	60
4.42	An example of results. Left: high density. Right: low density.	61
4.43	An example of a false detection for high point density in the case of threshold 5,000. Left: an actual environment. Right: a result of the plane detection. A nonexistent plane was detected as indicated by an arrow.	63
4.44	Examples of results in the case of threshold 15,000 for high point density data and threshold 3,000 for low point density data. Left: high point density. Right: low point density. Note that only the planes behind the point cloud are drawn and the points which compose planes are not displayed to be illustrated understandably.	64
4.45	Results of the number of detected planes according to the threshold, where results of five trials were averaged. Each graph includes high and low point density data, which are indicated by HD and LD.	64
4.46	Oculus Rift DK2.	65
4.47	Displaying real-time 3D point clouds on the Oculus Rift DK2. The images for left and right eyes are separately displayed according to operator's azimuth difference. Both images are also skewed in order that the operator gets wider FOV of the 3D point clouds through wide angle of lenses.	66
5.1	Example of RoboCupRescue Robot League Arena.	68
5.2	Performance tests on the four kinds of fields.	73
5.3	Travelling course for the mobile robot teleoperation in the experiment.	74
5.4	User interfaces for the mobile robot teleoperation in the experiment.	75
5.5	Configuration of the vertical FOV of the 3D laser scanner in the experiment. The vertical FOV V is set at 120° in order to increase the point density and to decrease blind spots as far as possible.	75
5.6	HMD viewpoint. Its reference position is located at 1 m backward and 1 m upward from the robot CG model.	75
5.7	The number of the robot crashes on the environment.	76

5.8	Lap time of the robot running on the field.	76
5.9	Total time of the robot running on the field.	76
6.1	HOKUYO UTM-30LX (Top-URG).	81
6.2	Transparent acrylic hemispherical shell used as a waterproof cover for Top-URG.	81
6.3	Sink used as a experimental environment.	81
6.4	Experimental environments and their diagrams in the cases of (a) Cross placement, (b) Vertical placement and (c) Offset placement of the target in the experiment (1).	82
6.5	Scan data in the cases of (a) Cross placement, (b) Vertical placement and (c) Offset placement of the target in the experiment (1). The red data points indicate scan data in air, the green data points indicate scan data in water with 0 ml of black ink (turbidity: 0 mg/l), the blue data points indicate scan data in water with 1 ml of black ink (turbidity: 20 mg/l), and the purple data points indicate scan data in water with 3 ml of black ink (turbidity: 158 mg/l).	83
6.6	Experimental environment and its diagram with a target plate located in front of Top-URG in the experiment (2), where the distance between Top-URG and the target plate is 30 centimeter and the target plate inclines at 0° to Top-URG.	84
6.7	Scan data with reflection intensities received from Top-URG in the cases of (a) 0° , (b) 30° , (c) 50° and (c) 70° of the inclining angle of the target plate in the experiment (2), where the distance between Top-URG and the target plate is 30 centimeter. Every data point is colored by a gradation according to its reflection intensities from Top-URG. The yellower data points indicate stronger reflection intensities, while the purpler data points have weaker reflection intensities.	85
6.8	Refraction principle of a measurement by a laser in water. The red line indicates a corrected optical path of a laser emitted from Top-URG. The corrected optical path is calculated by using refractive indices n_w , n_s and n_a . The green dashed line indicates a raw optical path of a laser without any corrections.	87
6.9	Correction results of scan data in the cases of (a) Cross placement, (b) Vertical placement and (c) Offset placement of the target by using a refractive index of water. The red data points indicate scan data in air, the green data points indicate raw scan data in water (turbidity: 0 mg/l) and the blue data points indicate the corrected scan data by a refractive index of water.	91

6.10	Correction results of scan data by removing data points which have reflection intensities lower than the automatically calculated thresholds in the cases of (a) 0° , (b) 30° , (c) 50° and (c) 70° of the inclining angle of the target plate in the experiment (2). The red data points indicate the corrected scan data by a refractive index of water (ref), and the green data points indicate corrected scan data by a refractive index of water and by eliminations according to thresholds for reflection intensities (ref+int). Each lower stand indicates a relationship between optical path lengths and reflection intensities. The blue lines are the automatically calculated thresholds.	94
6.11	Correction results of scan data by removing data points which have reflection intensities lower than the automatically calculated thresholds in the cases of (a) Cross placement, (b) Vertical placement and (c) Offset placement of the target in the experiment (1). The red data points indicate scan data in air, the green data points indicate the corrected scan data by a refractive index of water (ref), and the blue data points indicate corrected scan data by a refractive index of water and by eliminations according to thresholds for reflection intensities (ref+int). Each lower stand indicates a relationship between optical path lengths and reflection intensities. The purple lines indicate the automatically calculated thresholds. . .	95
6.12	Average errors and their standard deviations between scan data in air and corrected scan data in water for the cross placement, the vertical placement and the offset placement of the target. The blue boxes indicate results of scan data in water with no correction, the green boxes indicate correction results by a refractive index of water (ref), and the red boxes indicate correction results by both a refractive index of water and eliminations according to thresholds for reflection intensities (ref+int).	96
6.13	Convergences of the automatically calculated thresholds I_{th} in the cases of 0° , 30° , 50° and 70° of the inclining angle of the target plate in the experiment (2), and the cross placement, the vertical placement and the offset placement of the cylindrical target in the experiment (1), respectively.	96
A.1	Indoor searching robot running on the grating cover.	118
A.2	3D scan on the grating cover.	118
A.3	Results of 3D scans on the grating cover.	119
A.4	Dimensions of the stairs.	120
A.5	Sequence of stairs climbing.	120
A.6	Experiment in the nuclear reactor containment.	121
A.7	Results of 3D scans in the nuclear reactor containment.	121

A.8	Results of 3D scans under the grating cover.	123
B.1	3D scan result for the 3D scanner located in front of the CT gantry at 0°.	126
B.2	3D scan result for the 3D scanner located in front of the CT gantry at 45°.	126
B.3	3D scan result for the 3D scanner located in front of the CT gantry at 60°.	126
B.4	3D scan result for the 3D scanner located on the left of the robot arm.	127
B.5	3D scan result for the 3D scanner located on the right of the robot arm.	127
C.1	Three D scan module process.	129
C.2	Connection of Two DOF platform module with Three D scan module.	130
C.3	Two DOF platform module process.	131
C.4	RT components for 3D scan. Top: RT System Editor display. Bottom: Console displays.	139
C.5	Axis camera image displays.	142
C.6	Opt camera image displays.	143
C.7	Colored 3D scan process. The same processes are shown in the same colors.	144
C.8	Result of colored 3D scan.	144
C.9	Mobile robot teleoperation interface developed with OpenRTM-aist.	145
D.1	ROS nodes relationships between each other including data publishing and subscribing.	150
D.2	Coordinate systems for the surveyor type robot.	151
D.3	Registration of coordinate frames for the developed scanner.	152
D.4	Mobile robot teleoperation interface developed with ROS.	152

表 目 次

3.1	Computer specifications.	11
3.2	Frustum parameters.	12
3.3	3D display specifications.	13
3.4	Experimental configurations.	20
3.5	The result of Group A.	22
3.6	The result of Group B.	22
3.7	Integrated Experiment Results	22
4.1	Requirements for a real-time 3D laser scanner.	26
4.2	Comparisons of sensors.	28
4.3	Specifications and requirements for a real-time 3D laser scanner.	37
4.4	The number of detected planes.	60
4.5	Angle in degrees between corresponding normals of planes.	60
4.6	Oculus Rift DK2 specifications.	65
6.1	Specification of Top-URG.	81
6.2	Received reflection intensities from Top-URG according to distances between Top-URG and the target plate and to inclining angles of the target plate in the experiment (2), where the scanning angle of Top-URG is 0°	84
6.3	Parameters for calculations of scan data corrections.	87
C.1	Three D scan module input ports.	128
C.2	Three D scan module output ports.	129
C.3	Three D scan module configuration.	129
C.4	Two DOF platform module input ports.	130
C.5	Two DOF platform module output ports.	131
C.6	Two DOF platform module configurations.	131
C.7	Processing time of 3-D scan with mif_robot program [ms].	132
C.8	Processing time of 3-D scan with Two DOF platform module [ms].	132
C.9	Three D odometry module input ports.	133
C.10	Three D odometry module output ports.	133
C.11	Subset of Manual run module input ports.	134

C.12 HORIPAD 3 TURBO joystick's buttons assignments.	134
C.13 HORIPAD 3 TURBO joystick's analog sticks assignments.	134
C.14 Manual run module output ports.	135
C.15 Subset of Manual run module input configuration.	135
C.16 Crawler module input ports.	136
C.17 Subset of Crawler module configuration.	136
C.18 Subset of Map viewer module input ports.	137
C.19 Axis camera control module input ports.	140
C.20 Axis camera control module output ports.	140
C.21 Axis camera control module configuration.	141
C.22 Axis camera viewer module input port.	141
C.23 Opt camera control module input port.	142
C.24 Opt camera viewer module input port.	142
C.25 Added input ports for Map viewer module.	144

緒言

1.1 レスキューロボットの研究背景

近年、阪神淡路大震災（1995年）や東日本大震災（2011年）といった大規模な自然災害が発生している。災害現場では人間のレスキュー隊員が二次災害に巻き込まれる危険があることから、これまでロボットを用いてレスキュー活動を行うことが検討されてきた。レスキューロボットの目的は、「災害発生時に探索救助活動を行うこと」である。では、災害とは何だろうか。二度と同じ災害は起こらないといわれている。そのため、ある災害に対応できるロボットや要素技術を開発したとしても、それらロボットや要素技術が今後発生する災害に対応できる保証があるわけではない。これがレスキューロボットの研究における最大の課題といえる。

レスキューロボットの研究について振り返ってみると、1995年に起きた阪神淡路大震災で得られた教訓をもとに、課題を洗い出し、必要なロボット技術を研究開発するというアプローチが採られてきた [5]。最近の例では、2001年の米国世界貿易センタービルの倒壊時に遠隔操作型ロボットが投入され、被災者や遺留物の探索が行われた [1, 2, 6]。また日本では、2011年に発生した東日本大震災の影響で機能停止した福島第一原子力発電所の内部調査のために、探索ロボット Quince [7] が投入された。Quince は地下鉄構内での NBC（核・生物・化学）災害に対応するために開発されたロボットであったため、原発対応のために有線通信や線量計の搭載といった改良 [8] や、電子機器の放射線耐性の評価 [9] が必要となった。このように、レスキューロボットの研究においては、開発→災害現場での運用→課題の洗い出し→改良という流れが一般的である。つまり、災害が起きてから迅速に対策を講じる、という対応になっている。それでは、こうした過去に起きた事例をもとに洗い出された課題をことごとく解決したロボットを開発すれば、前述のレスキューロボットの目的を達成できるだろうか。どれほどの課題を解決しても、それはこれまでに起きた災害に対応できるロボットが完成した、という結果にとどまる。つまり、この研究姿勢、「課題解決型」アプローチでは、いつまでも想定内の事態に対応できるロボットができるだけで、想定外の事態に対応できるロボットはできない。いくら手を伸ばしても想定外は捕まらず逃げていく。

さて、30年ほど前から学問的に研究されている、レジリエンス・エンジニアリングと呼ばれる分野がある。レジリエンスとは、想定された動作条件を超える、異常な変化・変異・劣化が起こったときにも所望の動作を回復できる能力、とされている [10]。

レジリエンス・エンジニアリングの考え方によれば，課題解決型のアプローチは，原因と結果の因果関係がはっきりしている線形系では有効であるが，プラントのような複雑系では限界があるとされている．理由としては，

- ・エラーやインシデントを数え上げる方法では，報告されたエラーやインシデントに次の事故の要因が含まれていると仮定されている
- ・膨大な量のデータを処理し，それから意味のある関係を抽出できる能力や方法があることが前提となっている
- ・複雑系では失敗と成功が同じ起源である

ことがあげられている．そこで，レジリエンス・エンジニアリングでは，失敗よりもむしろ成功に着目している．レスキューロボットにおいても，同様の議論が可能であると考ええる．

再度レスキューロボットの研究について考えると，福島原発事故対応の場合，Quinceは以下の点でうまく対応できたともいえる．

- ・原子炉建屋内の階段やがれきの上を走行するための走破性
- ・クローラ・フリッパ操作のためのインタフェースを含めた遠隔操作性
- ・原子炉内やその階段に進入するためのサイズ
- ・線量計や有線遠隔操作用ドラムリール搭載のための可搬重量，拡張性，アクチュエータの出力
- ・目的を達成し帰還するまで稼働できるバッテリー容量
- ・放射線量 100 mSv/h 未満の建屋内では，使用するセンサ類は 2000 時間稼働可能であることが判明 [9]

こうした事柄を踏まえると，レスキューロボットの目的達成へのロボット工学的アプローチとして，「将来災害が発生したときに使えるかもしれないロボット要素技術の提供」が一つの方法になると考えられる．つまり，何か起きた時に提供できる可能性のある技術の開発，これを本研究の位置づけとする．

ロボット要素技術の提供を実現するためには，ハードウェアやソフトウェア両面での対応が必要である．何かが起きた時に，迅速に技術を共有できる仕組みが必要である．実は，ロボット開発の要素技術を世界で共有する空気は，現在ロボット研究に関する分野の端々にみられている．たとえば，2006年からリリースされた OpenRTM-aist [11] とよばれる RT ミドルウェアや 2007年からリリースされた ROS (Robot Operating System) [12] においては，ロボットの制御に使用するアルゴリズムをコンポーネントやノードとして無償で提供している．これら RT ミドルウェアや ROS が登場するまでは，研究室で技術が囲い込まれる傾向があった．また，東北大学の田所先生が牽引する ImPACT プログラム「タフ・ロボティクス・チャレンジ」では，「屋外ロボットのキー基盤技術を研

究開発し、未来の高度な屋外ロボットサービス事業の開拓への礎を築く」ことが目標である [13]. レスキューロボットの研究開発における今後の方向性としては、基盤となる要素技術を開発し、共有する流れになっていくだろう. このように、開発したロボット技術を世界で共有できる枠組みができつつある. 本研究は、その一助となる要素技術の開発を目指すものである.

1.2 本研究の目的

前節で述べたことをまとめると、レスキューロボットの目的は、災害発生時に探索救助活動を行うことである. しかし、二度と同じ災害は起こらないと言われているため、過去の災害から課題を洗い出して解決するアプローチだけでは、次に発生する災害に対応することが不可能である. 一方で、災害発生時に役立つ可能性のある要素技術を開発しておくことは可能である. 再現性のない災害に対応することは困難であるが、災害発生時に役立つ可能性のある要素技術を開発しておくことが迅速な災害対応のための一つの方法といえる. 東日本大震災後に起きた津波の影響で運転停止となった福島第一原子力発電所の建屋内探索に投入されたロボットは遠隔操作型であり [8], 遠隔操作のための要素技術は今後もレスキューロボットの根幹部分になると考えられる. そこで、本研究では、遠隔操作に関する要素技術に関して研究を行う.

レスキューロボットを遠隔操作するに当たり、まずロボット周囲の環境の距離感を把握することが重要である. また、レスキューロボットの遠隔操作はリアルタイムに行う必要がある. さらに、ロボットを用いた探索や点検において、ロボットの周囲を見回すことが必要になる. 2011年に発生した東日本大震災における人命探索救助では、地震による被害だけでなく、津波による被害に対応することが求められたことから、水中探索にも対応する必要がある.

本研究では、以上の課題を解決する遠隔操作システムを構築する. 続く第2章では、遠隔操作システムを構成する要素それぞれの課題に対して解決策を提案する. 第3章以降の章では各々の解決策について手法や評価結果を詳しく説明していく. ここで、それぞれの課題に対する解決策においては、先行研究との比較と評価を行い、技術的新規性と有効性があることを示す. レスキューロボットの目的、つまり「災害発生時に探索救助活動を行うこと」を達成できるかどうかについては、レスキューロボット用の標準化フィールドでロボットの遠隔操作試験を実施することで、達成できる可能性があることを示す.

提案する遠隔操作システム

本章では提案する遠隔操作システムの内容について述べる．具体的には，前章で述べた目的を達成するためのアプローチについて述べ，それぞれの解決方法について述べる．

2.1 距離感の提示

災害発生時は被災者の救助を促進するために，被災建物内の損傷状況を確認することが重要である．人間のレスキュー隊員を出動させる代わりに，遠隔操作型移動ロボットを使用して損害を調査することが有効であると考えられる．ロボットはオペレータから見えないところから遠隔操作されるため，ロボットで得られたセンサデータをオペレータに可視化して表示することが必要になる．そのため，ロボットシステムによる三次元環境地図作成が一つの重要な課題である．

三次元環境地図作成については様々な研究がなされている．レーザレンジファインダ (LRF) を回転台座に設置し環境を計測する手法 [14] が一般的である．そのほかには，三次元データに対応した写真からテクスチャを生成し，三次元環境地図をレンダリングすることで写実的な三次元モデルを生成する手法 [15]，ビデオ映像を用いて環境を再構成する手法 [16, 17]，三次元（または六次元）SLAM (Simultaneous Localization And Mapping: 自己位置同定と地図作成) やスキャンマッチングアルゴリズムを用いて複数の三次元点群を位置合わせし，全体の環境地図を構築する手法 [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]，などがある．三次元点群の表示に関しては，三次元点群をいくつかの種類のオブジェクトに分割して表示する手法 [25] や，三次元点群の点密度に基づいてボクセル（ピクセルの三次元版．空間を三次元格子で区切って点の存在する部分を表示する）で表現する手法 [26]，直方体ボクセルを用いて計算コストやメモリ消費を抑える環境表現方法 [27]，などがある．

しかしながら，こうした先行研究では三次元環境地図における奥行き知覚に関して実用化に向けた研究は行われていない．奥行情報の欠如はオペレータの環境誤認につながる恐れがある．奥行き知覚に関していえば，ステレオカメラと立体視ディスプレイを用いてオペレータに奥行情報を提示しているものがある [28]．たとえば，移動ロボットの遠隔操作 [29, 30]，ロボットアームの遠隔操作 [31]，軍事用途での応用研究 [32]，などである．ロボットの遠隔操作に関して150報以上の先行研究を調査した報告 [33] に

よれば、ステレオカメラと立体視ディスプレイは倒壊した世界貿易センターのような狭隘空間において特に有効であると述べられている [34]。一方で、LRFで取得した三次元点群の立体視の効果はよく分かっていないのが現状であった。カメラと比較して照明条件の悪い環境でも正確な三次元情報を取得できるという利点のため、LRFによる三次元環境地図作成を行い、立体視に利用することは有効であると考えられる。

本研究では、視差による立体視の効果が明確にわかるような環境を設定し、実験を行う。実験に用いるシステムでは、まずロボットに搭載された回転台座上のLRFを用いて三次元点群データを取得し、データを操作側のPCに送信する。取得された三次元点群は立体視用ディスプレイに立体的に表示される。オペレータは3Dメガネを装着することで立体的なデータを見ることができる。実験では、参加者は特定の対象を発見するように求められる。三次元データは狭隘で複雑な環境で取得する。そして、実験結果を統計的に処理し、立体視をする場合としない場合とで比較を行う。詳しい手法と実験結果については第3章に述べる。

2.2 遠隔操作可能なリアルタイム性とロボットの周囲を見回せる 広視野

移動ロボットを用いて原子力建屋などの特定の施設を点検する場合、オペレータはロボット周囲の状況をリアルタイムに把握する必要がある。オペレータは直接ロボットを目視できないため、ロボットには視覚センサを搭載する必要がある。視覚センサは、災害地域でみられる不安定な照明条件において使用できることや、距離感をオペレータに提示することが必要である。また災害地域における通信インフラは信頼性が低いため、データの通信負荷が低いことが必要である。リアルタイムな視覚センサとしてカメラは一般に広く用いられているが、暗闇で使用できない、奥行き情報を取得できない、通信負荷が高いという欠点がある。ロボットを俯瞰する視点に搭載されたカメラは、ロボットと障害物との相対関係を把握して接触を回避するのに有効であるが、依然として暗闇で使用できない、正確な距離情報を取得できない、通信負荷が高いという欠点がある。ステレオカメラはオペレータに奥行き情報を提供し、障害物との距離感を把握するのに役立つが、単眼のカメラと比較して通信負荷が2倍になること、暗闇では使用できないことが欠点である。超音波ソナーは暗闇でも使用でき、また奥行き情報を提供できるが、精度は高くないという問題がある。一方で、前節で距離感の把握のために採用したLRF (Laser Range Finder) は上記の装置の欠点を補うことが可能である。LRFは超音波ソナーよりも正確な距離情報を取得でき、また暗闇でも使用可能であり、カメラよりも通信負荷が低い利点がある。そこで、本研究では遠隔操作のためにLRFを使用する。

本研究では、実際にロボットを遠隔操作する際に三次元スキャンしながら操作することが必要となるため、スキャン速度を向上できる新たなスキャン機構を開発する。また、三次元スキャンデータの表現方法として、Marching Cubes[35]やボクセル[26]といった数多くの三次元再構成手法があるが、リアルタイム性に重要な計算コストが増大するため、三次元点群を処理せずにそのまま表示することとする。三次元点群の表示方法について、災害地域や原子力施設における点検や探索タスクを想定すると、オペレータはロボットや縦横に伸びる配管等の設備を見回して巡回する必要がある。したがって、広視野角のリアルタイム三次元レーザスキャナと、広視野角での視覚情報提示が必要である。そこで、本研究では、広視野角リアルタイム三次元レーザスキャナと、Oculus Riftを用いた広視野角インタフェースを開発する。また、開発したスキャナが先行研究の回転式揺動機構と比較して、点密度およびスキャン速度、また上下方向の障害物検出において優れていることを確認する。

開発した三次元スキャナの詳細と先行研究との比較結果は第4章で述べる。スキャン速度をさらに向上させるための試みも同じ章で説明する。また、第5章では構築したインタフェースを用いたロボットの遠隔操作実験の結果を示す。

2.3 水中探索への対応

将来的な課題として、水中探索への対応を検討する。水中環境における測距装置としては、超音波を用いたソナーが多く用いられている。超音波ソナーは、移動ロボットの陸上での環境地図作成や自己位置推定のためにもしばしば用いられている[36]が、音は水中において空気中より遠くまで伝播するという物理特性から、水中移動ロボットにも用いられている。たとえば、水中移動ロボットのための未知環境における地図作成および移動計画[37]、カメラ画像とソナーを統合した海底表面の三次元再構成[38]、ソナーデータから海底の特定の対象物を識別する方法の研究[39]、などがある。一方で、ソナーは精度や分解能が低いという問題がある。

これに対し、LRFはソナーよりも精度や角度分解能が高く、陸上ではその優位性から、移動ロボットの環境地図作成や自己位置推定に広く用いられている。また、レーザは水中における測距にも使われている。たとえば、自律水中ロボットを用いて船体の点検支援を行うことを目的とした、複雑な三次元構造物を網羅する動作計画の研究[40]や、レーザの振幅変調とローパスフィルタによる処理を行うことで、海底状況の三次元計測を改善する手法[41]、川底の堆積物の推移をレーザで三次元計測する研究[42]、海軍による水中の脅威の検出への応用[43]、海底に潜るエビの生態のレーザ計測[44]、自律水中ロボットを用いた水質の定量的評価[45]、海底に散乱した貝殻の識別[46]、高速な水中二次元スキャンシステムの開発[47]、三角測量法を用いた水中三次元スキャンのためのキャリブレーション手法[48]、水を満たした容器に沈めた物体の三

次元スキャン手法 [49], などがある.

ここで, レーザによる水中環境計測においては, 空気中での計測と比較して屈折と減衰の影響が大きくなることに注意が必要である. 吸収を含む媒質中における光の特性に関して, 屈折と減衰は複素屈折率 (complex refractive index) を用いて

$$N = n + ik \quad (2.1)$$

と表現される. ここで N : 複素屈折率, n : 屈折率 (refractive index), k : 消光係数 (extinction coefficient), i : 虚数単位である. 屈折率 n は, 真空と比較した際の媒質中の光の速度または波長の比率である. 一般に媒質中では, 真空中と比べて光の波長は小さくなる. これに対して, 消光係数 k は媒質による光の吸収の強さ, すなわち光が媒質中を進むにつれてその振幅が減少していく度合いを示している. したがって, 消光係数は光が媒質中でどれほど遠くまで伝搬するかを示す指標となる. 水中では波長 475 nm 付近の光 (緑-青色光) が最も消光係数 (光の吸収率) が小さく, これより波長が増加しても減少しても光の吸収率は上昇する [50]. また, これら屈折率と消光係数はともに光の波長, 媒質の温度, 密度によって変化する. 先に示した水中でのレーザ測距の関連研究においては, 屈折率の補正に関して, 測定ごとにキャリブレーション用のターゲットを用いることで, 反射したレーザを撮像するカメラをキャリブレーションする方法 [44, 46] や, 測距結果の計算において屈折率を考慮することで補正を行う方法がとられている [41, 42, 48, 49]. また, 消光係数による光の到達性に関しては, 水中で吸収率の低い波長 457–514 nm のレーザを用いているものがある [47].

しかし, 上記に示した水中レーザ測距に関する先行研究では, 目的に特化したレーザ測距装置の構造と, その構造に対して屈折率を考慮したキャリブレーション手法や計測方式に関して議論がなされているが, 陸上で広く使用されている汎用の LRF を水中計測に応用することについては十分に議論されていない. 汎用の LRF は現在陸上での移動ロボットの視覚センサとして広く用いられているため, 汎用 LRF による水中計測は今後水中ロボットに適用される可能性がある. 実際に, 2011 年に発生した東日本大震災における人命探索救助では, 地震による被害だけでなく, 津波による被害に対応することが必要になった. そのため, 災害時に運用される探索ロボットにおいても, 陸上および水中環境における環境計測技術が重要になってきた. 探索ロボットにおいては, 構造や重量, 価格の点から同じセンサを用いて陸上および水中環境計測を行うことが望ましい. 陸上や水中それぞれで最も消光係数の小さい波長に調整可能なレーザはすでに実現されており [51], 将来的には, この可変波長レーザを用いた LRF が登場すると考えられる. 可変波長の LRF が一般に普及すれば, 陸上・水中探索救助ロボットにも搭載されることが予測される. このように, 汎用 LRF を用いた水中計測の可能性は大きくなってきている.

そこで、本研究では、汎用 LRF を用いて水中環境を計測したスキャンデータに対して、屈折の影響を補正し、また信頼性の低いデータを除去する手法を提案する。具体的には、移動ロボットの測域センサとして広く普及している北陽電機（株）製の UTM-30LX (通称 Top-URG. 以後 Top-URG と呼称する) [52] を用いて水中環境を測定する。Top-URG のレーザ波長は 905 nm であるが、これは水に対してレーザ吸収率の低い波長 475 nm とほぼ同じ屈折率をもつため [53], 本手法は水中で長距離測距が可能な他の波長のレーザ測距装置においても同様に応用可能である。また、将来的に陸上および水中それぞれに適応可能な可変波長の LRF が登場した際にも、本手法は役立つ。具体的な手法および評価結果は第 6 章に述べる。

三次元スキャンデータの立体視

本章では、オペレータへの距離感の提示のために三次元スキャンデータの立体視を行い、その効果を実験により確かめる。

3.1 三次元スキャンデータの立体視システムの構成

本研究では、建物内探索ロボットに搭載したLRFを用いて三次元スキャンデータの収集を行う。以下に建物内探索ロボットと三次元スキャンデータの収集、および三次元スキャンデータを立体視するシステムについて説明する。

3.1.1 建物内探索ロボット

本実験では、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト 被災建造物内移動RTシステム」において開発された兄弟型ロボット [54] のうち、Fig. 3.1に示す「弟ロボット」を建物内探索ロボットとして用いる。ロボットのサイズは $490(\text{max:}705) \times 590 \times 400 \text{ mm}^3$ 、重量は24 kgである。このロボットはクローラ駆動により最大1 m/sで走行し、フリッパアームを利用して階段や段差の踏破が可能となっている。またこのロボットには以下のセンサが搭載されている。

- ・ 測域センサ (LRF) HOKUYO UTM-30LX (Top-URG) (スキャニング角度270°, 測定可能距離30 m)
- ・ ネットワークカメラ Axis PTZ213 (パン340°, チルト100°, 光学26倍ズーム)
- ・ 小型広角カメラ OPT NM30 (俯瞰視点用)
- ・ 赤外線近接センサ SHARP GP2D120 (前後左右の障害物検知用)
- ・ 姿勢センサ INTERSENSE InertiaCube3 (3軸360°の姿勢検知)

特にLRFはFig. 3.2に示す自作の二自由度雲台に取り付けられており、三次元のLRFデータを収集することが可能である。

3.1.2 三次元スキャンデータの収集

二自由度雲台には2つのモータ (ROBOTIS Dynamixel AX-12) が取り付けられており、ピッチ軸とヨー軸周りにLRFを回転させることで三次元的な距離情報を取得すること



Fig. 3.1: Surveyor type robot with a 3D laser scanner. Upper right: side view in normal locomotion mode; Lower right: side view in extended flipper mode.

が可能である [55, 56]. LRF は 1 回の平面スキャンで最大 1,081 点を取得できる．三次元スキャンの場合は，これにさらにヨー軸周りの回転角度の分解能をかけることによって全スキャン点数が変化する．スキャンデータはロボットから操作用 PC に送信され，センサ座標系からワールド座標系に変換される．Fig. 3.3 にピッチ軸を -30° に固定し，ヨー軸を 0° から -300° まで変化させた際にスキャンされる範囲を示している．本稿の実験では，ロボットの真上の空間もスキャンする必要があるため，ピッチ軸を -90° に固定して三次元スキャンを行う．

3.1.3 三次元スキャンデータの立体視

視差を利用した立体視を行う方法には，toe-in 法と呼ばれるものと，off-axis 法と呼ばれるものがある [57]．toe-in 法は対象物周りにカメラを回転させることで視差を生み出し，左右の画像をそれぞれの目に見せて立体視を行う方法である．この方法は実装が容易であるが，文献 [57] によると簡易的な方法であり，中央から離れるにしたがって視差に矛盾が生じるため，正しくないものとされている．off-axis 法は視野を左右に平行にずらすことで，より厳密な立体視を行う方法である．文献 [57] ではこちらが正しい方法とされているため，本研究では off-axis 法を用いる．なお，本研究では，立体視表示を実現するソフトウェアを実行するために，Table 3.1 に示す PC を用いる．

立体視表示に用いる OpenGL ライブラリで設定する左目用の視体積（視野）を Fig. 3.4 に示す．また OpenGL の関数 (`glFrustum`) で用いる視体積のパラメータを Table 3.2 に示す．ここで，視野の中心はスクリーンの中央にあると仮定している． P , D , W , H , Z_{Near} , Z_{Far} が任意に設定するパラメータである． P （両目の間隔）と D （目とスクリーンと

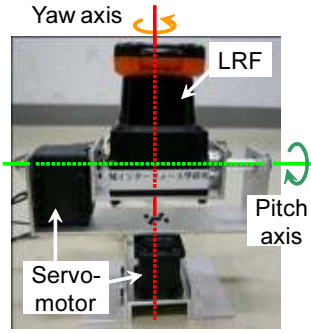


Fig. 3.2: 2-DOF stage for a 3D scan.

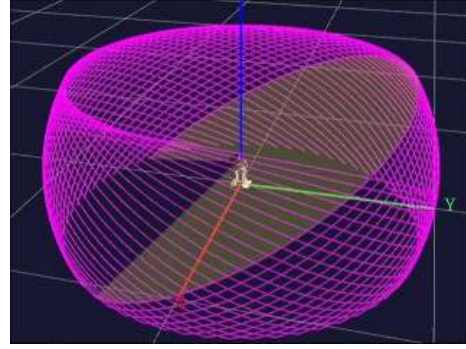


Fig. 3.3: Range of the 3D scan with a fixed pitch angle at -30° .

Table 3.1: Computer specifications.

CPU	Intel Core i7 CPU 870 2.93GHz
RAM	4GB
Graphic card	NVIDIA GeForce GTX470

の間隔)は参加者ごとに変わる．実験では，これら P と D は定規で測定する．パラメータ W (スクリーン幅)と H (スクリーン高さ)は使用するディスプレイに依存する．これらはドットピッチ(画素間隔)と画面解像度を用いて計算できる．パラメータ Z_{Near} と Z_{Far} については，三次元点群全体が視体積に含まれるように設定している．

そのほかのパラメータは以下のように計算される．

$$F = \frac{PZ_{Near}}{2D} \quad (3.1)$$

左目用のパラメータは

$$left = -\frac{WZ_{Near}}{2D} + F, \quad (3.2)$$

$$right = \frac{WZ_{Near}}{2D} + F, \quad (3.3)$$

$$bottom = -\frac{HZ_{Near}}{2D}, \quad (3.4)$$

$$top = \frac{HZ_{Near}}{2D}, \quad (3.5)$$

Table 3.2: Frustum parameters.

Parameter	Value in experiments	Description
P [mm]	Measured for each participant	Distance between both eyes
D [mm]	Measured for each participant	Distance from one eye to the screen
F [mm]	Calculated by (3.1)	Distance to the center of the near clip plane
W, H [mm]	474, 296	Width and height of the screen
Z_{Near} [mm]	1	Distance to the near clip plane
Z_{Far} [mm]	100,000	Distance to the far clip plane
$left$ [mm]	Calculated by (3.2) and (3.6)	Far left of the near clip plane
$right$ [mm]	Calculated by (3.3) and (3.7)	Far right of the near clip plane
$bottom$ [mm]	Calculated by (3.4) and (3.8)	Bottom of the near clip plane
top [mm]	Calculated by (3.5) and (3.9)	Top of the near clip plane

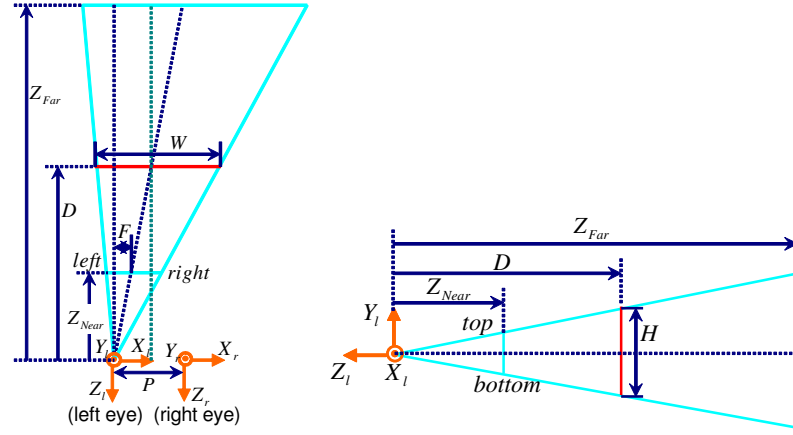


Fig. 3.4: Configuration of the view frustum (left eye).

と計算され，右目用のパラメータは

$$left = -\frac{WZ_{Near}}{2D} - F, \quad (3.6)$$

$$right = \frac{WZ_{Near}}{2D} - F, \quad (3.7)$$

$$bottom = -\frac{HZ_{Near}}{2D}, \quad (3.8)$$

$$top = \frac{HZ_{Near}}{2D}, \quad (3.9)$$

と計算される．OpenGLでレンダリングする際，左目の視点からみたシーンは基準位置から $(\frac{P}{2}, 0, 0)$ だけ平行移動してレンダリングし，右目の視点からみたシーンは基準位置から $(-\frac{P}{2}, 0, 0)$ だけ平行移動してレンダリングする．以上の処理により，ニアクリップ平面 (near clip plane) とファークリップ平面 (far clip plane) の間にある物体はそこに実際にあるかのように表示される．

Table 3.3: 3D display specifications.

Name	ZALMAN ZM-M220W
Type	3D passive polarized display
Resolution	1,680 × 1,050
Size	22 inch wide
Dot pitch	0.282 mm
Horizontal frequency	64.674 KHz
Vertical frequency	59.883 Hz

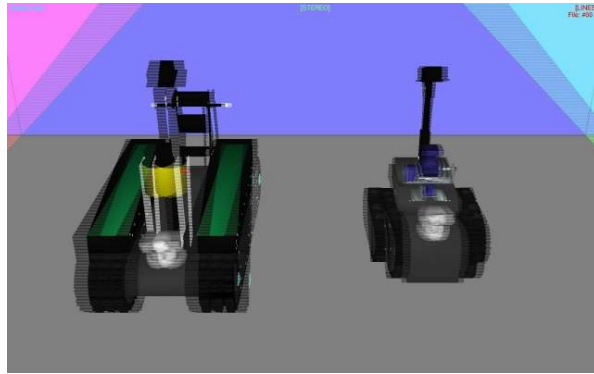


Fig. 3.5: Example stereo image (the images for the right and left eyes are overlaid).

本研究では，Table 3.3に示す仕様の3Dディスプレイ (Zalman ZM-M220W) を用いて立体視表示を実現する．オペレータは偏光メガネをかけて画面を見ることで，立体感を感じることができる．偏光メガネにより，ディスプレイ画面の奇数番目の走査線上の映像が右目のみに到達し，偶数番目の走査線上の映像が左目のみに到達する．これを利用して，右目用の画像を奇数番目の走査線上に，左目用の画像を偶数番目の走査線上に表示することで，立体視表示を実現できる．

立体視の実行例をFig. 3.5に示す．ぼやけたような画像になっているのは，右目と左目用の画像が奇数番目と偶数番目の走査線上に交互に表示されているためである．

3.1.4 立体視の効果が表れやすい条件

奥行き感に貢献するものを調査した結果，以下のようなことが分かっている．奥行き感をもたらす手がかりとして，まず単眼によるものは，

- ・ 運動視差
- ・ 視野角の大きさ（大きいと臨場感が増す）
- ・ 網膜像の大きさ（見慣れた対象なら距離が分かる）
- ・ 空気透視（遠くのもののはかすむ）

- ・線遠近法
- ・きめの勾配
- ・陰影
- ・重なり
- ・進出色—後退色（暖色は進出）
- ・焦点調節（水晶体の厚みが変わる）

があり、両眼によるものは

- ・両眼視差
- ・輻輳（ふくそう）

がある [58]. 輻輳とは、眼球が対象のほうを向くことである. 対象が近いと寄り目になるのがこの現象である. 脳内では上記の情報を総合して立体を認識していると考えられている.

これに加えて、今回は立体視を用いてロボットの遠隔操作を行っている論文を調査し、立体視の効果が表れやすい環境の条件を明らかにした. おもに遠隔操作に関する150報以上の先行研究を調査した報告 [33] から、奥行き知覚に関する部分を参考にまとめた. 以下に認識速度、正確さに関して、単眼視と比較して両眼視が有効な状況を示す.

- ・俯瞰視点（真上からの視点）より地面に水平な視点 [59]
- ・現実環境より仮想環境（距離を短く見積もる傾向） [60, 61, 62]
- ・介在物、光と影、線遠近法（消失点への収縮を使って遠近を表す手法）、物体の大きさの恒常性（網膜像の大きさが変わっても知覚される大きさがあまり変化しないこと）、といった手がかりがない環境 [63]
- ・見慣れない厳しい（WTCのように瓦礫が散乱した）地形 [34, 64]
- ・斜面やくぼみのある地形 [64, 65]
- ・三次元的に複雑な環境 [64]
- ・画質が悪い [66]
- ・対象物までの距離が3 m以内でピント調節・運動視差が発生しない [67]

以上から、LRFによる三次元環境地図において両眼視差による立体視の効果が大きく表れる条件を以下のように仮定できる.

- ・見慣れない物体が散乱し、斜面やくぼみが存在する複雑な環境
- ・暗闇に近い（カメラ映像が取得不可能、LRFデータのみ使用（赤外線画像は陰影が分かるため受光強度は非表示））
- ・線遠近法が生じない視点（狭い通路などは幅が不定ならよさそう）

- ・ 視点から近い位置に物体がある (3 m 以内)
- ・ 静止画像・静止視点
- ・ 狭い視野 (何かの一部しか見えない)

この条件で実験環境を設定すれば，両眼視差による立体感以外の奥行き知覚の手がかりになるものを除くことができ，目的とする両眼視差による立体視の効果のみの評価ができると期待される．

3.2 参加者による性能評価実験

実験では、遠隔操作型移動ロボットを用いた探索救助活動を想定する．今回の実験ではロボットがスキャン範囲に含まれているため，三次元スキャナをロボットに搭載して三次元スキャンを実施することとする．

3.2.1 実験の目的

実験の目的は，三次元点群を立体視することで，オペレータの環境認識が容易になるかどうかを確かめることである．そのために，立体視の有無で結果を比較する．

3.2.2 実験環境

実験環境として，Fig. 3.6に示す世界貿易センター事故の現場 [1] のような環境を想定する．つまり，狭隘かつ三次元的に複雑であり，また照明条件が悪く暗闇に近い，環境が塵灰等に覆われてほぼ灰色一色となっている状況を想定する．Fig. 3.6には3組の被災者の遺留物が含まれているが，環境が塵灰に覆われほぼ灰色一色となっているため，カメラ画像では判別が困難になっている．実際に世界貿易センター事故後に投入されたロボットによる人命探索では，被災者やその遺留物の見落としがあったことが確認されている [1, 2]．Fig. 3.7は，ロボットによる探索終了から5ヶ月後に録画映像中に発見された人間の手とみられる遺留物を示している．実験では，このような環境で対象物を探索する際に，三次元点群の立体視が有効かどうかを確認することとした．

構築した環境とその画面表示の例をFig. 3.9に示す．実験用としてはFig. 3.10に示すような環境10パターンを構築した．なお，今回の実験では色情報を取得することは想定していないため，図に示すような色のついた物体で環境を構築している．このような狭隘空間においてロボットを用いて三次元スキャンデータを取得し，オペレータが対象物として被災者の手を模擬した軍手 (Fig. 3.8) を探索することとする．対象物はFig. 3.10に示すように，さまざまな方向・位置に配置するものとする．ここで，三次元スキャンデータに含まれるスキャン点は324,300点である．狭隘空間のできるだけ広い範囲のデータが取得できるように，二自由度雲台はピッチ角度を -90° に設定して三次元スキャンを実施する．できるだけ高密度の点が得られるように，このときのヨー軸角度の回転ステップ角は 1° とする．表示する点群のスケールは，現実と一致させるために1対1とする．また，Fig. 3.9に示すように，この実験では三次元スキャンデータにロボットCGが映り込んでいる．



Fig. 3.6: Confined space at the World Trade Center (WTC) response with three sets of victim remains [1].



Fig. 3.7: Material resembling a human hand remain recognized five months after the WTC response [2].



Fig. 3.8: Target (glove with padding) in the experiment.

3.2.3 三次元スキャンデータ提示の視点

三次元スキャンデータを提示する際の視点は任意に設定することができるが、本実験では対象物ができるだけ隠れないような視点で三次元スキャンデータを参加者に提示する。また、前節までに説明した、視差による立体視以外の影響が除かれるように視点を設定する。したがって、Fig. 3.11(b)に示すような視点でデータを提示することとする。また、運動視差の影響を避けるために、実験中の視点は固定するものとする。

3.2.4 実験内容（タスク）

参加者には、1人ずつ三次元スキャンデータが表示されたディスプレイの前に座った状態で、三次元スキャンデータの中から対象物をできるだけ多く発見し、その場所を口頭や身振りで伝えてもらう。ただし、対象物はデータ中に0個以上あると教示する。また、1つのデータに対して立体視なしの場合と立体視ありの場合で行う。この実験の様子を示した模式図をFig. 3.12に示す。上記のタスクを、あらかじめFig. 3.9のパターンの三次元スキャンデータを用いて1回練習を行い、正解例を教えておく。そ

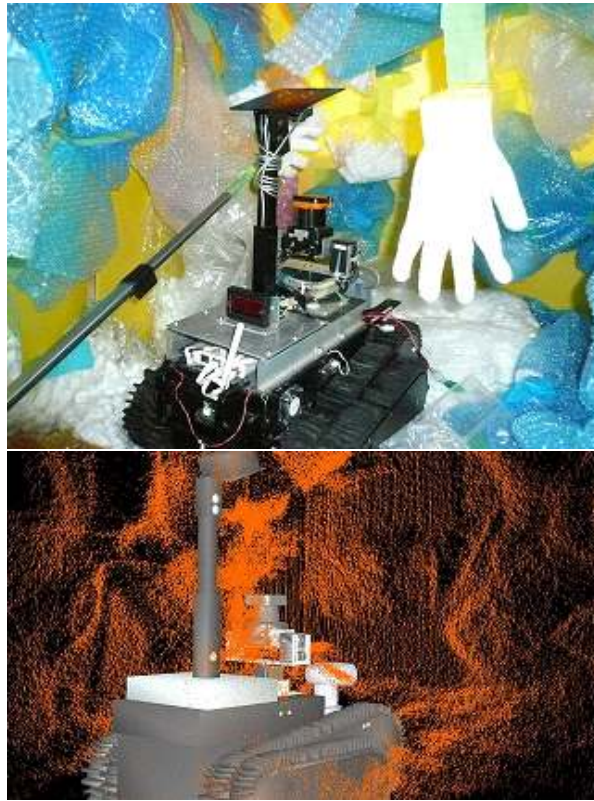


Fig. 3.9: Example of images used in the experiment.

の後，Fig. 3.10に示す10パターンの三次元スキャンデータに対して実験を行う．また，実験は以下の2つのグループで実施することで，立体視なし・立体視ありの提示の順番による影響を減少させることとした．

- ・ Aグループ：立体視なし→立体視ありの順に提示（8人）
- ・ Bグループ：立体視あり→立体視なしの順に提示（8人）

ここで参加者は22-28歳の男性15人，女性1人の合計16人であり，工学部の学生である．また参加者全員は三次元点群の立体視になじみがない．さらに，Table 3.2に示した立体視に必要なパラメータは参加者ごとに測定している．実験の構成をまとめたものをTable 3.4に示す．

3.2.5 評価方法

実験では10パターンに対してそれぞれ対象物を発見した数と誤認した数を記録する．そして $(\text{スコア}) = (\text{発見した全体の数}) - (\text{誤認した全体の数})$ という評価値を設定し，スコアが高いほうが対象物を認識しやすいと評価する．全員の結果を立体視なしの場合と立体視ありの場合で平均し， t 検定で比較する．

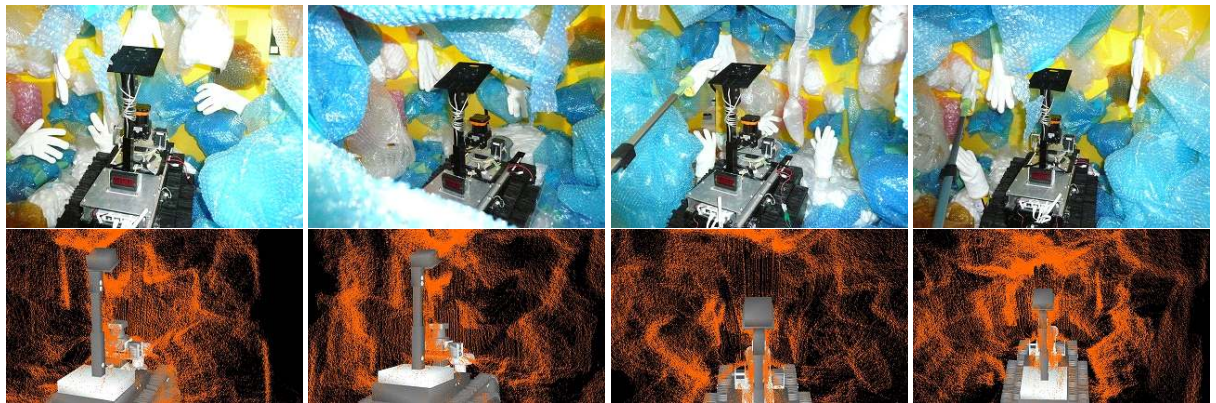


(a) Env. III-1
(Scale: 1, Targets: 4)

(b) Env. III-2
(Scale: 1, Targets: 3)

(c) Env. III-3
(Scale: 1, Targets: 2)

(d) Env. III-4
(Scale: 1, Targets: 3)

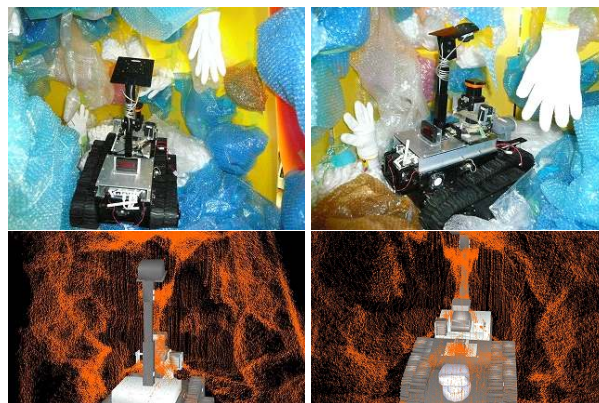


(e) Env. III-5
(Scale: 1, Targets: 5)

(f) Env. III-6
(Scale: 1, Targets: 2)

(g) Env. III-7
(Scale: 1, Targets: 5)

(h) Env. III-8
(Scale: 1, Targets: 4)



(i) Env. III-9
(Scale: 1, Targets: 3)

(j) Env. III-10
(Scale: 1, Targets: 2)

Fig. 3.10: Scenes used in the experiment. Top: 3D point cloud environments; Bottom: 3D point clouds (orange) and a mobile CG robot.



(a) Overhead view.

(b) Following view.

Fig. 3.11: Comparison of viewpoints for 3D LRF data displays.

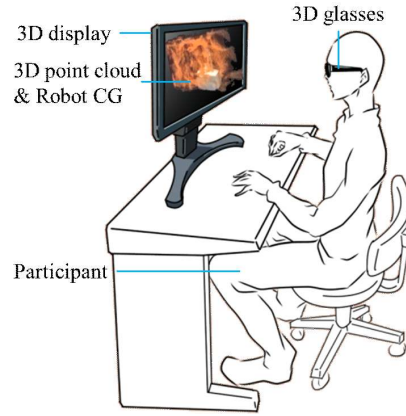


Fig. 3.12: Experimental apparatus.

Table 3.4: Experimental configurations.

Displayed point cloud	Point size	2×2 px
	Point shape	Square
	Point color	Orange (#FF6600)
	Number of points	324,300
Screen	Resolution	$1,680 \times 1,050$
	Background color	Black (#000000)
Environment	Complex & Confined (Fig. 3.9)	
Target	Gloves (Fig. 3.8)	
2-DOF stage	Pitch angle	-90° (Constant)
	Yaw angle rotation	0 to -300° (Step angle: 1°)

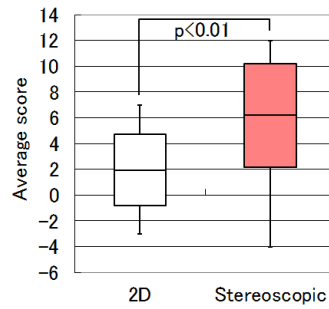


Fig. 3.13: Box plot (maximum value, +SD, average, -SD, minimum value) of the average scores in the experiment.

3.2.6 実験結果

Aグループ, Bグループの参加者ごとの対象物発見数, 誤認数, スコア, および各グループの合計, 平均, 標準偏差 (SD: Standard Deviation) をそれぞれ Table 3.5, 3.6 に示す. また全体の結果を Table 3.7 および Fig. 3.13 に示す. 結果を見ると, A, B どちらの場合においても立体視ありのほうがスコアが高い傾向となっている.

t 検定は, 平均値の差に意味がある (有意) かどうかを判定できる方法である. ここでは立体視なしとありの平均スコアの差が有意かどうかを検定する. 立体視なしの場合と立体視ありの場合の平均スコアに対して, 有意水準1%で両側検定の t 検定を行ったところ, $t(15) = 6.69$, $p = 7.29 \times 10^{-6}$ という結果になった. ここで t 値は p 値と自由度 (参加者数-1) から計算される値である. この結果から, この差が偶然発生する確率は0.0007289%であり, 有意水準1%で有意な差があることが分かった. つまり, 立体視なしの場合と立体視ありの場合の平均スコアには有意水準1 [%] で統計的に有意な差があることが分かった. したがって, 立体視のほうが三次元スキャンデータを把握しやすい傾向にあることが分かった.

3.3 考察

誤認率を $\frac{\text{誤認数}}{(\text{発見数} + \text{誤認数})}$ と定義すると, 全体の結果において立体視なしの場合の誤認率は0.33, 立体視ありの場合の誤認率は0.21となる. この結果からも, 立体視ありの場合のほうが環境の認識に有利であるといえる. 以上の結果から, 三次元点群の立体視が対象物の探索に有効であることが確認できた. 1つの理由としては, 本実験で構築した環境が3.1.4節で述べた条件にある程度当てはまったためと考えられる.

さらに, 結果を見ると, データのばらつきは立体視ありのほうが多くなっているため, 参加者ごとに立体感の感じ方に差異があることが分かる.

Table 3.5: The result of Group A.

Participants	2D			Stereoscopic		
	Correct ans.	Incorrect ans.	Score	Correct ans.	Incorrect ans.	Score
A1	2	1	1	10	1	9
A2	1	0	1	4	1	3
A3	0	2	-2	5	2	3
A4	1	0	1	9	1	8
A5	2	0	2	10	3	7
A6	2	0	2	7	1	6
A7	2	0	2	5	1	4
A8	1	0	1	4	0	4
Total	11	3	8	54	10	44
Average	1.4	0.4	1	6.8	1.3	5.5
SD	0.74	0.74	1.3	2.6	0.89	2.3

Table 3.6: The result of Group B.

Participants	2D			Stereoscopic		
	Correct ans.	Incorrect ans.	Score	Correct ans.	Incorrect ans.	Score
B1	5	7	-2	3	7	-4
B2	4	0	4	13	1	12
B3	3	0	3	7	2	5
B4	4	0	4	9	0	9
B5	5	8	-3	11	8	3
B6	9	5	4	16	7	9
B7	9	2	7	11	0	11
B8	9	3	6	10	0	10
Total	48	25	23	80	25	55
Average	6	3.1	2.9	10	3.1	6.9
SD	2.6	3.2	3.6	3.9	3.6	5.3

Table 3.7: Integrated Experiment Results

	2D			Stereoscopic		
	Correct ans.	Incorrect ans.	Score	Correct ans.	Incorrect ans.	Score
Average	3.7	1.8	1.9	8.4	2.2	6.2
SD	3.0	2.7	2.8	3.6	2.7	4.0

一方で、今回の実験では、先に提示した情報により参加者の認識能力にバイアスがかかっている可能性がある。たとえば、先に提示した情報により対象物の位置が分かったために、後に提示した情報の特定の部分に意識が集中した可能性がある。逆に、先に提示した情報で対象物がないと判断した場合に、後に提示した情報の該当部分を見落としている可能性もある。AグループよりBグループのほうが総じてスコアが高い傾向があるのは、こうした影響がある可能性がある。あるいは単に、AグループとBグループで母集団に認識能力の差があった可能性もある。これらの影響を加味した実験を行うことは今後の課題である。

加えて、参加者の認識における疲労も考慮する必要がある。今回の実験では、実験終了までに1人当たり最大で20分程度かかっていたが、参加者の中には立体視した場合のほうがしない場合と比較して疲労を感じていた。これは、自然界での立体視とは異なるためであると考えられる。したがって、長時間の実験、たとえばロボットの遠隔操作を立体視で行った場合、さらに疲労を感じる可能性がある。

3.4 本章のまとめ

本章では、世界貿易センター事故現場のような複雑な狭隘空間を想定環境とし、三次元スキャンデータを立体視することで環境内を探索しやすくなるかどうかを検証する実験を行った。実験では、参加者を用いて三次元スキャンデータの中から対象物を探索するタスクを立体視なしの場合と立体視ありの場合で行い、発見数と誤認数を記録した。評価においては、設定したスコアに対して t 検定により立体視なしの場合と立体視ありの場合のスコアに有意差があるか検定を行った。結果として、想定環境において三次元スキャンデータの立体視の効果が高い傾向が見られることを確認した。

今後の課題としては、先に得た情報が後に影響しないように、ある環境のパターンを先に見せた後別のパターンの環境をランダムに見せるようにするなどの改善を行うことや、参加者数を増加させて実験を行うこと、またより実際の災害現場に近い環境で実験を行うこと、三次元スキャンデータをリアルタイムに取得しながらロボットを遠隔操作する実験を行うことがあげられる。リアルタイムに三次元スキャンデータを取得しながら遠隔操作する手法については次章で述べる。

高速な広視野角三次元レーザスキャナと 広視野角インタフェース

本章では高速な広視野角三次元レーザスキャナと広視野角インタフェースについて述べる．まず，新たに開発したLRFを用いた広視野角のリアルタイム三次元レーザスキャナについて説明する．また，RANSACアルゴリズムを用いた平面検出によるスキャン速度の向上手法について述べる．また，リアルタイムの三次元点群表示のために導入した，広視野角のHMD (Head Mounted Display) について説明する．

4.1 高速な広視野角三次元レーザスキャナの設計

4.1.1 移動ロボットの遠隔操作における必要条件

移動ロボットの遠隔操作における必要条件として，Table 4.1に示すように，測距可能範囲，精度，垂直視野角，スキャン時間，分解能，使用環境について検討した．まずスキャン時間について，「リアルタイム」を「移動ロボットの遠隔操作において支障がない時間内に1周期の三次元スキャンを完了すること」と定義する．ここで，Fig. 4.1に示すように，ロボットと障害物が正面からお互いに接近する状況を考える．移動ロボットの走行速度を v_r m/s，障害物の大きさ（スキャナから見た投影幅または高さ）を s_o m，また移動速度を v_o m/sとし，スキャナの分解能を r_s rad とすると，必要な三次元スキャン周期は以下のように計算できる．

$$T = \frac{d}{v_o + v_r} \quad (4.1)$$

ここで

$$d = s_o / r_s \quad (4.2)$$

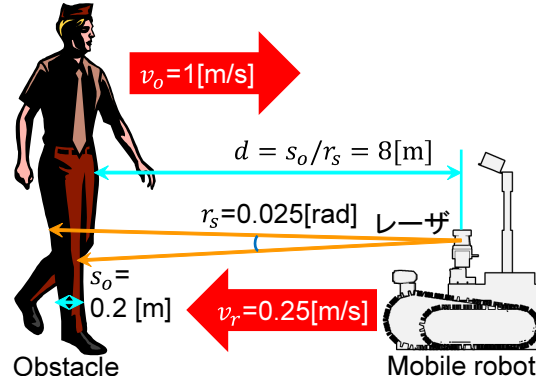


Fig. 4.1: Calculation of the “real-time” 3D scanning cycle T [s].

であり,

s_o [m]: 障害物の大きさ (幅または高さ)

v_o [m/s]: 障害物の想定移動速度

v_r [m/s]: ロボットの移動速度

d [m]: 障害物検出可能距離

r_s [rad]: スキャナの分解能

T [s]: 三次元スキャン周期

である．制御可能なロボットの移動速度として $v_r = 0.25$ m/s, 人間の歩行速度として $v_o = 1$ m/s, 人間の脚の幅から $s_o = 0.2$ m, 使用予定の LRF (HOKUYO UTM-30-LX-EW) の分解能から $r_s = 0.025$ rad とすると, 必要な三次元スキャン周期は $T = 6.4$ s となる．この場合, 6.4 s 周期の三次元スキャンを行うことで, ロボットは衝突する前に障害物 (人間) を検出できる．

測距範囲については, 被災建物や原子力施設内のような狭隘空間を探索する際に出現する近い障害物を検出するために, 最小 0.1 m と設定した．また最大測距範囲は, 障害物のサイズ s_o とスキャナの分解能 r_s から導かれる障害物検出可能距離 d の式 (4.2) から 8 m 以上と設定した．測距精度は, 障害物の最小部分が 0.2 m であることから ± 0.1 m と設定した．垂直視野角は, ロボットの頭上やロボットの近くの床面にある障害物を検出するために 180° 程度必要である．使用環境は, 被災地域や原子力施設の環境を想定し屋内外とした．

4.1.2 従来の装置との比較

従来の三次元スキャン装置を調査した結果, 高速三次元スキャン装置には, (a)Velodyne レーザスキャナ (5–15 Hz) や, (b)Microsoft Kinect (RGB-D カメラ : 30 Hz), (c)mesa Swiss

Table 4.1: Requirements for a real-time 3D laser scanner.

Range [m]	0.1 to 8 or more
Accuracy [m]	$< \pm 0.1$
Vertical FOV [$^{\circ}$]	$\cong 180$
Scanning time [s]	< 6.4
Resolution [rad]	< 0.025
Use environment	In&outdoor

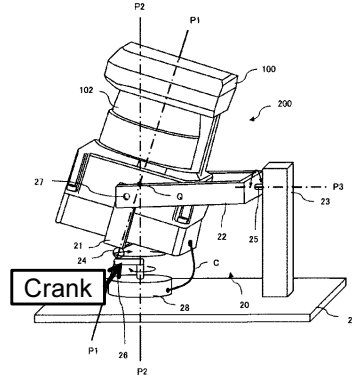


Fig. 4.2: Principle of the former swing mechanism [3, 4].

Ranger (Time of Flight カメラ : 50 Hz), (d) 回転式揺動機構 [3, 4] (約 1 Hz) があることが分かった。しかし、それぞれ (a) 至近距離 (1 m 未満) をスキャンできない, (b)(c) 屋内専用であり視野角が狭い, (a)(d) 垂直視野角が狭いという問題があり, 本研究で必要な三次元スキャン装置の条件に合致しない。そこで, 本研究では必要条件を満たすために Fig. 4.2 に示す (d) 回転式揺動機構 [3, 4] をベースとした新たな三次元スキャナを開発する。

4.1.3 試作機の開発

揺動機構の開発にあたり, まず, Fig. 4.3 に示すような試作機を開発した。これは前節で述べた参考文献 [3, 4] (Fig. 4.2) の機構が動くかどうか確認するための簡単なモデルである。ここでギアボックスに接続されているクランクには, 先行研究では球体軸受が用いられているが, 本研究では円筒軸受を採用している。これは, 後述する揺動角度, すなわち垂直視野角を調整可能にするためである。ここでは, 先行研究と同様の揺動運動を達成するために, クランクが揺動角度分だけ曲げられている。Fig. 4.3 右に本試作機の揺動運動の様子を示す。この試作機により, 所望の揺動運動が実現できていることが確認できたため, これを元に実機的设计を行うこととした。

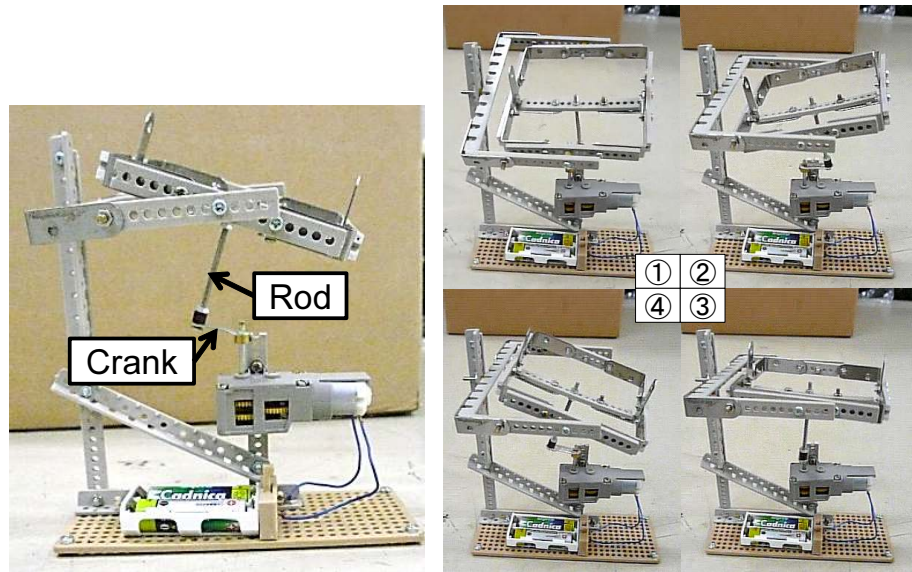


Fig. 4.3: Test model of a new swing mechanism.

4.1.4 センサの選定

揺動機構に搭載するセンサの条件として、まず狭隘空間で三次元スキャン可能にするため、近い距離をスキャン可能であること、またできるだけ精度が高いこと、視野角が広いこと、測定時間が短いこと、価格が安いこと、屋外でも使用可能なこと、を検討することとした。センサの検討結果を Table 4.2 に示す。Microsoft Kinect は価格の点で優位であり、容易に試すことができることから候補に挙げたが、屋内用であり屋外では精度が低下することが分かった。HOKUYO UTM-30LX では周囲照度 100000 lx（晴天の正午の太陽光：自然界で見られる最大照度）にて ± 50 mm (0.1–10 m) の精度で測定が可能であるため、この点は不利である。また精度について、精度評価を行った研究 [68] によると、系統誤差は不明であるが、デプス測定値の偶然誤差は距離 5 m において 4 cm、奥行き方向の分解能は距離 5 m において 7 cm であった。また、velodyne HDL-32e はリアルタイム (5–15 fps) で全方位の三次元点群を取得できるため、そもそも揺動させる必要がないセンサであるが、最小測距範囲が 1 m であり、狭隘空間探索には適さないと判断した。測定距離を重点的に検討すると、0.1–30 m まで可能な HOKUYO UTM-30LX が最も適していると思われる。

上記のように検討した結果、HOKUYO UTM-30LX が最適であると判断した。なお、開発においては HOKUYO UTM-30LX の後継機である HOKUYO UTM-30LX-EW を搭載する。HOKUYO UTM-30LX-EW の性能は Table 4.2 に示している HOKUYO UTM-30LX の性能と全く同じである。

Table 4.2: Comparisons of sensors.

Product name	HOKUYO UTM-30LX	mesa SR4000
Range	0.1–30 m	0.3–10 m (10 m model 15MHz)
Accuracy	0.1–10 m: ± 30 mm 10–30 m : ± 50 mm	5 m model: ± 10 mm 10 m model: Unknown
FOV [°]	270	Normal: 43.6×34.6 Wide: 69×56
Scanning time	25 ms	min. 20 ms (50 fps)
Price [Yen]	400,000	1000,000
Use environment	In&Outdoor	Indoor
Product name	Microsoft Kinect	velodyne HDL-32e
Range	0.8–4 m	1–70 m
Accuracy	Unknown	± 20 mm
FOV [°]	Xbox 360: 57.5×43.5 Durango: 70×60	360×41.3
Scanning time	33 ms (30 fps)	67–200 ms (5–15 fps)
Price [Yen]	15,000	5000,000
Use environment	Indoor	In&Outdoor

4.1.5 サーボモータの選定

使用するサーボモータについては、機構が無限回転することから 360° 角度を取得できるものが望ましい。本機構についての研究を調査した結果、明治大学の黒田先生のグループ [69] はROBOTIS Dynamixel MX-28を用いており、無限回転可能で 360° の角度取得が可能なため、本機構にもこれを使用することとした。このサーボモータの外形をFig. 4.4に、仕様を以下に示す。

- ・ 使用電圧 : 10–14.8 V (推奨電圧 12 V)
- ・ 失速トルク : 2.5 N·m (at 12 V, 1.4 A)
- ・ 無負荷時回転速度 : 55 rpm (at 12 V)
- ・ 動作角度 : 位置決め制御時: $0\text{--}360^\circ$ (12 ビット分解能), 無限回転
- ・ 最小制御角 : 0.088°

4.1.6 設計方針

狭隘空間においては、様々な方位に障害物が存在するため、ロボットの真上方向にも三次元スキャンできることが望ましい。そこで、元の機構の上下視野角を増大させ



Fig. 4.4: Servomotor (ROBOTIS Dynamixel MX-28).

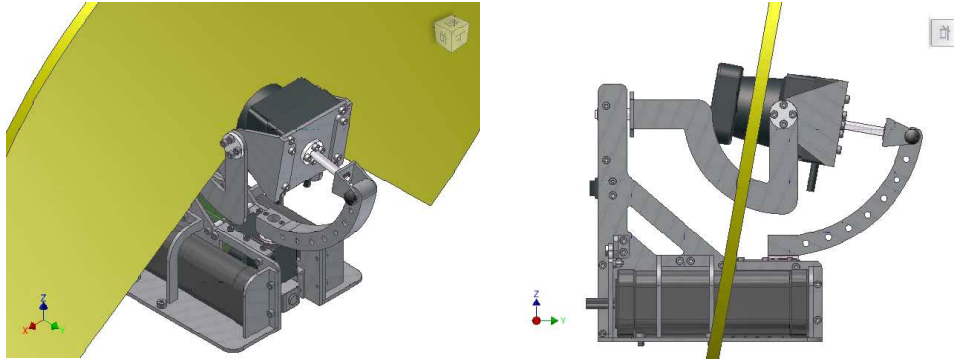


Fig. 4.5: Avoidance of a LRF laser inference with the link where the angle of gradient of a LRF is 80° .

るために、モータに取り付けられたリンクは円弧状にし、一定間隔で角度を変更できるようにする．本研究では $10\text{--}80^\circ$ の範囲で 10° 刻みに変化させることができるようにした．また、このとき傾斜角度が増大するにつれLRFレーザがリンクと干渉することが想定されるため、Fig. 4.5に示すようにリンクがLRFのレーザを遮らないようにする．具体的には、リンクに円弧状の部分をつくりLRFレーザを回避できるようにする．図ではLRFの傾斜角度が 80° のときの様子を示している．また、本機構はピッチ角・ロール角が常に変化するように遥動するため、LRFはモーメントが発生しないよう重心周りに回転することが望ましい．そこでLRFの重心を測定し、この点周りに回転させることとした．上記の条件を踏まえて設計した機構をFig. 4.6に示す．ここではLRFの傾斜角度を 30° に設定している．

4.1.7 機構の消費電力の計算

機構の電源の設計のため、使用するセンサ・サーボモータの消費電力を計算した．以下に結果を示す．

- ・ LRF (HOKUYO UTM-30LX)

－ 電圧 : 12 V

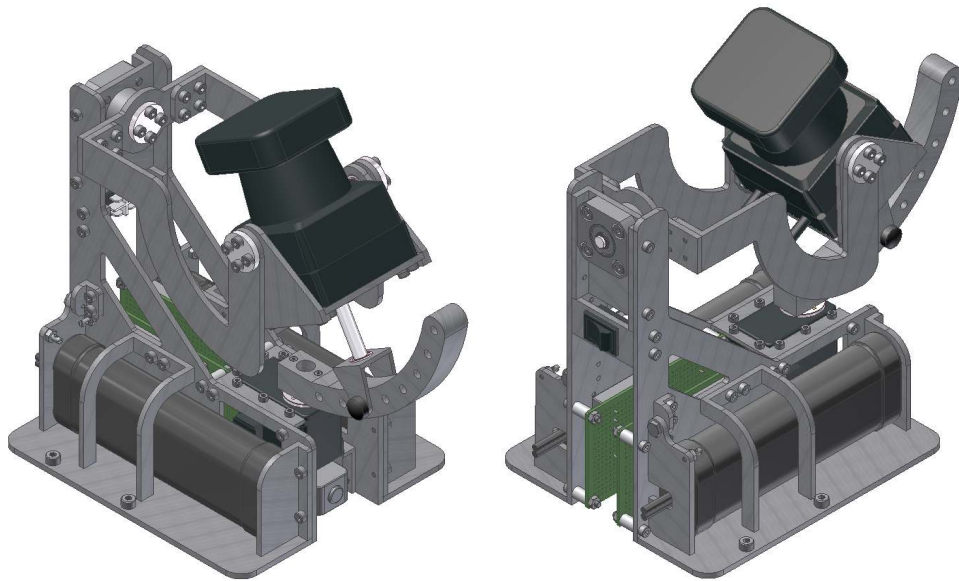


Fig. 4.6: Design of the new swing mechanism where the angle of gradient of a LRF is 30° .

- 消費電流 : 700 mA (起動時 : 1 A)
- 消費電力 : 8.4 W (起動時 : 12 W)
- サーボモータ (ROBOTIS Dynamixel MX-28)
 - 電圧 : 12 V
 - 消費電流 : 最大 1.4 A (待機時 : 100 mA)
(失速トルク : 2.5 N·m (at 12 V, 1.4 A) より)
 - 消費電力 : 最大 16.8 W (待機時 : 1.2 W)

LRFは平常時の8.4 Wを，サーボモータは常に回転することを考慮して最大値の16.8 Wを用いることとした．したがって，機構全体の消費電力は25.2 Wとなる．

4.1.8 電源の検討

使用するバッテリーは汎用のものとし，仕様は

- 出力電圧 : 7.2 V
- 容量 : 5200 mAh (37.44 Wh)

である．

LRFとモータに適したDCDCコンバータを調査した結果，COSEL ZUS250512が該当した．外形図をFig. 4.7に，仕様を以下に示す．

- 入力電圧 : 4.5–9 V

- ・ 出力電圧 : 12 V
- ・ 出力電流 : 1.7 A
- ・ 効率 : 82 %

これをLRFとモータに1つずつ用いる．

また，バッテリーの個数による動作時間について以下のように検討した．バッテリーの使用可能容量は，DCDCコンバータの効率を考慮して

$$37.44 \times 0.82 \cong 30.70 \text{ Wh}$$

となる．1つをLRFとサーボモータ両方に使う場合，動作時間は

$$30.70/25.2 \cong 1.22 \text{ h} \cong 1 \text{ h } 13 \text{ min}$$

となる．また，2つをLRFとサーボモータ各々に使う場合，動作時間は

- ・ LRF
 $30.70/8.4 \cong 3.655 \text{ h} \cong 3 \text{ h } 39 \text{ min}$
- ・ モータ
 $30.70/16.8 \cong 1.827 \text{ h} \cong 1 \text{ h } 50 \text{ min}$

となる．本機構ではLRFとサーボモータで1つずつ2つのバッテリーを使用することとする．

4.1.9 DCDCコンバータ・バッテリーの配置

DCDCコンバータは，Fig. 4.8に示すように，ユニバーサル基板に取り付けた後，機構のベースの左右の内側側面に取り付けることとした．

バッテリーは，Fig. 4.9に示すように，機構の脇に取り付けることとした．ここではバッテリーが上下左右に動かないように部材を配置している．バッテリーホルダのタブは引っ張りばねを用いて開閉する．タブの可動範囲からばねの長さは19 mm–28 mm程度伸びればよいので，ミスマの引っ張りばねAUY3-15を用いることにした．仕様は以下のようになっている．

- ・ 自由長 : 15 mm
- ・ 最大長 : 31.6 mm
- ・ 最大荷重 : 2.25 N
- ・ 基準ばね定数 : 0.12 N/mm

このバッテリー格納部を機構の両側に配置する．

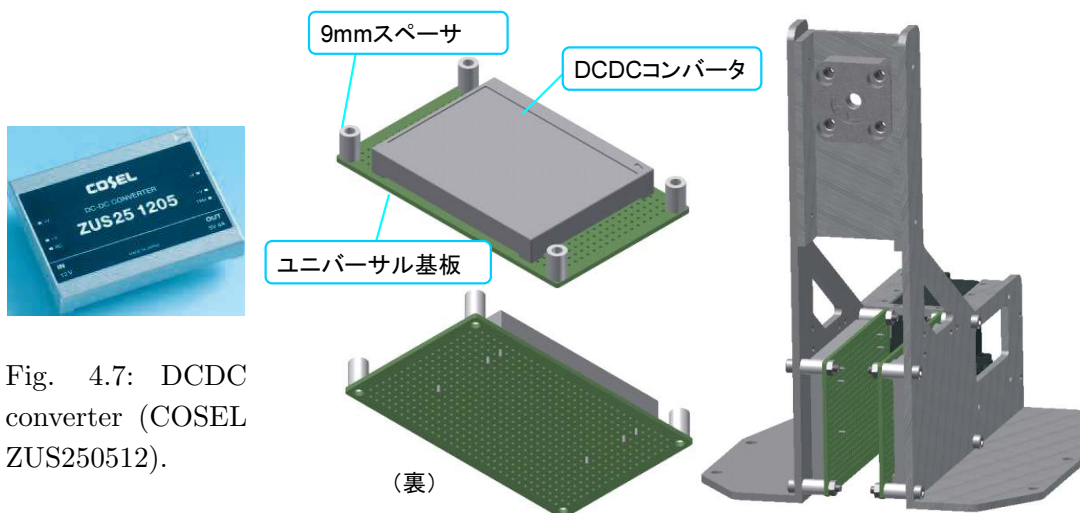


Fig. 4.7: DCDC converter (COSEL ZUS250512).

Fig. 4.8: Assembly of the DCDC converter.

4.1.10 ケーブル類の配置

遙動機構からの配線を簡潔にするために、サーボモータ MX-28 の USB-シリアル変換部分を機構内に収める。USB シリアル変換には Besttechnology の USB-3WAY を用いる。これは USB から Dynamixel のモータで使用する TTL, RS485, RS232C の信号に変換するものである。また、これとサーボモータをつなぐケーブルは DX/RX 用接続ケーブルを用いる。これは Dynamixel と RS485 の通信が行えるように配線されたケーブルである。これら 2 つの部品を Fig. 4.10 に示す。これらを Inventor 上でモデリングし、Fig. 4.11 のように配置した。

また、回転部分の動作範囲に入らないように、スイッチを Fig. 4.6 のように配置した。上や前に取り付けることも検討したが、上に取り付ける場合は広角カメラに接近し視野が狭くなる恐れがある。また前に取り付ける場合は、後ろに取り付ける場合と比較して前にせり出す量が増え、回転部分の近くになるため、最終的に後ろに取り付けることとした。

4.1.11 ベアリングの強度計算

本機構には Fig. 4.12 に示すように回転軸受け部分が 4 箇所ある。それぞれについて必要な耐荷重を計算し、ベアリングが適切であるか確認した。ここでは Fig. 4.12 に示すように、各部分の質量を考慮して計算を行った。

まず、LRF の両側の軸受け部分について検討する。ここでは LRF 部の重量がかかる

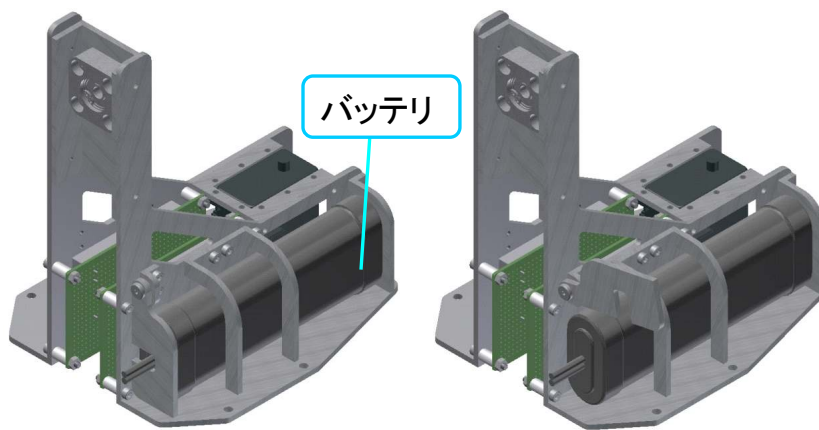


Fig. 4.9: Assembly of the battery holder.



Fig. 4.10: Top: USB-3WAY. Bottom: Connection cable for Dynamixel DX/RX servomotors.

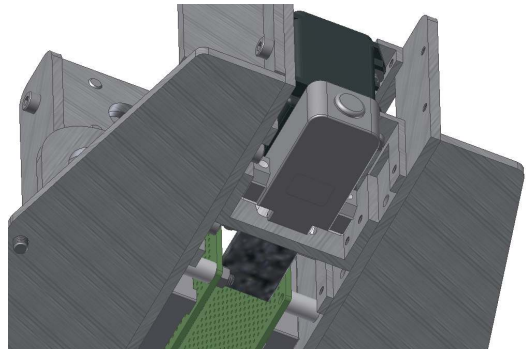


Fig. 4.11: Assembly of a USB-3WAY and a connection cable for Dynamixel DX/RX servomotors.

と想定した．すなわち，必要な全耐荷重は

$$0.269 \times 2 \times 9.8 \cong 5.27 \text{ N}$$

となる．ここでは安全のために2倍の余裕を持たせている．軸受けは2つあるのでそれぞれにこの半分の荷重2.64 Nがかかることになる．使用しているベアリングはミスマのSFL676ZZである．仕様は

- ・ 静定格荷重 C_{or} : 174 N
- ・ 動定格荷重 C_r : 421 N

となっている．ここで静定格荷重は静止時の定格であり，動定格荷重はこの荷重をかけて100万回転可能であることを示している．また添え字のrはラジアル方向（軸に

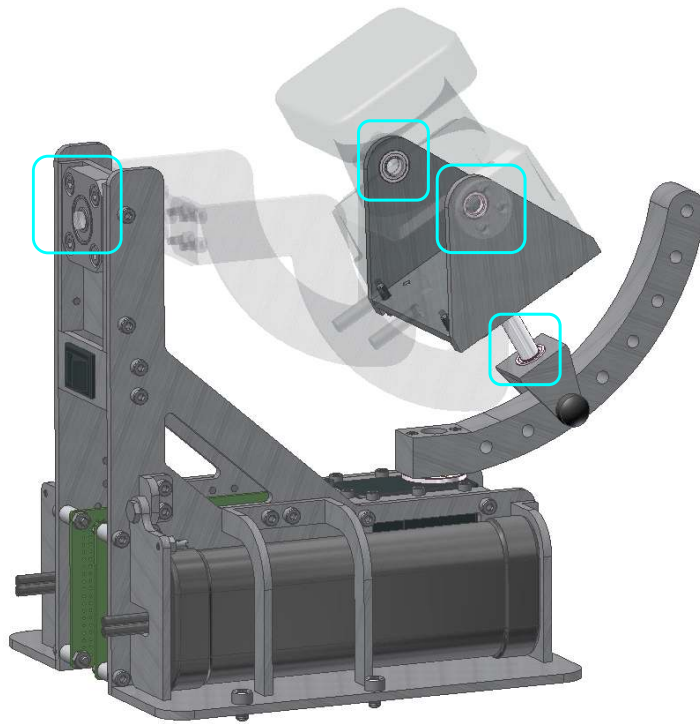


Fig. 4.12: Locations of bearings.

直角な方向)の荷重を示している．使用しているベアリングは静定格荷重において実際の荷重を大幅に上回っており，強度的に問題はないことが分かった．

次にLRF下のロッド部分の軸受けについて同様に検討する．ここではリンク部とLRF部の重量がかかると想定した．したがって，かかる荷重は

$$(0.269 + 0.038) \times 2 \times 9.8 \cong 6.01[\text{N}]$$

となる．この部分には上記と同じベアリングを用いる．

最後にリンクの付け根部分について検討する．ここにはリンク部とLRF部の重量がかかると想定されるため，かかる荷重は上記と同じように6.01 Nである．ここで用いているベアリングはミスミのSB606ZZであり，仕様は

- ・ 静定格荷重 C_{or} : 668 N
- ・ 動定格荷重 C_r : 1921 N

となっている．定格荷重がかかる荷重より大幅に大きいため十分な強度である．

また，リンクの付け根部分は片持ち梁のような構造になるため，ダブルベアリングのベアリングホルダを採用している．さらに，回転軸がベアリングから抜けないように，止め輪を取り付けている．ここではFig. 4.14に示すように，4つの回転軸それぞれに取り付けた．



Fig. 4.13: Left: Link part (38 g). Right: LRF part (269 g).

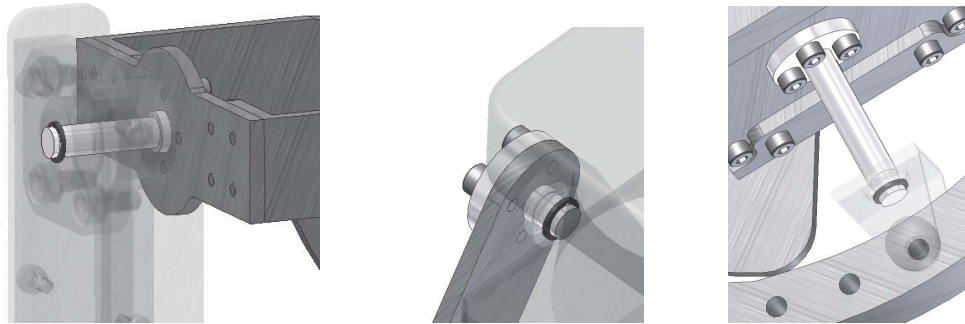


Fig. 4.14: Assembly of retaining rings of rotation shafts.

4.1.12 LRF レーザと機構の干渉

リンク部分とLRFレーザは干渉しないように設計したが、本機構では土台部分との干渉は避けられない。そこで、どの場合に土台とLRFレーザとの干渉があるか調査した。結果として、LRF傾斜角度が $10\text{--}50^\circ$ では干渉は発生しないことが分かった。一方でFig. 4.15,4.16に見られるように、LRF傾斜角度が $60\text{--}80^\circ$ において干渉が見られた。したがって、設計した機構は $10\text{--}50^\circ$ の傾斜角度においては機構自体とLRFレーザの干渉はないが、 $60\text{--}80^\circ$ においては干渉は避けられないことが分かった。

4.1.13 設計のまとめ

本節では、三次元LRFデータを用いた立体視の実験をリアルタイムで行うために、新たな三次元スキャン機構を設計した。具体的には、高速で三次元スキャンが可能な従来の遥動機構のLRF傾斜角度を可変に改良した。また、センサ・サーボモータの選定、電源の設計、およびそれらの配線方法や通信線の配置の検討、軸受け部分の強度

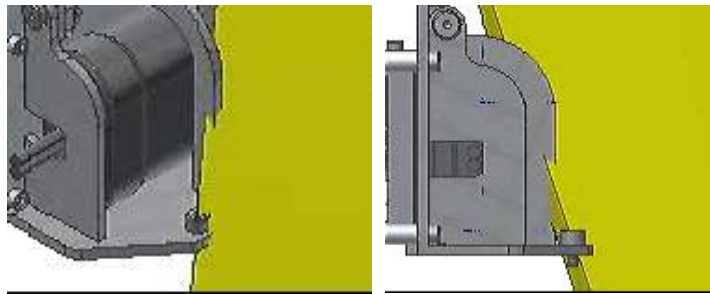


Fig. 4.15: LRF laser inference with the base (60°).

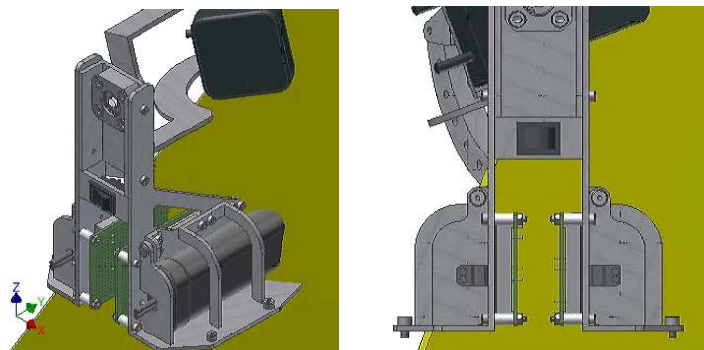


Fig. 4.16: LRF laser inference with the base (80°).

計算を行った．さらに，ほぼ完成した設計に対して，LRF レーザの機構本体との干渉の調査，および期待されるスキャン範囲の描画を行った．設計段階では，設定した傾斜角度において目的の動作が実現できていることが分かった．

次節以降で機構を実際に製作し，この機構を用いて三次元スキャンをリアルタイムで行いながらロボットの立体視による遠隔操作の実験を行う．

Table 4.3: Specifications and requirements for a real-time 3D laser scanner.

	Specification	Requirement
Range [m]	0.1 to 30	0.1 to 8 or more
Accuracy [m]	Max. ± 0.05	$< \pm 0.1$
Vertical FOV [$^{\circ}$]	Max. 160	$\cong 180$
Scanning time [s]	1 $\sim$	< 6.4
Resolution [rad]	0.017 $\sim$	< 0.025
Use environment	In&outdoor	In&outdoor

4.2 高速な広視野角三次元レーザスキャナの開発

前節では、従来の三次元スキャン装置の中に必要な条件を満たすものがなかったため、新たな三次元スキャン装置を設計した．本節では、その設計に基づいてFig. 4.17に示す三次元スキャナを開発した．Table 4.3に示すように、本研究で開発したスキャナはすべての必要条件を満たしている．

新たに開発したスキャナの特徴としては、

1. 上下の視野角が水平視野角の全方位において等しい
2. 計測点密度の偏りが小さい
3. 揺動アクチュエータは等速回転するため制御が容易
4. LRF本体は無限回転しないためスリップリングが不要
5. 環境やタスクに応じて垂直視野角を調整可能

があげられる．新たに開発したスキャナの定数と変数をFig. 4.18に示す．ここで

l_1, l_2 [m]: Fig. 4.18の青い三角形の各辺の長さ

α [rad]: LRFの取り付け傾斜角度

θ_p [rad]: 赤い円弧矢印で示されたピッチ軸周り回転角度

θ_r [rad]: 赤い円弧矢印で示されたロール軸周り回転角度

θ_m [rad]: 赤い円弧矢印で示されたモータ回転角度

である．

新たに開発したスキャナには垂直視野角を調整できる機能がある．これは、ピッチ・ロール軸周り二自由度の揺動運動により三次元スキャンを実現した先行研究の回転式揺動機構 [3] と比較した際の利点である．先行研究の回転式揺動機構は、1つのサーボモータのみで駆動され、ピッチ・ロール軸周りに固定振幅の揺動運動を発生させている．本研究では、この回転式揺動機構について垂直視野角を変更できるように改良を行った．Fig. 4.18のRodの取り付け位置はLink Aに沿って変更することができ、これに



Fig. 4.17: Real-time 3D laser scanner which we have developed.

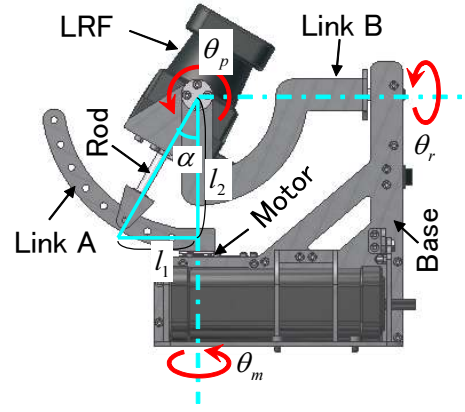


Fig. 4.18: Definition of constants and variables of the developed scanner.

よって LRF の傾斜角度を $10\text{--}80^\circ$ まで変化させることで垂直視野角を調整することができる．ここで LRF の傾斜角度 α と垂直視野角 V の関係は

$$V = 2\alpha \quad (4.3)$$

と表される． $V = 60^\circ$ に設定した場合の三次元スキャンの 1 周期の動作を Fig. 4.19 に示す．また，新たに開発したスキャナのスキャン範囲を Fig. 4.20 に示す．ここでは垂直視野角 V によって変化するスキャン範囲を OpenGL を用いて描画している．

開発したスキャナは，垂直視野角が小さいと三次元点群の密度は高く，またスキャン範囲は狭くなり，サーボモータの回転速度を上げると三次元点群の密度は低くなる．この設定はスキャナの使用環境やタスクに応じて変更することができる．開発したスキャナに使用されているサーボモータは ROBOTIS Dynamixel MX-28 であり，LRF は HOKUYO UTM-30LX-EW を用いている．本 LRF は水平視野角が 270° で最大 30 m の範囲を測距可能である．走査ステップ角は 0.25° であるので一度の走査で 1,081 個の点群が取得できる．ここで一回あたりのスキャンは 0.025 s 間隔で行われる．開発したスキャナで取得される三次元点数は以下の式で表せる．

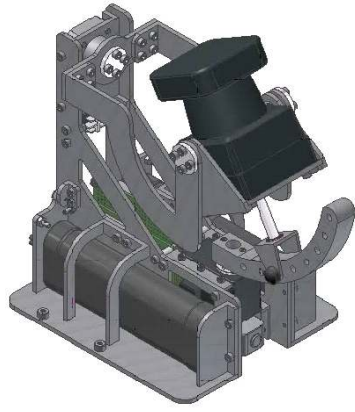
$$n_p = n_{p1} T / t_s \quad (4.4)$$

ここで

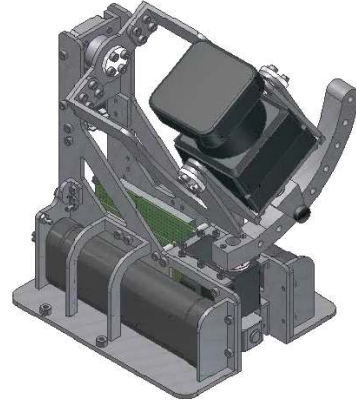
n_p : 一回の三次元スキャンで取得される点数

n_{p1} : 一回の二次元スキャンで取得される点数

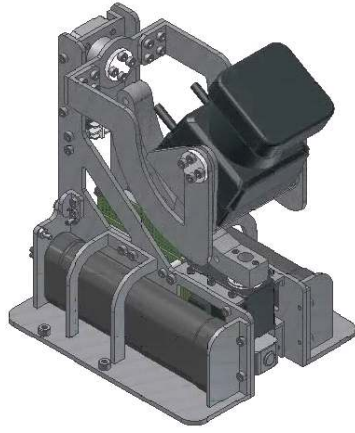
t_s [s]: 一回の二次元スキャン周期



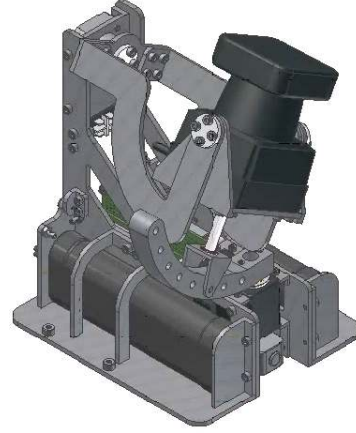
(a) $\theta_m = 0^\circ$.



(b) $\theta_m = 90^\circ$.



(c) $\theta_m = 180^\circ$.



(d) $\theta_m = 270^\circ$.

Fig. 4.19: Oscillating movement of LRF in one cycle of 3D scanning of the developed scanner in the case of $V = 60^\circ$.

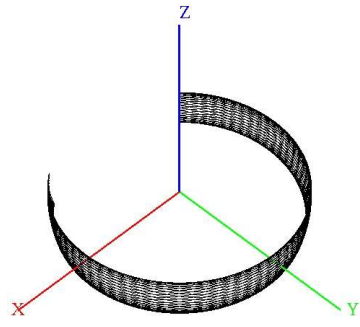
である．開発したスキャナの場合， $n_{p1} = 1,081$ ， $t_s = 0.025$ s， $T = 6.4$ s であるので， $n_p = 276,736$ となる．

4.2.1 三次元点群の座標変換

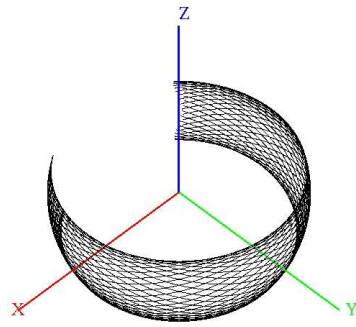
ロール・ピッチ軸角度の計算

計測された点群はスキャナのロール・ピッチ軸角度およびロボット座標系とスキャナ座標系との平行移動距離を用いてワールド座標系での座標に変換される．ロール・ピッチ角度はモータ回転角度から計算される．計算に用いる変数・定数を Fig. 4.18 に示す．ここで

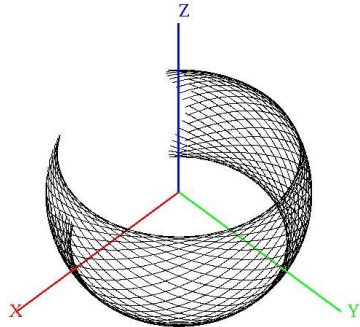
$$l_1 = l_2 \tan \alpha \quad (4.5)$$



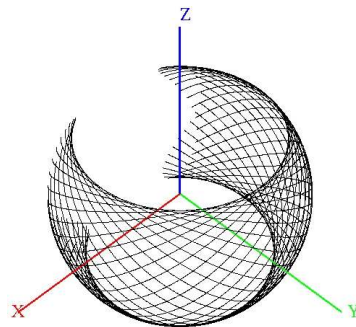
(a) $V = 20^\circ$.



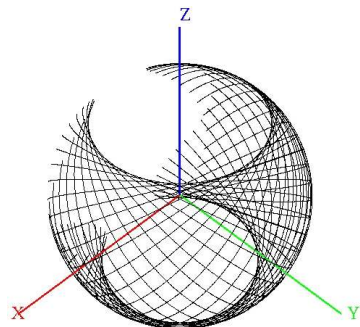
(b) $V = 40^\circ$.



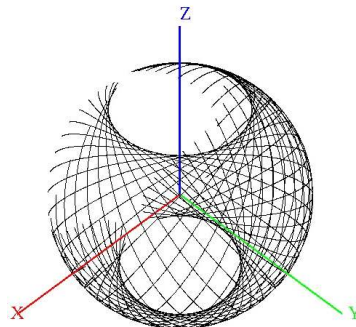
(c) $V = 60^\circ$.



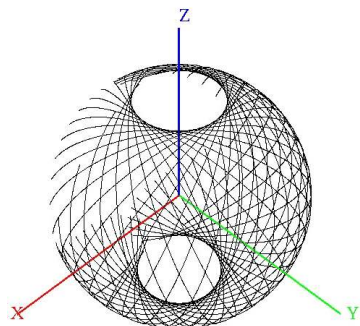
(d) $V = 80^\circ$.



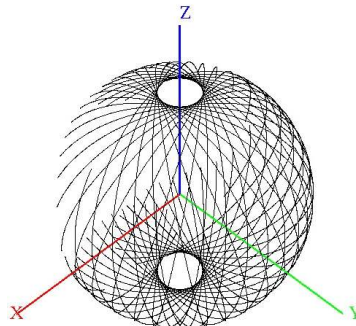
(e) $V = 100^\circ$.



(f) $V = 120^\circ$.

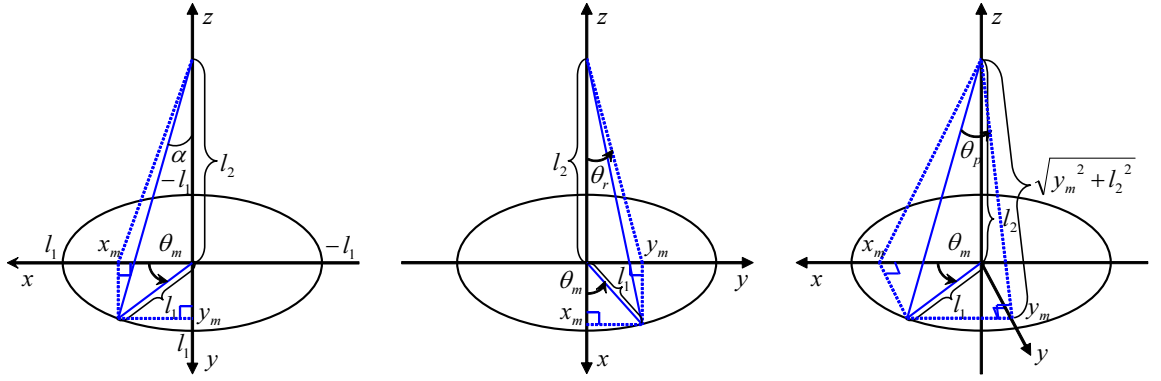


(g) $V = 140^\circ$.



(h) $V = 160^\circ$.

Fig. 4.20: 3D Scanning range of the developed scanner.



(a) For the motor rotation angle θ_m . (b) For the roll rotation angle θ_r . (c) For the pitch rotation angle θ_p .

Fig. 4.21: Variable definitions.

である．また，Fig. 4.21(a) に示すように，モータの回転角度に関する変数を定義する．ここで

x_m, y_m [m]: l_1 の軌跡の座標

$$\begin{aligned} x_m &= l_1 \cos \theta_m \\ y_m &= l_1 \sin \theta_m \end{aligned} \quad (4.6)$$

とする．

ロール角度 θ_r は Fig. 4.21(b) より

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{y_m}{l_2} \right) \quad (4.7)$$

となり，ピッチ角度 θ_p は Fig. 4.21(c) より

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{-x_m}{\sqrt{y_m^2 + l_2^2}} \right) \quad (4.8)$$

となる．

モータ角度の線形補間

LRF からのスキャンデータ取得時刻とモータ角度の取得時刻はずれがあるため，Fig. 4.22 のように線形補間して求める．

$$\theta_{t_s} = \omega_{t_1} t_s + \psi_{t_1} \quad (4.9)$$

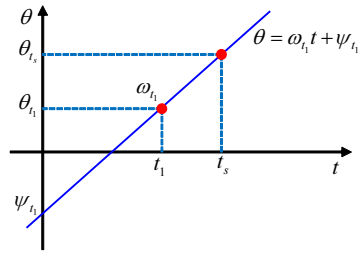


Fig. 4.22: Linear interpolation of the motor rotation angle θ_m .

ただし

$$\psi_{t_1} = \theta_{t_1} - \omega_{t_1} t_1 \quad (4.10)$$

ここで

θ_{t_s} [rad]: スキャン時刻 t_s [s] におけるモータ角度

θ_{t_1} [rad]: ある時刻 t_1 [s] におけるモータ角度

ω_{t_1} [rad/s]: ある時刻 t_1 [s] におけるモータ角速度

ψ_{t_1} [rad]: ある時刻 t_1 [s] におけるモータ角度の切片

である。

4.3 開発したリアルタイム三次元レーザスキャナの性能評価

ここでは、開発したスキャナと先行研究の回転式揺動機構と比較した際の優位性を2つの実験により確かめる．先行研究の回転式揺動機構では、垂直視野角は $V=56^\circ$ となっている．そこでこれを再現するため、本研究で開発したスキャナにおいて垂直視野角を $V=60^\circ$ に設定して比較することとした．

4.3.1 三次元スキャンの点密度とスキャン速度の向上

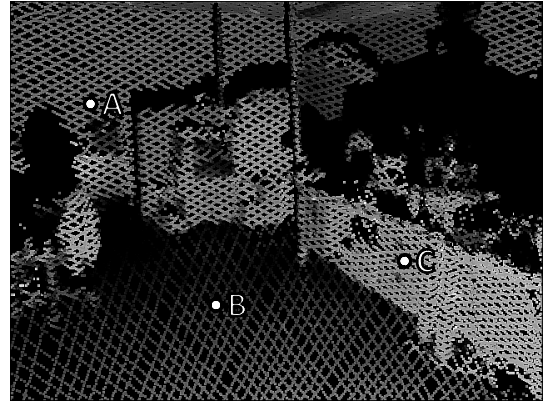
Fig. 4.23(a)に示す環境で三次元スキャンを行った結果をFig. 4.23(b)–(d)に示す．黒い部分はスキャン点がない領域である．また、レーザの反射強度に応じて点群に黒–白の色を付加している．黒いほうが強度の低いことを示している．

点密度についての評価手法と結果を以下に示す．まず、1周期分の三次元点群を収集する．これは装置のモータが1回転する間に三次元点群を取得することで達成した．次に、Fig. 4.23のA,B,C各点において、各点を中心とする一辺が0.2 mの立方体を考え、これに含まれる点の数をカウントする．その後、立方体の体積で割って単位体積当たりの点数を求めた．上記を3つの設定($V=60^\circ$, $T=6.28$ s), ($V=20^\circ$, $T=6.28$ s), ($V=20^\circ$, $T=3.14$ s)で三次元スキャンした結果に対して行った．また各設定において3回試行し、その平均を求めた．結果の平均のグラフをFig. 4.24に示す．ここで青いバーは先行研究の回転式揺動機構による結果、赤と緑のバーは開発したスキャナによる結果を示している．結果をみると、赤いバーは青いバーに比べてはるかに高い密度を示していることが分かる．したがって、開発したスキャナは先行研究の回転式揺動機構と比較して点密度の点で大幅な向上が達成できたといえる．この性能は、三次元点群を用いて特定の対象物を見つけたり、複雑な入り組んだ配管設備の点検を行ったりする場合など、高いクオリティの三次元点群が必要な時に役立つ．

また、スキャン速度に関して、緑のバーは赤いバーの設定でスキャン速度を2倍に設定した際の点密度を示している．緑のバーはすべてにおいて青いバーを上回っていることから、青いバーの点密度で十分な場合は、このスキャン速度を用いることができる．たとえば、速い周期で三次元スキャンを行って大まかに環境を認識したり、対象物探索においては狭い垂直視野角と遅いスキャン周期で三次元スキャンを行って詳細に環境を調べたりするなど、異なる用途に対応ができる．したがって、開発したスキャナは先行研究の回転式揺動機構と比較してスキャン速度の点でも優位であることが確認された．以上より、三次元スキャンの点密度とスキャン時間の設定を環境やタスクに応じて変えることが必要になると考えられる．スキャン時間は現在もリアルタイムで変更可能であるが、垂直視野角の調整による点密度は現在リアルタイムに変更できないため、今後は垂直視野角をアクチュエータでリアルタイムに変更できるメカニズムを検討する必要がある．



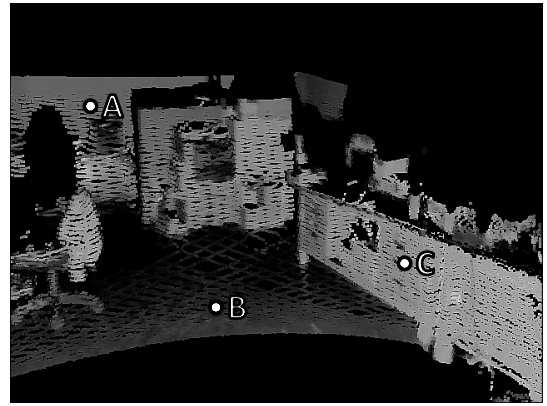
(a) Experimental environment.



(b) Former scanner ($V=60^\circ$, $T=6.28$ s).



(c) Our developed scanner ($V=20^\circ$, $T=6.28$ s).



(d) Our developed scanner ($V=20^\circ$, $T=3.14$ s).

Fig. 4.23: Comparison of real-time 3D scanning by changing the vertical FOV and one cycle of 3D scanning. The case (b) indicates the result of the former swing mechanism [3]. The cases (c) and (d) indicate the results of our developed real-time 3D scanner. A, B and C indicate where their point densities are calculated.

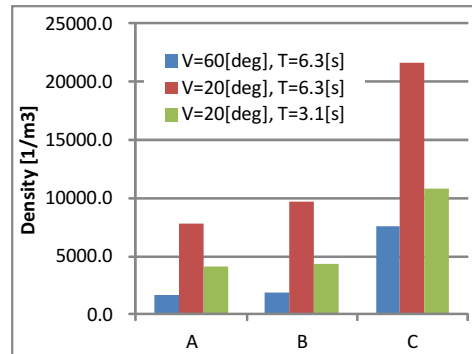


Fig. 4.24: Averaged point densities at A, B and C in Fig. 4.23. The blue bars indicate the result of the former swing mechanism [3]. The red and green bars indicate the results of our developed real-time 3D scanner.

4.3.2 三次元スキャンによる障害物検出範囲の向上

移動ロボットの遠隔操作においては、ロボットが障害物に衝突したりスタックしたりするのを避けるために、リアルタイムの障害物検出が重要である．開発したスキャナでは、垂直視野角を $V=20\text{--}160^\circ$ に変更することが可能である．この優位性をFig. 4.25(a)の環境で三次元スキャンを行った結果を比較することで示す．環境にはロボットの上いくつかのパイプやプレート、またロボットの近くの床面には黒い箱形状の障害物が置かれている．これらの障害物を、先行研究の回転式揺動機構と開発したスキャナが検出できるかどうか実験を行った．実験では先行研究の回転式揺動機構の設定として $V=60^\circ$ 、開発したスキャナの設定として $V=140^\circ$ とした．スキャン時間については、ここでは障害物に配管等を想定しているため以下のように設定した．第2章で示した式(4.1) (4.2)における最小の障害物のサイズ s_o として配管の直径20 mmを設定し、また障害物は静止していることから $v_o=0\text{ m/s}$ として以下のように計算した．

$$d = s_o/r_s = 0.02/0.025 = 0.8\text{ m} \quad (4.11)$$

$$T = \frac{d}{v_o + v_r} = \frac{0.8}{0 + 0.25} = 3.2\text{ s} \quad (4.12)$$

ただし、

s_o [m]: 障害物の大きさ (幅または高さ)

v_o [m/s]: 障害物の想定移動速度

v_r [m/s]: ロボットの移動速度

d [m]: 障害物検出可能距離

r_s [rad]: スキャナの分解能

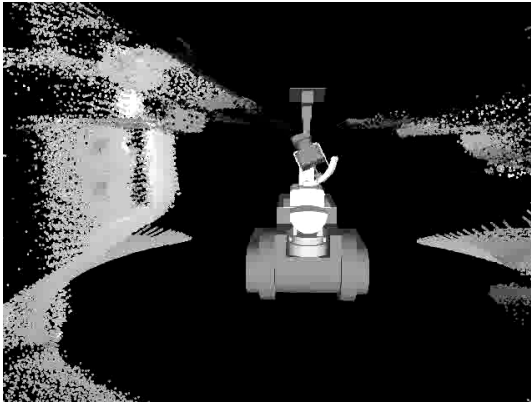
T [s]: 三次元スキャン周期

である．

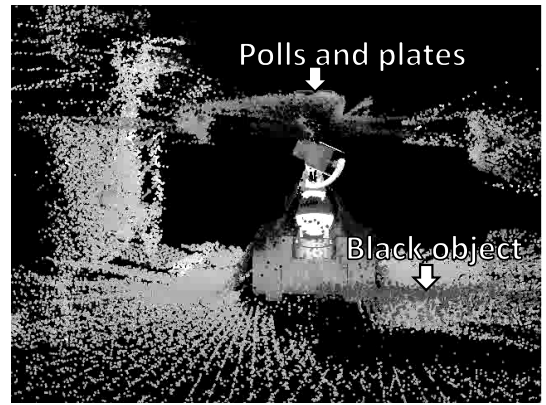
この環境において先行研究の回転式揺動機構の条件 $V=60^\circ$ では、Fig. 4.25(b)に示すようにロボットの上にある障害物を検出することができない．また、ロボットの足元にあるはずの障害物も検出できていない．したがって、このままロボットが前進すると障害物に衝突してしまう．一方で、新たに開発したスキャナでは、Fig. 4.25(c)に示すようにロボットの上にある障害物を検出できており、このまま前進すると衝突することが分かる．また、足元にある障害物を検出できており、このまま前進すると衝突することを認識できる．ただし、ロボットの周囲にある点群はロボットがスキャンされたことを示している．以上のように、三次元スキャンによる障害物検出範囲が増大していることが分かる．この性能向上は、リアルタイムに変化する動的な環境において、ロボットを遠隔操作するときにより有利であると考えられる．



(a) Experimental environment for the range of obstacle detections. There are some polls and plates over the mobile robot and a black object on the ground near the mobile robot.



(b) Former scanner ($V=60^\circ$, $T=3.2$ s).



(c) Our developed scanner ($V=140^\circ$, $T=3.2$ s).

Fig. 4.25: Comparison of ranges of obstacle detections. The case (b) indicates the result of the former swing mechanism[3]. The case (c) indicates the result of our developed real-time 3D scanner.

4.3.3 現状の課題

まず, LRF 傾斜角度が 80° ではモータ角度 0° , 180° 付近で座標変換された点群にゆがみが出てくる問題がある. これは, Fig. 4.26 に示すように, LRF 傾斜角度が増加するにつれ, モータ角度の変化量に対するロール軸角度の変化量が大きくなるため, 機構の微妙なガタ, 組み立て時のズレが増幅されることが原因と考えられる. ここでロール角度のモータ角度に対する傾きを考えると, 0° 付近で最大となり

$$\frac{d\theta_r}{d\theta_m} = \frac{1}{1 + \left(\frac{l_1 \sin \theta_m}{l_2}\right)^2} \cdot \frac{l_1 \cos \theta_m}{l_2}$$

$$\frac{d\theta_r}{d\theta_m}(0) = \frac{l_1}{l_2} = \tan \alpha \cong 5.67$$

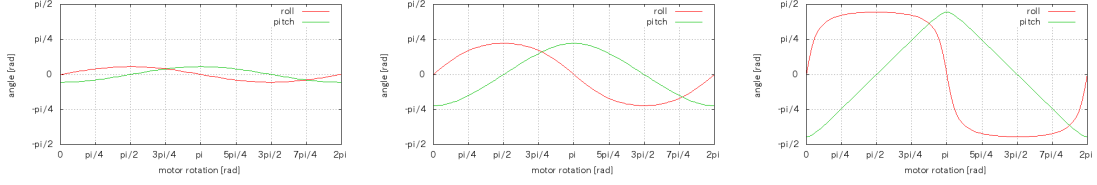


Fig. 4.26: Relationships between the motor rotation angle θ_m and the roll and pitch angles θ_r, θ_p , with $\alpha = 10, 40, 80^\circ$ from the left.

となる．この場合はモータ角度 1° のズレに対してロール角度が 5.67° ずれることを意味している．ガタやズレが一定であれば対応は可能かもしれない．

2つ目は，モータ角速度上げると座標変換結果のゆがみが大きくなる点である．これは慣性モーメントの影響が1つの原因と考えられる．ロール・ピッチ軸角加速度増加に伴い，LRF 取付部の回りにくさ（慣性モーメント）が増加しているため，追従遅れが発生していると見られる．これに対して何らかの補償を入れることが必要かもしれない．またはソフトウェアの問題の可能性もある．ROSによるモータやLRFの時刻取得の誤差が影響しているか，tfまたはモータ角度の線形補間方法に問題があるのかもしれない．

3つ目は，LRF 傾斜が 80° ではモータの回転が高速になるほど機構の振動が増大する点である．これは原因として機構のガタ，慣性モーメントが考えられるため，衝撃吸収材を取り付ける，問題にならない回転速度でスキャンする，問題の位置では回転速度を落とす，などが対処法として考えられる．

4.4 RANSACアルゴリズムを用いた平面検出によるスキャン速度向上

1つのLRFを用いた三次元スキャンにおいては、スキャン周期を小さくするためにスキャン速度を大きくすると点密度が低下するという関係がある。このようにスキャン速度と点密度は互いにトレードオフの関係にある。そこで、本節ではこれらの問題を解決することを目指す。具体的な解決案としては、以下のようなことが挙げられる。

- ・リアルタイム性（スキャン速度）の問題の解決案
 - 新たなハードウェアの導入（前節まで）
 - スキャン点数を減らす
 - 効率的なスキャンアルゴリズムの開発（ピッチ・ヨー回転の調整）（前節まで）
- ・解像度の問題の解決案
 - 任意の指定箇所を詳細スキャン
 - 少ない点群でも分かりやすく表示するアルゴリズムの開発
 - * 立体視の利用（前節まで）
 - * 家具・平面等のオブジェクトの推定・置換
 - スキャンを重ねるごとに詳細度を向上させる方法の検討
 - * スキャンマッチング等
- ・スキャン速度と解像度のトレードオフを評価する評価関数の提案
 - 妥当といえるトレードオフを決める

このうち、本研究では特に解像度の問題の解決案のオブジェクト推定として、RANSAC (RANdom SAmple Consensus) による平面検出の実装を行う。その後、RANSAC アルゴリズムで検出された平面のうち重複する部分を統合し、凸包アルゴリズムの一つである Graham 走査法を用いて凸包として描画する方法を実装する。評価実験では、同じ環境をスキャンした点密度の低いデータと高いデータを用いて上記手法を実行する。ここで、点密度が高いデータと低いデータのどちらの場合でも同じ結果が得られるならば、凸包が描画された部分に関しては解像度の小さいスキャンでも十分であるといえる。この方法を用いて3パターン2種類の点密度のデータに実行した結果を比較し、実際に同様の結果が得られることを確認する。

4.4.1 RANSAC による平面領域の抽出

RANSAC (RANdom SAmple Consensus) アルゴリズム [70, 71] は、ノイズを含んだデータから、何らかの相関を示すパラメータ x を求める方法である。具体的な方法を以下に示す。

・ 仮定

1. パラメータ $\mathbf{x}$ は N 個のデータで推定できるとする.
2. 全データ数を M 個とする.
3. ランダムに選択されたデータがよいモデルの一部である確率を P_g とする.
4. 1つも適合データが見つからずに終了する確率を P_{fail} とする.

・ 手順

1. ランダムに N 個のデータを選ぶ.
2. パラメータ $\mathbf{x}$ を推定する.
3. 許容範囲内で $\mathbf{x}$ に当てはまるデータを探し, その個数を K とする.
4. K が十分大きければ, その $\mathbf{x}$ を求めるパラメータとし終了する.
5. 1-4 を L 回繰り返す.
6. ここまでに見つからなければ失敗とする.

平面検出に利用する場合に必要な事柄について, 仮定(1)から検討する. Fig. 4.27 に示すように, 点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ を通り, 法線ベクトル $\mathbf{n} = (a, b, c)$ である平面の方程式は

$$a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0$$

または

$$\begin{aligned} ax + by + cz + d &= 0 \\ (d &= -ax_0 - by_0 - cz_0) \end{aligned}$$

と表される. これをベクトルで表現すると

$$\mathbf{n} \cdot \overrightarrow{P_0P} = 0$$

となる. ここで $P(x, y, z)$ は動点である. したがって, 法線ベクトルを求めれば平面を表すことができる. そこで, $\mathbf{n} = (a, b, c)$ が求めるパラメータ $\mathbf{x}$ になる. これは以下のように求められる.

$$\mathbf{n} = \frac{\overrightarrow{P_0P_1} \times \overrightarrow{P_0P_2}}{|\overrightarrow{P_0P_1} \times \overrightarrow{P_0P_2}|}$$

ただし

$$P_0, P_1, P_2 : \text{任意の点}$$

である. 3点あれば求められるため, 推定に必要なパラメータの数は $N = 3$ である.

仮定2において, 全データ数は $M = 300 \times 1081 = 324300$ 個とする. また, ここでは後に必要となるため, データ処理前に全点の法線ベクトルを計算しておく. ここで, 各点

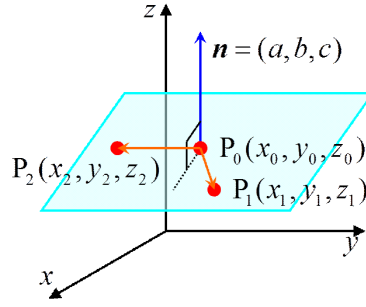


Fig. 4.27: Normal vector which composes a plane.

は近傍2点からなる平面上にあると仮定すると，法線ベクトルはそれらから計算することができる．今回は，Fig. 4.28に示すように，LRFの回転を利用して，データの順番により以下のようにして最近傍点を決定している．3つの点を $P_A(\mathbf{p}_A)$, $P_B(\mathbf{p}_B)$, $P_C(\mathbf{p}_C)$, (i, j) 番目の点の法線ベクトルを $\mathbf{n}_p(i, j)$, i, j 方向の最大値をそれぞれ $i_{\max}, j_{\max}$ としたとき，

$$\mathbf{n}_p(i, j) = \frac{\overrightarrow{P_AP_B} \times \overrightarrow{P_AP_C}}{|\overrightarrow{P_AP_B} \times \overrightarrow{P_AP_C}|}$$

と計算できる．また， (i, j) 番目の点の位置ベクトルを $\mathbf{p}(i, j)$ とすると

$$\mathbf{p}_A = \mathbf{p}(i, j)$$

となり， $i \neq i_{\max}, j \neq j_{\max}$ のとき

$$\begin{cases} \mathbf{p}_B = \mathbf{p}(i+1, j) \\ \mathbf{p}_C = \mathbf{p}(i, j+1) \end{cases}$$

$i = i_{\max}, j \neq j_{\max}$ のとき

$$\begin{cases} \mathbf{p}_B = \mathbf{p}(i-1, j) \\ \mathbf{p}_C = \mathbf{p}(i, j+1) \end{cases}$$

$i \neq i_{\max}, j = j_{\max}$ のとき

$$\begin{cases} \mathbf{p}_B = \mathbf{p}(i+1, j) \\ \mathbf{p}_C = \mathbf{p}(i, j-1) \end{cases}$$

$i = i_{\max}, j = j_{\max}$ のとき

$$\begin{cases} \mathbf{p}_B = \mathbf{p}(i-1, j) \\ \mathbf{p}_C = \mathbf{p}(i, j-1) \end{cases}$$

となる．今回は $i_{\max} = 299, j_{\max} = 1080$ とした．ただし，3点のうち1つでもエラー値の場合は $\mathbf{n}_p(i, j) = (0, 0, 0)$ を割り当てることとした．

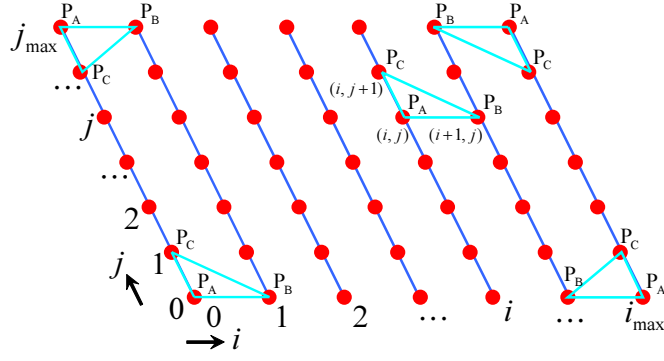


Fig. 4.28: Calculation of normal vectors in the point cloud.

以上で求めた法線ベクトルは、向きを考慮しておらず、スキャン位置から見て逆方向になっている可能性がある．そこで、これを補正する必要がある．以下のようにして補正する．各点の法線ベクトルの張る平面は、スキャン位置から見て表側になっているはずである．つまり、Fig. 4.29に示すように、スキャン位置 $P_s(\mathbf{p}_s)$ からスキャン点 $P(\mathbf{p})$ へのベクトル $\mathbf{p} - \mathbf{p}_s$ と、 $P(\mathbf{p})$ の法線ベクトル $\mathbf{n}_p$ とのなす角 θ が $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ となっているとき、法線ベクトルは逆向きになっているといえる．ここで

$$\begin{aligned} 0 &\leq \cos \theta \leq 1 \\ 0 &\leq |\mathbf{n}_p| |\mathbf{p} - \mathbf{p}_s| \cos \theta \leq |\mathbf{n}_p| |\mathbf{p} - \mathbf{p}_s| \\ 0 &\leq \mathbf{n}_p \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{p}_s) \leq |\mathbf{p} - \mathbf{p}_s| \end{aligned}$$

となるので、このとき修正値 $\mathbf{n}'_p = -\mathbf{n}_p$ とする．ただし、

$$\mathbf{p}_s = {}^W\mathbf{T}_L \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

である．ここで

${}^W\mathbf{T}_L$: ワールド座標系 $\rightarrow$ LRF 座標系までの同次変換行列

を示す．また、ここではDynamixelの角度を考慮せずに計算を行っている．計算した法線ベクトルを表示した例をFig. 4.30に示す．ここで橙色の点はスキャン点、水色の直線は法線ベクトルを示している．

仮定3,4については、まず全データの10%が平面上の点だとすると $p_g = 0.1$ となり、0.1%の確率で平面検出に失敗するとすると $p_{fail} = 0.001$ となる．現在はとりあえずこれで動作させている．

次に、実際の手順1から検討していく．ランダムに N 個のデータを選ぶために、点の番号を示す $0-(M-1)$ までの乱数を発生させ、これから重複しないように3点を選

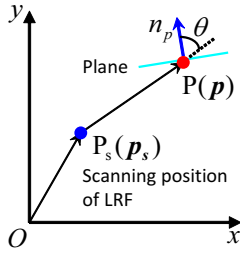


Fig. 4.29: An example of a wrong direction of a normal vector. (in the two-dimensional case)

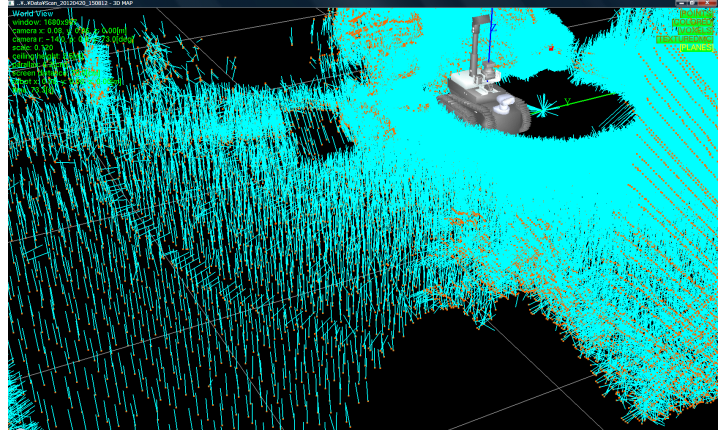


Fig. 4.30: Illustration of normal vectors.

択する．この点を P_0, P_1, P_2 とする．ここで，すでに検出された平面上の点は除き，エラー値も除くこととする．

手順2では，選んだ3点から法線ベクトル $\mathbf{n}$ を計算する．この後，スキャン位置に対して正しい方向に向くように補正する．また，この法線ベクトルが適合するものかどうか判断するため，Fig. 4.31 に示すように， P_0, P_1, P_2 の法線ベクトル $\mathbf{n}_{p0}, \mathbf{n}_{p1}, \mathbf{n}_{p2}$ と比較する．このとき，なす角度 θ が

$$-20^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$$

つまり

$$0.94 \leq \cos \theta \leq 1$$

$$0.94|\mathbf{n}||\mathbf{n}_{pi}| \leq |\mathbf{n}||\mathbf{n}_{pi}| \cos \theta \leq |\mathbf{n}||\mathbf{n}_{pi}|$$

$$0.94 \leq \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_{pi} \leq 1$$

に当てはまらなければ，この点は不適当として手順1に戻る．

手順3では，求めた法線ベクトルが妥当かどうか，他のデータを当てはめてどれだけ適合するかを判定する．ここでは，Fig. 4.32 に示すように，ある点 $P(x, y, z)$ と推定した平面との距離が $d < 10[\text{mm}]$ であれば，その点は平面上の点と判断する．その際， K のカウントを1つ増加させる．ここで d については

$$d = \left| \overrightarrow{P_0P} \cdot \mathbf{n} \right|$$

と計算する．

手順4では， $K > 10000$ になればそのときの法線ベクトルを求めるパラメータとして終了する．

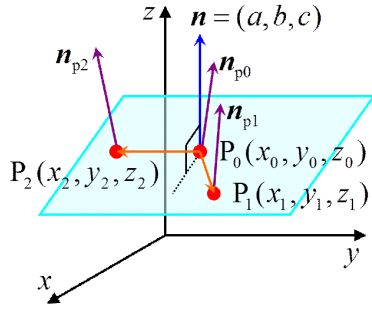


Fig. 4.31: Normal vectors which composes a plane ($\mathbf{n}$) and of the three points ($\mathbf{n}_{p0}, \mathbf{n}_{p1}, \mathbf{n}_{p2}$).

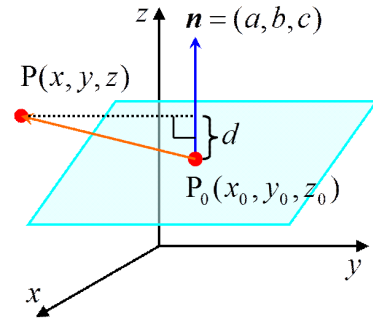


Fig. 4.32: Distance between a point and an estimated plane.

手順5では，手順4にて終了条件を満たすまで手順1-4を L 回繰り返す．ここで L については

$$\begin{aligned}
 p_{fail} &= L \text{ 回連続で失敗する確率} \\
 &= (1 \text{ 回の試行が失敗する確率})^L \\
 &= (1 - (1 \text{ 回の試行が成功する確率}))^L \\
 &= (1 - (1 \text{ つのランダムデータがモデルに適合する確率})^N)^L \\
 &= (1 - (p_g)^N)^L
 \end{aligned}$$

から

$$L = \frac{\log(p_{fail})}{\log(1 - (p_g)^N)}$$

と計算できる．

手順6まできて，何も見つかってない場合は失敗とする．データ内に複数の平面がある場合は，以上の手順1-6を $M - K$ 個の点に対して繰り返し行う．

4.4.2 平面検出結果

以上の処理を実行した結果をFig. 4.33に示す．ここでは複数個の平面を検出し，対応する点に異なる色をつけて表示している．天井と床に最も平面が多いことがわかった．次節では，この検出結果に基づいて平面領域を1枚のポリゴンで表示することで，わかりやすい表示にすることを検討する．さらに，今回の方法で，間引いて三次元スキャンしたデータに対しても同様に平面検出が行えるかを確認する．

duplication						parallel					
plane	1	2	3	4	5	plane	1	2	3	4	5
1	T	F	T	F	F	1	T	F	F	F	F
2	F	T	F	T	T	2	F	T	T	T	T
3	T	F	T	F	F	3	F	T	T	T	T
4	F	T	F	T	T	4	F	T	T	T	T
5	F	T	F	T	T	5	F	T	T	T	T

AND operation

integration					
plane	1	2	3	4	5
1	T	F	F	F	F
2	F	T	F	T	T
3	F	F	T	F	F
4	F	T	F	T	T
5	F	T	F	T	T

T: true
F: false

Fig. 4.34: An example of integrated planes' table. Upper left: a table of planes with duplicated points. Upper right: a table of planes regarded as parallel. Bottom: an integrated planes' table.

例を Fig. 4.34 下に示す. ここでは結果として統合平面の組み合わせは, (1),(2,4,5),(3) となっている.

平面の統合処理の結果

以上の処理を高密度のデータに対して実行した結果を Fig. 4.35 に示す. 床と天井がそれぞれ1つの色で表示され, それぞれ1つの平面に統合されていることが分かる.

4.4.4 凸包による統合平面の描画

統合した平面を描画する際には, その輪郭に沿って描画することが適当であると考えられる. その方法として本論文では凸包を求めるアルゴリズムを用いることとした. 凸包 (Convex Hull) とは, 対象の点群を含む最小の凸多角形のことである.

参考文献 [72] によると, 凸包アルゴリズムには以下に示すものがある.

- 直接法: データ数 n に対して $\mathcal{O}(n^3)$ の計算量
- 包装法: 最悪時 $\mathcal{O}(n^3)$ の計算量
- Graham 走査法: $\mathcal{O}(n \log n)$ の計算量
- 逐次添加法: $\mathcal{O}(n \log n)$ の計算量
- 分割統治法: $\mathcal{O}(n \log n)$ の計算量
- Quick 法: $\mathcal{O}(n \log n)$ の計算量

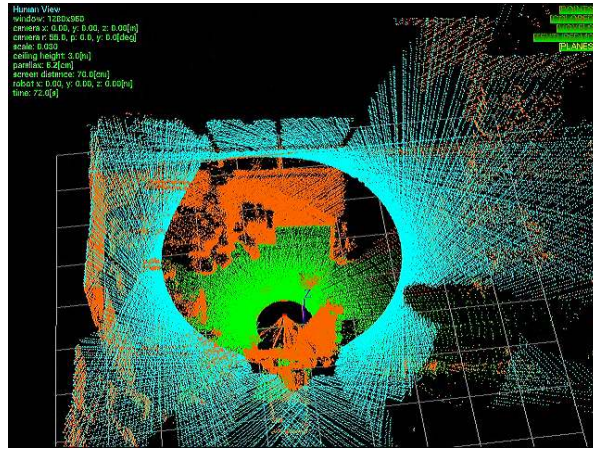


Fig. 4.35: Result of plane integration.

- ・ 内点消去法 : $\mathcal{O}(n \log n)$ の計算量

ここでは総計算量が $\mathcal{O}(n \log n)$ となる Graham 走査法を実装することとした.

Graham 走査法 (Graham's Scan)

Graham 走査法 (Graham's Scan) [73] のアルゴリズムは以下のとおりである.

1. 二次元点群から最小の y 座標を持つ点 P_0 を見つける
2. P_0 と他の点を結ぶ線分の偏角を求める
3. 偏角の昇順で点群を並び替える
4. P_0 と P_1 が凸包の頂点 → スタック S に挿入
5. P_2 から凸包になるかどうか各点を順次に調べる
 - (a) $S[top-1]$, $S[top]$, P_i からなる三角形が時計回り
→ $S[top]$ を S から取り出し、除去する
 - (b) 上記を三角形が反時計回りになるまで繰り返す
 - (c) P_i を S に入れる

今回はこのアルゴリズムを三次元点群へ適用する方法について説明する.

統合平面の設定

Graham 走査法を適用するために, 統合平面の重心と法線ベクトルを設定しておく.

Fig. 4.36 に示すように, 重心は

$$p_g = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n p_i$$

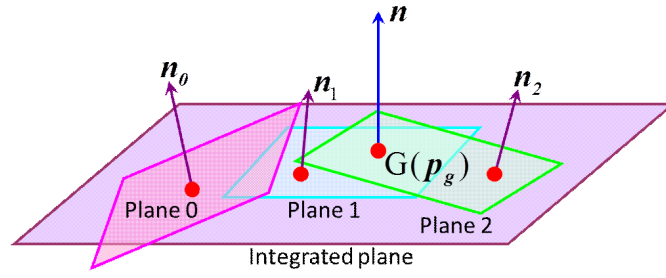


Fig. 4.36: Integrated plane example.

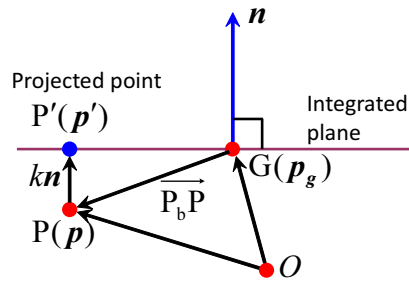


Fig. 4.37: Point projection onto the integrated plane.

と定める．ここで n は統合平面を構成する点の数である．また法線ベクトルについては，各平面を構成する点の数を信頼度として加重加算した後正規化することとした．すなわち，

$$\mathbf{n} = \frac{N_0 \mathbf{n}_0 + N_1 \mathbf{n}_1 + \cdots + N_m \mathbf{n}_m}{|N_0 \mathbf{n}_0 + N_1 \mathbf{n}_1 + \cdots + N_m \mathbf{n}_m|} = \frac{\sum_{i=0}^m N_i \mathbf{n}_i}{\left| \sum_{i=0}^m N_i \mathbf{n}_i \right|}$$

となる．ここで N_i は各平面を構成する点の数， m は統合平面を構成する平面の数である．

次に，統合平面の構成点を統合平面に投影する．Fig. 4.37 に示すように，投影点は

$$\mathbf{p}' = \mathbf{p} + k\mathbf{n}$$

となる．ここで

$$k = -\mathbf{n} \cdot \overrightarrow{\mathbf{G}\mathbf{P}} = -\mathbf{n} \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{p}_g)$$

である．

Graham 走査法の実装

まず(1)における最小の y 座標の点 P_0 については、重心 G から最も遠い点を考えることにする．ここで Fig. 4.38 に示すように、 P_0G 方向を v 軸、 v 軸と平面の法線ベクトル $\mathbf{n}$ に垂直な方向を u 軸とする．すると P_0 は v 座標が最小の点になる．また、後の計算における偏角は u 軸との角度とする．ここで角度計算に用いるベクトルを計算しておく． u 軸方向の単位ベクトルを $\mathbf{e}_u$ 、 v 軸方向の単位ベクトルを $\mathbf{e}_v$ とすると、

$$\mathbf{e}_v = \frac{\overrightarrow{P_0G}}{|\overrightarrow{P_0G}|}$$

より

$$\mathbf{e}_u = \frac{\mathbf{e}_v \times \mathbf{n}}{|\mathbf{e}_v \times \mathbf{n}|}$$

と計算できる．ここでは法線ベクトルを1つの軸とする右手系の座標系となるように u 軸を定めている．

次に(2)については、Fig. 4.38 に示すように P_0 と i 番目の点 P_i を結ぶベクトルと $\mathbf{e}_u$ との偏角 ($\cos \theta_i$) を計算する．

$$\cos \theta_i = \frac{\mathbf{e}_u \cdot \overrightarrow{P_0P_i}}{|\mathbf{e}_u| |\overrightarrow{P_0P_i}|} = \frac{\mathbf{e}_u \cdot \overrightarrow{P_0P_i}}{|\overrightarrow{P_0P_i}|}$$

ここで $0^\circ \leq \theta_i \leq 180^\circ$ より $-1 \leq \cos \theta_i \leq 1$ の範囲で $\cos \theta_i$ と θ_i が一意に対応するため、実装においては $\cos \theta_i$ まで計算することとした．

続いて(3)については、上記で計算した $\cos \theta_i$ の降順 (1..-1) で点群を並び替える．ただし、重心は実際の点ではないので除いている．Fig. 4.39 に番号を振り直した点群を示す．

(4)については、スタック S について

$$S[0] = P_0, S[1] = P_1$$

となるように頂点を挿入する．ここでスタックの一番上は $top = 1$ となる．

(5)について、三角形が反時計回りかどうかの判定は以下のように行う．Fig. 4.40 の場合、ベクトル $\overrightarrow{P_1P_2}$ と $\overrightarrow{P_1P_0}$ を考え、これらに垂直なベクトル $\mathbf{n}'$ を以下のように計算する．

$$\mathbf{n}' = \overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_0} = \overrightarrow{P_{top}P_i} \times \overrightarrow{P_{top}P_{top-1}}$$

右辺は一般化した式である．外積は計算の順番で方向が逆になるが、この頂点の順番で計算した外積 (ベクトル) は、反時計回りであれば平面の法線ベクトルと向きが一

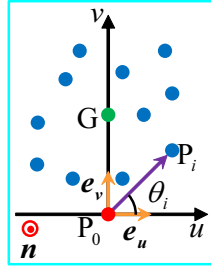


Fig. 4.38: Configuration of u, v axes and vectors e_u, e_v , angle θ_i in the implementation of Graham's scan.

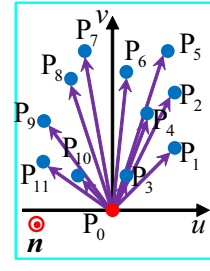


Fig. 4.39: A result of sorting points in ascending order of their angles in the implementation of Graham's scan.

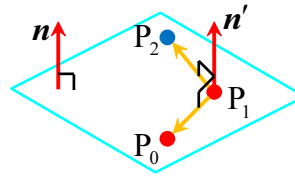


Fig. 4.40: Evaluation whether the order of vertices is counterclockwise or not in the implementation of Graham's scan.

致するはずであるので,

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}' > 0$$

となればこの三角形は反時計回りと判定することができる。

凸包の描画結果

高密度のデータに対して凸包を描画した結果をFig. 4.41に示す. なお, 平面は表の面のみ表示されている. ここで床面は13頂点で構成され, 平面の全構成点数61,276の0.021%となっている. また天井面も13頂点で構成され, 平面の全構成点数95,934の0.014%程度となっている.

4.4.5 評価実験と結果: 異なる点密度での検出平面の比較

実験では, 同じ環境をスキャンした高密度のデータと低密度のデータを用いて提案手法を実行する. どちらの場合でも同じ凸包が描画できるならば, 凸包が描画された部分に関しては低密度のスキャンでも十分であるといえる.

ここで評価基準は, 検出された平面の法線ベクトルのなす角度, および検出された平面数とする. データは3パターンとし, それぞれの密度については, ヨー軸1度刻

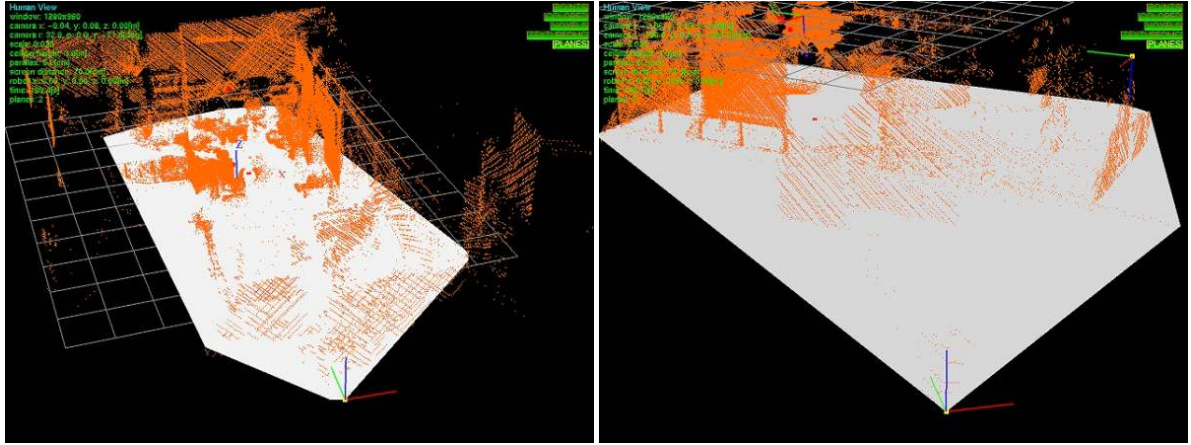


Fig. 4.41: Drawing result of convex hulls. Left: floor plane. Right: ceiling plane.

Table 4.4: The number of detected planes.

	High point density	Low point density
Pattern 1	2	2
Pattern 2	4	4
Pattern 3	3	3

みでのスキャンおよび6度刻みでのスキャンとした．ここで1度刻みでのスキャンで得られた高密度のデータは324,300点/20秒，6度刻みでのスキャンで得られた低密度のデータは54,050点/5秒である．密度の比は6:1である．

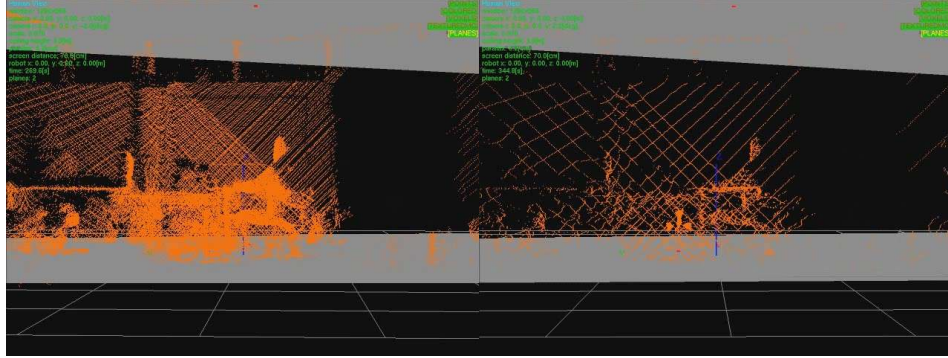
Fig. 4.42に3パターンの結果を示す．図の左側が高密度，右側が低密度の場合である．それぞれの平面検出数をまとめた表をTable 4.4に，対応する平面の法線ベクトルのなす角度をまとめた表をTable 4.5に示す．

上記の実験結果から，3つのデータすべてにおいて検出面数は同じであり，各平面の法線ベクトルのなす角度は最大2°程度であることが分かる．以上の結果から，点密度の低い場合でも同じ凸包が描画されたといえる．したがって，点密度の低い場合でスキャンすることでスキャン速度の向上を達成できると考えられる．また，本手法では平面を検出・描画しているため，点密度の低い領域を補うことも可能である．

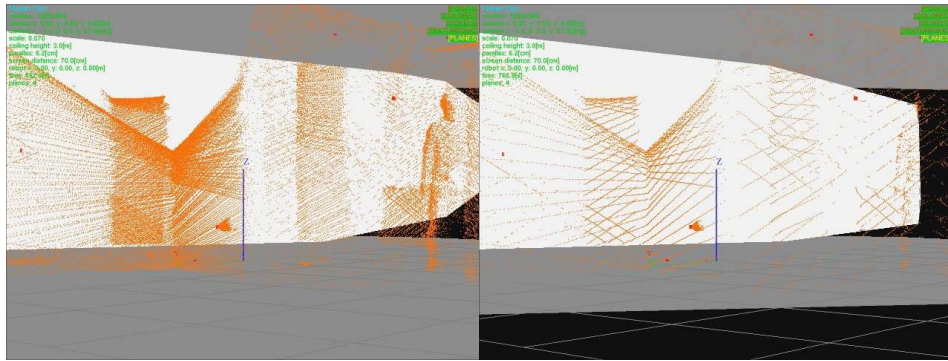
一方で，エレベータホールでは扉や通路などが検出平面によってふさがれてしまう結果となっていた．今後検討する必要がある．

Table 4.5: Angle in degrees between corresponding normals of planes.

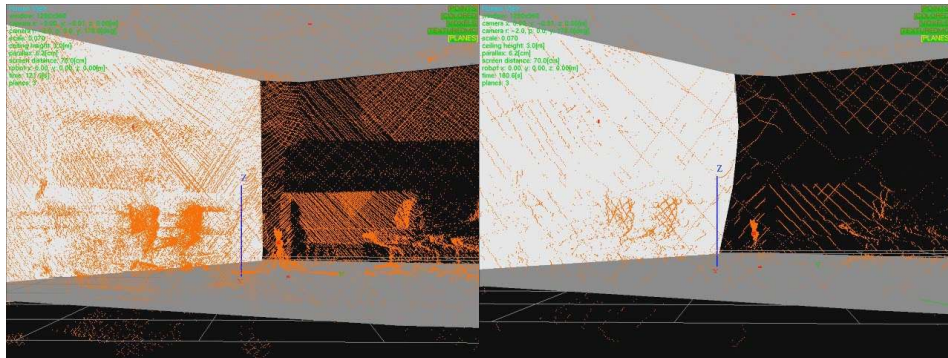
	Ceiling	Floor	Wall 1	Wall 2
Pattern 1	0.29	0.32	-	-
Pattern 2	0.46	0.18	0.088	1.9
Pattern 3	0.23	0.82	1.3	-



(a) Pattern 1



(b) Pattern 2



(c) Pattern 3

Fig. 4.42: An example of results. Left: high density. Right: low density.

4.4.6 評価実験と結果：異なる閾値での検出平面の比較

ここでは、4.4.1節で示した点の数 K の下限を決定する閾値と、三次元スキャンを実行する環境を変化させた際の検出平面を比較する．これにより、本手法の特徴を明らかにする．

実験は10個の閾値と5つの環境で実施する．このとき、検出された平面数と点密度を対応付けて記録する．ここで検出平面数は5回の試行の平均をとることとする．

また、平面の誤検出についても目視で確認する．ここで誤検出とは、実際の環境には平面が存在しないにも関わらず、三次元点群から平面が検出されたことと定義する．誤検出の例をFig. 4.43に示す．ここでは写真中の椅子と左側の机の間に平面が誤って検出されている．

結果として、高密度の点群においては、平面を構成する点数 K に対する閾値を15,000以上に設定した場合に誤検出平面がなくなり、低密度の点群においては、平面を構成する点数 K に対する閾値を3,000以上に設定した場合に誤検出平面がなくなることを確認した．上記の閾値を設定した場合の結果をFig. 4.44に示す．以上より、検出平面数が最大になる閾値を選択すると誤検出が含まれる可能性が高くなることから、最大平面数が得られる閾値は必ずしも適していないことが分かる．

5つの環境において高密度と低密度の三次元点群から検出された平面数をまとめたグラフをFig. 4.45に示す．閾値が小さい場合は、高密度の場合も低密度の場合も検出平面数はほぼ一定値であることが分かる．一方である程度閾値が大きくなると検出平面数は徐々に減少している．

高密度の場合は閾値80,000以降、低密度の場合は閾値15,000以降になると平面が検出されなくなることも分かる．

以上の結果から、RANSACアルゴリズムを用いて平面検出を行う場合、誤検出せずできるだけ多くの平面を検出するためには、点密度に応じて閾値を設定する必要があるといえる．その閾値は、今回の結果見ると高密度：低密度＝5：1となっており、点密度の比率6：1と相関があるように思われる．

4.4.7 考察

本節では、三次元スキャンデータからRANSACアルゴリズムを用いて平面領域を検出し、重複する部分を統合したのち、凸包アルゴリズムの一つであるGraham走査法を用いて凸包として描画する方法を実装した．この方法を用いて3パターン2種類の点密度のデータに実行した結果を比較し、差異が小さいことを確認した．したがって、点密度の小さいスキャンを行うことでスキャン速度を向上することができることを示した．また、本手法では平面を検出・描画することで、点密度の低い領域を補うことができる可能性も確認した．

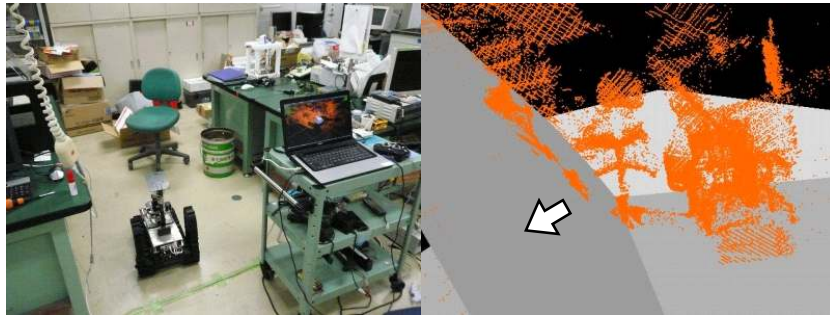
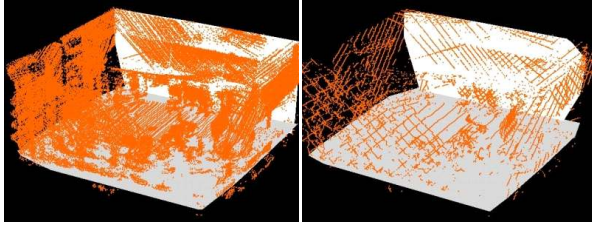


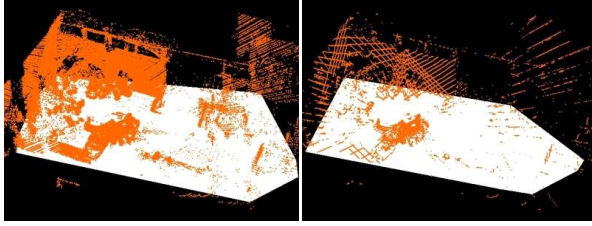
Fig. 4.43: An example of a false detection for high point density in the case of threshold 5,000. Left: an actual environment. Right: a result of the plane detection. A nonexistent plane was detected as indicated by an arrow.

さらに、高密度と低密度のデータそれぞれにおいて、検出平面を構成する点数の閾値と環境を変化させた場合の平面検出数を比較した。その結果、誤検出なしで最大数の平面を検出したい場合、閾値を点密度に応じて変化させる必要があることが分かった。

一方で、エレベータホールでは扉や通路などが検出平面によってふさがれてしまう結果となっていた。また今回の実験では一部の壁面など天井や床より小さな平面を検出することはできていない。今後は、穴のあいた部分をふさがらない方法や、さらに小さい平面領域を検出して描画すること、提案方法が実際にロボットを遠隔操作する際に適しているかどうかを評価することを検討していく予定である。



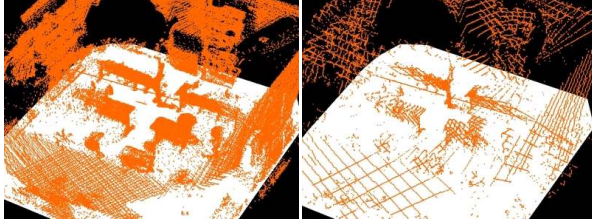
(a) Environment 1



(b) Environment 2



(c) Environment 3

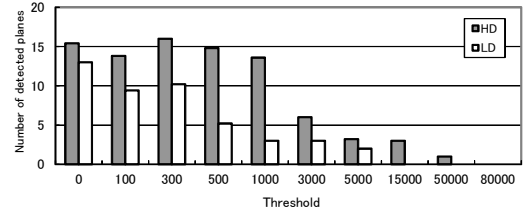


(d) Environment 4

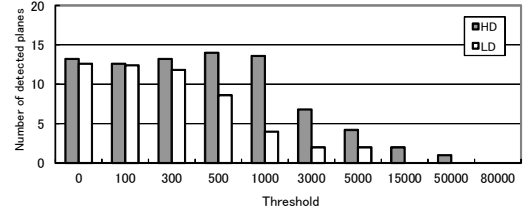


(e) Environment 5

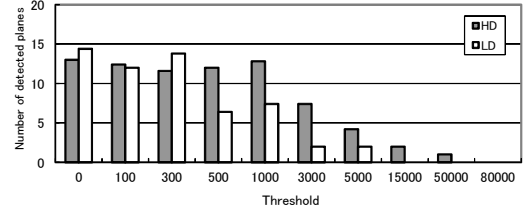
Fig. 4.44: Examples of results in the case of threshold 15,000 for high point density data and threshold 3,000 for low point density data. Left: high point density. Right: low point density. Note that only the planes behind the point cloud are drawn and the points which compose planes are not displayed to be illustrated understandably.



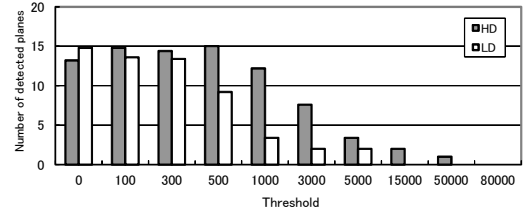
(a) Environment 1



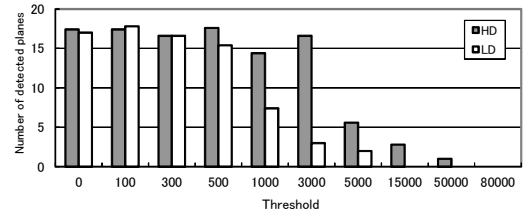
(b) Environment 2



(c) Environment 3



(d) Environment 4



(e) Environment 5

Fig. 4.45: Results of the number of detected planes according to the threshold, where results of five trials were averaged. Each graph includes high and low point density data, which are indicated by HD and LD.



Fig. 4.46: Oculus Rift DK2.

Table 4.6: Oculus Rift DK2 specifications.

Resolution	1920×1080 (960×1080 per eye)
Field of view	84–100°
Internal tracking	1000 Hz 3DOF (gyro/acceleration/magnetism)
Positional tracking	60 Hz (near infrared CMOS sensor)
Platforms	Windows, (Linux, OS X)
Interfaces	DVI/HDMI & USB×2

4.5 Oculus Rift を用いた広視野角インタフェース

本研究では三次元点群の表示デバイスとして、近年登場したHMDであるOculus Rift DK1の改良版Oculus Rift DK2（以下DK2）を採用する．DK2の外観をFig. 4.46に示す．DK2には以下に示す大きな利点がある [74]．(1) 三次元点群を見る際の没入感を向上させる広視野角，(2) 3D酔い防止のためのHMDを搭載した頭の位置姿勢検出機能，である．DK2は3Dコンピュータゲーム用に開発されたHMDであるが，三次元点群を立体視しながら移動ロボットの遠隔操作をするのにも役立つ可能性がある．目下知られている研究では，ステレオカメラを搭載したロボットから送られる映像をDK1で見ながら遠隔操作を行うものがあるが，この場合にはステレオカメラをパンチルトさせる機械的なメカニズムが必要である．そのため，通信遅れに加えて，パンチルトの遅れも生じることになる．一方で，三次元点群を見る場合，機械的なメカニズムは必要ないため，姿勢の変化により迅速に追従できる．この場合，姿勢追従はロボットと操作側のコンピュータとの通信と，ソフトウェアを実行しているコンピュータの処理速度に依存する．

開発したスキャナで取得した三次元点群の表示結果をFig. 4.47に示す．ここで三次元点群はロボットを遠隔操作しながら取得されている．図ではロボットのCGモデルが表示されている．DK2で三次元点群を見ながら遠隔操作を行った結果として，三次元点群の広視野角な視点や，三次元点群で構築された三次元空間への高い没入感が得られることを確認した．また，他の3Dディスプレイでは発生しがちな左右画像が重なるゴーストが見られないこと，マウスなどの入力デバイスを用いずに頭の姿勢で視点変更ができること，といった利点も確認された．この広視野角は，点検作業において施設内を見回す時に役立つと考えられる．

一方で，DK2を装着した状態では，外界の情報がほぼ完全に遮断される．これはレスキュー隊員や作業員にとって不利益となる可能性がある．この点はステレオカメラをDK2前面に取り付け，その画像をDK2に表示することで対応できると考えている．また，3D酔いの問題に関しては，技術的な工夫が載せられている文献 [75] を参考にし

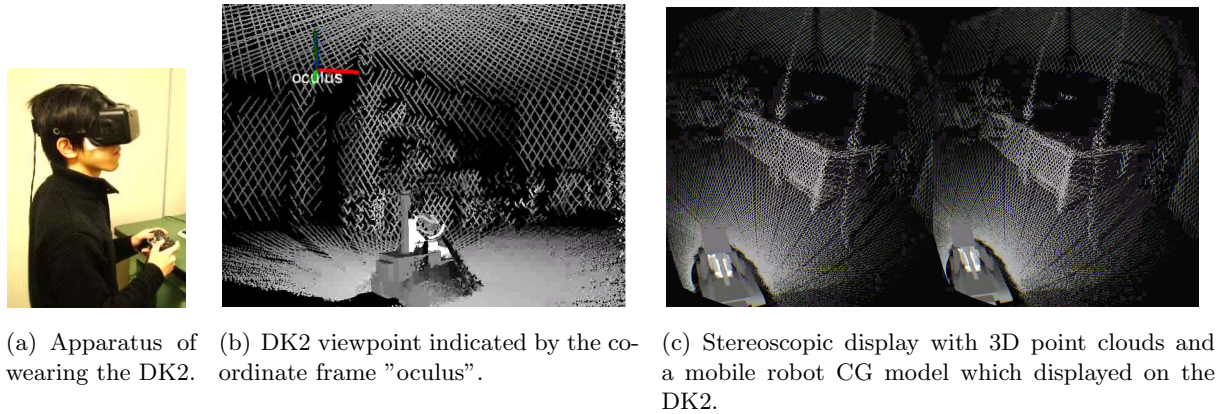


Fig. 4.47: Displaying real-time 3D point clouds on the Oculus Rift DK2. The images for left and right eyes are separately displayed according to operator's azimuth difference. Both images are also skewed in order that the operator gets wider FOV of the 3D point clouds through wide angle of lenses.

ながら，参加者を用いて実験を行うことで具体的な対策を検討する予定である．

4.6 本章のまとめ

本章では，新たに広視野角リアルタイム三次元レーザスキャナと，Oculus Rift DK1を用いた広視野角インタフェースを開発した．また，開発したスキャナで取得した三次元点群をインタフェース上で表示されることを確認した．開発したスキャナは先行研究の回転式揺動機構と比較して，点密度およびスキャン速度，また上下方向の障害物検出において優れていることを実験で確認した．さらに，スキャン速度をさらに向上させる手法として，RANSACによる平面検出を行い点群を平面ポリゴンで置き換えて描画することで，平面検出できる範囲で点密度を小さくすることを提案した．

第5章では，参加者を用いた遠隔操作実験を行って，本章で開発したスキャナとインタフェースを評価する．

フィールドでの遠隔操作試験

本章では、これまでに開発した広視野角のリアルタイム三次元レーザスキャナおよびOculus Rift DK2（以下HMD）を用いたインタフェースの評価を行うための予備実験を行った結果を示す。実験の目的は、構築したインタフェースによる移動ロボットの遠隔操作が可能かどうかを確認することである。

5.1 評価実験方法の検討

5.1.1 レスキューロボット競技会の調査

実験方法の検討にあたり、まず既存の評価手法や評価用フィールドが参考になると考え、レスキューロボットの競技会を調査した。

レスキューロボットコンテスト

以下はWikipediaおよび文献[76]より抜粋・要約したものである。

- ・概要：

地震の被害にあった市街地を模擬した実験フィールドにおいて、ロボットによって要救助者を模擬した人形（ダミヤン）を安全かつ迅速に救助することを目的としている。ロボットに搭載された無線カメラ、およびヘリコプターを模擬したヘリテレのカメラの映像のみがオペレータに提供される。要救助者はヘリコプターによってすでに発見されている。

- ・ポイント

- － 総合ポイント：

- 競技ポイントと審査員ポイントの合計

- － 競技ポイント：

- フィジカルポイントとミッションポイントを足したもの

- － フィジカルポイント：

- ダミヤンの生命力を表したもの。満点が100点、時間が経過するごとに徐々に減点される。またダミヤンを乱暴に扱う（落とす、引っ張るなど）と減点される

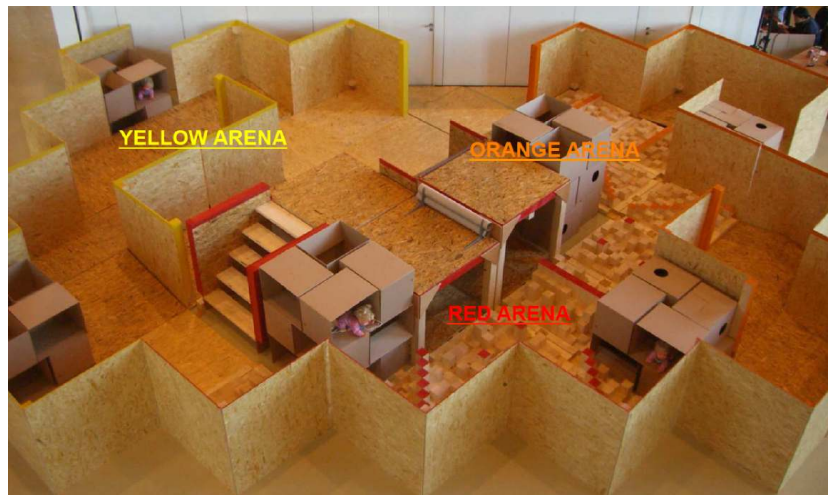


Fig. 5.1: Example of RoboCupRescue Robot League Arena.

ー ミッションポイント：

第8回までは，現場到着，救出完了，救助完了の3段階

ー 審査員ポイント：

一般審査員と専門審査員各3名の計6名のポイントの小計

RoboCup レスキュー

以下はNIST（National Institute of Standards and Technology: 米国標準技術研究所）のWebページ [77] および日本語ルール説明のWebページ [78] より抜粋・要約したものである．

・ 概要：

評価の中心は，アリーナの隅々まで疑似 Victim を探索しているかである．自律型であるか遠隔操縦型であるかで，評価に違いは無い．むしろ，アリーナを横断してたくさんの Victim を発見できるロボットに，高い評価を与える．

・ アリーナ（フィールドの区分）：

自律用・遠隔操作用，またモビリティの高低にしたがってイエロー・オレンジ・レッド・ブルー・イエローブラック・ブラック・飛行ロボットアリーナに区分されている．アリーナの区分例をFig. 5.1に示す．自律移動用のアリーナは，複雑でなくモビリティが低いフィールドとなっている．実際のより複雑で高いモビリティを必要とするアリーナは遠隔操作用となっている．

・ ポイントなど：煩雑なため次項で説明．

5.1.2 実験内容の検討

上記2つの競技会の主な目的はそれぞれ

- ・ RoboCup レスキュー：初動捜査で被災者を発見すること
- ・ レスキューロボットコンテスト：発見された被災者を救助すること

と分類できる．本研究では，これまで被災者の発見を目的として研究してきたため，RoboCup レスキューの競技内容を参考にして実験内容を検討する．

実験で評価する内容は

- ・ 遠隔操作性の評価
- ・ 被災者探索性能の評価

の2つが考えられる．ここで，上記2つの項目は互いに相関関係があると考えられる．すなわち，遠隔操作性が向上（たとえば，操作時間が短縮）すれば被災者探索時間の余裕ができるため，探索性能が向上する．そこで，本研究では遠隔操作性の評価を行うことで，被災者探索性能も間接的に評価する．

実験用フィールドとして，国際レスキューシステム研究機構の神戸ラボラトリーにある標準化フィールドを用いる．このフィールドには

- ・ 対称ステップフィールド (MOBILITY : TERRAINS SYMMETRIC STEPFIELDS)
- ・ 傾斜走行 (MOBILITY : CROSSING PITCH/ROLL RAMP)
- ・ パイプステップ (MOBILITY : OBSTACLES PIPE STEP)
- ・ 階段 (MOBILITY : STAIRS)
- ・ マニピュレーション (MANIPULATION)

の5つのエリアがあり，このうち遠隔操作性に関するものは上の4つである．遠隔操作性の評価のフィールドには，4種類あるうちの1つが走行できそうなものを一つまたは複数組み合わせることを検討する．

また，競技ルールでは減点（ペナルティ）が以下のように設定されている．以下のイベントが1回発生するごとに-10ポイントとなっている．

- ・ ロボットがアリーナ内の物体を動かしてしまい，再配置を要する場合
- ・ ロボットが Victim を傷つけた場合（生身の人間強度で考える）

以上より，遠隔操作性の評価において達成時間と衝突回数を評価することとする．

5.1.3 実験環境と評価項目について

実験環境に関して，70 報程度のレスキューロボットに関する文献を調査した結果，以下のような環境でロボットが評価されていることが分かった（複数利用有り）．

- 実際の災害環境 ... (計5報)
 - 海底や河川 (水中ロボット) [79]
 - 世界貿易センター [1, 6]
 - 土砂崩れ [6, 80]
 - ハリケーン [6]
 - 倒壊家屋 [81]
- 大学付近とみられる屋外環境 ... (計8報)
 - 雪道, 中庭, 歩道, グラウンド, 公園 [82, 83, 84, 85, 86, 87, 88]
 - 建設現場 [89]
- 研究室内環境 ... (計26報)
 - 平坦な床 (箱や板, がれきを配置) [90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 82, 97, 98, 99, 100, 84, 101, 102, 103, 104, 105, 88, 106, 107],
 - 階段 [108, 97, 109, 110, 111]
- 災害環境模擬フィールド ... (計14報)
 - 災害対応 (救助) 訓練場 (多くのがれき, 倉庫, がれきに埋まった車) [112, 113, 114]
 - NIST フィールド・RoboCup レスキューのフィールド [115, 116, 117, 118, 119, 82, 120, 121]
 - USAR アリーナ [122]
 - DARPA Robotics Challenge のフィールド [123]
 - NASA AmesUSA USAR 施設 [81]
- 仮想環境 ... (計7報)
 - シミュレーション [90, 124, 125, 126, 127]
 - USARSim シミュレータ [96, 128]

このうち, 再現性や説得力の点で妥当と思われる災害環境模擬フィールドを実験環境に設定することとした. 本実験では, 国際レスキューシステム研究機構の神戸ラボラトリーにある標準化フィールドを用いる. この標準化フィールドはNISTによって制定されたものであり, 多数のレスキューロボットの評価に用いられていることから, 実験用のフィールドとして適切である.

レスキューロボットの評価項目については, 先行研究では以下のようにになっている.

- 性能評価 ... (計23報)

- － 段差の乗り越え高さ，ジャンプ高さ，がれきを除去できたか，地図作成可能か等 [129, 108, 90, 91, 89, 82, 97, 100, 109, 110, 130, 125, 114, 103, 111, 93, 96, 95, 122, 119, 120, 121, 107]
- ・ アルゴリズムの評価 ... (計6報)
 - － 人間認識，自己位置推定精度，地形の予測，繰り返し回数等 [98, 88, 83, 99, 101, 105]
- ・ 災害現場での成果報告 [79, 1, 6, 2, 80] ... (計5報)
- ・ 被災者発見数 [112, 116, 117, 118, 119, 102, 87, 126, 106] ... (計9報)
- ・ 探索範囲 [116, 118, 84, 86, 102, 126] ... (6報)
- ・ 時間 ... (計10報)
 - － 探索，走行，マニピュレータ操作等 [124, 92, 94, 89, 96, 84, 86, 113, 106, 127]
- ・ 衝突回数 [116, 96, 118, 102] ... (計4報)

本研究では，このうち遠隔操作性に直接影響する「時間」と「衝突回数」を評価することとする．

なお，実験では

- ・ 対称ステップフィールド
- ・ 傾斜走行
- ・ パイプステップ
- ・ 階段

の4つのエリアすべてまたは走行可能なエリアを走破する．また，対照実験として，

- ・ 目視でロボット遠隔操作
- ・ カメラ画像を見ながらロボット遠隔操作
- ・ HMDで三次元点群を見ながらロボット遠隔操作

を実施する．

5.2 標準化フィールドでの遠隔操作実験

本節では、国際レスキューシステム研究機構の神戸ラボラトリーにある標準化フィールドで予備実験を行った結果を示す。

5.2.1 実験フィールド選定のためのテスト走行

まず、第ロボットにどれくらいの走破能力があるかを確認した。走行したフィールドとその結果を以下に示す。

- ・ 対称ステップフィールド (MOBILITY : TERRAINS SYMMETRIC STEPFIELDS)
 - － ポール1周だけ走行。難易度が高い。補助がないと転倒する。
- ・ 傾斜走行 (MOBILITY : CROSSING PITCH/ROLL RAMP) 2つのポールを8の字走行可。コース取りを間違えると乗り越えられない。補助はほぼ不要。
- ・ パイプステップ (MOBILITY : OBSTACLES PIPE STEP) 容易に乗り越え走行可能。往復可。補助不要。
- ・ 35°, 40°, 45° の階段 (MOBILITY : STAIRS)
 - － 35°: 上りは可。下りは前進では転倒し不可。後進では可。少し難しい。補助必要。
 - － 40°: 上りは可。下りは前進では転倒し不可。後進では可。難しい。補助必要。
 - － 45°: 上りは可。下りは前進では転倒し不可。後進では可。難しい。補助必要。

またそれぞれの走行の様子を Fig. 5.2 に示す。第ロボットにとって適度な難易度であれば、インタフェースの違いが結果に現れるのではないと思われる。また、補助がいらないことも重要である。したがって、傾斜走行フィールドを実験フィールドとして選定することとした。

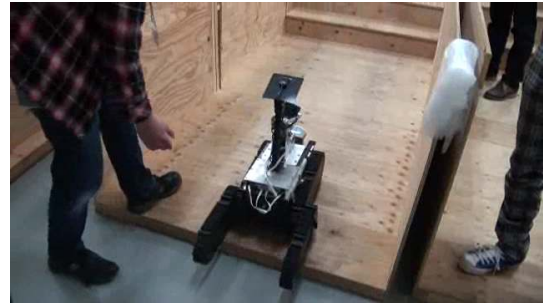
5.2.2 遠隔操作実験

傾斜走行フィールドの2つのポールを、決められた経路で8の字に走行してスタート地点に戻ってくることをタスクと設定した。ロボットの走行経路と実際の走行の様子を Fig. 5.3 に示す。参加者には以下の3つを上から順に行ってもらった。

- ・ 目視でロボット遠隔操作
- ・ カメラ画像を見ながらロボット遠隔操作 (Fig. 5.4(a))
- ・ HMD で三次元点群を見ながらロボット遠隔操作 (Fig. 5.4(b))



(a) Obstacles Pipe Step.



(b) Stairs (35°).



(c) Terrains Symmetric Stepfields.



(d) Crossing Pitch/Roll Ramp.

Fig. 5.2: Performance tests on the four kinds of fields.

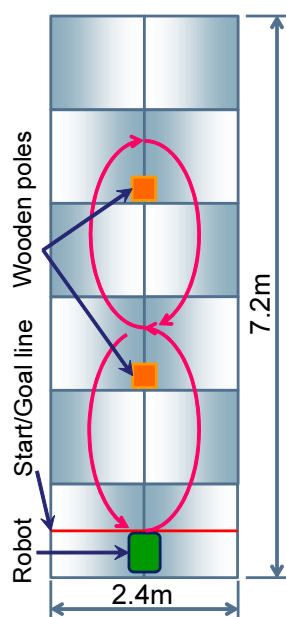
ここでカメラ画像を用いた遠隔操作ではFig. 5.4(a)に示すように前方カメラ画像と俯瞰視点カメラ画像を提示し，HMDを用いた遠隔操作ではFig. 5.4(b)に示すように，三次元点群とロボットCGをHMDに提示した．またその際に

- ・ ラップタイム（半周），クリアタイム（一周）
- ・ 衝突回数（フィールドに大きな衝撃を与えた回数）

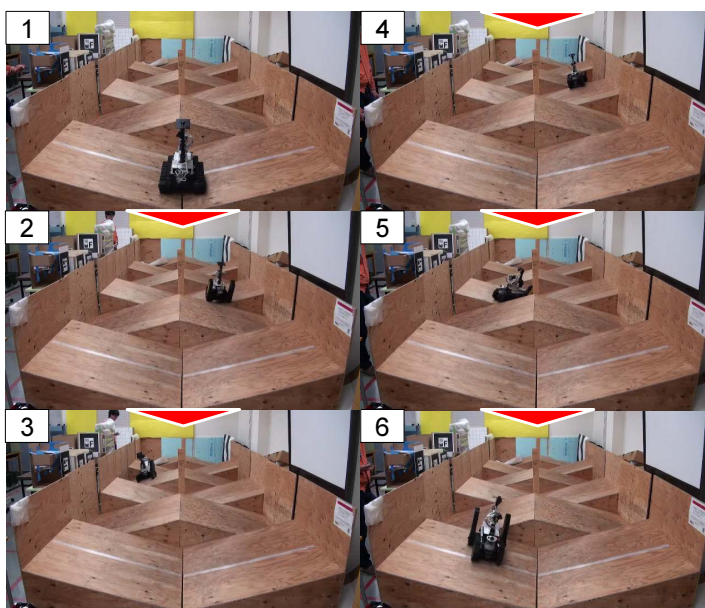
を記録した．

また，ここではロボットの最高速度を $v_{max}=0.5$ m/s，最高旋回速度を $w_{max}=5$ rad/s とした．さらに三次元スキャナのスキャン周期を $T=6.28$ s，三次元スキャナの垂直視野角を $V=120^\circ$ とした．ここで垂直視野角については，今回の環境では張り出している障害物やロボット上方の障害物がないため，ロボットの足元が最大限スキャンできるように設定した．Fig. 5.5に示すように，垂直視野角 V が 120° のときにロボット足元の死角が最も小さくなり，かつスキャン密度が高くなる． 120° 以上になるとロボット本体上のスキャン点が増加する一方で足元の死角は変わらず，また環境のスキャン密度が小さくなる．そのため， 120° に設定している．

HMDの視点については，基準位置を第ロボットCGの後方1 m，上方1 mに設定した．第ロボットが動いて位置が変化すれば，それに応じてHMD視点の基準位置も追従す



(a) Teleoperation course.



(b) Actual robot trajectory.

Fig. 5.3: Travelling course for the mobile robot teleoperation in the experiment.

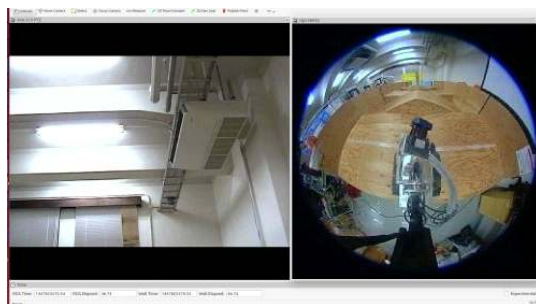
る．また，HMD 装着者の頭部位置姿勢が変化すると，基準位置を中心としてHMD の視点も変化する．Fig. 5.6にHMD の位置（oculus という座標軸）と弟ロボットCG との関係を示す．

5.2.3 結果

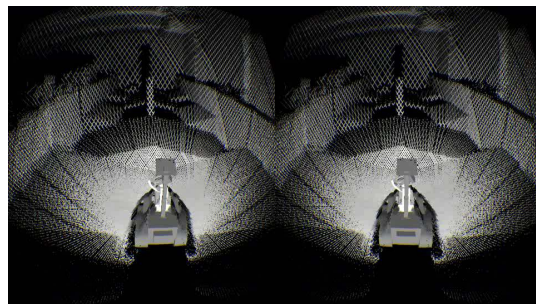
衝突回数，ラップタイム，クリアタイムの結果をそれぞれFig. 5.7, 5.8, 5.9に示す．ラップタイムとクリアタイムにおいては，短いほうから目視，カメラ使用，HMD 使用となった．衝突回数には差が見られなかった．なお，参加者CはHMD 使用時にはコースを間違えてしまったためその結果がない．

また，参考結果として三次元スキャナのスキャン周期を1.14 sに設定した時の結果をFig. 5.7, 5.8, 5.9の4本目の棒グラフ（右端）に示す．参加者B, Cはゴールできなかったため平均の計算に含めていないが，参加者AやDは完走でき，タイムも悪くなかった．意見・感想としては，以下のようなコメントをいただいた．

- ・ HMD では点群の更新が遅くて操作しづらい
- ・ HMD では3D 酔いはほとんどなかった
- ・ HMD では自分が今どこにいるのか分からなくなることがあった
- ・ HMD はカメラより分かりやすかった．情報が正しければ（更新周期が速ければ）もっと良かった．



(a) Front camera view and the overhead camera view which displayed on a 2D display.



(b) Stereoscopic display with 3D point clouds and a mobile robot CG model which displayed on the HMD.

Fig. 5.4: User interfaces for the mobile robot teleoperation in the experiment.

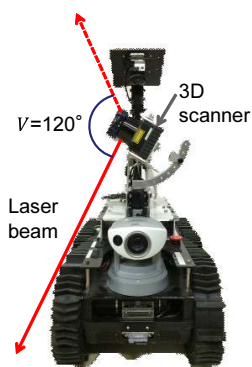


Fig. 5.5: Configuration of the vertical FOV of the 3D laser scanner in the experiment. The vertical FOV V is set at 120° in order to increase the point density and to decrease blind spots as far as possible.



Fig. 5.6: HMD viewpoint. Its reference position is located at 1 m backward and 1 m upward from the robot CG model.

5.2.4 判明した問題点

実験の結果判明した問題を以下に示す.

HMDに表示されているロボットCGの位置のずれ

HMDを用いて遠隔操作した場合、クローラが段差にぶつかって乗り越えられず、その場でスリップし続ける事態が頻繁に発生していた。これは、ロボットはその場から動いていないにも関わらず、クローラの回転によりオドメトリは計算され続け、HMD画面上でのロボットCGの位置は前進してしまうため、スリップしていることに気付かず前進できていると思ってしまったことが原因と考えられる。これは三次元スキャ

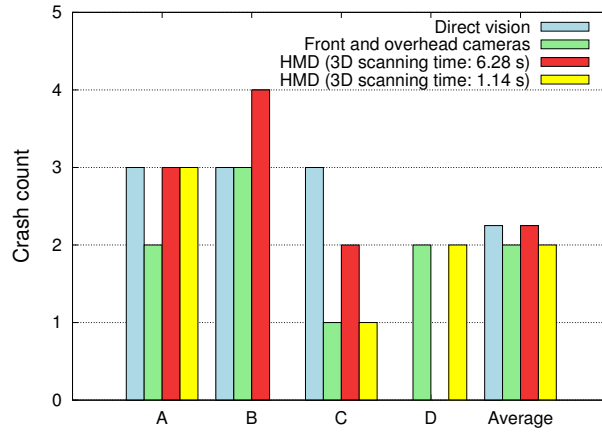


Fig. 5.7: The number of the robot crashes on the environment.

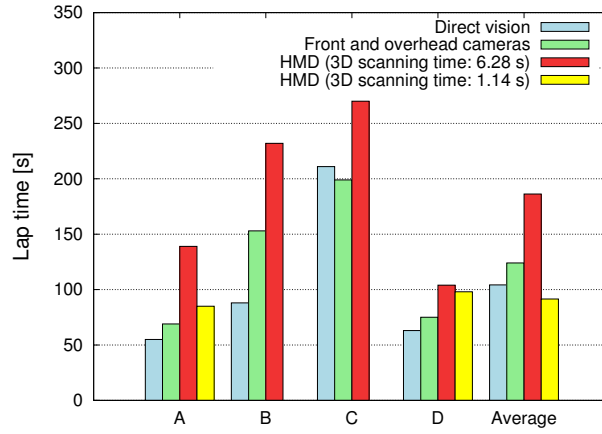


Fig. 5.8: Lap time of the robot running on the field.

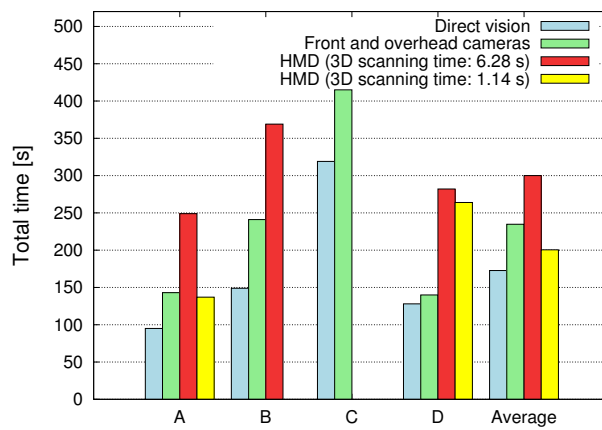


Fig. 5.9: Total time of the robot running on the field.

ナの更新周期を早くすることや、LRFなどの外界センサを用いてSLAM行い、オドメトリだけではなく自己位置推定を行うことで、解決できると考えられる。

HMDでは自分の位置が分からなくなる

スキャン周期とも関連するが、ロボットの姿勢が著しく変化した際には、スキャンデータの表示が滅茶苦茶になり、大変見づらくなるという問題があった。SLAMによりデータを蓄積表示するか、ある地点に視点を固定し、そこからロボットを見守るという方法で対応できるかもしれない。

ジョイスティック操作でAxisカメラのパンチルトができない

ノード起動時にはパンチルトできて、少し走行するとできなくなる現象が発生した。原因は不明である。ロボットの最大速度を上げたことで、電圧降下が大きくなり、Axisカメラへの電圧が低下して不具合が起きたのかもしれない。

ハードウェアの問題

フィールド走行中に以下の問題が発生した。

- ・ OPT NM33 カメラ取り付け用の針金の断裂
- ・ ロボット前方部のスペーサねじの断裂
- ・ ロボット前方赤外線近接センサの破損
- ・ ロボット本体のねじ穴の問題（実験前から）

5.2.5 考察

実験の結果、HMDをかぶって遠隔操作する提案システムを用いてロボットの遠隔操作ができることを確認した。また、実験前に最も懸念していた、3D酔いについては、参加者がほとんど感じなかったことを確認した。文献 [131] によると、Oculus Riftを用いた「ゲーム画面に固定された可視参照物体がある場合にシミュレータ酔いは軽減する」と述べられている。提案システムにおいては、HMD画面の中で視点到常に追従するロボットCGが表示されていたため、同様の効果が得られたと考えられる。

提案システムの1つの最終目標は、目視と同等の遠隔操作スピードと安全性を達成することである。結果をみると、提案システムを用いた場合、コースを1周するのに最速で249秒、また最低で3回の衝突回数という結果であったのに対し、目視の場合は最速で95秒、最低で3回の衝突回数という結果であった。したがって、提案システムに

において操作スピードを改善する余地があるといえる。しかしながら、実際の災害発生時に建物内に進入したロボットを目視で遠隔操作することは不可能なため、提案システムにはこの点ですでに優位性がある。

また、提案システムを用いた場合はあまりよくない結果であった理由としては以下が考えられる。ロボット自身が動くことで発生する速度（障害物との相対速度）を考えてリアルタイムに必要な周期を割り出していたが、現実では段差乗り越え時に落下するなど、ロボットの速度より大きな速度が発生していたことが分かった。そのため、以前に定めていたリアルタイム性の計算は不十分だった可能性がある。今回行った実験では、スキャン周期を1.14 sとしたが、これでリアルタイム性にはあまり問題がなかったことから、これを目安にしてもよい。

一方で、スキャン周期が早くなれば、カメラ映像を見て操作するのに匹敵する運転速度で遠隔操作できる可能性があることが分かった。しかし、スキャン周期を早くすると点密度が疎になり、人によっては状況を把握できない可能性があることも分かった。したがって、スキャン周期を向上させつつ、必要な部分には十分な点密度が確保できるようにすれば、よりよいインタフェースになる可能性がある。今後の展開としては、オペレータの注視点付近の点密度を一定の高さに保ちつつ、その他のエリアは高速でスキャンする、という方策が考えられる。

具体的な方法としては、HMDで頭部姿勢が計測できるため、このHMDの位置姿勢をオペレータの視線方向と仮定する（実際には頭を動かさずに視線を移動することができるので、あくまで仮定である）。この位置姿勢から視線ベクトルを求め、また人の目の視野角からその視線ベクトル方向の見える範囲を計算する。一方で、三次元スキャナでスキャンできる範囲も計算で求めることができると思われるので、その範囲と視線の交差範囲を求め、交差範囲になるような三次元スキャナのモータ角度の範囲を求めれば、どの範囲でモータのスピードを上げればいいのか分かるのではないかと考えている。

さらに、標準化フィールドでは立体視が有利に働くような狭隘で複雑な環境がなく、三次元立体視の利点がありませんでした可能性はある。障害物の配置もランダムにすると結果が変わるかもしれない。

目視での性能を達成するためのその他の方法としては、カメラ画像を三次元点群に重畳表示することや、SLAMを導入して大域的な三次元環境地図を作成し提示すること、スキャンした三次元点群からロボットが通行可能な領域を計算し提示すること、などが考えられる。

5.3 本章のまとめ

本章では、開発した広視野角リアルタイム三次元レーザスキャナと、Oculus Rift DK2で構成される広視野角インタフェースを用いて予備実験を行った。予備実験では、レスキューロボット用の評価用標準化フィールドを用い、参加者にロボットの遠隔操作を行ってもらった。実験の結果、HMDをかぶって遠隔操作する提案システムを用いてロボットの遠隔操作ができることを確認した。

対照実験として、目視でロボット遠隔操作、カメラ画像を見ながらロボット遠隔操作、HMDで三次元点群を見ながらロボット遠隔操作を設定した。その際にラップタイム（半周）、クリアタイム（一周）、衝突回数を記録した。結果として、スキャン周期が6.28 sの場合は、HMDで三次元点群を見ながらロボット遠隔操作する場合において、ラップタイム・クリアタイムともに目視やカメラ視と比較して多くの時間がかかった。衝突回数には差が見られなかった。一方で、スキャン周期を1.14 sとした場合は、認識能力に個人差があるものの、カメラ画像と同等程度の時間で走破できることが分かった。今後の予定としては、オペレータの注視点付近の点密度を一定の高さに保ちつつ、その他のエリアは高速でスキャンする、という方策を検討する。

汎用測域センサで測定した水中スキャンデータの補正手法

本章では汎用測域センサで測定した水中スキャンデータの補正手法について述べる。

まずTop-URGを使用して海中汚濁環境を模擬した環境における計測実験を行い、水中における計測精度・性能を検証する。具体的には、(1) 水の濁りを変化させた水中計測、(2) 対象物の位置と角度を変化させた水中計測を行う。そして、水中計測の諸問題のうち、まず屈折の影響を考慮したスキャンデータの補正手法を提案する。さらに、Top-URGで取得できるレーザの受光強度を用いて信頼性の低いデータ除去する手法を提案する。

6.1 実験装置および実験環境

本研究では水中環境計測に北陽電機（株）製のUTM-30LX (Top-URG) を使用する。Top-URGの概観をFig. 6.1に、主な仕様をTable 6.1に示す。Top-URGの測距方式はTOF (Time Of Flight) であり、またレーザ投光部と受光部が一体となったタイプである。さらにTop-URGは受光強度値を取得することができる。仕様書 [132] によると、これは単位の無いセンサ内部データであり、大小関係を表す相対値である。また、距離に対する受光強度および実際の光の強度値と受光強度の関係は線形ではない [133]。なお、本研究で示す実験環境においては、受光強度値は0-4000程度であった。

水中計測実験は、シンク（幅×長さ×深さ、49 cm × 111 cm × 19 cm）にアクリル製半球球殻（直径×厚み、 ϕ 30 cm × 3 mm）で防水処置したTop-URGをガムテープで固定し、シンクを水道水で高さ17 cmまで満たした環境で行った。ここでは、シンク底面にアクリル球殻の外縁と中心を示す印のついたテープを貼付し、その中心とTop-URGのレーザ照射原点が一致するように、目視で調整しながらTop-URGとアクリル製半球球殻を設置した。シンクの外観をFig. 6.3に、アクリル製半球球殻をFig. 6.2に示す。なお、実験ではTop-URGのスキャンにおける鏡面反射の影響をなくすため、シンクの側面にガムテープを貼り付けている。



Fig. 6.1:
HOKUYO
UTM-30LX
(Top-URG).

Table 6.1: Specification of Top-URG.

Light source	Semiconductor laser diode ($\lambda=905$ nm)
Measurement principle	Time of flight (TOF)
Accuracy	0.1–10 m: ± 30 mm, 10–30 m: ± 50 mm
Angular resolution	Step angle: 0.25° ($360^\circ / 1,440$ steps)
Scan time	25 ms / scan
Scan angle	270°

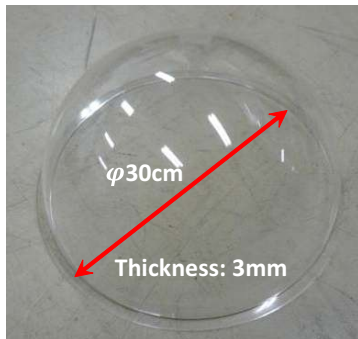


Fig. 6.2: Transparent
acrylic hemispherical shell
used as a waterproof cover
for Top-URG.

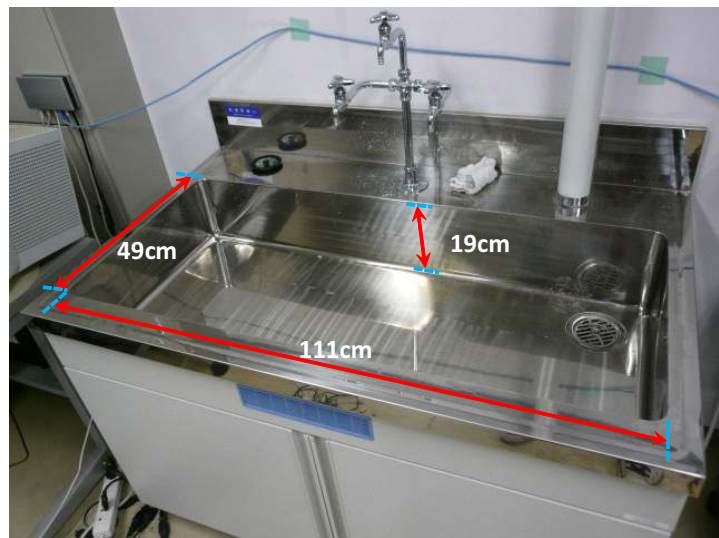


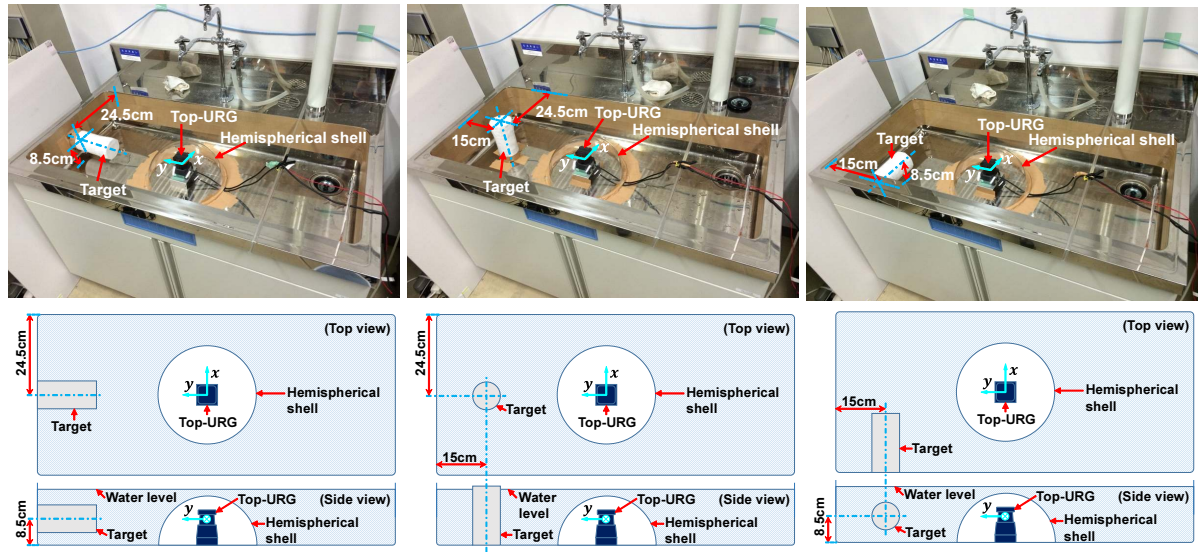
Fig. 6.3: Sink used as a experimental environment.

6.2 Top-URG の水中における計測精度・性能の検証

6.2.1 実験 (1) : 水の濁りを変化させた水中計測

実験内容

この実験では、海中汚濁環境を模擬するために、光吸収率の高い成分が含まれている市販の墨汁を用いる。ここでは、水を張ったシンクに墨汁を 0 ml, 1 ml, 3 ml 加えることで水中の濁りを変化させた。KASAHARA 社製の透過光式濁度／水深計 (TR-1Z) を用いて濁度を測定をしたところ、シンクに高さ 17 cm まで満たした水に墨汁を 0 ml, 1 ml, 3 ml 加えたとき、濁度計の値はそれぞれ 0 mg/l, 20 mg/l, 158 mg/l であった。また、水中計測のスキャン対象として、水中ロボットの充電用電力供給に用いられる電源ソケットを模擬した円柱物体 (直径 × 高さ, $\phi 8.5$ cm × 18 cm) を用いた。このスキャ



(a) Cross placement of the target. (b) Vertical placement of the target. (c) Offset placement of the target.

Fig. 6.4: Experimental environments and their diagrams in the cases of (a) Cross placement, (b) Vertical placement and (c) Offset placement of the target in the experiment (1).

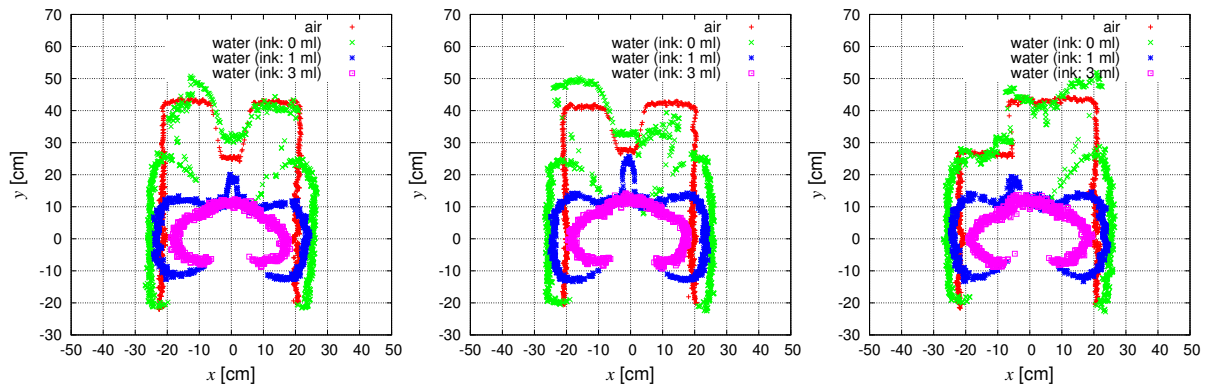
ン対象を対称配置（直交型），対称配置（垂直型），非対称配置（オフセット型）に配置してそれぞれ実験を行った．水を張っていないそれぞれの実験環境および模式図を Fig. 6.4 に示す．

実験結果

対称配置（直交型），対称配置（垂直型），非対称配置（オフセット型）の配置それぞれに対して，水の無い場合と，水を高さ 17 cm に満たして墨汁 0 ml, 1 ml, 3 ml の濁度の変化を加えた場合の水中計測結果を Fig. 6.5 に示す．ここで，各図の x, y の値は，Fig. 6.4 の実験環境に示されている Top-URG の中心を基準として，Top-URG 前方を y 軸，右方向を x 軸とした二次元座標系に基づいている．それぞれの図中において赤色が空气中，緑色が墨汁 0 ml の水中（濁度 0 mg/l），青色が墨汁 1 ml の水中（濁度 20 mg/l），紫色が墨汁 3 ml の水中（濁度 158 mg/l）のスキャンデータを描画したものである．

考察

結果から，紫色のプロットで示されている墨汁を 3 ml 加えた水中環境では，レーザー光がスキャン対象やシンク側壁に届いておらず，Top-URG 周囲の環境を計測するのは



(a) Cross placement of the target. (b) Vertical placement of the target. (c) Offset placement of the target.

Fig. 6.5: Scan data in the cases of (a) Cross placement, (b) Vertical placement and (c) Offset placement of the target in the experiment (1). The red data points indicate scan data in air, the green data points indicate scan data in water with 0 ml of black ink (turbidity: 0 mg/l), the blue data points indicate scan data in water with 1 ml of black ink (turbidity: 20 mg/l), and the purple data points indicate scan data in water with 3 ml of black ink (turbidity: 158 mg/l).

困難であることが分かる．青色のプロットで示されている墨汁 1 ml の場合では，わずかにスキャン対象である円柱が認識されている．また，緑色のプロットで示されている墨汁 0 ml の汚濁のない水中環境では，赤色のプロットで示されている空気中に比べて円柱の測定距離に大きなずれが生じていることや，シンクの角の箇所が正しく測定できずに，実環境より手前の位置がスキャンデータとして計測されてしまう「ゴースト」現象が確認された．

さらに，先行研究 [134] によると，Top-URG による水中スキャンを行った場合，計測限界は約 50 cm で，対象までの距離が長めに計測される傾向があるとされているが，墨汁 0 ml 時（緑色）のシンク側壁部分や円柱部分のスキャンデータから，同様の現象が生じていることを確認できる．このずれの原因の 1 つは，空気中と水中で光の進む速度の違い（屈折率）である．この屈折率を考慮することで，シンク側面やスキャン対象のスキャンデータは補正できる．これについての方法は 6.3.1 節に述べる．

6.2.2 実験 (2) : 対象物の位置と角度を変化させた水中計測

実験内容

この実験では，スキャン対象の位置と角度を変化させて Top-URG による水中計測を行った．なお，この実験では水中に墨汁は入れていない．また，先の実験で用いた円柱物体では位置と角度の変化による違いがわかりにくいため，ここではスキャン対象を板（縦 × 横，18 cm × 25 cm）に変更した．まず，Top-URG 正面にスキャン対象を正

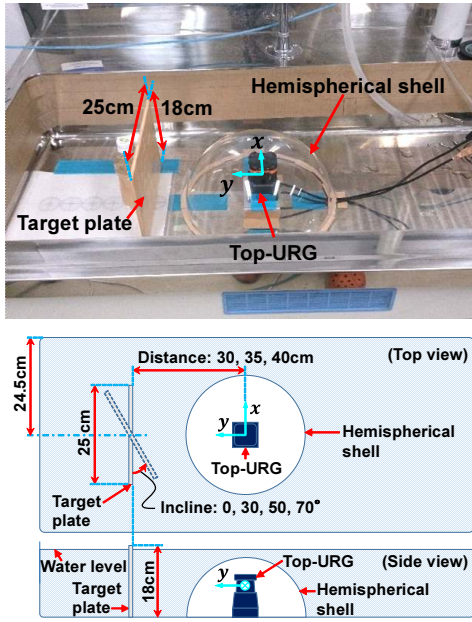


Fig. 6.6: Experimental environment and its diagram with a target plate located in front of Top-URG in the experiment (2), where the distance between Top-URG and the target plate is 30 centimeter and the target plate inclines at 0° to Top-URG.

Table 6.2: Received reflection intensities from Top-URG according to distances between Top-URG and the target plate and to inclining angles of the target plate in the experiment (2), where the scanning angle of Top-URG is 0° .

Incline [$^\circ$]	Distance [cm]		
	30	35	40
0	1969	1950	1906
30	1821	1700	1608
50	1558	1450	1249
70	1197	999	869

対するように配置し、それから位置と角度を変化させ、Top-URGによる水中計測を行った。Top-URGに対するスキャン対象の距離は30 cm, 35 cm, 40 cm, 角度は 0° , 30° , 50° , 70° にそれぞれ変化させた。板をTop-URGから30cm離れた位置に 0° の角度で配置した実験環境とその模式図をFig. 6.6に示す。また、この実験では距離情報に加えて、Top-URGが取得するレーザの反射の度合を示す受光強度の測定も行った。

実験結果

それぞれの実験において、Top-URGの走査が 0° の方向(y 軸方向)のスキャンデータの受光強度をまとめたものをTable 6.2に示す。さらに、Top-URGとスキャン対象の板との距離が30 cmの場合のスキャンデータに受光強度の情報を付加して、グラデーションをつけたものをFig. 6.7に示す。ここでは受光強度が小さくなるにしたがって黄色から紫色に変化するようにグラデーションを設定している。また実験(1)と同様に、各図の x, y の値は、Fig. 6.6の実験環境に示されているTop-URGの中心を基準として、Top-URG前方を y 軸、右方向を x 軸とした二次元座標系に基づいている。

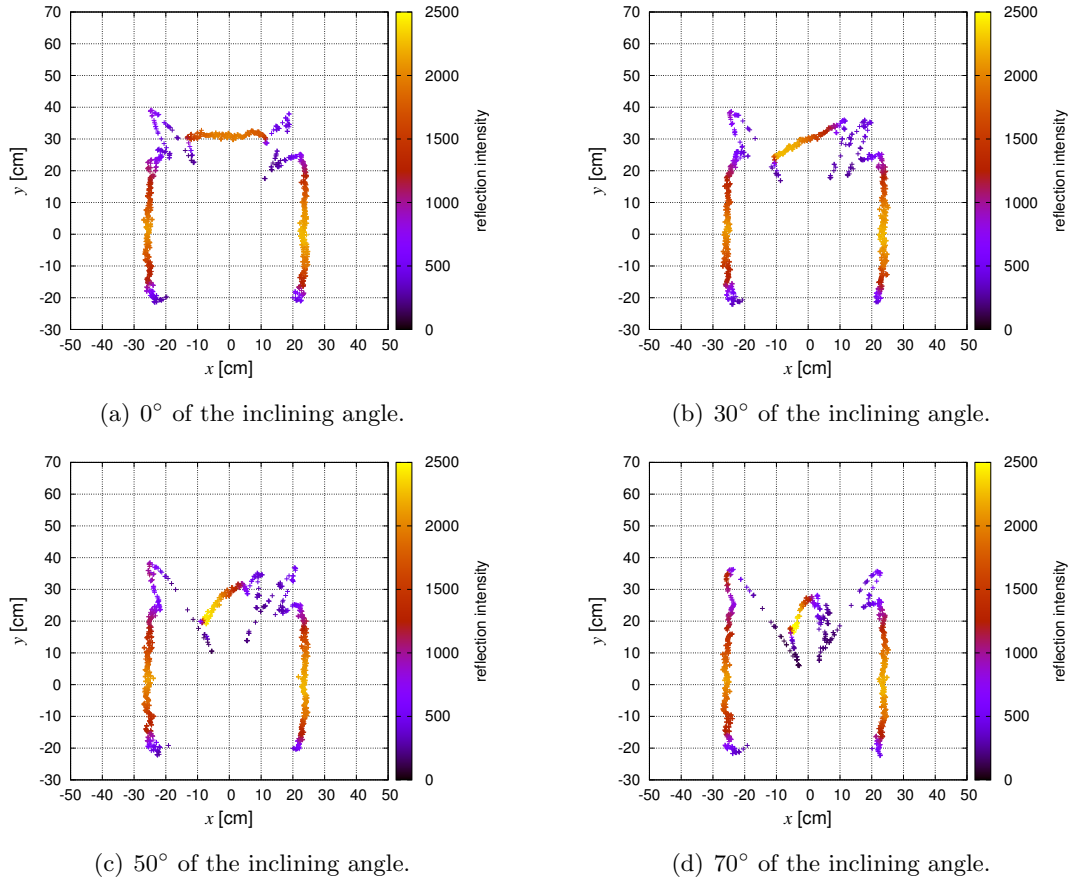


Fig. 6.7: Scan data with reflection intensities received from Top-URG in the cases of (a) 0° , (b) 30° , (c) 50° and (c) 70° of the inclining angle of the target plate in the experiment (2), where the distance between Top-URG and the target plate is 30 centimeter. Every data point is colored by a gradation according to its reflection intensities from Top-URG. The yellower data points indicate stronger reflection intensities, while the purpler data points have weaker reflection intensities.

考察

Table 6.2 に示した実験の結果から、スキャン対象と Top-URG との距離が離れるほど受光強度が小さくなることが分かる。同様に、Top-URG に対するスキャン対象の角度が大きくなるほど、受光強度が小さくなることが分かる。また、この実験においても、実際の位置にはない点がスキャンされるゴースト現象が確認された。ここで、Fig. 6.7 に示した実験の結果から、ゴーストの可能性が高いスキャンデータの受光強度が、そのほかのスキャンデータと比較して相対的に低いことが確認できる。そこで、受光強度の低いスキャンデータをゴーストとして除去することで、より正確なスキャンデータに近づくと考えられる。この手法は 6.3.2 節で述べる。

6.3 水中計測誤差の補正・修正手法

6.3.1 屈折率を用いた水中計測誤差の補正

ここでは、水中におけるレーザの屈折率を考慮し、水中計測で生じたずれを補正する方法を提案する。

補正手法

Top-URG とアクリル球殻、障害物との関係を側面から見たときの模式図を Fig. 6.8 に示す。ここで、Top-URG はアクリル球殻の中心に位置し、点 H からレーザを放射することとする。図中の変数や定数についての定義をまとめたものを Table 6.3 に示す。

Top-URG で取得されたスキャンデータは、水中でのレーザの屈折が考慮されていない。つまり、Top-URG 内部で計算された Top-URG から障害物までの距離は、Fig. 6.8 に示す緑の破線で示された光路長 (raw optical path) となる。しかし、実際には、Top-URG から放射されたレーザは、Fig. 6.8 の赤い線 (corrected optical path) のように、各媒質に進入する際に屈折しながら障害物まで到達する。したがって、正しい計測位置はレーザと障害物との交点 D となる。ここで、Top-URG は投受光部一体型であるため、点 D で反射したレーザは同じ光路をたどって Top-URG に帰還する。そのため Fig. 6.8 ではレーザの復路を省略している。以下に点 D の座標の導出過程を示す。

まず、レーザとアクリル球殻内縁との交点 D_i の座標を求める。レーザの軌跡を示す直線 HD_i の方程式は $Y = h$ 、アクリル球殻内側は円の方程式 $X^2 + Y^2 = r_i^2$ で表される。交点 D_i の座標を (X_i, Y_i) とすると、図より $r_i > h$, $X_i > 0$ となることから

$$X_i = \sqrt{r_i^2 - h^2} \quad (6.1)$$

$$Y_i = h \quad (6.2)$$

となる。

次に、点 D_i で屈折したレーザとアクリル球殻外縁との交点 D_o の座標を求める。レーザの軌跡を示す直線 $D_i D_o$ の方程式は、点 $D_i(X_i, Y_i)$ を通る傾き $\tan(\theta_{ai} - \theta_{so})$ の直線より

$$X \tan(\theta_{ai} - \theta_{so}) - Y - X_i \tan(\theta_{ai} - \theta_{so}) + h = 0 \quad (6.3)$$

となる。ただし、

$$\tan \theta_{ai} = \frac{h}{\sqrt{r_i^2 - h^2}} \quad (6.4)$$

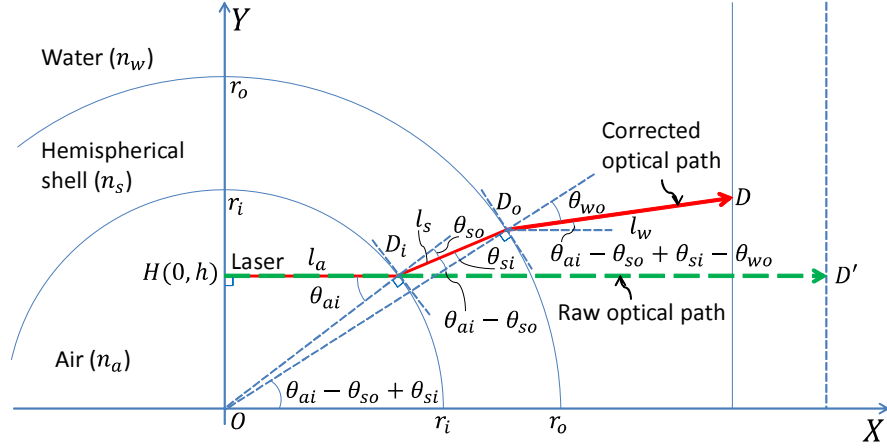


Fig. 6.8: Refraction principle of a measurement by a laser in water. The red line indicates a corrected optical path of a laser emitted from Top-URG. The corrected optical path is calculated by using refractive indices n_w , n_s and n_a . The green dashed line indicates a raw optical path of a laser without any corrections.

Table 6.3: Parameters for calculations of scan data corrections.

Param.	Value	Description
r_i [cm]	14.7	Inside radius of the acrylic hemispherical shell
r_o [cm]	15	Outside radius of the acrylic hemispherical shell
h [cm]	8	Height of the laser emissions
θ_{ai} [rad]	by (6.5)	Angle of incidence from air to the acrylic hemispherical shell
θ_{so} [rad]	by (6.7)	Angle of refraction from air to the acrylic hemispherical shell
θ_{si} [rad]	by (6.25)	Angle of incidence from the acrylic hemispherical shell to water
θ_{wo} [rad]	by (6.21)	Angle of refraction from the acrylic hemispherical shell to water
l_a [cm]	by (6.13)	Optical path length of a laser in air from H to D_i
l_s [cm]	by (6.13)	Optical path length of a laser in the shell from D_i to D_o
l_w [cm]	by (6.17)	Optical path length of a laser in water from D_o to D
n_a	1.0002745	Refractive index of a laser ($\lambda = 905$ nm) in air
n_s	1.4832	Refractive index of a laser ($\lambda = 905$ nm) in the acrylic hemispherical shell
n_w	1.3280	Refractive index of a laser ($\lambda = 905$ nm) in water
e_s [cm]	3	Measurement accuracy of Top-URG (see Table 6.1)
W	100	Error tolerance of reflection intensities
L	30	Number of iterations for a weighted least-square method

より

$$\theta_{ai} = \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{r_i^2 - h^2}} \right) \quad (6.5)$$

である．また Snell の法則から

$$\sin \theta_{so} = \frac{n_a}{n_s} \sin \theta_{ai} \quad (6.6)$$

より

$$\theta_{so} = \sin^{-1} \left(\frac{n_a}{n_s} \sin \theta_{ai} \right) \quad (6.7)$$

となる．ここで $a = \tan(\theta_{ai} - \theta_{so})$, $b = -1$, $c = -X_i \tan(\theta_{ai} - \theta_{so}) + h$ とおく．アクリル球殻外縁の方程式は $X^2 + Y^2 = r_o^2$ と表されることから，交点 D_o の座標 (X_o, Y_o) は

$$X_o = \frac{-ac \pm b\sqrt{(a^2 + b^2)r_o^2 - c^2}}{a^2 + b^2}, \quad (6.8)$$

$$Y_o = \frac{-bc \mp a\sqrt{(a^2 + b^2)r_o^2 - c^2}}{a^2 + b^2} \quad (6.9)$$

となる．ここで $X_i > 0$, $Y_i > 0$ であり，また $\theta_{ai} > \theta_{so}$, $0 < \theta_{ai} < \pi/4$, $0 < \theta_{so} < \pi/4$ から $a > 0$, $b < 0$, $c > 0$ となるので

$$X_o = \frac{-ac - b\sqrt{(a^2 + b^2)r_o^2 - c^2}}{a^2 + b^2}, \quad (6.10)$$

$$Y_o = \frac{-bc + a\sqrt{(a^2 + b^2)r_o^2 - c^2}}{a^2 + b^2} \quad (6.11)$$

となる．

最後に，点 D_o で屈折したレーザと障害物との交点 $D(X_d, Y_d)$ の座標を求める．ここで，補正された実際の光路長を l とすると，

$$l = l_a + l_s + l_w \quad (6.12)$$

と表される．ただし

$$l_a = \sqrt{r_i^2 - h^2}, \quad (6.13)$$

$$l_s = \overline{D_i D_o} = \sqrt{(X_o - X_i)^2 + (Y_o - Y_i)^2}, \quad (6.14)$$

$$l_w = \overline{D_o D} = \sqrt{(X_d - X_o)^2 + (Y_d - Y_o)^2} \quad (6.15)$$

である．一方で，Top-URG で観測された補正なしの距離を l_0 とすると， l_0 は各媒質中の屈折を考慮していないため，

$$l_0 = l_a + \frac{n_s}{n_a} l_s + \frac{n_w}{n_a} l_w \quad (6.16)$$

と表せる．このうち l_0, l_a, l_s は既知であるから

$$l_w = \frac{n_a}{n_w} \left(l_0 - l_a - \frac{n_s}{n_a} l_s \right) \quad (6.17)$$

と求められる．したがって，図より点 $D(X_d, Y_d)$ の座標は

$$X_d = l_w \cos(\theta_{ai} - \theta_{so} + \theta_{si} + \theta_{wo}) + X_o, \quad (6.18)$$

$$Y_d = l_w \sin(\theta_{ai} - \theta_{so} + \theta_{si} + \theta_{wo}) + Y_o \quad (6.19)$$

となる．ここで Snell の法則より

$$\sin \theta_{wo} = \frac{n_s}{n_w} \sin \theta_{si} \quad (6.20)$$

から

$$\theta_{wo} = \sin^{-1} \left(\frac{n_s}{n_w} \sin \theta_{si} \right) \quad (6.21)$$

が得られる．また， θ_{si} については，加法定理より

$$\tan \theta_{si} = \tan\{(\theta_{si} + \theta_{ai} - \theta_{so}) - (\theta_{ai} - \theta_{so})\} \quad (6.22)$$

$$= \frac{\tan(\theta_{si} + \theta_{ai} - \theta_{so}) - \tan(\theta_{ai} - \theta_{so})}{1 + \tan(\theta_{si} + \theta_{ai} - \theta_{so}) \tan(\theta_{ai} - \theta_{so})} \quad (6.23)$$

$$= \frac{Y_o/X_o - a}{1 + aY_o/X_o} \quad (6.24)$$

となることから

$$\theta_{si} = \tan^{-1} \left(\frac{Y_o/X_o - a}{1 + aY_o/X_o} \right) \quad (6.25)$$

と求められる．

上記の計算を Top-URG の各走査角 θ におけるスキャンデータに対して行い，

$$x = X_d \cos \theta, \quad (6.26)$$

$$y = X_d \sin \theta, \quad (6.27)$$

$$z = Y_d \quad (6.28)$$

とすることで x, y, z 座標に変換する.

本研究では各定数について, Top-URG のレーザ投受光の高さは $h = 8 \text{ cm}$, アクリル球殻の内径, 外径はそれぞれ $r_i = 14.7 \text{ cm}$, $r_o = 15 \text{ cm}$ とした. 波長 905 nm のレーザの各媒質中における屈折率については, 文献からそれぞれ, 空気中の屈折率 $n_a = 1.0002745$ [135], アクリル球殻中の屈折率 $n_s = 1.4832$ [136], 水中の屈折率 $n_w = 1.3280$ [53] とした. 以下に補正結果を示す.

補正結果

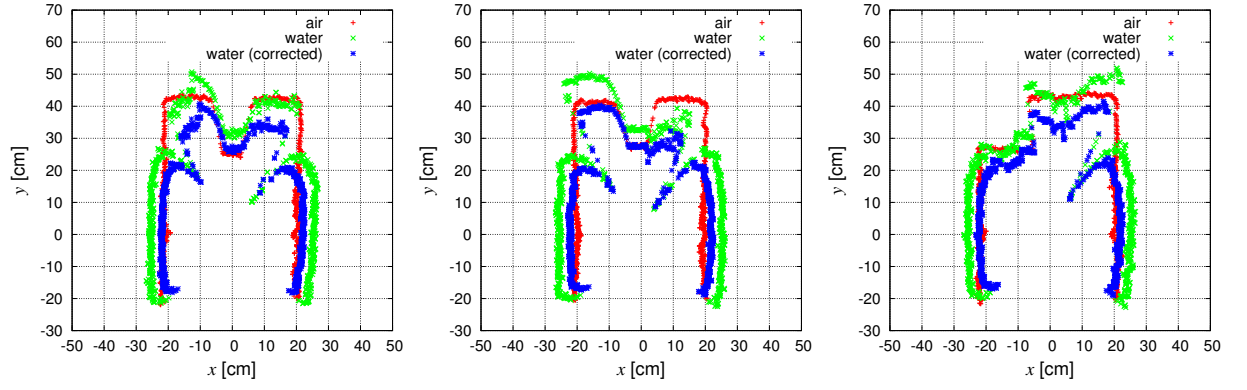
6.2.1 節の実験 (1) 水の濁りを変化させた水中計測における対称配置 (直交型), 対称配置 (垂直型), 非対称配置 (オフセット型) の水中 (墨汁 0 ml) のスキャンデータ (Fig. 6.5 の緑色スキャンデータ) を上述の提案手法で補正し, 空気中のスキャンデータと比較した結果を Fig. 6.9 に示す. 各図において, 青色が空気中, 赤色が水中 (補正なし), 緑色が水中 (補正あり) のスキャンデータを描画したものである. 結果から, シンク側面部分や円柱部分のスキャンデータに関しては, 補正後のスキャンデータが空気中のスキャンデータとほぼ重なっており, 本提案手法の有効性が確認できる.

一方で, 本手法ではアクリル球殻を真球であると想定しているが, 実際にはゆがんでいる場合も考えられる. その影響を試算したところ, 計算上でアクリル球殻半径を $\pm 1 \text{ mm}$ 変動させた際の補正結果の変動は $\pm 0.33 \text{ mm}$ であり, アクリル球殻の厚みを $\pm 1 \text{ mm}$ 変動させた際の補正結果の変動は $\pm 0.47 \text{ mm}$ であった. これは Top-URG の精度 ($\pm 30 \text{ mm}$) と比較しても十分小さく, 補正結果への影響は小さい.

Fig. 6.9 では依然として空気中のスキャンデータと一致しないゴーストとみられるスキャンデータが確認できる. この修正手法については続く節で述べる.

6.3.2 受光強度を利用した信頼性の低いデータの除去

6.2.2 節の実験 (2) 対象物の位置と角度を変化させた水中計測結果 (Fig. 6.7) から, 水中計測で取得したスキャンデータの中で受光強度が相対的に低いデータは, 正しくスキャンできていないゴーストである可能性が高いことを確認した. 誤ったスキャンデータを除去する手法として, 三角測量方式の LRF による計測結果にエピポーラ幾何拘束を適用することで, 誤ったレーザ反射点を除去する手法がある [137]. しかし, 本研究で用いている汎用 LRF は, 投受光部がほぼ同位置にある TOF 方式であり, エピポーラ幾何拘束条件を適用することができない. そこで, Top-URG による水中計測で取得したスキャンデータの受光強度を用いて, 水中計測において信頼性の低いデータを除去する手法を提案する.



(a) Cross placement of the target. (b) Vertical placement of the target. (c) Offset placement of the target.

Fig. 6.9: Correction results of scan data in the cases of (a) Cross placement, (b) Vertical placement and (c) Offset placement of the target by using a refractive index of water. The red data points indicate scan data in air, the green data points indicate raw scan data in water (turbidity: 0 mg/l) and the blue data points indicate the corrected scan data by a refractive index of water.

除去手法

レーザによる水中計測において、できるだけ遠くにある障害物を検出できることが望ましい．そこで，ゴーストを除去する際，できるだけ遠くのスキャン点が含まれるように受光強度の閾値を設定することが必要である．また，消光係数 k の媒質中を波長 λ の光が x だけ進むとき，光強度は $e^{-4\pi kx/\lambda}$ 倍となることが知られている．そのため，基本的に Top-URG から最も遠いスキャン点における受光強度はそれより近いスキャン点の受光強度と比べて相対的に小さくなる．Table 6.2 から，Top-URG とスキャン対象との距離が大きくなるにつれて受光強度が小さくなることを確認できる．そこで，Top-URG から最も遠いスキャン点における受光強度より小さい受光強度をもつスキャン点は，信頼性が低いと判断できる．この特性を利用して，ゴーストを除去する手法を提案する．以下に提案手法の具体的な手順を示す．

前節の式 (6.12) で求めた， N 点を含むスキャンデータの i 番目の点の補正光路長 l_i の最大値を

$$l_{\max} = \max \{l_i\}, \quad (i = 1, \dots, N) \quad (6.29)$$

と求める．ここで，Top-URG の測定値には誤差（真値とのずれ）が含まれているため，この点が実際に最も遠いスキャン点とは限らない．そこで，誤差の範囲内のスキャン点も考慮することとする．誤差の範囲は測距精度 (accuracy) で表される．Top-URG の測距精度を e_s とし， $l_{\max} - e_s \leq l_j \leq l_{\max} + e_s$ となるスキャン点の受光強度 I_j の集合を，

閾値の候補となる受光強度の集合 $\hat{I}_{th}$ として

$$\hat{I}_{th} = \{I_j \mid l_{\max} - e_s \leq l_j \leq l_{\max} + e_s, j = 1, \dots, M\} \quad (6.30)$$

と表す．ただし， M は $l_{\max} - e_s \leq l_j \leq l_{\max} + e_s$ となるスキャン点の数を表す．

次に， $\hat{I}_{th}$ を用いてゴーストとみられるスキャン点を除去するための閾値 I_{th} を決定する．ここで，スキャンデータにはゴーストが含まれているため，受光強度集合 $\hat{I}_{th}$ にも大きく外れた受光強度値を持つデータが含まれている．そこで，重み付き最小二乗法を用いて外れ値の影響を除いた閾値を求める．具体的には，重みを更新しながら以下の式を繰り返し計算し，求める閾値 I_{th} と $\hat{I}_{th}$ 内の各値との差の最小化を行う．

$$\begin{aligned} & \min \sum_{j=1}^M w_j^{(m)} \left(I_j - I_{th}^{(m)} \right)^2 \\ & = \min \left\{ \sum_{j=1}^M w_j^{(m)} I_j^2 - 2I_{th}^{(m)} \sum_{j=1}^M w_j^{(m)} I_j + \left(I_{th}^{(m)} \right)^2 \sum_{j=1}^M w_j^{(m)} \right\} \end{aligned} \quad (6.31)$$

ここで， $w_j^{(m)}$ は j 番目の点に対する m 回目の重みであり， $I_{th}^{(m)}$ は m 回目に推定された受光強度の閾値である．ただし，計算を L 回繰り返すこととし， $m = 1, \dots, L$ とする．ここでは重み付けとして Tukey の Biweight 法を用いた．この手法では誤差（閾値 I_{th} と $\hat{I}_{th}$ 内の各値との差）の大きさに応じて重みが以下のように決定される．

$$w_j^{(m)} = \begin{cases} 0 & (|d_j^{(m-1)}| > W) \\ \left\{ 1 - \left(\frac{d_j^{(m-1)}}{W} \right)^2 \right\}^2 & (|d_j^{(m-1)}| \leq W) \end{cases} \quad (6.32)$$

ここで， $d_j^{(m-1)}$ は j 番目の点の $(m-1)$ 回目の閾値 I_{th} と $\hat{I}_{th}$ 内の各値との差であり， W はその差の許容範囲である．ただし，

$$d_j^{(m-1)} = I_j - I_{th}^{(m-1)} \quad (6.33)$$

である．ここで $I_{th}^{(m-1)}$ は $(m-1)$ 回目に推定された受光強度の閾値である．

m 回目に推定される受光強度の閾値 $I_{th}^{(m)}$ は，式 (6.31) を $I_{th}^{(m)}$ で微分して

$$2I_{th}^{(m)} \sum_{j=1}^M w_j^{(m)} - 2 \sum_{j=1}^M w_j^{(m)} I_j = 0 \quad (6.34)$$

となる $I_{th}^{(m)}$ を求めることで得られる．これを解いて

$$I_{th}^{(m)} = \frac{\sum_{j=1}^M w_j^{(m)} I_j}{\sum_{j=1}^M w_j^{(m)}} \quad (6.35)$$

となる．

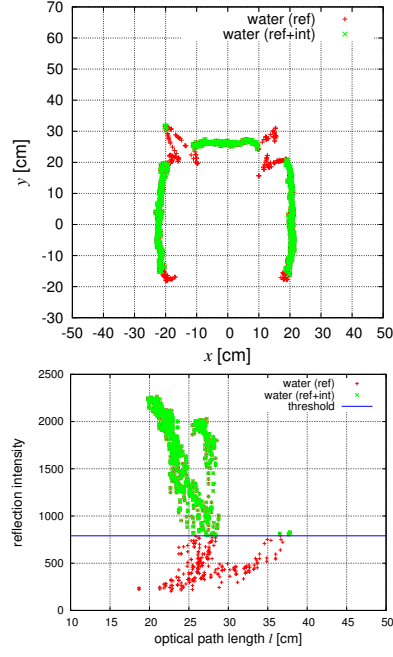
本研究では，Top-URG の測距精度を Table 6.1 の仕様から $e_s = 3$ [cm]，受光強度の誤差の許容範囲を試行錯誤的に $W = 100$ とした．また今回使用したスキャンデータを用いた重み付き最小二乗法の計算では，30 回程度でほぼ $I_{th}^{(m)}$ が収束していたことから $L = 30$ とした (Table 6.3 参照)．

修正結果

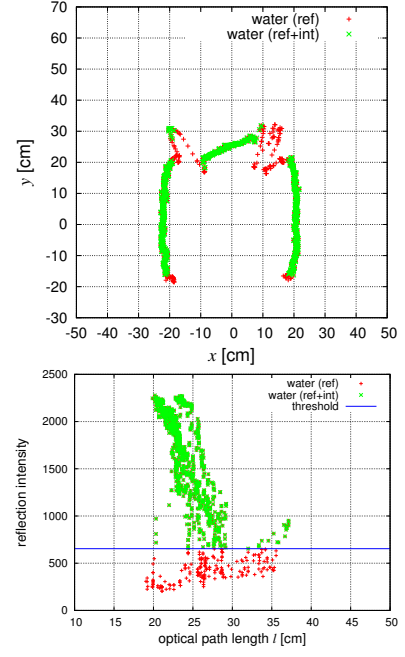
まず，6.2.2 節の実験 (2) 対象物の位置と角度を変化させた水中計測におけるスキャンデータ (Fig. 6.7) を上述の手法で修正した．結果を Fig. 6.10 に示す．ここで各図上段は x, y 平面上でのプロットを示している．赤色のスキャンデータは屈折率による補正のみを行ったもの (ref) であり，緑色のスキャンデータは屈折率による補正と受光強度の閾値による修正を行ったもの (ref+int) である．また，各図下段は屈折率を用いて補正された光路長 l と受光強度との関係を示している．さらに，青い直線は本提案手法で計算された受光強度の閾値を示しており，この閾値以下のスキャンデータは除去されることを示している．ここで，各閾値は Top-URG から最も遠い点が含まれるように設定されていることが確認できる．上段の図から，修正されたスキャンデータにはシンクの側壁とスキャン対象として用いた板のみが残されていることが分かる．

さらに，6.2.1 節の実験 (1) 水の濁りを変化させた水中計測におけるスキャンデータを屈折率を用いて補正した結果 (Fig. 6.9) に対して本手法による修正を適用した．その結果を Fig. 6.11 に示す．ここで各図上段の赤色は空気中でのスキャンデータ，緑色は水中でのスキャンデータに屈折率による補正のみを行ったもの (ref)，青色は水中でのスキャンデータに屈折率による補正と受光強度の閾値による修正を行ったもの (ref+int) を示している．各図下段は屈折率を用いて補正された光路長 l と受光強度との関係を示しており，紫色の直線が本手法で計算された閾値である．ここでも各閾値は Top-URG から最も遠い点が含まれるように設定されていることが分かる．結果より，側壁とスキャン対象の円柱の一部が残されていることが確認できる．以上から，本提案手法により，ゴーストとみられる信頼性の低いスキャンデータをほぼ除去できることを確認した．

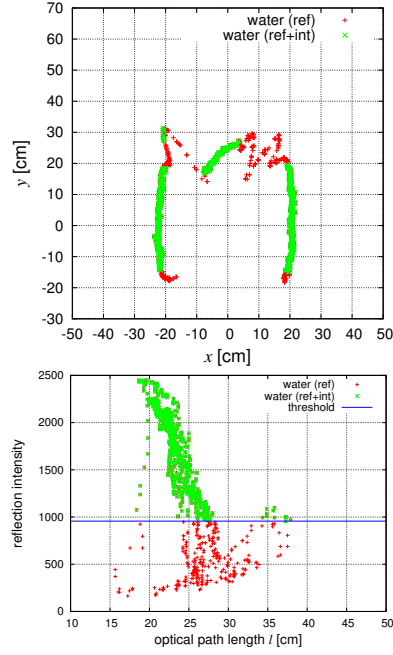
また，空気中での計測結果と比較した結果を Fig. 6.12 に示す．ここでは，青色が補正なしの計測結果 (no correction)，緑色が屈折率を用いた補正結果 (ref)，赤色が屈折



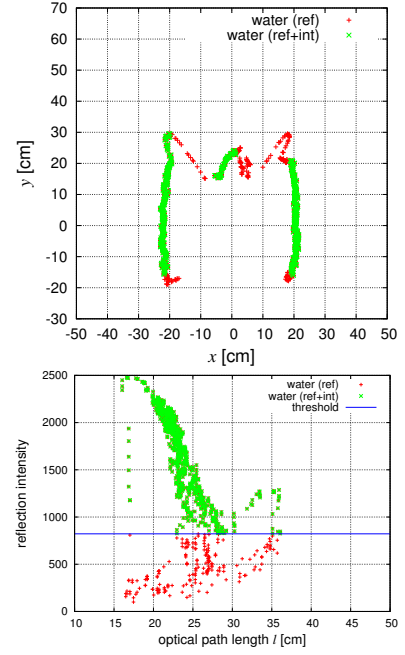
(a) 0° of the inclining angle.



(b) 30° of the inclining angle.

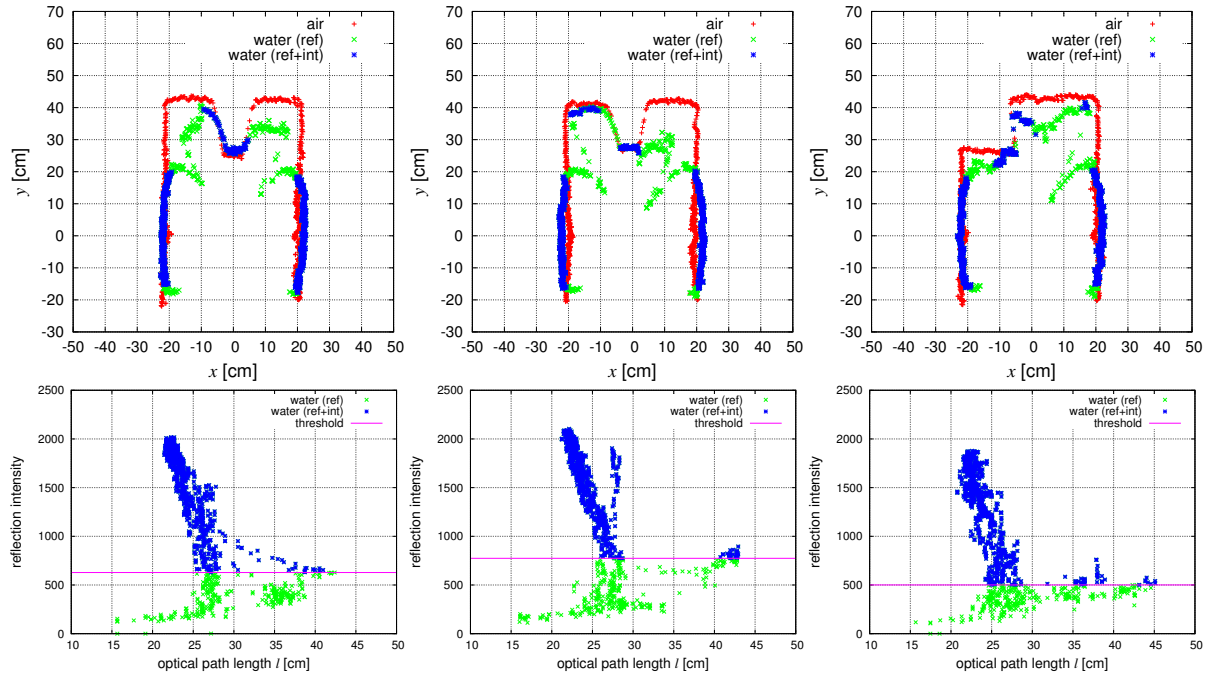


(c) 50° of the inclining angle.



(d) 70° of the inclining angle.

Fig. 6.10: Correction results of scan data by removing data points which have reflection intensities lower than the automatically calculated thresholds in the cases of (a) 0° , (b) 30° , (c) 50° and (d) 70° of the inclining angle of the target plate in the experiment (2). The red data points indicate the corrected scan data by a refractive index of water (ref), and the green data points indicate corrected scan data by a refractive index of water and by eliminations according to thresholds for reflection intensities (ref+int). Each lower stand indicates a relationship between optical path lengths and reflection intensities. The blue lines are the automatically calculated thresholds.



(a) Cross placement of the target. (b) Vertical placement of the target. (c) Offset placement of the target.

Fig. 6.11: Correction results of scan data by removing data points which have reflection intensities lower than the automatically calculated thresholds in the cases of (a) Cross placement, (b) Vertical placement and (c) Offset placement of the target in the experiment (1). The red data points indicate scan data in air, the green data points indicate the corrected scan data by a refractive index of water (ref), and the blue data points indicate corrected scan data by a refractive index of water and by eliminations according to thresholds for reflection intensities (ref+int). Each lower stand indicates a relationship between optical path lengths and reflection intensities. The purple lines indicate the automatically calculated thresholds.

率と受光強度を用いた補正結果 (ref+int) における，空気中の計測結果との最近傍点間の平均誤差を示している．2つのスキャンデータの差は xy 平面上での距離とした．結果として，本提案手法を用いて屈折の影響およびゴーストを除去した場合 (ref+int) は平均誤差とそのばらつきが3つすべての環境で減少しており，提案手法の有効性が確認できる．

さらに，Fig. 6.10とFig. 6.11において本提案手法で計算された受光強度の閾値 I_{th} と，繰り返しステップ m との関係を表したグラフをFig. 6.12に示す．ここでは確認のために $m = 40$ までの値を示している． $m = 10$ までにはほぼ I_{th} は収束しているが，厳密に同じ値になるまでには $m = 30$ 程度まで繰り返す必要があったため，繰り返し回数を $L = 30$ としている．

なお現時点では，反射面の材質を区別する手段がないため，周囲よりも反射率の低い材質の面があるとそのスキャン点は除去される可能性がある．そこで，実装上では，

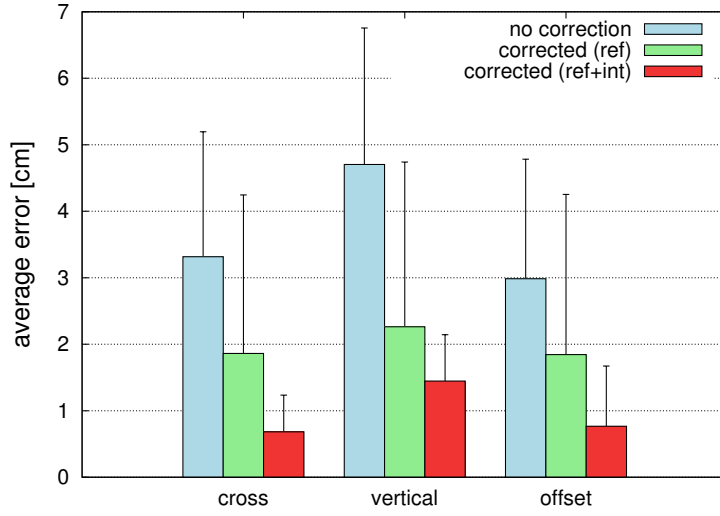


Fig. 6.12: Average errors and their standard deviations between scan data in air and corrected scan data in water for the cross placement, the vertical placement and the offset placement of the target. The blue boxes indicate results of scan data in water with no correction, the green boxes indicate correction results by a refractive index of water (ref), and the red boxes indicate correction results by both a refractive index of water and eliminations according to thresholds for reflection intensities (ref+int).

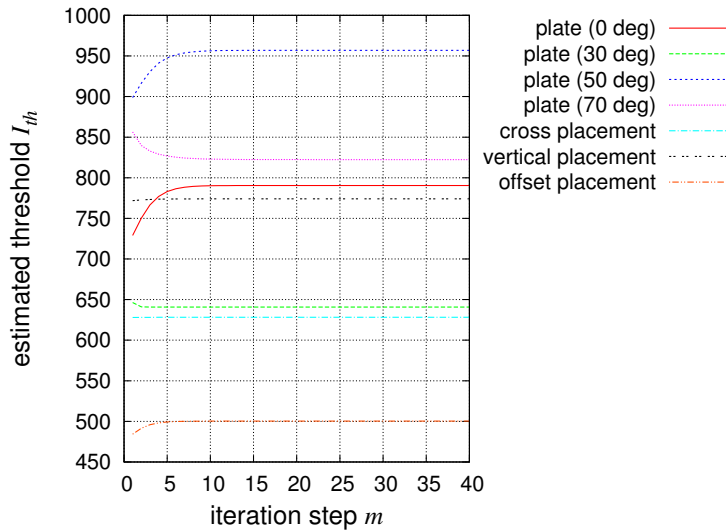


Fig. 6.13: Convergences of the automatically calculated thresholds I_{th} in the cases of 0° , 30° , 50° and 70° of the inclining angle of the target plate in the experiment (2), and the cross placement, the vertical placement and the offset placement of the cylindrical target in the experiment (1), respectively.

あらかじめ認識したい最低反射率の材質の対象を水中で計測しておき、これが除去されないように誤差の許容範囲 W や I_{th} の下限値を設定しておくことで、問題に対処できる。

6.4 本章のまとめ

本章では、汎用測域センサ (LRF) を用いて水中で取得したスキャンデータの補正手法を提案した。まず汎用 LRF を用いた基礎実験として、水の濁りを変化させた水中計測、および対象物の位置と角度を変化させた水中計測を行った。結果として、空気中での測定と比較して、水中ではレーザの屈折によりスキャンデータにゆがみが生じることや、ゴーストと呼ばれる信頼性の低いデータが得られることを確かめた。これを修正するために、レーザの屈折率を考慮してスキャンデータを補正する手法、および、受光強度に閾値を自動的に設定し、信頼性の低いデータを除去する手法を提案した。それぞれの提案手法を基礎実験で得られたデータに適用し、その有効性を確認した。

汎用 LRF を用いた水中計測の今後の課題としては、Top-URG と異なる波長のレーザを搭載した他の汎用 LRF においても提案手法が有効かどうか検証すること、および水中での三次元スキャンに提案手法を応用することがあげられる。

結言

7.1 まとめ

本研究では、災害発生時に役立つ可能性のある要素技術を開発することを目的として、移動ロボットの遠隔操作に関する要素技術に関して研究を行った。

レスキューロボットを遠隔操作するに当たり、まずロボット周囲の環境の距離感を把握することが重要であることから、第3章でLRFを用いて取得した三次元スキャンデータに対して両眼視差による立体視を行うことを提案した。取得した三次元スキャンデータは立体視用ディスプレイ表示される。立体視の評価実験環境として、大規模災害により倒壊した建物におけるレスキュー活動で想定される狭隘で複雑な環境を構築し、被災者の手を模擬した対象物を配置した。16人の参加者に対象物を探索するタスクを実行してもらい、発見した対象物数を比較した。結果として、立体視する場合で発見数が多く、三次元スキャンデータを立体視して距離感を把握することが、環境の認識しやすさに役立つことが分かった。

また、遠隔操作はリアルタイムに行う必要があることから、第4章では遠隔操作に必要なセンサの条件を設定し、新しい「三次元レーザスキャナ」を開発した。開発したスキャナの大きな特徴は、環境やタスクに応じて垂直視野角を調整可能な点である。評価実験では、本スキャナが従来手法と同じ点密度でより高速な三次元スキャンを行えることを確認した。

さらに、ロボットを用いた探索や点検ではロボットの周囲を見回すことが必要になるため、開発したスキャナの垂直視野角を大きくすることで、取得する三次元スキャンデータの範囲を拡大できるようにした。評価実験では、従来手法と比較してロボットの足元にある障害物を検出できる範囲が広くなることを確認した。また、表示デバイスとして広視野角のヘッドマウントディスプレイを導入し、広視野角のスキャナで取得した三次元スキャンデータを表示するのに適したインタフェースを構築した。

第5章では、上記で開発した三次元レーザスキャナをロボットに搭載し、ヘッドマウントディスプレイによるインタフェースで構築した遠隔操作システムの評価試験を行った。提案システムを適切に評価するために、レスキューロボット用に標準化された、不整地のテストフィールドで参加者による遠隔操作実験を行った。実験では、参加者は決められた経路に沿ってロボットを遠隔操作するタスクを実施した。また、参加者はヘッドマウントディスプレイをかぶり、三次元スキャンデータとロボットのCG

のみが表示される状況で遠隔操作を行った。結果として、本システムを用いて移動ロボットを遠隔操作できることが示された。ここで重要なことは、少なくとも遠隔操作システムとして機能するかどうかを確認することであった。したがって、提案システムはレスキューロボットの遠隔操作システムとして使用できる可能性があることが確認された。

また第6章では、将来的な課題の一つとして水中探索への対応について取り組んだ。陸上用の汎用LRFを用いて水中を計測したところ、水中では光の屈折や減衰の影響により、LRFで測定したスキャンデータにゆがみや信頼性の低いデータ「ゴースト」が発生することが分かった。そこで防水用カバーと水それぞれの屈折率と屈折角を考慮してスキャンデータを補正する手法、およびLRFの受光強度を利用してゴーストを自動的に除去する手法を提案、実装した。実装したアルゴリズムを用いて水中で計測したスキャンデータを補正した結果、空気中で計測したスキャンデータに近づくことが確認され、提案手法の有効性が示された。

以上より、本研究では、移動ロボットの遠隔操作に関する要素技術を開発することができた。開発したスキャナは、USBポート1つとLANポート1つをもつ一般的なPCであれば接続することができる。すなわち、一般的なPCを備えた移動ロボットであればすぐに搭載して使うことができる。また、ソフトウェアに関しては、ロボット搭載のPCにROSがインストールされていれば必要なROSノードを実行することができる。オペレータ側のPC環境についてはほぼ制限なく高性能のものが使用できるため、Oculus Riftを動作させるのに必要なグラフィックカードを搭載するのは容易である。したがって本研究では、何かの災害が発生した際に提供できる可能性のある遠隔操作の要素技術を開発できたといえる。将来大規模災害が発生した際に、本研究で開発した要素技術が役立つことを願っている。

7.2 今後の課題

三次元レーザスキャナに関する今後の課題としては、スキャン速度の向上による遠隔操作のリアルタイム性の向上や、カメラ画像を三次元点群に重畳表示すること、SLAMを導入して大域的な三次元環境地図を作成し提示すること、スキャンした三次元点群からロボットが通行可能な領域を計算し提示することなどを検討し、目視による遠隔操作と同等の操作スピードや安全性を達成することがあげられる。

また水中探索対応については、さまざまな水中環境やTop-URGと異なる波長のレーザを搭載した他の汎用LRFにおいても提案手法が有効かどうか検証すること、および水中での三次元スキャンに提案手法を応用することが今後の課題としてあげられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、研究会やゼミ等で適切な助言や指摘をしてくださり、日々の生活の中で研究を温かく見守ってくださった岡山大学大学院自然科学研究科インタフェースシステム学研究室の五福明夫教授に深く感謝いたします。また、研究室配属時からロボットに関する専門的な技術・知識のご教授、相談への親身な対応、また事あるごとにさまざまな形で支援をしてくださった亀川哲志講師に心より感謝いたします。さらに、杉原太郎助教のご助力により、統計的な評価手法を学ぶことができました。異なる視点からの役立つご助言に感謝いたします。材料の加工やロボット故障時に関する相談にも親切に対応してくださり、またその優れた加工技術でシステム構築に協力してくださった柴田光宣技術職員に感謝いたします。研究におけるアドバイスや実験等への協力において多大な貢献をしてくれた、研究室の同期や後輩の皆様は謹んで感謝の意を表します。ドイツ留学において楽しい生活を送る手助けをしてくれた、ミュンヘン工科大学の皆様および同留学中に知り合った諸兄諸姉の皆様にも感謝いたします。最後に、博士後期課程での研究生活を全うするにあたり、日々の弁当や飲み会時の送迎等、惜しみない援助をしてくれた、父、母、姉、兄、弟達に感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Robin Roberson Murphy. Trial by fire - Activities of the Rescue Robots at the World Trade Center from 11-21 September 2001. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 11, No. 3, pp. 50–61, Sep 2004.
- [2] Jennifer Casper and Robin Roberson Murphy. Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B: Cybernetics*, Vol. 33, No. 3, pp. 367–285, 2003.
- [3] 森利宏, 嶋地直広, 油田信一, 大矢晃久, 小柳栄次, 吉田智章. 三次元測距装置. 特許 4059911(特開 2008-134163).
- [4] 吉田智章, 入江清, 小柳栄次, 友納正裕. 広視野3Dレーザスキャナとジャイロオドメトリを用いた屋外ナビゲーション. 計測と制御, Vol. 49, No. 9, pp. 608–611, Sep 2010.
- [5] 松野文俊. 阪神淡路大震災を振り返って. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 2, pp. 138–141, 2010.
- [6] Mark J. Micire. Evolution and field performance of a rescue robot. *Journal of Field Robotics*, Vol. 25, No. 1–2, pp. 17–30, 2008.
- [7] Eric Rohmer, Tomoaki Yoshida, Kazunori Ohno, Keiji Nagatani, Satoshi Tadokoro, and Eiji Koyanagi. Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Mechatronics*, pp. 225–230, 2010.
- [8] Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, and Yasushi Hada. Redesign of rescue mobile robot Quince –Toward emergency response to the nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011–. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pp. 13–18, Nov 2011.
- [9] Keiji Nagatani, Seiga Kiribayashi, Yoshito Okada, Kazuki Otake, Kazuya Yoshida, Satoshi Tadokoro, Takeshi Nishimura, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Mineo Fukushima, and Shinji Kawatsuma. Gamma-ray irradiation test of electric components of rescue mobile

- robot Quince –Toward emergency response to nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station on March 2011–. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pp. 56–60, Nov 2011.
- [10] Erik Hollnagel, David D. Woods, and Nancy Leveson. *Resilience Engineering: Concepts And Precepts*. Ashgate Pub Co, Sep 2006.
 - [11] OpenRTM-aist. <http://www.openrtm.org/>.
 - [12] ROS (Robot Operating System). <http://www.ros.org/>.
 - [13] ImPACT プログラム「タフ・ロボティクス・チャレンジ」全体計画. http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/kakushintekikenkyu/siryo/plan07_tadokoro.pdf.
 - [14] Hartmut Surmann, Andreas Nüchter, and Joachim Hertzberg. An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 45, No. 3, pp. 181–198, 2003.
 - [15] Ioannis Stamos and Peter K. Allen. Geometry and texture recovery of scenes of large scale. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 88, No. 2, pp. 94–118, 2002.
 - [16] Marc Pollefeys, David Nistér, Jan-Michael Frahm, Amir Akbarzadeh, Philippos Mordohai, Brian Clipp, Chris Engels, David Gallup, Seon Joo Kim, Paul Merrell, C. Salmi, Sudipta N. Sinha, B. Talton, Liang Wang, Qingxiong Yang, Henrik Stewénus, Ruigang Yang, Greg Welch, and Herman Towles. Detailed Real-Time Urban 3D Reconstruction from Video. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 78, No. 2, pp. 143–167, 2008.
 - [17] Yasutaka Furukawa, Brian Curless, Steven M. Seitz, and Richard Szeliski. Reconstructing building interiors from images. In *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 80–87. IEEE, 2009.
 - [18] Sebastian Thrun, Mark Diel, and Dirk Hähnel. Scan alignment and 3-d surface modeling with a helicopter platform. In Shin’ichi Yuta, Hajime Asama, Sebastian Thrun, Erwin Prassler, and Takashi Tsubouchi, editors, *Field and Service Robotics*, Vol. 24 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pp. 287–297. Springer, 2003.
 - [19] Hiroshi Ishida, Keiji Nagatani, and Yutaka Tanaka. Three-dimensional localization and mapping for a crawler-type mobile robot in an occluded area using the scan matching method. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 449–454. IEEE, 2004.

- [20] Andreas Nüchter, Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Joachim Hertzberg, and Sebastian Thrun. 6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1998–2003. IEEE, 2004.
- [21] Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, and Shin’ichi Yuta. Outdoor Map Building Based on Odometry and RTK-GPS Positioning Fusion. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 684–690. IEEE, 2004.
- [22] Kaustubh Pathak, Andreas Birk, Narunas Vaskevicius, Max Pfingsthorn, Sören Schwertfeger, and Jann Poppinga. Online three-dimensional SLAM by registration of large planar surface segments and closed-form pose-graph relaxation. *Journal of Field Robotics*, Vol. 27, No. 1, pp. 52–84, 2010.
- [23] David M. Cole and Paul M. Newman. Using laser range data for 3d slam in outdoor environments. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1556–1563. IEEE, 2006.
- [24] Satoshi Kagami, Ryo Hanai, Naotaka Hatao, and Masayuki Inaba. Outdoor 3D map generation based on planar feature for autonomous vehicle navigation in urban environment. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1526–1531. IEEE, 2010.
- [25] Arne Rönna, Grisha Liebel, Thomas Schamm, Thilo Kerscher, and Rüdiger Dillmann. Robust 3D Scan Segmentation for Teleoperation Tasks in Areas Contaminated by Radiation. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2419–2424, 2010.
- [26] Julian Ryde and Michael Brünig. Non-Cubic Occupied Voxel Lists for Robot Maps. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4771–4776, 2009.
- [27] Sheraz Khan, Athanasios Dometios, Chris Verginis, Costas Tzafestas, Dirk Wollherr, and Martin Buss. Rmap: a rectangular cuboid approximation framework for 3d environment mapping. *Autonomous Robots*, Vol. 37, No. 3, pp. 261–277, 2014.
- [28] Susumu Tachi. *Telexistence*. World Scientific, 2010.
- [29] Kouichi Watanabe, Ichiro Kawabuchi, Naoki Kawakami, Taro Maeda, and Susumu Tachi. TORO: Development of a Telexistence Visual System Using a 6-d.o.f. Robot Head. *Advanced Robotics*, Vol. 22, No. 10, pp. 1053–1073, 2008.

- [30] Salvatore Livatino, Giovanni Muscato, and Filippo Privitera. Stereo Viewing and Virtual Reality Technologies in Mobile Robot Teleguide. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, No. 6, pp. 1343–1355, 2009.
- [31] Manuel Ferre, Rafael Aracil, and Manuel Navas. Stereoscopic video images for telerobotic applications. *Journal of Field Robotics*, Vol. 22, No. 3, pp. 131–146, 2005.
- [32] Jessie Y. C. Chen, Razia V. N. Oden, Caitlin Kenny, and John O. Merritt. Evaluation of Stereoscopic Display for Indirect-vision Driving and Robot Teleoperation. *The WSTIAC (Weapon Systems Technology Information Analysis Center) Quarterly*, Vol. 10, No. 2, pp. 3–9, 2010.
- [33] Jessie Y. C. Chen, Ellen C. Haas, and Michael J. Barnes. Human Performance Issues and User Interface Design for Teleoperated Robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part C: Applications and Reviews*, Vol. 37, No. 6, pp. 1231–1245, 2007.
- [34] Robin Roberson Murphy. Human-Robot Interaction in Rescue Robotics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part C: Applications and Reviews*, Vol. 34, No. 2, pp. 138–153, 2004.
- [35] William E. Lorensen and Harvey E. Cline. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 163–169, Aug 1987.
- [36] Juan D. Tardós, José Neira, Paul M. Newman, and John J. Leonard. Robust mapping and localization in indoor environments using sonar data. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 21, pp. 311–330, 2002.
- [37] Hans Jacob S. Feder, John J. Leonard, and Christopher M. Smith. Adaptive Mobile Robot Navigation and Mapping. *The International Journal of Robotic Research*, Vol. 18, No. 7, pp. 650–668, 1999.
- [38] Ricard Campos, Rafael Garcia, Pierre Alliez, and Mariette Yvinec. A Surface Reconstruction Method for In-Detail Underwater 3D Optical Mapping. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 34, No. 1, p. 25, Jan 2015.
- [39] R. Paul Gorman and Terrence J. Sejnowski. Analysis of hidden units in a layered network trained to classify sonar targets. *Neural Networks*, Vol. 1, No. 1, pp. 75–89, 1988.
- [40] Brendan Englot and Franz S. Hover. Three-dimensional coverage planning for an underwater inspection robot. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 32, No. 9-10, pp. 1048–1073, 2013.

- [41] L. De Dominicis, M. Ferri de Collibus, G. Fornetti, M. Guarneri, M. Nuvoli, R. Ricci, and M. Francucci. Improving underwater imaging in an amplitude-modulated laser system with radio frequency control technique. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, Vol. 5, pp. 10004–1–10004–5, 2010.
- [42] Enrique Pena Gonzalez, Felix Sanchez-Tembleque Diaz-Pache, Luis Pena Mosquera, and Jeronimo Puertas Agudoa. Bidimensional measurement of an underwater sediment surface using a 3d-scanner. *Optics and Laser Technology*, Vol. 39, No. 3, pp. 481–489, 2007.
- [43] Shawn O’Connor, Linda J. Mullen, and Brandon Cochenour. Underwater modulated pulse laser imaging system. *Optical Engineering*, Vol. 53, No. 5, pp. 051403–1–051403–9, May 2014.
- [44] Nicola J. Grigg, I. T. Webster, and P. W. Ford. Non-destructive measurement of the time evolution of burrowing shrimp mound topography. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 329, pp. 157–168, 2007.
- [45] Jan Christian Albiez, Alexander Duda, Martin Fritsche, Felix Rehrmann, and Frank Kirchner. CSurvey - An autonomous optical inspection head for AUVs. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 67, pp. 72–79, 2015.
- [46] Chau-Chang Wang and Dajun Tang. Application of Underwater Laser Scanning for Seafloor Shell Fragments Characterization. *Journal of Marine Science and Technology-TAIWAN*, Vol. 20, No. 1, pp. 95–102, Feb 2012.
- [47] Thomas J. Kulp, Darrel Garvis, Randall Kennedy, Tom Salmon, and Keith Cooper. Development and testing of a synchronous-scanning underwater imaging system capable of rapid two-dimensional frame imaging. *Applied Optics*, Vol. 32, No. 19, pp. 3520–3530, Jul 1 1993.
- [48] Karl D. Moore. Intercalibration method for underwater three-dimensional mapping laser line scan systems. *Applied Optics*, Vol. 40, No. 33, pp. 5991–6004, Nov 20 2001.
- [49] 山下淳, 林本悦一, 金子透. レーザレンジファインダを用いた水中物体の3次元形状計測. 日本機械学会論文集C編, Vol. 72, No. 717, pp. 1506–1513, May 2006.
- [50] David Jay Segelstein. The Complex Refractive Index of Water. Master’s thesis, University of Missouri, Kansas City, 1981.
- [51] Michael Maus, Els Rousseau, Mircea Cotlet, Gerd Schweitzer, Johan Hofkens, Mark Van der Auweraer, Frans C. De Schryver, and Arnd Krueger. New picosecond laser system for easy tunability over the whole ultraviolet/visible/near infrared wavelength range based

- on flexible harmonic generation and optical parametric oscillation. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 72, No. 1, 1, pp. 36–40, Jan 2001.
- [52] Hirohiko Kawata, Akihisa Ohya, Shin’ichi Yuta, Wagle Santosh, and Toshihiro Mori. Development of ultra-small lightweight optical range sensor system. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1078–1083. IEEE, 2005.
 - [53] George M. Hale and Marvin R. Query. Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- μ m Wavelength Region. *Applied Optics*, Vol. 12, No. 3, pp. 555–563, Mar 1973.
 - [54] Tetsushi Kamegawa, Noritaka Sato, Michinori Hatayama, Yojiro Uo, and Fumitoshi Matsuno. Design and implementation of grouped rescue robot system using self-deploy networks. *Journal of Field Robotics*, Vol. 28, No. 6, pp. 977–988, 2011.
 - [55] Kazunori Ohno, Toyokazu Kawahara, and Satoshi Tadokoro. Development of 3D Laser Scanner for Measuring Uniform and Dense 3D Shapes of Static Objects in Dynamic Environment. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 2161–2167, 2009.
 - [56] Keiji Nagatani, Naoki Tokunaga, Yoshito Okada, and Kazuya Yoshida. Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*, pp. 25–30, 2008.
 - [57] Paul Bourke and Peter Morse. Stereoscopy: Theory and practice. In *Workshop at 13th International Conference*, 2007.
 - [58] 河原哲夫. 奥行きの知覚. 眼科, Vol. 40, pp. 161–168, 1998.
 - [59] Lisa C. Thomas and Christopher D. Wickens. Effects of display frames of reference on spatial judgments and change detection, 2000.
 - [60] Donald R. Lampton, Michael J. Singer, Daniel P. McDonald, and James P. Bliss. Distance Estimation in Virtual Environments. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, pp. 1268–1272, 1995.
 - [61] Bob G. Witmer and Paul B. Kline. Judging Perceived and Traversed Distance in Virtual Environments. *Presence*, Vol. 7, No. 2, pp. 144–167, 1998.
 - [62] Douglas E. McGovern. Pictorial communication in virtual and real environments. chapter Experience and results in teleoperation of land vehicles, pp. 182–195. Taylor & Francis, Inc., Bristol, PA, USA, 1991.

- [63] Anu Rastogi. Design of an interface for teleoperation in unstructured environments using augmented reality displays. Master's thesis, Univ. Toronto, Toronto, ON, Canada, 1996.
- [64] David Drascic. An Investigation of Monoscopic and Stereoscopic Video for Teleoperation. Master's thesis, Univ. Toronto, Toronto, ON, Canada, 1991.
- [65] David R. Scribner and James W. Gombash. *The Effect of Stereoscopic and Wide Field of View Conditions on Teleoperator Performance*. ARL-TR-1598. U.S. Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, 1998.
- [66] J. V. Draper, S. Handel, C. C. Hood, and C. T. Kring. Three Experiments with Stereoscopic Television: When It Works and Why. In *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 1047–1052, 1991.
- [67] 畑田豊彦. 3D ディスプレイに要求されるもの, 2010.
- [68] Kourosh Khoshelham and Sander Oude Elberink. Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. *Sensors*, No. 12, pp. 1437–1454, 2012.
- [69] 藤野雄介, 清水尚吾, 黒田洋司. 回転式揺動機構の3DLRFの開発および精度評価. 第31回日本ロボット学会学術講演会, No. 1N3-06, 2013.
- [70] Martin A. Fischler and Robert C. Bolles. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, 1981.
- [71] Robert B. Fisher. The RANSAC (Random Sample Consensus) Algorithm. http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/FISHER/RANSAC/, 2002.
- [72] 計算幾何学 第三章 凸包. http://i-health.u-aizu.ac.jp/CompuGeo/2006/stocked_notes/Chapter3S.pdf.
- [73] Ronald Lewis Graham. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set. *Information processing letters*, Vol. 1, No. 4, pp. 132–133, 1972.
- [74] Oculus VR. <https://www.oculus.com/>.
- [75] Oculus VR. Oculus Best Practice, 2015.
- [76] Koichi Osuka. Rescue Robot Contest – to expand the range of rescue research. *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 6, pp. 565–568, 2002.
- [77] Performance Metrics and Test Arenas for Autonomous Mobile Robots. <http://www.nist.gov/el/isd/testarenas.cfm>.

- [78] ロボカップレスキュー実機リーグルール. <https://sites.google.com/site/robocupjorescuerobotleague/other/rr1-rule>.
- [79] Nozomu Matsumoto. Development of underwater search and rescue remotely operated vehicles. *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 6, pp. 561–564, 2002.
- [80] Robin Roberson Murphy and Sam Stover. Rescue Robots for Mudslides: A Descriptive Study of the 2005 La Conchita Mudslide Response. *Journal of Field Robotics*, Vol. 25, No. 1-2, pp. 3–16, 2008.
- [81] Alon Wolf, Howie Choset, H. Benjamin Brown, and Randall W. Casciola. Design and control of a mobile hyper-redundant urban search and rescue robot. *Advanced Robotics*, Vol. 19, No. 3, pp. 221–248, 2005.
- [82] Masayuki Arai, Yoshinori Tanaka, Shigeo Hirose, Hiroyuki Kuwahara, and Shingo Tsukui. Development of "Souryu-IV" and "Souryu-V: " Serially connected crawler vehicles for in-rubble searching operations. *Journal of Field Robotics*, Vol. 25, No. 1-2, pp. 31–65, 2008.
- [83] Yan Guo, Aiguo Song, Jiatong Bao, Hongru Tang, and Jianwei Cui. A combination of terrain prediction and correction for search and rescue robot autonomous navigation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 207–214, 2009.
- [84] David Sanders. Comparing ability to complete simple tele-operated rescue or maintenance mobile-robot tasks with and without a sensor system. *Sensor Review*, Vol. 30, No. 1, pp. 40–50, 2010.
- [85] Jonathan Roberts and Rod Walker. Flying Robots to the Rescue. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 17, No. 1, pp. 8–10, Mar 2010.
- [86] Alberto Valero, Gabriele Randelli, Fabiano Botta, Miguel Hernando, and Diego Rodríguez-Losada. Operator Performance in Exploration Robotics: A Comparison Between Stationary and Mobile Operators. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 64, No. 3, pp. 365–385, Dec 2011.
- [87] Geert J. M. Kruijff, Ivana Kruijff-Korbayová, Shanker Keshavdas, Benoit Larochelle, Miroslav Janíček, Francis Colas, Ming Liu, François Pomerleau, Roland Siegwart, Mark A. Neerincx, Rosemarijn Looije, Nanja J. J. M. Smets, Tina Mioch, Jurriaan van Diggelen, Fiora Pirri, Mario Gianni, Federico Ferri, Matteo Menna, Rainer Worst, Thorsten Linder, Varoslav Tretyakov, Hartmut Surmann, Tomas Svoboda, Michal Reintein, Karel Zimmermann, Tomas Petříček, and Vaclav Hlaváč. Designing, developing, and deploying systems

- to support human-robot teams in disaster response. *Advanced Robotics*, Vol. 28, No. 23, pp. 1547–1570, 2014.
- [88] Vladimír Kubelka, Lorenz Oswald, François Pomerleau, Francis Colas, Tomáš Svoboda, and Michal Reinstein. Robust Data Fusion of Multimodal Sensory Information for Mobile Robots. *Journal of Field Robotics*, Vol. 32, No. 4, SI, pp. 447–473, Jun 2015.
 - [89] Takahiro Sasaki and Kenji Kawashima. Development of a remote control system for construction machinery for rescue activities with a pneumatic robot. *Advanced Robotics*, Vol. 20, No. 2, pp. 213–232, 2006.
 - [90] Ismet Erkmen, Aydan M. Erkmen, Fumitoshi Matsuno, Ranajit Chatterjee, and Tetsushi Kamegawa. Snake robots to the rescue! *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 9, No. 3, pp. 17–25, 2002.
 - [91] Michele Guarnieri, Paulo Debenest, Takao Inoh, Edwardo F. Fukushima, and Shigeo Hirose. Helios VII: a new vehicle for disaster response - mechanical design and basic experiments. *Advanced Robotics*, Vol. 19, No. 8, pp. 901–927, 2005.
 - [92] Zhixiao Yang, Kazuyuki Ito, Kazuhiko Saijo, Kazuyuki Hirosune, Akio Gofuku, and Fumitoshi Matsuno. Volunteers Oriented Interface Design for the Remote Navigation of Rescue Robots at Large-Scale Disaster Sites : To Develop an Efficient Remote Navigation Interface Combined by a Force Feedback Steering Wheel and a Mouse for a Tank Rescue Robot. *JSME International Journal. Series C, Mechanical systems, machine elements and manufacturing*, Vol. 48, No. 4, pp. 620–631, Dec 2005.
 - [93] Andreas Birk and Max Pfingsthorn. A HMI Supporting Adjustable Autonomy of Rescue Robots. In Bredenfeld, A and Jacoff, A and Noda, I and Takahashi, Y, editor, *RoboCup 2005: Robot Soccer World Cup IX*, Vol. 4020 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pp. 255–266, 2006.
 - [94] Brian McKinnon, Jacky Baltes, and John Anderson. A region-based approach to stereo matching for USAR. In Bredenfeld, A and Jacoff, A and Noda, I and Takahashi, Y, editor, *RoboCup 2005: Robot Soccer World Cup IX*, Vol. 4020 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pp. 452–463, 2006.
 - [95] Andreas Birk and Stefano Carpin. Rescue robotics - a crucial milestone on the road to autonomous systems. *Advanced Robotics*, Vol. 20, No. 5, pp. 595–605, 2006.
 - [96] Curtis W. Nielsen, Michael A. Goodrich, and Robert W. Ricks. Ecological Interfaces for Improving Mobile Robot Teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 5, pp. 927–941, 2007.

- [97] Ye Changlong, Ma Shugen, and Li Bin. Development of a Shape-Shifting Mobile Robot for Urban Search and Rescue. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 31–35, Apr 2008.
- [98] Zhe Zhang and Goldie Nejat. Intelligent Sensing Systems for Rescue Robots: Landmark Identification and Three-Dimensional Mapping of Unknown Cluttered Urban Search and Rescue Environments. *Advanced Robotics*, Vol. 23, No. 9, pp. 1179–1198, 2009.
- [99] Kristin S. Moore, Joshua A. Gomer, Christopher C. Pagano, and D. DeWayne Moore. Perception of Robot Passability With Direct Line of Sight and Teleoperation. *Human Factors*, Vol. 51, No. 4, pp. 557–570, 2009.
- [100] S Ali A Moosavian, Arash Kalantari, Hesam Semsarilar, Ehsan Aboosaeedan, and Ehsan Mihankhah. ResQuake: A Tele-Operative Rescue Robot. *Journal of Mechanical Design*, Vol. 131, No. 8, p. 081005, 2009.
- [101] Christian Dornhege and Alexander Kleiner. A Frontier-Void-Based Approach for Autonomous Exploration in 3D. *Advanced Robotics*, Vol. 27, No. 6, pp. 459–468, 2013.
- [102] Barzin Doroodgar, Yugang Liu, and Goldie Nejat. A Learning-Based Semi-Autonomous Controller for Robotic Exploration of Unknown Disaster Scenes While Searching for Victims. *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 44, No. 12, pp. 2719–2732, Dec 2014.
- [103] Dunwen Wei and Wenjie Ge. Research on one Bio-inspired Jumping Locomotion Robot for Search and Rescue. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 11, , Oct 16 2014.
- [104] Peng Wang, Jixiang Li, and Yuan Zhang. The Nonfragile Controller with Covariance Constraint for Stable Motion of Quadruped Search-Rescue Robot. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014.
- [105] Widodo Budiharto. Intelligent Surveillance Robot with Obstacle Avoidance Capabilities Using Neural Network. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2015.
- [106] Wing-Yue Geoffrey Louie and Goldie Nejat. A victim identification methodology for rescue robots operating in cluttered usar environments. *Advanced Robotics*, Vol. 27, No. 5, pp. 373–384, 2013.
- [107] Babak Mobedi and Goldie Nejat. 3-D Active Sensing in Time-Critical Urban Search and Rescue Missions. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 17, No. 6, pp. 1111–1119, 2012.

- [108] Kenichi Tokuda, Koichi Osuka, Yoshihiro Mori, and Shinsuke Yano. Rescue robot CUL: walking system based on a 'Robotic Follower'. *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 6, pp. 533–536, 2002.
- [109] Byeong-Sang Kim, Quy-Hung Vu, Jae-Bok Song, and Chung-Hyuk Yim. Novel design of a small field robot with multi-active crawlers capable of autonomous stair climbing. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 343–350, Jan 2010.
- [110] Yan Guo, Aiguo Song, Jiatong Bao, Huatao Zhang, and Hongru Tang. Research on Centroid Position for Stairs Climbing Stability of Search and Rescue Robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 24–30, Dec 2010.
- [111] Huatao Zhang and Aiguo Song. System centroid position based tipover stability enhancement method for a tracked search and rescue robot. *Advanced Robotics*, Vol. 28, No. 23, SI, pp. 1571–1585, Dec 2 2014.
- [112] Jennifer L. Burke, Robin Roberson Murphy, Michael D. Covert, and Dawn L. Riddle. Moonlight in Miami: Field Study of Human-Robot Interaction in the Context of an Urban Search and Rescue Disaster Response Training Exercise. *Human-Computer Interaction*, Vol. 19, No. 1-2, pp. 85–116, 2004.
- [113] Quirin Hamp, Omar Gorgis, Patrick Labenda, Marc Neumann, Thomas Predki, Leif Heckes, Alexander Kleiner, and Leonhard M. Reindl. Study of efficiency of USAR operations with assistive technologies. *Advanced Robotics*, Vol. 27, No. 5, pp. 337–350, 2013.
- [114] Weidong Wang, Wei Dong, Yanyu Su, Dongmei Wu, and Zhijiang Du. Development of Search-and-rescue Robots for Underground Coal Mine Applications. *Journal of Field Robotics*, Vol. 31, No. 3, pp. 386–407, 2014.
- [115] Holger Kenn and Andreas Birk. *From Games to Applications: Component reuse in Rescue Robots*, Vol. 3276 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pp. 669–676. Springer, 2005.
- [116] Alberto Finzi and Andrea Orlandini. Human-Robot Interaction Through Mixed-Initiative Planning for Rescue and Search Rovers. In *Proceedings of the 9th conference on Advances in Artificial Intelligence (AI*IA)*, pp. 483–494, 2005.
- [117] Illah R. Nourbakhsh, Katia Sycara, Mary Koes, Mark Yong, Michael Lewis, and Steve Burion. Human-Robot Teaming for Search and Rescue. *IEEE Pervasive Computing: Mobile and Ubiquitous Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 72–78, Jan–Mar 2005.

- [118] Holly A. Yanco, Brenden Keyes, Jill L. Drury, Curtis W. Nielsen, Douglas A. Few, and David J. Bruemmer. Evolving Interface Design for Robot Search Tasks. *Journal of Field Robotics*, Vol. 24, No. 8-9, pp. 779–799, 2007.
- [119] Stephen Balakirsky, Stefano Carpin, Alexander Kleiner, Michael Lewis, Arnoud Visser, Jijun Wang, and Vittorio Amos Ziparo. Towards Heterogeneous Robot Teams for Disaster Mitigation: Results and Performance Metrics from Robocup Rescue. *Journal of Field Robotics*, Vol. 24, No. 11, pp. 943–967, 2007.
- [120] Benjamin Balaguer, Stephen Balakirsky, Stefano Carpin, and Arnoud Visser. Evaluating maps produced by urban search and rescue robots: lessons learned from RoboCup. *Autonomous Robots*, Vol. 27, No. 4, pp. 449–464, 2009.
- [121] Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Naoki Tokunaga, Seiga Kiribayashi, Kazuya Yoshida, Kazunori Ohno, Eijiro Takeuchi, Satoshi Tadokoro, Hidehisa Akiyama, Itsuki Noda, Tomoaki Yoshida, and Eiji Koyanagi. Multirobot Exploration for Search and Rescue Missions: A Report on Map Building in RoboCupRescue 2009. *journal of Field Robotics*, Vol. 28, No. 3, pp. 373–387, May–Jun 2011.
- [122] Lars-Peter Ellekilde, Shoudong Huang, Jaime Valls Miro, and Gamini Dissanayake. Dense 3D map construction for indoor search and rescue. *Journal of Field Robotics*, Vol. 24, No. 1-2, pp. 71–89, Jan–Feb 2007.
- [123] Mathew DeDonato, Velin Dimitrov, Ruixiang Du, Ryan Giovacchini, Kevin Knoedler, Xianchao Long, Felipe Polido, Michael A Gennert, Taşkın Padır, Siyuan Feng, et al. Human-in-the-loop Control of a Humanoid Robot for Disaster Response: A Report from the DARPA Robotics Challenge Trials. *Journal of Field Robotics*, Vol. 32, No. 2, pp. 275–292, 2015.
- [124] Sanem Sariel and H. Levent Akin. A Novel Search Strategy for Autonomous Search and Rescue Robots. In *RoboCup 2004: Robot Soccer World Cup VIII*, pp. 459–466, 2004.
- [125] Steven Dubowsky, Samuel Kesner, Jean-Sébastien Plante, and Penelope Boston. Hopping mobility concept for search and rescue robots. *Industrial Robot*, Vol. 35, No. 3, pp. 238–245, 2008.
- [126] Tyler Gunn and John Anderson. Dynamic heterogeneous team formation for robotic urban search and rescue. *Journal of Computer and System Sciences*, Vol. 81, No. 3, pp. 553–567, May 2015.

- [127] Hisayoshi Sugiyama, Tetsuo Tsujioka, and Masashi Murata. Real-time exploration of a multi-robot rescue system in disaster areas. *Advanced Robotics*, Vol. 27, No. 17, pp. 1313–1323, 2013.
- [128] Daniele Calisi, Luca Iocchi, Daniele Nardi, Gabriele Randelli, and Vittorio Amos Ziparo. Improving Search and Rescue Using Contextual Information. *Advanced Robotics*, Vol. 23, No. 9, pp. 1199–1216, 2009.
- [129] Ryosuke Masuda. Development of a rescue robot with a multi-sensor hand system. *Advanced Robotics*, Vol. 16, No. 6, pp. 541–544, 2002.
- [130] Robert C. Richardson, Arjun Nagendran, and Robin G. Scott. Experimental Tests of ‘Bidi-bot’: A Mechanism Designed for Clearing Loose Debris from the Path of Mobile Search and Rescue Robots. *Advanced Robotics*, Vol. 26, No. 15, pp. 1799–1823, 2012.
- [131] ‘Virtual nose’ may reduce simulator sickness in video games. <http://www.purdue.edu/newsroom/releases/2015/Q1/virtual-nose-may-reduce-simulator-sickness-in-video-games.html>.
- [132] 北陽電機株式会社. SCIP2.0 準拠 “URG” シリーズ通信仕様書, 2009.
- [133] Hirohiko Kawata, Kohei Miyachi, Yoshitaka Hara, Akihisa Ohya, Shin’ichi Yuta. A Method for Estimation of Lightness of Objects with Intensity Data from SOKUIKI Sensor. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 661–664, 2008.
- [134] 佐々木 慎平, 和氣直道, 中島一樹, 劉青, 羽多野正俊. 水中メンテナンスロボットのための環境認識手法に関する研究. 日本大学理工学部学術講演会, pp. 309–310, 2013.
- [135] Philip E. Ciddor. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Applied Optics*, Vol. 35, No. 9, pp. 1566–1573, Mar 1996.
- [136] Stefka Nikolova Kasarova, Nina Georgieva Sultanova, Christo Dimitrov Ivanov, and Ivan Dechev Nikolov. Analysis of the dispersion of optical plastic materials. *Optical Materials*, Vol. 29, No. 11, pp. 1481–1490, 2007.
- [137] 伊部公紀, 山下淳, 金子透, 小林祐一. マニピュレータに搭載したレーザレンジファインダを用いた透明容器中の液中物体の3次元形状計測. 映像情報メディア学会誌, No. 11, pp. J379–J387.

論文リスト

参考論文：

1. 藤原始史, 亀川哲志, 長谷川準, 五福明夫, “汎用測域センサで測定した水中スキャンデータの補正手法”, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 831, DOI: 10.1299/transjsme.15-00412 (2015).
2. Tomofumi Fujiwara, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku, “Development of a real-time 3D laser scanner with wide FOV and an interface using a HMD for teleoperated mobile robots”, International Journal of Nuclear Safety and Simulation, Vol. 6, No. 2, pp. 132–141 (2015).
3. Tomofumi Fujiwara, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku, “Evaluation of Plane Detection with RANSAC According to Density of 3D Point Clouds”, Proceedings of IROS2013 Workshop on Robots and Sensors integration in future rescue INformation system (ROSIN2013) (2013).
4. Tomofumi Fujiwara, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku, “Plane Detection to Improve 3D Scanning Speed Using RANSAC Algorithm”, Proceedings of IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA2013), pp.1863–1869 (2013).
5. Tomofumi Fujiwara, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku, “Stereoscopic Presentation of 3D Scan Data Obtained by Mobile Robot”, Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2011), pp.178–183 (2011).

その他の論文等：

【その他の論文】

1. Tomofumi Fujiwara, Hirotsugu Minowa, Yoshiomi Munesawa, “Development of Dismantlement Support AR System for Nuclear Power Plants using Natural Features”, Chemical Engineering Transactions, Vol. 43, pp. 1999–2004 (2015).
2. Hirotsugu Minowa, Tomofumi Fujiwara, Yoshiomi Munesawa, Kazuhiko Suzuki, “Prototype of Decommissioning Support AR System for Nuclear Power Plant using Natural Features”, Proceedings of the first International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems (STSS2012), pp.06.1–7 (2012). (アブストラクト査読)

3. Tomofumi Fujiwara, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku, “Study on Teleoperational Performance for Rescue Robot by Stereoscopic Presentation of 3D Scan Data”, Proceedings of the first International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems (STSS2012), pp.17.1–7 (2012). (アブストラクト査読)

【口頭発表およびポスター発表】

1. Tomofumi Fujiwara, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku, “Development of A Real-time 3D Laser Scanner and An Interface using HMDs for Teleoperated Mobile Robots”, Proceedings of The Second International Workshop on Functional Modelling for Design and Operation of Engineering Systems and Infrastructures, pp.7.1–5 (2015).
2. 長谷川 準, 亀川 哲志, 藤原始史, 五福明夫 “Top-URG を用いた水中計測の基礎実験と考察”, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), Paper No. 1M1-5 (2014).
3. Tomofumi Fujiwara, “Development of an Interface System for Rescue Robots”, Proceedings of International Workshop on Natural Science and Technology, pp.2 (2014).
4. 藤原始史, 亀川 哲志, 五福明夫, 杉原 太郎, “三次元 LRF データの立体視による狹隘空間探索実験”, 第31回日本ロボット学会学術講演会論文集, Paper No. 1J1-05 (2013).
5. Tomofumi Fujiwara, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku, “Rescue Robots from the Perspective of Resilience Engineering”, Proceedings of Second International Seminar/Symposium on Natural Science and Technology –Resilience Engineering–, pp.39–44 (2013).
6. 藤原始史, 福永稔典, 亀川 哲志, 五福明夫, 松野文俊, “建物内探索ロボットの遠隔操作および環境地図提示実験”, 第55回自動制御連合講演会論文集, pp.749–754 (2012).
7. Tomofumi Fujiwara, Tetsushi Kamegawa, Akio Gofuku, “3D Environment Mapping by Mobile Robots”, Proceedings of First International Seminar on Information for Mechatronics Systems, pp.14–15 (2011).
8. 藤原始史, 箕輪弘嗣, 宗澤良臣, 鈴木和彦, “自然特徴点を用いた原子力プラント設備のための解体支援ARシステムの開発”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2010) 予稿集, pp.83–90 (2010).

原子力発電所における遠隔操作および 環境地図提示実験

本付録では中国電力島根原子力発電所内において実施した遠隔操作型探索ロボットの実験について報告する．具体的には，同発電所で建設中の3号機内において，建物内探索ロボットに搭載した三次元スキャナを用いて三次元スキャンを行い，環境地図作成および提示を行った．この3号機はまだ建設段階で運転されておらず，放射線による影響がない状態である．また，探索ロボットのマニュアル操作による階段踏破実験やロボット遠隔操作時の電波到達距離の確認を行った．さらに，発電所内で働く職員へのデモンストレーションとしてロボットの遠隔操作体験やスキャンした三次元データの三次元立体視提示を実施した．実験の結果，予定していた動作をある程度達成できた一方で，ロボットの昇降可能な階段の構造や高さ，遠隔操作に利用している無線LANの電波到達距離，三次元スキャン結果を提示する際の解像度の低さといった問題点が明らかになった．

A.1 建物内探索ロボットシステムの構成

今回使用した建物内探索ロボットシステムは，移動ロボットとそれを動作させるためのソフトウェア，および操作用コンピュータと周辺機器から構成されている．

なお，本システムのソフトウェアは一部を除きRTミドルウェア [11] を用いて開発されている．RTミドルウェアは，研究段階にある技術を比較的容易に追加・再構成できる点で試行錯誤による開発に適している．ロボットの各機能はRTコンポーネントと呼ばれる個別のプロセスとして起動され，これらを組み合わせて全体の動作が実現される．

本システムは，第3章で示した Fig. 3.1 の探索ロボットを用いている．また Fig. 3.2 に示す三次元スキャナを用いて三次元スキャンを行う．

本実験で使用した無線LANの仕様は以下の通りである．

- ・ メーカー : I-O DATA
- ・ 型名 : WN-WAG/A
- ・ 規格 : IEEE802.11a

- ・出力：6 mW/MHz

本実験では、この機器のWDSブリッジ・リピーター機能を利用してロボットと操作用コンピュータ間の無線通信を行った。

また、本実験では、取得した三次元スキャンデータを環境地図として表現する方法として、通常の三次元点群に加えて、色情報つき点群、色情報つきボクセル [26] 表現、Marching Cubes 法による再構成平面 [35] の4つの方法を実装した。色情報つき点群は、探索ロボットに取り付けられたカメラで取得した画像を利用し、三次元点群との対応関係を計算してスキャンした点に色を対応付けることで生成している。色情報つきボクセルの場合は、三次元スキャンデータをある固定サイズの立方体グリッドに分割し、各セルに含まれる点の色を総合してボクセルに着色することで表現している。Marching Cubes 法による再構成平面（以下MC面）では、Marching Cubes 法で平面を再構成した後、カメラ画像をテクスチャとして構成された平面に貼り付け、環境地図として表現する。さらに、第3章で説明した立体視を導入している。

A.2 実験

今回の主な実験内容は以下の通りである。

- ・三次元スキャンによる環境地図データ収集と提示
- ・マニュアル遠隔操作（階段踏破、電波到達距離の確認）

これらの実験を、中国電力島根原子力発電所で建設中の3号機の復水器周り、および原子炉格納容器内にて行った。

A.2.1 復水器周りでの実験

ここでは、グレーチング走破、三次元スキャン、階段踏破、電波到達距離の確認に関する実験を行った。

グレーチング走破

まず、今回使用した建物内探索ロボットが施設内のグレーチング（格子状の蓋）の上を遠隔操作にてスムーズに走行できるかについての走行実験を行った。実験の様子をFig. A.1に示す。結果として、使用した移動ロボットのクローラで問題なく走破できることを確認した。なお、実験に際しては、実験中にロボットのビス等の小さな部品がグレーチングを通して下部に落下する事態に備え、1つ下の階にブルーシートを敷いて実施した。



Fig. A.1: Indoor searching robot running on the grating cover.



Fig. A.2: 3D scan on the grating cover.

グレーチング上での三次元スキャン

グレーチング上をしばらく走行した後、三次元スキャンを行った。その様子を Fig. A.2 に示す。またその結果を Fig. A.3 に示す。ここでは順に点群、色情報つき点群、ボクセル、MC 面として表示している。結果を見ると、細長い配管等が多くスキャンされており、入り組んだ部分が分かりにくい結果となっている。なお、図中のオレンジ色の部分はカメラの可動範囲の問題で色情報が取得できていない領域である。

遠隔操作による階段踏破

次に、マニュアル操作にてロボットを操作し、施設内の階段を踏破できるか実験を行った。階段の外観を Fig. A.4 に示す。この階段は蹴上げの面（蹴込み板）がなく、また踏み面はグレーチングとなっている。同図に示すように1段目の高さは21 cm、2段目以降の高さは22 cm、踏み面は共通で奥行き24 cm、幅60 cmとなっている。

ここでは以下の3つのパターンの実験を行った。

1. そのまま階段に進行して1段目に乗り上げて踏破しようとする
2. 人間がロボットを持ち上げ階段の1段目に乗り上げさせてから踏破する
3. フリッパームを用いて階段の1段目に乗り上げさせて踏破する

結果としては、1の方法では、階段の1段目のエッジの高さがクローラの直径より大きかったためロボットが階段に乗り上げることができず、踏破することができなかった。一方で2,3の方法により踏破できることを確認した。つまり、はじめの1段目のエッジにロボットのクローラが乗り上げることが出来さえすれば、その後は階段を走破することができた。3の方法で実験に用いたロボットが階段を踏破する様子を Fig. A.5 に示す。階段踏破の流れとしては、Fig. A.5において、(1) まず階段に接近し、(2) フリッパームを前に回転させて車体を傾けて1段目に乗り上げさせ、(3) フリッパームを後

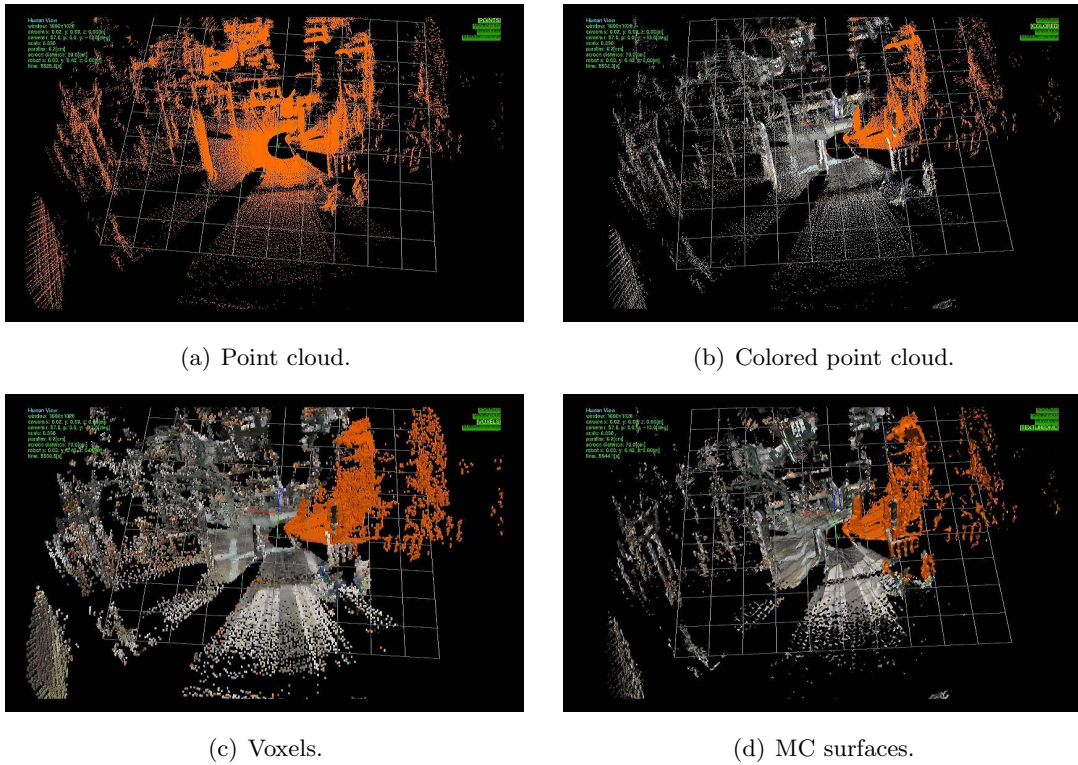


Fig. A.3: Results of 3D scans on the grating cover.

ろに回転させ, (4) フリッパームがクローラとほぼ平行になったら前進する, という手順で踏破することに成功した. なお画像中では, 操作を行うオペレータとは別の人間がロボットの転倒に備えて補助している.

電波到達距離の確認

ここではマニュアル操作により現在位置 (踏破した階段付近) から入り口付近まで (走行距離約 25 m, 直線距離約 18 m) 遠隔操作を行い, 電波到達距離を確認した. 結果として, この操作範囲においては, 通信の遅延等は発生せず問題なくロボットを操作できることを確認した.

A.2.2 原子炉格納容器内での実験

次に, 原子炉格納容器内にて三次元スキャンと遠隔操作による電波到達距離の確認を行った様子を示す. 実験環境を Fig. A.6 に示す. これは原子炉格納容器の入り口となっており, ロボットは原子炉格納容器の内側に, オペレータステーションは外側に配置されている. この実験では, Fig. A.6 に示す位置からロボットを遠隔操作して無線電波の届く限り原子炉格納容器内を移動させるものとする.



(a) First step.



(b) Second step and above.



(c) Tread.



(d) Step and the crawler.

Fig. A.4: Dimensions of the stairs.

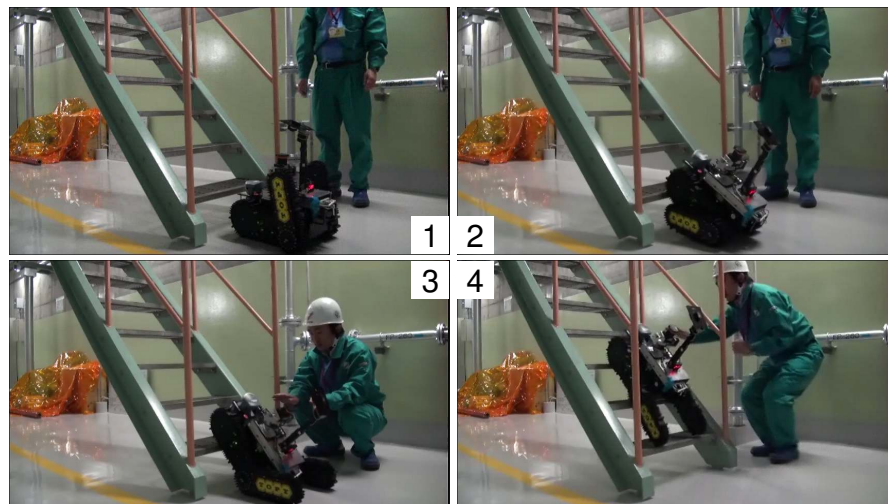


Fig. A.5: Sequence of stairs climbing.

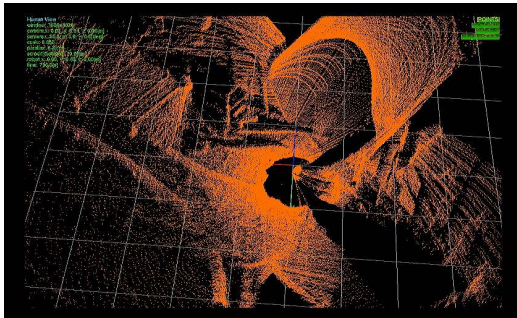
実験に際して、原子炉格納容器内の床面は大部分がグレーチングとなっており、落下物を防止するため、グレーチングの床の上に直接ブルーシートを敷いてロボットを走行させることとした。

三次元スキャン

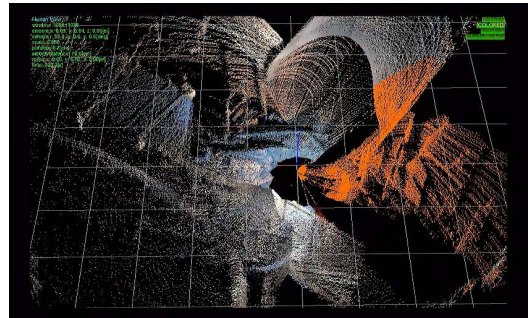
ロボットが Fig. A.6 にある状態で三次元スキャンを行った結果を Fig. A.7 に示す。上から順に点群、色情報つき点群、ボクセル、MC 面として表示している。表示された環境地図をみると、入り口の円筒部分はよく分かるが、原子炉格納容器内に存在する配管等の複雑な部分の詳細が分かりにくい結果となっている。



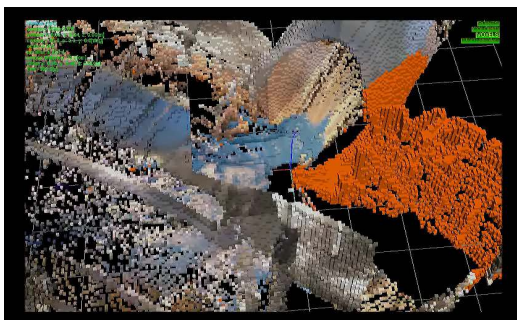
Fig. A.6: Experiment in the nuclear reactor containment.



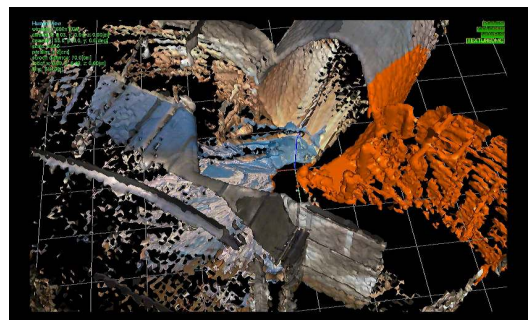
(a) Point cloud.



(b) Colored point cloud.



(c) Voxels.



(d) MC surfaces.

Fig. A.7: Results of 3D scans in the nuclear reactor containment.

電波到達距離の確認

原子炉格納容器内は円形の通路となっており，これをロボットが遠隔操作で一周して帰ってくるができるかどうか実験を行った．オペレータステーションから一番遠い部分，つまり円形の通路の直径はおおよそ 29 m であった．結果として，円形通路を半周ほど走行して一番遠い地点に到達したあたりで通信が途切れ，ロボットを遠隔操作できなくなったため，そこで実験を終了した．

A.3 デモンストレーション

遠隔操縦ロボットのデモンストレーションとして，まず上記実験で収集した三次元スキャンデータから環境地図を作成し，三次元立体視により表示したものを中国電力職員の方に 3D メガネをかけて体験していただいた．体験した感想として，大勢の方から「立体感が分かりやすい」とのコメントをいただいた．三次元スキャンデータの立体視に関しては，研究室内の学生を対象にした実験にて効果を確認しているものの，一般成人を対象とした場合でも，その効果が期待できる可能性があることを確認した．

また，上記実験と同じく復水器周りの環境にて，実際に建物内探索ロボットを用いたデモンストレーションを行った．具体的には，ロボットを用いた遠隔操作・三次元スキャン・階段踏破を行う様子の見学，および操作体験をしていただいた．このデモンストレーションにおいて，ロボットが比較的急な階段を踏破できる点は評価された．操作体験においては，操作説明の後ジョイスティックを用いてロボットを操作していただき，操作が容易であることを体験していただいた．また，職員の方の希望により，グレーチング下の様子をどの程度三次元スキャンできるのか確認を行った．この結果を Fig. A.8 に示す．ここでは点群，色情報つき点群，ボクセル，MC 面として表示している．各画像の左下部分に見られるように，グレーチング下の部分にいくらかスキャン点が得られるものの，グレーチングの上面がほぼスキャンされてしまうために詳細な様子は分かりにくい結果となっている．

A.4 考察

本実験では，原子力発電施設内の復水器周りと格納容器内にて三次元スキャンを実施し環境地図の提示を行ったが，実際の発電所内部の設備は配管等による複雑な形状が多く，今回実施した三次元スキャンでは施設内の空間の全体的な広さ・大きさは把握できるものの，詳細な部分の形状は不明瞭であり，細かい点検をするには改善が必要であることが確認された．この環境スキャンの解像度の低さは，主に次の二つの点

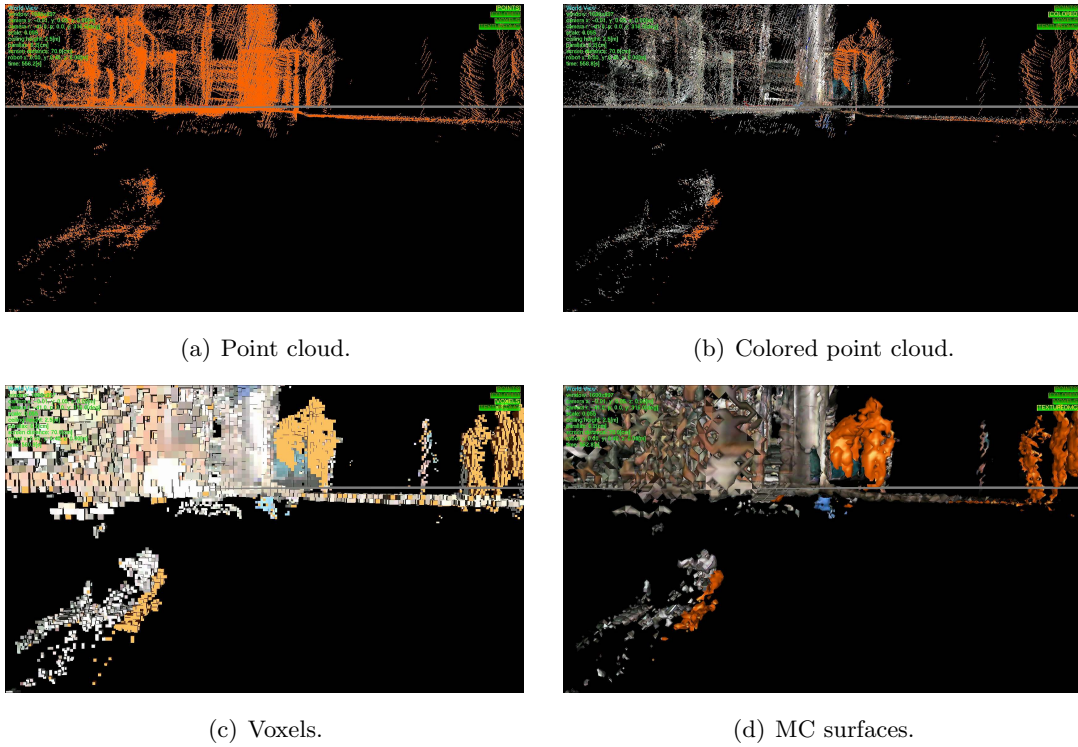


Fig. A.8: Results of 3D scans under the grating cover.

に起因すると考えられる．まず，今回の実験で使用した三次元スキャンのメカニズムでは二自由度雲台を構成するモータの指示角の分解能に限界があるという点と，LRFは原理的に扇状にレーザを射出するため，距離が離れるにつれ隣り合うレーザとの間隔が広くなり測定する形状の解像度が低下してしまうという点である．雲台の角の分解能に関しては，より高精度のものを利用することで改善が見込まれる．一方でLRFの分解能に関しては，複数地点でスキャンを実施してスキャン点を増やすことにより改善が見込まれる．ただし，解像度を上げることはスキャン時間の増大，すなわち探索時間の増加を意味するので好ましくない．そこで，三次元スキャンにより大まかな形状を把握した後，詳細な部分はカメラの光学ズームを利用して検査を行うようにするなど，検査手順を戦略的に改善することで問題を解決することも考えられる．たとえば，本稿で紹介したデモンストレーションにおいてグレーチング下の三次元スキャンを実施した際，グレーチング部分が多くスキャンされ，グレーチング下に到達するレーザが少なくなったために，下部の詳細が分かりにくい結果になっていた．大域的なスキャンで隙間のある部分を検出した際には，その隙間にカメラやセンサを挿入して詳細な情報を収集するなどの戦略もあり得るだろう．

階段の踏破に関しては，Fig. A.4(d)に示すように，階段の高さがクローラ直径より大きく，また蹴上げ面がないため，クローラのみを用いた従来の動作では1段目に乗り上げることができず，階段踏破は不可能であった．そこで，普段はあまり使用しな

いフリッパームを用いて車体を持ち上げる方法で階段の1段目にロボットを乗り上げさせることにより、その後は階段踏破できることは確認できたが、マニュアル操作にてオペレータが初見でこの動作を行うのは困難であると想定される。そのため、この一連の操作をある程度自動化しておくことが望ましいと考えられる。その際には、階段の高さを自動認識し、これに合わせてフリッパームを適切に回転させることなどが必要となる。さらには、施設にある階段の寸法に合わせてあらかじめロボットの階段昇降機能を設計しておくことが必要であろう。

無線電波到達距離に関しては、格納容器内を半周ほどしたところで通信が途絶え、それ以上操作ができなくなる問題があった。そのため、通信が途絶えた場合でも誤作動しないような構成にしておくことはもとより、出力の大きい電波を使用したり、無線を中継したりするなど、通信の確保について根本的に解決することが必要である。無線の到達距離は、単純に距離だけではなく、環境内の形状や電波間の干渉などさまざまな物理的影響を受けるため、可能であれば通信が途絶えた状況でもロボットがある程度自律した行動をすることが望ましいといえる。一方で、ロボットとオペレータステーションを有線接続する方法は、信頼性の高い通信を確保できるメリットがあるが、かさばる通信ケーブルをロボットが持ち運んだり取り回したりしなければならぬというデメリットが存在することを付記しておく。

A.5 結論

本付録では、中国電力島根原子力発電所内において建物内探索ロボットを使って実施した環境地図作成・提示の実験結果について報告を行った。また、ロボットをマニュアル操作することにより無線電波到達距離の確認や階段踏破実験を行った結果を示した。実際の発電プラント内で実験を行うことによって、これまでそれほど気にしていなかったいくつかの問題点が明らかになった。

今後は、階段の高さに対応した自動踏破アルゴリズムや、通信状況が悪化した場合に半自律的に行動できるアルゴリズムを構築すること、さらにロボットが環境をスキャンして人に提示する際の解像度の問題を改善することについて検討することが課題としてあげられる。

CT装置の三次元スキャン結果

本付録では，岡山大学の鹿田キャンパスにある医学部のIVRセンターにて，第4章で開発した Fig. 4.17 の三次元スキャナを用いて三次元スキャンを実施した結果を示す．

B.1 三次元スキャンの設定と手順

実験時の三次元スキャナの設定は以下のようにした．

- ・ スキャン周期： $T=60$ s
- ・ LRF 角度： $\alpha=60^\circ$ (垂直視野角： $V=120^\circ$)

ここでは1つの点群あたり約224万個の点が取得されることになる．また，三次元スキャンは以下のような手順で実施した．各図左が三次元スキャンを実施した環境である．

1. CT ガントリ正面からスキャン (Fig. B.1)
2. CT ガントリ左45度からスキャン (Fig. B.2)
3. CT ガントリ左60度程度からスキャン (Fig. B.3)
4. ロボットアーム左上からスキャン (Fig. B.4)
5. ロボットアーム右上からスキャン (Fig. B.5)

B.2 結果

Fig. B.1–B.5 の各図右が三次元スキャンの結果である．ここで，三次元スキャン時に各スキャン点の座標値と共に受光強度も取得されており，結果の図では受光強度を用いて各点にグレースケールの色を付加して表示している．目視でCTガントリ形状がよく分かる結果となっている．

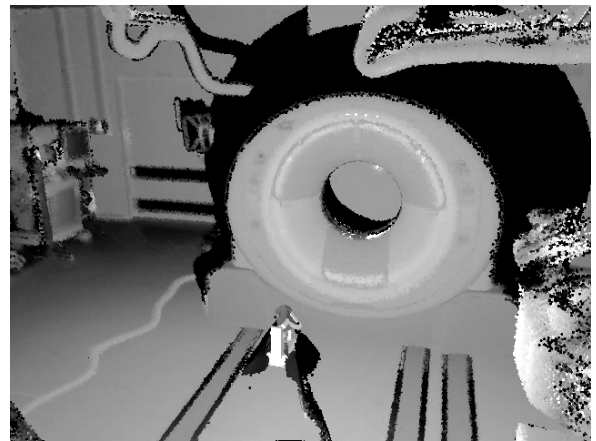


Fig. B.1: 3D scan result for the 3D scanner located in front of the CT gantry at 0° .

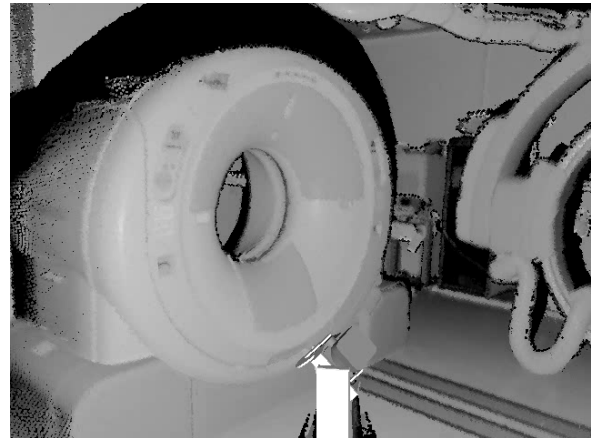


Fig. B.2: 3D scan result for the 3D scanner located in front of the CT gantry at 45° .

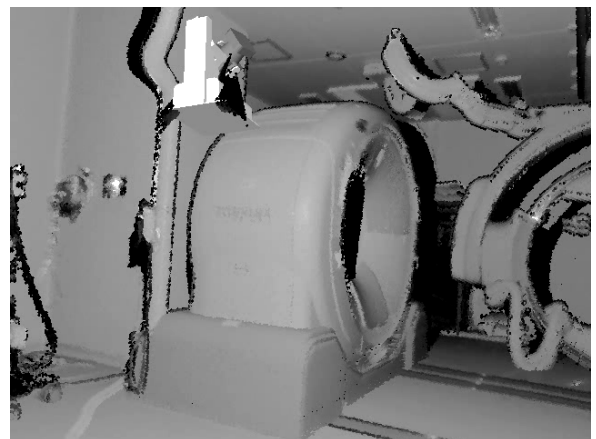


Fig. B.3: 3D scan result for the 3D scanner located in front of the CT gantry at 60° .

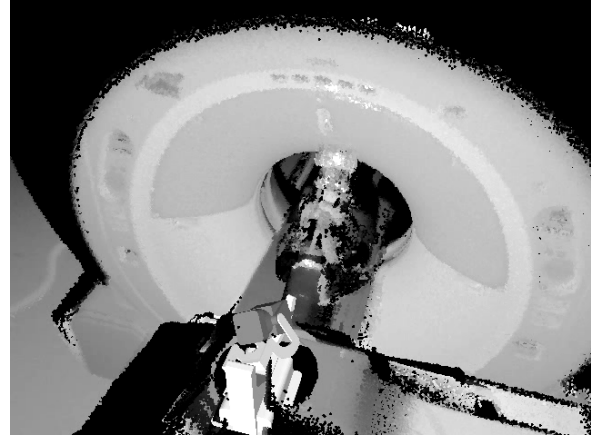


Fig. B.4: 3D scan result for the 3D scanner located on the left of the robot arm.

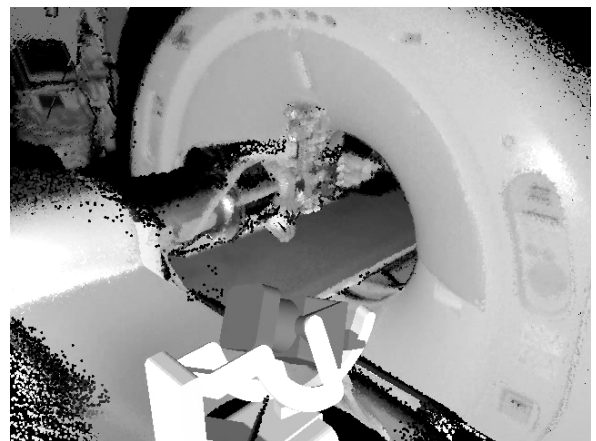


Fig. B.5: 3D scan result for the 3D scanner located on the right of the robot arm.

OpenRTM-aist によるシステム構築

本付録では，付録 A で用いたシステムを構築している RT ミドルウェア（OpenRTM-aist [11]）のモジュール群について説明する．

C.1 三次元スキャンモジュール

このモジュールでは，ジョイスティックの命令で三次元スキャンを実行することが目標となる．三次元スキャンの実行のためには，LRF コンポーネント・Dynamixel コンポーネントと通信する必要がある．また，取得したスキャンデータをロボット座標系まで座標変換し，地図表示モジュールに出力する．さらに，後述の地図表示モジュールにおいて三次元スキャン位置姿勢を特定するのにタイムスタンプを比較するため，スキャンデータにタイムスタンプを付加する処理を実装した．処理の流れを Fig. C.1 に示す．

このモジュールの入力ポートを Table C.1 に示す．ジョイスティックの値を受け取るためのポート，雲台の2つのモータの現在角度を受け取るためのポート，またスキャンした結果を受け取るポートをつけている．出力ポートも同様に Table C.2 に示す．ここでは地図表示モジュールへ三次元点群データを出力するためのポート，LRF モジュールにスキャンリクエストまたパラメータ設定値を送信するポート，雲台の2つのモータに目標角度を出力するポートをつけている．さらに，コンフィギュレーションパラメータとして，三次元スキャン実行時に傾けるピッチ軸角度を設定できるようにしている (Table C.3) ．

このモジュールでは，三次元点群データを出力する必要があるが，RT ミドルウェアでは，データポートはデフォルトで最大約 2[MB] までしか正常に通信できないように

Table C.1: Three D scan module input ports.

ポート名	型名	説明
m_js_buttonIn	TimedBooleanSeq	ジョイスティック ボタン入力
m_current_angle_pitchIn	TimedDouble	雲台の現在ピッチ角度 [°]
m_current_angle_yawIn	TimedDouble	雲台の現在ヨー角度 [°]
M_range_dataIn	RangeData	LRF スキャンデータ (極座標 [m])

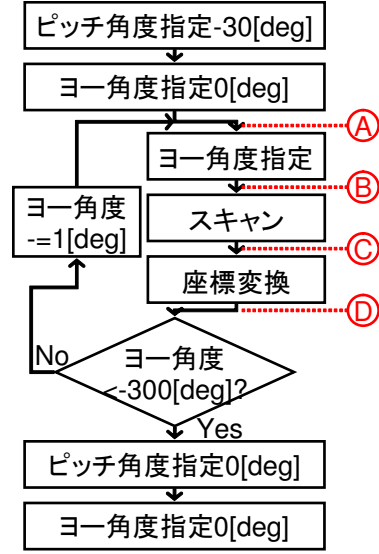


Fig. C.1: Three D scan module process.

Table C.2: Three D scan module output ports.

ポート名	型名	説明
m_point_cloudOut	PointCloud	三次元点群座標出力 [m]
m_scan_requestOut	TimedBoolean	スキャンリクエスト
m_LRF_configOut	RangerConfig	LRF パラメータ設定
m_desired_angle_pitchOut	TimedDouble	雲台の目標ピッチ角度 [°]
m_desired_angle_yawOut	TimedDouble	雲台の目標ヨー角度 [°]

Table C.3: Three D scan module configuration.

変数名	型名	既定値	説明
m_fix_angle_pitch	double	-30	LRF を傾けるピッチ角度 [°]

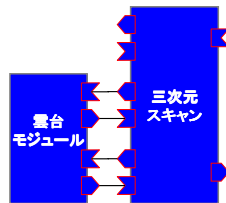


Fig. C.2: Connection of Two DOF platform module with Three D scan module.

Table C.4: Two DOF platform module input ports.

ポート名	型名	説明
m_desired_pitch_angleIn	TimedDouble	雲台の目標ピッチ角度 [°]
m_desired_yaw_angleIn	TimedDouble	雲台の目標ヨー角度 [°]

なっている．三次元点群の場合，1回のスキャンデータで約7.4[MB]となるため，正常に通信できないことになる．この通信データの最大サイズを変更するためには以下の2通りの方法がある．

1. rtc.confに以下を追加（送受信両方のRTCに必要）

```
corba.args: -ORBgiopMaxMsgSize 10485760
```

2. 環境変数を変更

```
export ORBgiopMaxMsgSize=10485760
```

ここでは最大サイズを10[MB](10485760[B])に変更している．

このモジュール名は「ThreeDScan」とした．

C.2 雲台モジュール

作成する雲台モジュールと三次元スキャンモジュールの接続イメージをFig.C.2に示す．このモジュールのフローチャートをFig. C.3に示す．デバイスへの接続はアクティベート時に一度だけ行い，ディアクティベート時に切断する．またonExecute関数内ではピッチ軸とヨー軸角度の受信と設定・完了までを行い，そのときの最終的な現在角度を送信することとした．

このモジュール名は「TwoDOFPlatform」とした．入出力ポートは，Table C.4, C.5に示すように2つのモータ用のポートをそれぞれ用意した．またTable C.6のように，コンフィギュレーションパラメータも2つ分の変数を用意した．

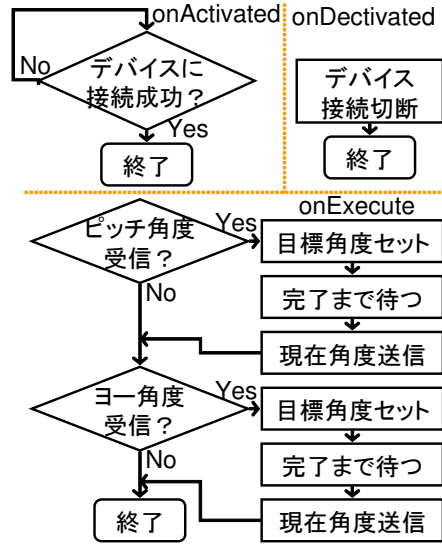


Fig. C.3: Two DOF platform module process.

Table C.5: Two DOF platform module output ports.

ポート名	型名	説明
m_current_pitch_angleOut	TimedDouble	雲台の目標ピッチ角度 [°]
m_current_yaw_angleOut	TimedDouble	雲台の目標ヨー角度 [°]

Table C.6: Two DOF platform module configurations.

変数名	型名	既定値	説明
m_pitch_ID	int	0	ピッチ軸モータの ID
m_yaw_ID	Int	1	ヨー軸モータの ID
m_start_pitch_angle	double	-150	ピッチ軸始端角度 [°] (0 に対応)
m_start_yaw_angle	double	-300	ヨー軸始端角度 [°] (0 に対応)
m_end_pitch_angle	double	150	ピッチ軸終端角度 [°] (1023 に対応)
m_end_yaw_angle	double	0	ヨー軸終端角度 [°] (1023 に対応)
m_pitch_angle	double	0	テスト入力用ピッチ軸角度 [°]
m_yaw_angle	double	0	テスト入力用ヨー軸角度 [°]
m_baudrate	int	1	通信速度 [Mbps]
m_ttyUSB	int	0	デバイスファイル番号 (ttyUSB*)

Table C.7: Processing time of 3-D scan with mif_robot program [ms].

Try	A-B	B-C	C-D	A-D
#1	29.682	37.989	0.281	67.952
#2	28.680	37.992	0.291	66.963
#3	29.066	37.987	0.285	67.338
#4	28.046	43.641	0.242	71.930
#5	31.075	27.463	0.298	58.836
avg.	29.310	37.014	0.279	66.604

Table C.8: Processing time of 3-D scan with Two DOF platform module [ms].

Try	A-B	B-C	C-D	A-D
#1	36.104	34.645	0.093	70.842
#2	35.308	34.042	0.097	69.447
#3	35.199	33.713	0.094	69.006
#4	34.788	34.576	0.093	69.457
#5	35.325	34.499	0.093	69.916
avg.	35.345	34.295	0.094	69.734

C.3 雲台モジュール使用時の処理時間計測

以上で作成した雲台モジュールに対して、同様に処理時間計測を行った．結果を Table C.8 に示す．雲台モジュールで実行したことにより，従来の mif_robot プログラムで実行したとき（Table C.7）と遜色ない程度の速度を達成できていることが分かる．

C.4 三次元オドメトリモジュールの作成

このモジュールの処理内容は，オドメトリモジュールと姿勢センサモジュールから値を受け取り，ロボットのタイムスタンプつき三次元位置姿勢を出力することである．プログラムは mif_robot からの流用である．モジュール名は「ThreeDOdometry」とした．入力ポートを Table C.9 に示す．このモジュールではオドメトリデータのうち v を，姿勢センサデータの yaw, pitch, roll を使用する．また出力ポートを Table C.10 に示す．ここでは三次元位置姿勢のデータ型として TimedPose3D を用いている．このデータ型の定義等を List C.1 に示す．これはタイムスタンプと位置 [m]，回転 [rad] で表現されている．タイムスタンプは Linux でのシステム時刻取得関数である gettimeofday() を用いて取得することとした．この関数は timeval 構造体のメンバ変数に秒 (tv_sec) とマイクロ秒 (tv_usec) を格納する．これを RT ミドルウェアの Time 構造体のメンバ変数 sec と nsec に格納している．

Table C.9: Three D odometry module input ports.

ポート名	型名	説明
m_OdometryDataIn	TimedDoubleSeq	オドメトリデータ 0: v 1: ω 2: x 3: y 4: θ
m_AttitudeRadIn	TimedDoubleSeq	姿勢センサデータ [rad] 0: yaw 1: pitch 2: roll

Table C.10: Three D odometry module output ports.

ポート名	型名	説明
m_pose3dOut	TimedPose3D	タイムスタンプ付三次元位置姿勢

List C.1: Definition of TimedPose3D structure (by ExtendedDataTypes.idl)

```

1  struct TimedPose3D
2  {
3      Time tm;
4      Pose3D data;
5  };
6  //////////////////////////////////
7  struct Pose3D
8  {
9      Point3D position;
10     Orientation3D orientation;
11 };
12 //////////////////////////////////
13 struct Point3D
14 {
15     double x; // [m]
16     double y; // [m]
17     double z; // [m]
18 };
19 //////////////////////////////////
20 struct Orientation3D
21 {
22     double r; // [rad]
23     double p; // [rad]
24     double y; // [rad]
25 };

```

C.5 マニュアル走行モジュール

モジュール名は「ManualRun」である．内容は，RTC_Joystickの出力を受け取るポートと処理の追加を行うことと，適切な v, w を出力することである．入力ポート（抜粋）をTable C.11に示す．ここではジョイスティックのボタン値とアナログスティック値を

Table C.11: Subset of Manual run module input ports.

ポート名	型名	説明
m_inButtonIn	TimedBooleanSeq	ボタン入力
m_inAxisIn	TimedLongSeq	スティック入力

Table C.12: HORIPAD 3 TURBO joystick's buttons assignments.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
□	×	○	△	L1	R1	L2	R2	SELECT	START	L3	R3	PS

取得するようにしている．ここで変数の配列の番号と実際のボタンとの対応を Table C.12 に，スティックとの対応を Table C.13 に示す．これは HORIPAD 3 TURBO ジョイスティックの場合である．

また出力ポートを Table C.14 に，コンフィギュレーションパラメータ（抜粋）を Table C.15 に示す．ここではロボットの最大速度，最大角速度，アナログスティックの最大値を設定可能にしている．この値を用いて v, ω を以下のように計算する．

変数を

ω_{cr}, ω_{cl} [rad/s] : 左右クローラの角速度

$\omega_{c\max}$ [rad/s] : クローラの最大角速度

a_{y1} : 左アナログスティックの y 座標値

a_{x2} : 右アナログスティックの x 座標値

$a_{\max}$: アナログスティックの最大値

v_{cr}, v_{cl} [m/s] : 左右クローラの速度

v [m/s] : ロボットの速度

ω [rad/s] : ロボットの角速度

r [m] : クローラ半径

Tr [m] : トレッド

$v_{\max}$ [m/s] : ロボットの最大速度

$\omega_{\max}$ [rad/s] : ロボットの最大角速度

Table C.13: HORIPAD 3 TURBO joystick's analog sticks assignments.

0	1	2	3	4	5
左 x	左 y	右 x	右 y	十字 x	十字 y

Table C.14: Manual run module output ports.

ポート名	型名	説明
m_FlipperOut	TimedDoubleSeq	フリッパ角度出力 [°] 0:右 1:左
m_CrawlerOut	TimedDoubleSeq	ロボット速度・角速度出力 0:v[m/s] 1:w[rad/s]

Table C.15: Subset of Manual run module input configuration.

変数名	型名	既定値	説明
m_v_max	double	0.5	ロボットの最大速度 [m/s]
m_w_max	double	9	ロボットの最大角速度 [rad/s]
m_analog_max	double	32767	アナログスティックの最大値

と定義すると, v, ω はそれぞれ

$$v = \frac{v_{cr} + v_{cl}}{2}$$

$$\omega = \frac{v_{cr} - v_{cl}}{Tr}$$

と表される. ここで

$$v_{cr} = r\omega_{cr}$$

$$v_{cl} = r\omega_{cl}$$

であり, また mif_robot プログラムの中ではジョイスティックから

$$\omega_{cr} = \frac{-a_{y1} - a_{x2}}{a_{\max}} \cdot \omega_{c\max}$$

$$\omega_{cl} = \frac{-a_{y1} + a_{x2}}{a_{\max}} \cdot \omega_{c\max}$$

と計算されている. したがって v_{cr}, v_{cl} は

$$v_{cr} = r\omega_{cr} = \frac{-a_{y1} - a_{x2}}{a_{\max}} \cdot r\omega_{c\max} = \frac{-a_{y1} - a_{x2}}{a_{\max}} \cdot v_{\max}$$

$$v_{cl} = r\omega_{cl} = \frac{-a_{y1} + a_{x2}}{a_{\max}} \cdot r\omega_{c\max} = \frac{-a_{y1} + a_{x2}}{a_{\max}} \cdot v_{\max}$$

と計算できる. また

$$\omega_{\max} = \frac{2v_{\max}}{Tr}$$

と表せることから

$$Tr = \frac{2v_{\max}}{\omega_{\max}}$$

と計算することができる. 上記の計算により, a_{y1}, a_{x2} の入力があったとき, $v_{\max}, \omega_{\max}, a_{\max}$ から v, ω を求めることができる.

Table C.16: Crawler module input ports.

ポート名	型名	説明
m_CrawlerVelocityIn	TimedDoubleSeq	ロボット速度・角速度入力 0:v [m/s] 1:w [rad/s]

Table C.17: Subset of Crawler module configuration.

変数名	型名	既定値	説明
m_wheel_radius	double	0.0943	車輪半径 [m]
m_tread	double	0.22	車輪間距離（トレッド） [m]
m_w_wheel_max	double	12	車輪の最大角速度 [rad/s]

C.6 クローラモジュール

本モジュールでは，マニュアル走行モジュールの出力に合わせて，入力 v, w から左右の車輪の角速度を計算する．ここで計算された角速度はマイコンに出力される．作成したモジュールは「CrawlerModule」である．入力ポートを Table C.16 に示す．またコンフィギュレーションパラメータ（抜粋）を Table C.17 に示す．ここでは車輪半径，トレッド，車輪の最大角速度を設定できるようにしている．これらを用いて左右クローラの角速度を以下のように計算する．

左右の車輪の角速度 ω_{cr}, ω_{cl} は

$$\omega_{cr} = \frac{v_{cr}}{r}$$

$$\omega_{cl} = \frac{v_{cl}}{r}$$

と計算できる．ただし

$$|\omega_{cr}| < \omega_{c \max}$$

$$|\omega_{cl}| < \omega_{c \max}$$

に制限される．ここで

$$v = \frac{v_{cr} + v_{cl}}{2}$$

$$\omega = \frac{v_{cr} - v_{cl}}{Tr}$$

から

$$v_{cr} + v_{cl} = 2v$$

$$v_{cr} - v_{cl} = \omega Tr$$

となり，これより v_{cr}, v_{cl} は

$$v_{cr} = v + \frac{\omega Tr}{2}$$

$$v_{cl} = v - \frac{\omega Tr}{2}$$

Table C.18: Subset of Map viewer module input ports.

ポート名	型名	説明
m_point_cloudIn	PointCloud	点群座標・色の入力
m_robot_pose3dIn	TimedPose3D	ロボットの三次元位置姿勢

と計算できる．

C.7 地図表示モジュール

本モジュールでは，三次元スキャンモジュールから送信された三次元スキャンデータを表示する．また，三次元オドメトリモジュールの出力に合わせて，三次元オドメトリの値をロボットCGの位置姿勢に反映させる．モジュール名は「MapView」とした．また，三次元オドメトリの値を三次元スキャンデータの座標変換に用いるようにした．ここではスキャン位置姿勢を以下の手順で決定する．

1. 毎周期三次元位置姿勢を配列に保持
2. スキャンデータが来たらタイムスタンプを比較
3. 最も近い時刻の位置姿勢を対応付ける

このモジュールの入力ポートを Table C.18 に示す．

C.8 RTC 群の起動スクリプトの作成

作成したモジュール群をテストするために，RTC 群を一括して起動するスクリプトを作成した．ここでは，1つのコンソールに全部の出力が表示されると見づらくなるため，RTC ごとにコンソールを表示するスクリプトを作成した．また，すでに起動中の RTC は起動しないような処理を実装した．さらに，新たに立ち上がるコンソールのタイトルバーに RTC 名 + バージョンを表示できるようにした．

ターミナルとしては，デスクトップ版 Ubuntu（操作用 PC の OS）では gnome-terminal を使用する．一方，サーバ版 Ubuntu（組み込み PC の OS）では gnome-terminal が使えないため，xterm を使用する．gnome-terminal を使用する場合はスクリプトを List C.2 に，xterm を使用する場合はスクリプトを List C.3 に示す．ここでは Ubuntu 10.04 LTS で動作確認を行っている．それぞれのコードを MySystem.bootup.sh など保存し，実行権限を付与した後実行すればよい．RTC のディレクトリ名やバージョン表記が統一されている場合は，List C.2, C.3 のように書くことができる．細かい部分は環境により変更が必要である．ここでは，

- RTC 名:MapView
- RTC ディレクトリ名:MapView_1.0.2
- RTC 実行ファイル名:MapViewComp

の規則で RTC が作成されている場合のコードとなっている。

List C.2: Script for gnome-terminal

```

1 #! /bin/bash
2
3 rtc_root=/home/nedo/workspace # RTCのあるパス
4 rtc_name=MapView # RTCの名前
5 rtc_version=1.0.2 # RTCのバージョン
6
7 rtc_pid=$(pgrep -xf ./${rtc_name}Comp) # RTCのプロセスID取得
8 if [ -z "${rtc_pid}" ]; then # nullか判定
9     cur_dir=$(pwd) # 現在のディレクトリを格納
10    cd "${rtc_root}/${rtc_name}-${rtc_version}/" # RTCのディレクトリに移動
11    gnome-terminal -t "${rtc_name}-${rtc_version}" -e ./${rtc_name}Comp
12    cd "$cur_dir" # 元のディレクトリに戻る
13 else # 起動中の場合は実行しない
14     echo "${rtc_name}Comp(pid:${rtc_pid}) is already running."
15 fi
16 ##### 以下 RTC の数だけ繰り返し #####

```

List C.3: Script for xterm

```

1 #! /bin/bash
2
3 rtc_root=/home/nedo/workspace # RTCのあるパス
4 rtc_name=MapView # RTCの名前
5 rtc_version=1.0.2 # RTCのバージョン
6
7 rtc_pid=$(pgrep -xf ./${rtc_name}Comp) # RTCのプロセスID取得
8 if [ -z "${rtc_pid}" ]; then # nullか判定
9     cur_dir=$(pwd) # 現在のディレクトリを格納
10    cd "${rtc_root}/${rtc_name}-${rtc_version}/" # RTCのディレクトリに移動
11    xterm -T "${rtc_name}-${rtc_version}" -e ./${rtc_name}Comp &
12    cd "$cur_dir" # 元のディレクトリに戻る
13 else # 起動中の場合は実行しない
14     echo "${rtc_name}Comp(pid:${rtc_pid}) is already running."
15 fi
16 ##### 以下 RTC の数だけ繰り返し #####

```

C.9 作成・改良したモジュールの動作

上記で作成した起動スクリプトを使用して RTC を起動した画面を Fig. C.4 に示す。ここでは三次元スキャンを行うのに必要な RTC を起動している。

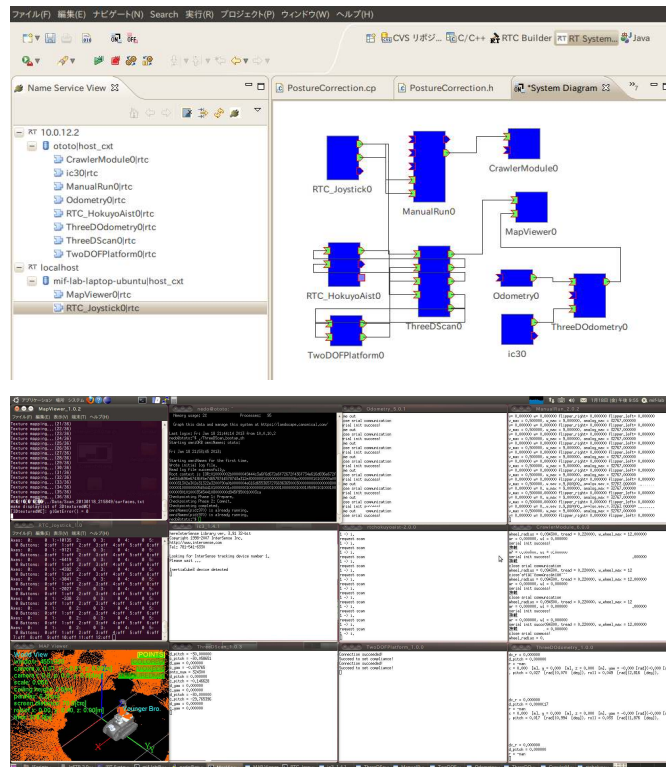


Fig. C.4: RT components for 3D scan. Top: RT System Editor display. Bottom: Console displays.

C.10 Axisカメラ制御モジュール

第ロボットに搭載されているネットワークカメラ (Axis 213 PTZ) の制御用モジュールを作成した。このモジュールの処理内容は、Axisカメラからの動画 (jpeg) 取得・出力、カメラのパンチルトズームの操作・現在値出力、スナップショットの取得・出力である。ここで動画を取得するために、mif-robotプログラムで使用されていたstreamerプロセスを流用している。ただし共有メモリ経由でコマンド操作、映像取得するように改造した。動画の取得は、RTCのactivate時にstreamerプロセスを起動することで開始する。本モジュール名は「AxisCameraControl」とした。

モジュールの入力ポートをTable C.19に示す。ここでパンチルト命令にPanTiltAnglesというデータ型を用いている。このデータ型の定義をList C.4に示す。また出力ポートをTable C.20に示す。ここではスナップショットデータとビデオ映像データのデータ型としてCameraImageを用いている。このデータ型の定義をList C.5に示す。ここではformat(="jpeg")とpixels(jpeg画像のバイナリデータ)を設定して出力している。octet型は8ビット整数型であり、ほとんどの環境ではC言語のchar型に相当するものと思われる。widthやheightはjpegデータから分かるので設定しなくてもよさそうである。タ

Table C.19: Axis camera control module input ports.

ポート名	型名	説明
m_joyButtonIn	TimedBooleanSeq	ボタン入力
m_joyAxisIn	TimedLongSeq	スティック入力
m_inPanTiltIn	PanTiltAngles	パンチルト命令 [rad]
m_inZoomIn	TimedShort	ズーム命令 (1-9999)
m_snapShotFlagIn	TimedBoolean	スナップショットフラグ

Table C.20: Axis camera control module output ports.

ポート名	型名	説明
m_outPanTiltOut	PanTiltAngles	パンチルト現在値 [rad]
m_outZoomOut	TimedShort	ズーム現在値
m_snapShotOut	CameraImage	スナップショットデータ
m_videoImageOut	CameraImage	ビデオ映像データ

タイムスタンプ `tm` は `gettimeofday()` を利用して設定している。さらに、モジュールで設定したコンフィギュレーションパラメータを Table C.21 に示す。ここでは Axis カメラの IP アドレスが変化しても対応できるように変数で指定できるようにしている。

List C.4: Definition of PanTiltAngles structure (by InterfaceDataTypes.idl)

```

1 struct PanTiltAngles
2 {
3     Time tm;
4     double pan; // [rad]
5     double tilt; // [rad]
6 };

```

List C.5: Definition of CameraImage structure (by InterfaceDataTypes.idl)

```

1 struct CameraImage
2 {
3     Time tm;
4     unsigned short width;
5     unsigned short height;
6     unsigned short bpp; // bits per pixel
7     string format; // jpeg など
8     double fDiv; // スケールファクタ
9     sequence<octet> pixels; // 画像本体
10 };

```

Table C.21: Axis camera control module configuration.

変数名	型名	既定値	説明
m.axis_ip	string	10.0.12.3	Axis カメラの IP アドレス
m.pan_deg	double	0.0	パン角度 [°]
m.tilt_deg	double	0.0	チルト角度 [°]
m.zoom	short int	1	ズーム値
m.snapshot_flag	short int	0	スナップショットフラグ

Table C.22: Axis camera viewer module input port.

ポート名	型名	説明
m.videoImageIn	CameraImage	カメラ映像 (jpeg)

C.11 Axis カメラ映像表示モジュール

このモジュールでは受信した jpeg 画像を表示する．ここでは OpenGL 画面を別スレッドで生成し，画像を表示することとした．画像はウインドウに合わせて拡大縮小できるようにした．OpenRTM 側では，画像取得と jpeg データから RGB データへの変換 (libjpeg ライブラリ使用) を行うこととした．変換された RGB データを OpenGL 画面で表示する．本モジュール名は「AxisCameraViewer」とした．この入力ポートを Table C.22 に示す．

C.12 Axis カメラ映像表示結果

RTC の接続図と実行画面例を Fig. C.5 に示す．ここではジョイスティックによるパンチルトズーム・スナップショットの実行ができることを確認した．また Axis カメラからの映像を表示できていることを確認した．図のように，画像がないときは NO IMAGE と表示し，また画像が来ているときは画像の左上に ONLINE と表示，来なくなったら OFFLINE と表示するようにしている．ここでは 1 秒以上更新がなければオフラインであるとした．

C.13 Opt カメラ制御モジュール

俯瞰視点用カメラ (OPT NM30) を制御するモジュールを作成した．このモジュールの処理内容は，Opt カメラからの動画 (jpeg) 取得・出力である．Axis カメラ制御モジュールと同様に，動画を取得するために，mif-robot プログラムで使用されていた streamer

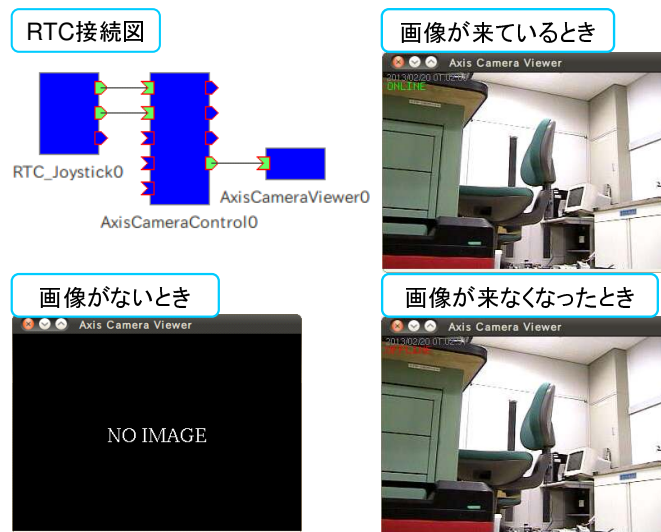


Fig. C.5: Axis camera image displays.

Table C.23: Opt camera control module input port.

ポート名	型名	説明
m_videoImageOut	CameraImage	ビデオ映像データ

プロセスを流用している．ただし共有メモリ経由でコマンド操作，映像取得する．RTCのactivate時に動画取得を開始する．本モジュール名は「OptNM30Control」とした．

モジュールの出力ポートをTable C.23に示す．ここではビデオ映像データのみを出力することとしている．また，ジョイスティックによる制御等は行っていない．

C.14 Opt カメラ映像表示モジュール

このモジュールでは受信したjpeg画像を表示する．処理の内容はAxisカメラ映像表示モジュールとまったく同じである．本モジュール名は「OptNM30Viewer」とした．この入力ポートをTable C.24に示す．

Table C.24: Opt camera viewer module input port.

ポート名	型名	説明
m_videoImageIn	CameraImage	カメラ映像 (jpeg)

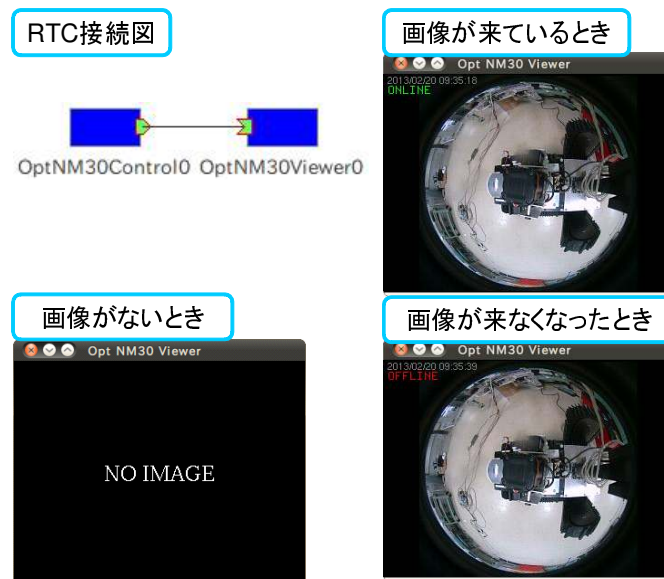


Fig. C.6: Opt camera image displays.

C.15 Opt カメラ映像表示結果

RTC の接続図と実行画面例を Fig. C.6 に示す．ここでは Opt カメラからの映像を表示できていることを確認した．画像の有無やオンライン・オフライン時の表示方法は Axis カメラ映像表示モジュールと同様である．ただし，この結果ではカメラの映像が 90° 傾いた状態になっている．

C.16 RTCでの色つき三次元スキャンの実装

色つき三次元スキャンを RTC で実装した．処理の流れとして，Fig. C.7 に示すように，カメラ制御は三次元スキャンとは切り離し，別個に動作するようにした．ここで三次元スキャンモジュールはスキャンが完了したらすぐにデータを送信する．カメラ制御モジュールは，ジョイスティックで命令を受け取るとカメラを逐次位置決めしながらスナップショットを撮影し，その画像とそのときのパンチルト値を送信する．ここでは三次元スキャンモジュールではなく，地図表示モジュールでカメラ画像を点群にマッピングする．このようにすることで，カメラ画像の取得が終了していなくても点群データを確認できるようにする．

地図表示モジュールの変更について以下に示す．三次元スキャンを行っている間にカメラ画像を受信したらそのときのパンチルト・三次元位置姿勢とともに保存しておく．実際に三次元スキャンデータが来たら保存しておいた画像をパンチルト角度と三次元位置姿勢をもとに点群にマッピングする．その後はカメラ画像が来る度にマッピング

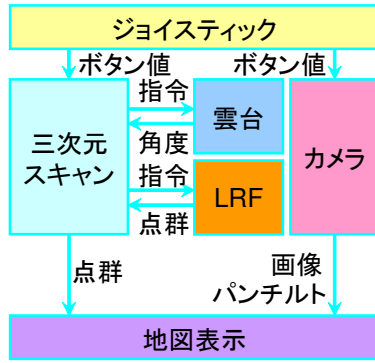


Fig. C.7: Colored 3D scan process. The same processes are shown in the same colors.

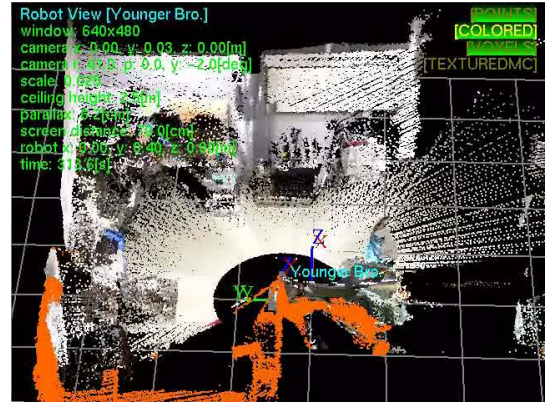


Fig. C.8: Result of colored 3D scan.

Table C.25: Added input ports for Map viewer module.

ポート名	型名	説明
m_axis_pantiltIn	PanTiltAngles	パンチルト値 [rad]
m_axis_zoomIn	TimedShort	ズーム値 (1-9999)
m_axis_imageIn	CameraImage	カメラ画像

を実行し結果を表示する（色つき点群・ボクセル）． $9 \times 4 = 36$ 枚画像が来たらテクスチャつきMC面を構築・表示する．パンチルト値とカメラ画像を取得するために、モジュールに Table C.25 に示す入力ポートを追加している．ここではズーム値用のポートも用意したが現時点では使用していない．

以上の処理を実装し実行すると、従来の mif-robot プログラムでは点群の表示に1分40秒かかっていたのに対し、RTCでは27秒で点群を表示できるようになった．この方法では、カメラ画像がマッピングされていく様子が見えるので、より動作が分かりやすくなったと思われる．

C.17 カメラ撮影時間の短縮

さらに高速化する方法として、カメラ画像を撮影する時間を短縮することを検討した．

Axis カメラ制御モジュールでは、指定角度ごとに位置決め・撮影していることで全体の画像を取得するのに非常に時間がかかっている．そこで一定速度でカメラをパン（ヨー軸回転）させ、その間の動画をカメラ画像として使用することとした．ここではパンを回転させておき、これが一定の角度を超えたときに所定角度チルトするようにした．ここでは $-10, 13, 36, 59^\circ$ ずつチルトする．パン回転中に現在角度を取得し、

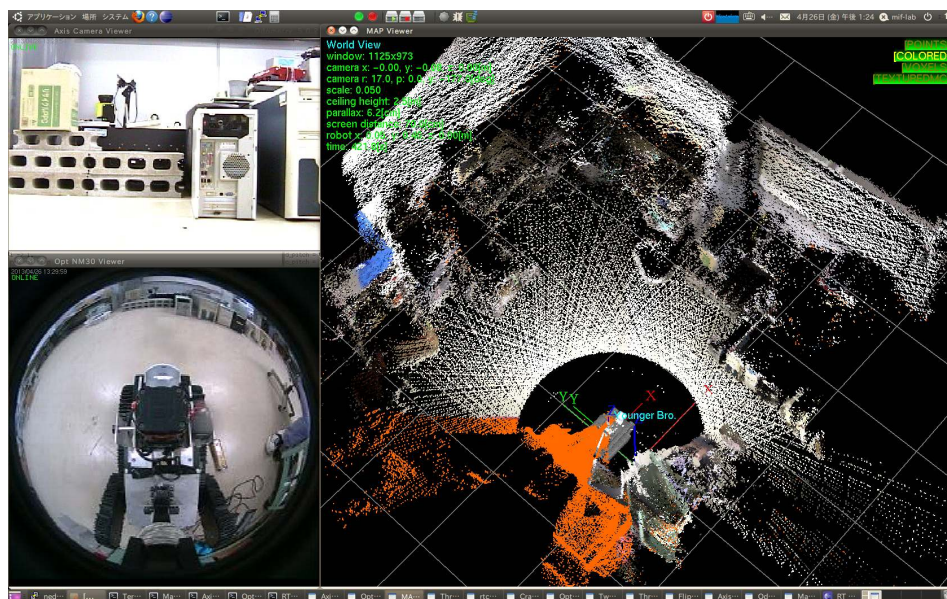


Fig. C.9: Mobile robot teleoperation interface developed with OpenRTM-aist.

そのときの動画をカメラ画像として取得し送信する．

カメラが連続回転していると速度によっては画像がぶれてしまうため，ここではぶれない程度の速度になるように調整した．また，画像の取得については，パンが240°回転する間に9枚程度取得できるように，sleep関数で調整した．さらに，回転しているために画像取得時のパン角度が一定量ずれることを考慮して，取得角度の補正を行っている．

上記の処理を実行した結果，位置決め撮影手法では色つき三次元スキャン全体に1分47秒かかっていることに対して，一定速度で回転しながら撮影した場合は43秒で色つき三次元スキャンが完了することを確認した．取得した画像については若干不鮮明にはなるが，スキャンデータを表示している限りそれほど差はないように思われる．このときの結果をFig. C.8に示す．

C.18 OpenRTM-aist を用いたインタフェース画面

本付録で説明したRTコンポーネント群を使用して構築したインタフェース画面をFig. C.9に示す．

ROS (Robot Operating System) によるシステム構築

本付録では，提案システムを構築している ROS ノード群について説明する．

D.1 システムを構成する ROS ノード群

弟ロボットと開発したスキャナの制御に関して，Fig. D.1 に使用している ROS ノードとノード間のデータのやり取りを示す．ここで○で囲まれている文字列はノード名を示し，ノード間の矢印はトピックのやり取りを示している．矢印のそばの文字列はトピック名を示している．

以下に本研究で使用するために作成した ROS ノード群を示す．

- manual_run

- 説明：マニュアル走行ノード．ジョイスティックの入力を受けてクローラ速度とフリッパ角度を Publish
- Subscribe するトピック：
 - * ジョイスティック 値: /joy (sensor_msgs::Joy)
- Publish するトピック：
 - * クローラ速度 v [m/s], ω [rad/s]: /crawler_speed (std_msgs::Float32MultiArray 型)
 - * 左右フリッパ角度 [rad]: /flipper_angle (std_msgs::Float32MultiArray 型)
- 設定可能パラメータ：
 - * ロボットの最大速度 v_{max} [m/s]: v_max (double_t 型)
 - * ロボットの最大角速度 w_{max} [rad/s]: w_max (double_t 型)

- crawler_module

- 説明：クローラ制御ノード．クローラ速度入力から左右クローラへの速度指令をマイコンに出力
- Subscribe するトピック：

- * クローラ速度 v [m/s], ω [rad/s]: /crawler_speed (std_msgs::Float32MultiArray 型)
- 設定可能パラメータ:
 - * 駆動車輪半径 [m]: wheel_radius (double_t 型)
 - * 車輪間距離 [m]: tread (double_t 型)
 - * 駆動輪最大回転角速度 [rad/s]: w_wheel_max (double_t 型)
 - * シリアルポート名: comport (str_t 型)
- flipper_module
 - 説明: フリッパ制御ノード. フリッパ角度入力から左右フリッパへの角度指令をマイコンに出力. 現在のフリッパ角度を Publish
 - Subscribe するトピック:
 - * 左右フリッパ角度 [rad]: /flipper_angle (std_msgs::Float32MultiArray 型)
 - Publish するトピック:
 - * 左右フリッパ角度 [rad]: /flipper_module/joint_states (sensor_msgs::JointState 型)
 - 設定可能パラメータ:
 - * シリアルポート名: comport (str_t 型)
- odometry
 - 説明: オドメトリ出力ノード. マイコンからの値 (v [m/s], ω [rad/s]) より計算したオドメトリを Publish
 - Publish するトピック:
 - * オドメトリデータ: /odom (nav_msgs::Odometry 型)
 - 設定可能パラメータ:
 - * シリアルポート名: comport (str_t 型)
- ic3
 - 説明: 姿勢センサノード. シリアル通信で姿勢センサから読み取ったロール・ピッチ・ヨー角度を Publish
 - Publish するトピック:
 - * 姿勢データ: /ic3_attitude (geometry_msgs::Vector3Stamped 型)
- odometry_3d
 - 説明: 三次元オドメトリノード. 二次元オドメトリノード (odometry) から Subscribe したオドメトリデータと, 姿勢センサノードから Subscribe した姿

勢データを用いてロボットの三次元位置姿勢($x, y, z, roll, pitch, yaw$)を推定し、Publish する

– Subscribe するトピック:

- * オドメトリデータ: /odom (nav_msgs::Odometry 型)
- * 姿勢データ: /ic3_attitude (geometry_msgs::Vector3Stamped 型)

– Publish するトピック:

- * 三次元オドメトリデータ: /odom_3d (nav_msgs::Odometry 型)

- dx_controller

– 説明: スキャナの Dynamixel MX-28 モータ制御ノード. 設定されたモータ回転角速度または回転周期から計算されたモータ回転角速度をモータに設定.

– Subscribe するトピック:

- * スキャナのモータの状態 (回転角速度を利用): /mx28_controller/state (dynamixel_msgs::JointState 型)

– サービス経由で設定するパラメータ:

- * スキャナのモータの速度: /mx28_controller/set_speed (dynamixel_controllers::set_speed 型)
- * スキャナのモータのトルク On/Off: /mx28_controller/torque_enable (dynamixel_controllers::TorqueEnable 型)

– 設定可能パラメータ:

- * モータ回転角速度 [rad/s]: speed (double_t 型)
- * モータ回転周期 [s]: cycle (double_t 型)

- tf_broadcaster_forCG

– 説明: スキャナの座標変換計算ノード. モータの回転角度と三次元オドメトリデータを用いて LRF スキャンデータが取得された時刻の座標変換を求めて Publish&Broadcast

– Subscribe するトピック:

- * スキャナのモータの状態: /mx28_controller/state (dynamixel_msgs::JointState 型)
- * LRF (HOKUYO UTM-30LX-EW) スキャンデータ: /first (sensor_msgs::LaserScan 型)
- * 三次元オドメトリデータ: /odom_3d (nav_msgs::Odometry 型)

– Publish するトピック:

- * スキャナの各ジョイント角度: /joint_states (sensor_msgs::JointState)

- Broadcast するトピック:
 - * ロボットの三次元位置姿勢 (tf)
- 設定可能パラメータ:
 - * LRF 取付部のずれ [m]: gap (double_t 型)
 - * LRF 取付角度 [°]: alpha (double_t 型)

D.2 ROS ノードの調整

ROS を用いてリアルタイムに三次元スキャンしながら遠隔操作をできるようにするために、不備な点を調整した。

D.2.1 通信負荷の改善

既製のノードを用いて Axis カメラと Opt カメラの2つのカメラ画像を表示すると、画像の表示に数秒程度遅延が発生していた。そこでこの問題を解決することにした。

UDP 通信で Subscribe されていないデータも垂れ流していることがカメラ画像表示遅延の原因と考えていたが、調査していたところ、ROS は UDP 通信ではないことが分かった。Publish するノードと Subscribe するノードがトピック単位で TCP/IP 接続されるようである。実際に Publish するノードと Subscribe するノードを立ち上げているときに、Subscribe するノードを強制終了すると、通信速度が向上した。通信速度は操作 PC から組み込み PC に Ping コマンドを送信して確認した。

そこで、画像の品質などが通信量増加の原因ではないかと考え、調査を行った。既製の ROS ノードにおいて、以下の変更を行ったところ、通信遅延は大幅に改善された。

- Axis カメラ画像 Publish ノード (axis_camera) の設定変更
 - 640×480 → 352×240
 - 15 fps
 - jpeg 圧縮率 70 %
- Opt カメラ画像 Publish ノード (opt_camera) の設定変更
 - 640×480 → 320×240
 - 150 fps → 15 fps
 - jpeg 品質 75 → 50
 - 画像余白の切り取り : 320×240 → 240×240
- 上記による通信速度の改善結果
 - ping 20 回平均 (LRF データ, Axis カメラ画像, Opt カメラ画像表示)
 - 前 : 51.965 ms → 後 : 8.145 ms (約 16 % に減少)

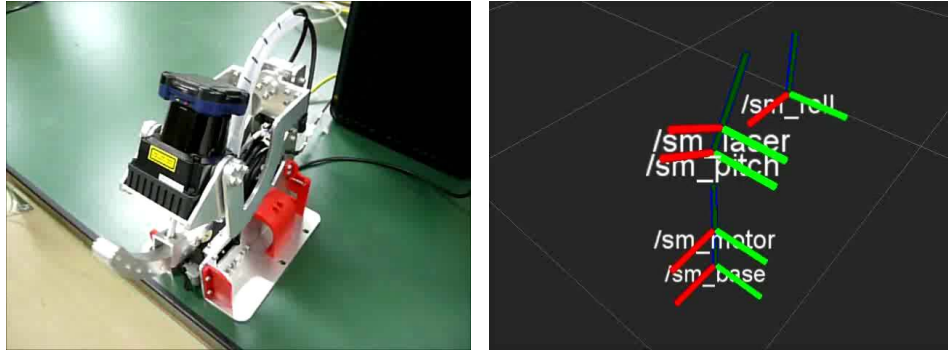


Fig. D.3: Registration of coordinate frames for the developed scanner.

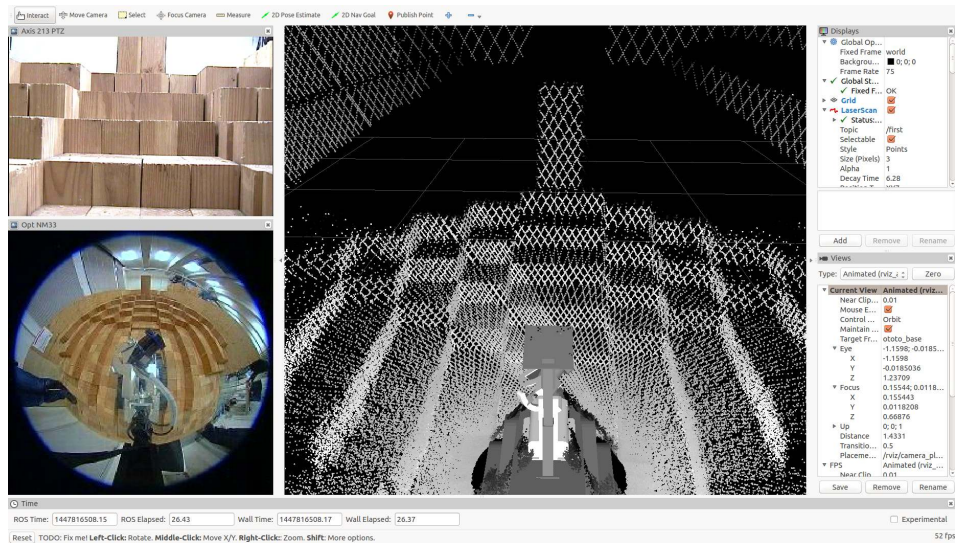


Fig. D.4: Mobile robot teleoperation interface developed with ROS.

イブラリによって座標系を登録した際のRVizの表示画面を示す. ここでは機構のベース, モータ, ロール, ピッチ, レーザそれぞれの座標系を登録している.

D.4 ROSを用いたインタフェース画面

本付録で説明したROSノード群を使用して構築したインタフェース画面をFig. D.4に示す. RVizについては, Oculus Rift DK2を実験でできるように調整を行った. DK2で推奨されているリフレッシュレート75 HzがRVizの描画で達成できるように, RVizのフレームレートを75 Hzに設定した. 表示する点群が多くなるとフレームレートは落ちるようである.