

拡張軌道誘導 SSM と LIDAR による ロボット車両の自律化に関する研究

防衛大学校理工学研究科後期課程

電子情報工学系専攻 情報知能メディア学教育研究分野

大川 真弥

平成28年3月

概要

近年, ロボットカーレースの Urban Challenge などをはじめ, 自律移動ロボット車両に関する技術が急速に発展してきている. ロボット車両の実現には様々な技術要素が必要とされ, なかでも正確に目標位置に到達させる車両誘導技術と外界の状況を観測しロボット自身の位置を推定する技術は特に重要である.

ロボットを指定した目標地点に誘導する技術は, ロボット専用のインフラを有する生産工場など限定された環境での運搬用として研究・実用化がなされてきた. 人の混在する変化の多い環境でロボット車両を運用するためには, 安全性が高く専用設備を必要としない軌道誘導手法が望まれる. また, ロボットに用いられる外界を観測するためのセンサとしては, CCD 又は CMOS カメラが多く利用されてきた. だが, これらのセンサは外部環境の変化に弱く, 処理に多くの時間を要する. このため, 気象条件や季節の変化に対応できるセンサを用いた自己位置推定技術が必要である.

本研究では, 屋外環境でロボット車両の自律走行を達成させる手法についてのいくつかの方法を提案する. 車両の誘導手法として, 誘導ラインを追従する軌道誘導車両を安定して走行させることができる軌道誘導 Sensor Steering Mechanism (SSM) を応用し, 専用インフラを用いずにどのような位置・姿勢においても誘導目標に対して追従することができる手法である拡張軌道誘導 SSM を提案する. 拡張軌道誘導 SSM を実現させるために, 屋外環境における自己位置推定を高精度で行なう手法として, レーザの飛翔時間を計測することで距離を計測可能なセンサ Light Detection and Ranging (LIDAR) 情報の活用と自律走行に資する三次元環境地図 Cuboid Map を提案する.

本論文では, 提案手法の有効性を示すため, 前輪操舵方式の車体を有するロボット車両 “Smart Dump” とアーティキュレート式ロボット車両 “AR Chair” を開発し, 歩行者や自転車等が存在する実際の屋外環境で自律走行技術の検証を行った. 正確な三次元環境を事前に入力されたロボット車両は, 環境地図が提供されている範囲内の屋外経路において安定した自律走行の実現に至った. また, 屋外不整地環境で自律走行を行いつつ除草作業を行う刈払ロボットを開発し, 約 $45m^2$ の作業範囲を 1 時間での自動刈払いを達成した.

検証実験の結果より, 屋外活動する安全な自律移動ロボット車両の開発のためには, ロボット車両に採用する制御機構に対応した軌道誘導手法を適切に用いることが重要であることを確認した. また, 最適な軌道誘導のために必要な精度の高い自己位置推定の実現には, 常に周辺環境をセンサの範囲内に収めることが重要となる. このため, 使用環境に応じた計測性能を有する LIDAR の活用の必要性を確認した.

目次

第1章	序論	1
1.1	緒言	1
1.2	自律移動ロボット車両に関する従来研究	2
1.3	本論文の目的	5
1.4	本論文の構成	6
第2章	拡張軌道誘導 SSM によるロボット車両誘導手法の提案	9
2.1	緒言	9
2.2	軌道誘導 SSM の概要	11
2.2.1	前輪操舵式車両の軌道誘導 SSM	11
2.2.2	後輪操舵式車両の軌道誘導 SSM	12
2.2.3	前後輪逆相操舵式車両の軌道誘導 SSM	13
2.2.4	アーティキュレート式車両の軌道誘導 SSM	14
2.3	軌道誘導 SSM の WP 通過方法の提案	15
2.3.1	前輪操舵式車両の VWP 誘導手法	16
2.3.2	後輪操舵式車両の VWP 誘導手法	17
2.3.3	前後輪逆相操舵式車両の WP 誘導手法	18
2.3.4	アーティキュレート式車両の VWP 誘導手法	19
2.4	拡張軌道誘導 SSM のシミュレーション評価	20
2.4.1	シミュレーション条件	20
2.4.2	直線追従の数値シミュレーション	21
2.4.3	直角追従の数値シミュレーション	27
2.4.4	最適な拡張軌道誘導 SSM のパラメータ決定手法	28
2.5	結言	33
第3章	三次元環境地図 Cuboid Map による自己位置推定手法の提案	36
3.1	緒言	36
3.2	LIDAR による環境認識	38
3.2.1	LIDAR の概要	38
3.2.2	LIDAR のによる周辺環境の計測と課題	42
3.3	特徴的な高さ情報を記録した Cuboid Map の提案	44
3.3.1	三次元環境地図の表現手法	44

3.3.2	三次元環境地図 Cuboid Map の提案	46
3.3.3	三次元環境地図 Cuboid Map の作成	48
3.3.4	Cuboid Map を用いた自己位置推定手法	50
3.4	スキャンマッチング度合の比較検証実験	52
3.4.1	実験条件	52
3.4.2	実験結果	54
3.5	結言	56
第4章	地表面 LIDAR 受光強度を活用した自律移動	60
4.1	緒言	60
4.2	LIDAR の受光強度情報を用いた地表面素材の識別	62
4.2.1	LIDAR の計測する受光強度の原理	62
4.2.2	LIDAR 受光強度情報と分離曲線による地表面素材判定手法の提案	63
4.2.3	植生情報を有する三次元環境地図	67
4.2.4	路面情報を記録した三次元環境地図による自己位置推定の提案	69
4.3	自律移動ロボット車両 ” Smart Dump 5 ”	71
4.3.1	車体構成	71
4.3.2	制御システム	75
4.4	Smart Dump 5 による自律移動実験	76
4.4.1	実験条件	76
4.4.2	実験結果	77
4.4.3	つくばチャレンジ 2011 での走行結果	80
4.5	結言	81
第5章	刈払ロボットによる自動刈払作業の実現	84
5.1	緒言	84
5.2	刈払作業ロボット車両	86
5.2.1	車体構成	86
5.2.2	制御システム	88
5.2.3	刈払操作機構	89
5.3	屋外環境における自動刈払作業の検証	90
5.3.1	不整地環境での走行実験	90
5.3.2	走行実験結果	90
5.3.3	自動刈払作業実験	92
5.3.4	刈払作業実験結果	93
5.4	LIDAR の受光強度情報を用いた障害物検出手法	96
5.4.1	受光強度値の分散を考慮した分離曲線式の系統的導出法	96
5.4.2	外部環境が LIDAR 受光強度情報に及ぼす影響の検証	99

5.4.3	周辺環境の変化を考慮した分離曲線による障害物の判定	104
5.5	結 言	110
第 6 章	アーティキュレート式ロボット車両による移動支援と人物探索	112
6.1	緒 言	112
6.2	LIDAR 情報の活用による物体検出	113
6.2.1	地表段差検出手法	113
6.2.2	クラスタリングによる人物検出手法	116
6.3	移動支援ロボット車両 ” AR Chair ”	119
6.3.1	機体構成	119
6.3.2	制御システム	122
6.4	アーティキュレート式ロボット車両 AR Chair による自律移動実験	124
6.4.1	実験条件	124
6.4.2	自律走行結果	125
6.4.3	探索対象人物の検出結果	130
6.4.4	すれ違い時における回避動作結果	132
6.5	結 言	135
第 7 章	結 論	138
付 録 A	拡張軌道誘導 SSM 適用のためのパラメータ決定過程	144
A.1	自律移動ロボット車両 Smart Dump 9 の概要	144
A.2	シミュレーションによる評価	146
A.2.1	シミュレーション条件	146
A.2.2	シミュレーション結果	147
A.3	実験走行による検証	150
A.3.1	実験走行条件	150
A.3.2	実験走行結果結果	151
A.4	L_p 値決定のための考察	151
付 録 B	回転揺動式三次元 LIDAR	154
B.1	回転揺動式三次元 LIDAR の構成	154
B.2	回転揺動式三次元 LIDAR の座標変換	156
付 録 C	LIDAR 受光強度情報を活用した道路標示検出手法	160
C.1	緒 言	160
C.2	地表面テクスチャを用いた路面標示検出手法	162
C.2.1	地表面受光強度による地表面テクスチャ画像の作成	162
C.2.2	テンプレート画像の作成要領	165

C.2.3	検出処理アルゴリズム	166
C.3	道路標示検出に用いる適切な類似度尺度の検討	167
C.3.1	実験条件	167
C.3.2	実験機材構成	167
C.3.3	校内予備実験結果	169
C.4	一般公道における道路標示を用いた検出実験	169
C.4.1	道路標示計測実験条件	169
C.4.2	実験機材構成	170
C.4.3	公道実験結果	172
C.5	結 言	174

目 次

1.1	専用環境で活用される自動運転技術	2
1.2	自動運転ロボット車両	3
1.3	つくばチャレンジにおける自律移動ロボット車両	4
2.1	AGV の一例 (出典: SHIKO (左), Hitachi(右))	9
2.2	前輪操舵方式車両の SSM 二輪モデル	11
2.3	後輪操舵方式車両の SSM 二輪モデル	12
2.4	前後輪逆相操舵方式車両の SSM 二輪モデル	13
2.5	アーティキュレート式車両の SSM 二輪モデル	14
2.6	環境地図を基準に設定された WP の一例	15
2.7	前輪操舵方式車両の軌道誘導 SSM を用いた VWP 誘導手法	16
2.8	後輪操舵方式車両の軌道誘導 SSM を用いた VWP 誘導手法	17
2.9	前後輪逆相操舵方式車両の軌道誘導 SSM を用いた VWP 誘導手法	18
2.10	アーティキュレート式車両の軌道誘導 SSM を用いた VWP 誘導手法	19
2.11	直線追従シミュレーションでの想定	21
2.12	走行軌跡 [前輪操舵・直線追従]	23
2.13	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [前輪操舵・直線追従]	23
2.14	姿勢角 [前輪操舵・直線追従]	23
2.15	操舵角 [前輪操舵・直線追従]	23
2.16	走行軌跡 [後輪操舵・直線追従]	24
2.17	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [後輪操舵・直線追従]	24
2.18	姿勢角 [後輪操舵・直線追従]	24
2.19	操舵角 [後輪操舵・直線追従]	24
2.20	走行軌跡 [前後輪逆相操舵・直線追従]	25
2.21	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [前後輪逆相操舵・直線追従]	25
2.22	姿勢角 [前後輪逆相操舵・直線追従]	25
2.23	操舵角 [前後輪逆相操舵・直線追従]	25
2.24	走行軌跡 [アーティキュレート式・直線追従]	26
2.25	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [アーティキュレート式・直線追従]	26

2.26	姿勢角 [アーティキュレート式・直線追従]	26
2.27	屈曲角 [アーティキュレート式・直線追従]	26
2.28	直角追従シミュレーション想定	27
2.29	走行軌跡 [前輪操舵・直角追従]	29
2.30	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [前輪操舵・直角追従]	29
2.31	姿勢角 [前輪操舵・直角追従]	29
2.32	操舵角 [前輪操舵・直角追従]	29
2.33	走行軌跡 [後輪操舵・直角追従]	30
2.34	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [後輪操舵・直角追従]	30
2.35	姿勢角 [後輪操舵・直角追従]	30
2.36	操舵角 [後輪操舵・直角追従]	30
2.37	走行軌跡 [前後輪逆相操舵・直角追従]	31
2.38	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [前後輪逆相操舵・直角追従]	31
2.39	姿勢角 [前後輪逆相操舵・直角追従]	31
2.40	操舵角 [前後輪逆相操舵・直角追従]	31
2.41	走行軌跡 [アーティキュレート式・直角追従]	32
2.42	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [アーティキュレート式・直角追従]	32
2.43	姿勢角 [アーティキュレート式・直角追従]	32
2.44	屈曲角 [アーティキュレート式・直角追従]	32
3.1	LIDAR の Time of Flight による距離計測	38
3.2	2D-LIDAR UTM-30LX-EW の外観 (出典: 北陽電気)	39
3.3	UTM-30LX-EW の計測範囲	39
3.4	3D-LIDAR HDL-32e の外観 (出典: Velodyne)	40
3.5	HDL-32e の計測範囲	40
3.6	各種揺動機構による 2D-LIDAR の三次元化	41
3.7	環境地図と LIDAR のスキャンデータの重ねあわせによる自己位置推定	42
3.8	占有格子地図の一例	43
3.9	二次元 LIDAR により自己位置推定が不安定となることが危惧される環境	43
3.10	三次元環境地図の表現法	44
3.11	三次元環境地図 Cuboid Map 作成のための量子化手順	47
3.12	Cuboid Map の構造	47
3.13	三次元環境情報を収集した地点の景況	48
3.14	三次元点群による表現	49
3.15	Cuboid Map による三次元環境の表現	49

3.16	Cuboid Map によるマップマッチング	51
3.17	オドメトリシステムの累積誤差を考慮した探索範囲	51
3.18	三次元地図の比較	52
3.19	環境地図作成に用いた環境	53
3.20	Cuboid Map 形式による環境地図	53
3.21	三次元 LIDAR の観測点と環境地図が合致した点数の比較	55
3.22	環境地図の違いによる評価関数最大値の比較	55
4.1	つくばチャレンジ 2011 課題経路 (出典:つくばチャレンジ 2011)	61
4.2	課題経路周辺の航空写真 (出典:Google earth)	61
4.3	各波長帯における植物, 土, 水の電磁波の反射と放射の強さ (出典:JAXA)	63
4.4	回転揺動式三次元 LIDAR を用いて受光強度情報を収集した環境	64
4.5	回転揺動式三次元 LIDAR による計測距離と受光強度情報の関係	64
4.6	LIDAR 受光強度を収集した場所 (防衛大学校内航空写真)	65
4.7	防衛大学校内路面識別結果	65
4.8	LIDAR 受光強度を収集した場所 (つくば中央公園内航空写真)	66
4.9	つくば中央公園路面識別結果	66
4.10	植生の受光強度情報記録のために検証に用いた場所 (つくば中央公園の航空写真)	67
4.11	立体構造物のみを記録した Cuboid Map	68
4.12	地表面の芝生位置を地図情報として追加記録した Cuboid Map	68
4.13	路面情報を記録した三次元環境地図による自己位置推定要領	69
4.14	スキャンマッチングの検証に用いた環境	70
4.15	路面情報を記録した三次元環境地図を用いたスキャンマッチング	70
4.16	Smart Dump 5 の外観	72
4.17	Smart Dump 5 の外形	72
4.18	回転揺動式 3D-LIDAR を Smart Dump 5 に搭載した際の視界範囲	73
4.19	回転揺動式 3D-LIDAR により周辺環境情報を収集した地点	73
4.20	回転揺動式 3D-LIDAR で収集した 1 秒間の 3 次元点群情報	74
4.21	回転揺動式 3D-LIDAR で収集した 10 秒間の 3 次元点群情報	74
4.22	Smart Dump 5 の制御システム	75
4.23	検証実験に用いた走行経路	76
4.24	実験走行結果	77
4.25	走行位置の WP からの誤差	78
4.26	オドメトリを基準とした自己位置推定精度の比較	78
4.27	実験走行結果	79
4.28	実験走行結果	80

5.1	刈払作業ロボット車両の外観	87
5.2	刈払作業ロボット車両の外形	87
5.3	刈払作業ロボット車両制御システムの構成	88
5.4	刈払機操作制御システムの構成	89
5.5	刈払ロボット走行実験環境	90
5.6	走行実験環境結果	91
5.7	WP を基準とした走行軌跡の誤差	91
5.8	GPS とオドメトリを基準としたマップマッチングの誤差評価	92
5.9	各走行位置におけるマップマッチングの誤差評価	92
5.10	刈払作業時の走行経路の考え方	93
5.11	刈払作業実験の走行軌跡	94
5.12	WP を基準とした走行軌跡の誤差	94
5.13	刈払作業中の様子	95
5.14	自動刈払作業実験結果	95
5.15	チルト式三次元 LIDAR を用いて受光強度情報の収集した環境	96
5.16	チルト式三次元 LIDAR による計測距離と受光強度情報の関係	96
5.17	LIDAR 受光強度情報の分散を考慮した分離曲線導出	98
5.18	LIDAR 受光強度情報の晴天時と雨天後の比較	99
5.19	周辺照度の異なる環境における姫高麗芝の受光強度値の変化	101
5.20	周辺照度を変化させた際の各距離における受光強度値の平均値	101
5.21	周辺照度を変化させた際の各距離における受光強度値の分散	102
5.22	0lx 基準とした各照度における受光強度値のオフセット量	102
5.23	湿潤条件の異なる環境における姫高麗芝の受光強度値の変化	103
5.24	湿潤条件の異なる環境における受光強度値の平均値と分散	104
5.25	実験環境及び機材構成	105
5.26	LIDAR 受光強度情報を基にした植生の受光強度情報下限値の導出	105
5.27	周辺環境照度が変化した同一計測地点の景況	106
5.28	周辺環境照度が変化した場合の LIDAR 計測距離と受光強度値の関係	107
5.29	周辺環境光 5000 lx 時における閾値 3900 での判定結果	107
5.30	周辺環境光 15200 lx 時における閾値 3900 での判定結果	107
5.31	周辺環境光 5000 lx 時における閾値 4183 での判定結果	107
5.32	周辺環境光 15200 lx 時における閾値 4183 での判定結果	107
5.33	湿潤条件が変化した同一計測地点の景況	108
5.34	湿潤条件が変化した場合の LIDAR 計測距離と受光強度値の関係	109
5.35	乾燥時における閾値 3900 での判定結果	109
5.36	湿潤時における閾値 3900 での判定結果	109
5.37	乾燥時における閾値 3700 での判定結果	109

5.38	湿潤時における閾値 3700 での判定結果	109
6.1	市街に存在するロボット車両の障害になる段差の一例	114
6.2	パン機構に配置して構成した三次元 LIDAR の外観	114
6.3	パン式三次元 LIDAR の構成	114
6.4	凹部検出要領	115
6.5	凹部検出の状況	115
6.6	凸部検出要領	116
6.7	凸部検出の状況	116
6.8	スキャン環境模式図	117
6.9	スキャン結果	117
6.10	三次元点群情報を二次元距離画像として扱う場合の模式図	118
6.11	LIDAR データのクラスタリングによる物体検出の一例	118
6.12	AR Chair の外観	120
6.13	AR Chair の外形	121
6.14	AR Chair の視界範囲	121
6.15	AR Chair の制御システム	122
6.16	モータドライバの構成	123
6.17	モータドライバの外観	123
6.18	つくばチャレンジ 2014 課題経路 (出典: つくばチャレンジ 2014)	124
6.19	探索対象の人物の一例 (出典: つくばチャレンジ 2014)	124
6.20	つくばチャレンジ 2014 に使用した環境地図と WP 及び走行結果	126
6.21	つくばチャレンジ 2014 本走行における AR Chair の走行状態	127
6.22	Area 1 における走行軌跡	128
6.23	Area 1 における走行速度と車体屈曲角	128
6.24	Area 1 における WP からの走行位置の誤差	128
6.25	Area 3 における走行軌跡	129
6.26	Area 3 における走行速度と車体屈曲角	129
6.27	Area 3 における WP からの走行位置の誤差	129
6.28	Area 3 の Detection target 3a 付近の景況	130
6.29	Area 1 における探索対象位置推定のための尤度値	131
6.30	Area 2 における探索対象位置推定のための尤度値	131
6.31	Area 3 における探索対象位置推定のための尤度値	131
6.32	Near miss 1 付近の景況	132
6.33	No.1425 ロボットとの再接近時の状況 (0s)	132
6.34	Near miss 1 付近における AR Chair と No.1425 の動き	133
6.35	Near miss 1 における走行速度と車体屈曲角	133

6.36	Near miss 2 付近の景況	134
6.37	No.1401 ロボットとの再接近時の状況 (0s)	134
6.38	Near miss 2 における AR Chair と No.1401 の動き	134
6.39	Near miss 2 における走行速度と車体屈曲角	134
A.1	Smart Dump 9 の外観	145
A.2	Smart Dump 9 の外形 (側面図)	145
A.3	Smart Dump 9 の制御システム	146
A.4	直線追従シミュレーションでの想定	147
A.5	直角追従シミュレーションでの想定	147
A.6	走行軌跡 [Smart Dump 9 シミュレーション・直線追従]	148
A.7	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [Smart Dump 9 シミュレーション・直線追従]	148
A.8	姿勢角 [Smart Dump 9 シミュレーション・直線追従]	148
A.9	操舵角 [Smart Dump 9 シミュレーション・直線追従]	148
A.10	走行軌跡 [Smart Dump 9 シミュレーション・直角追従]	149
A.11	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [Smart Dump 9 シミュレーション・直角追従]	149
A.12	姿勢角 [Smart Dump 9 シミュレーション・直角追従]	149
A.13	操舵角 [Smart Dump 9 シミュレーション・直角追従]	149
A.14	直線追従実験走行の設定	150
A.15	直角追従実験走行の設定	150
A.16	走行軌跡 [Smart Dump 9 実車による走行・直線追従]	152
A.17	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [Smart Dump 9 実車による走行・直線追従]	152
A.18	姿勢角 [Smart Dump 9 実車による走行・直線追従]	152
A.19	操舵角 [Smart Dump 9 実車による走行・直線追従]	152
A.20	走行軌跡 [Smart Dump 9 実車による走行・直角追従]	153
A.21	$L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [Smart Dump 9 実車による走行・直角追従]	153
A.22	姿勢角 [Smart Dump 9 実車による走行・直角追従]	153
A.23	操舵角 [Smart Dump 9 実車による走行・直角追従]	153
B.1	回転揺動式三次元 LIDAR の構造	154
B.2	回転揺動式三次元 LIDAR の姿勢変化	155
B.3	回転揺動式三次元 LIDAR の制御システム構成	156
B.4	回転揺動機構と二自由度ジンバルによる LIDAR 光源位置の比較	157

C.1	路面の受光強度情報収集時の機材構成	163
C.2	実験に用いた校内の道路標示	164
C.3	射影変換後の道路標示	164
C.4	地表面テクスチャ画像	164
C.5	道路標示の寸法例	165
C.6	テンプレート画像例	165
C.7	路面標示判定処理の構成	166
C.8	地表面受光強度情報収集に用いた計測車両外観	168
C.9	計測車両外形	168
C.10	検出ソフトウェアの確認画面	168
C.11	公道実験走行経路実験走行に使用した経路	170
C.12	公道実験計測車両外観	171
C.13	公道実験計測車両外形	171
C.14	公道実験走行中の車載カメラ画像	172
C.15	公道実験走行における道路標示検出結果	173

表 目 次

2.1	前輪操舵式車両シミュレーションパラメータ	21
2.2	後輪操舵式車両シミュレーションパラメータ	21
2.3	前後輪逆相操舵式車両シミュレーションパラメータ	21
2.4	アーティキュレート式車両シミュレーションパラメータ	21
3.1	UTM-30LX-EW 諸元	39
3.2	HDL-32e 諸元	41
3.3	Cuboid Map の記録テーブル例	48
4.1	分離曲線を用いた LIDAR 受光強度情報による識別結果	64
4.2	Smart Dump 5 の諸元	71
5.1	刈払作業ロボット車両の諸元	86
6.1	AR Chair の諸元	120
A.1	前輪操舵式車両シミュレーションパラメータ	146
B.1	回転揺動式三次元 LIDAR の諸元	155
C.1	文字毎の検出率	169
C.2	類似度尺度の違いによる検出率と処理時間	169
C.3	公道における道路標示検出結果	174

第1章 序 論

1.1 緒 言

交通事故の発生原因は、平成 24 年度に発生した関越自動車道高速バス居眠り運転事故、亀岡の暴走事故や最近多発する高齢者のアクセルとブレーキの踏み間違いによる事故の例を見ると、注意不十分、無免許等規則違反そして加齢による運動や判断能力の低下といった、人間のミスがほとんどである。このような交通事故が及ぼす損害は、当事者およびその家族が受ける被害もさることながら、事故による渋滞などにより影響を受ける人の数は膨大になる。内閣府の資料 [1] によると、交通事故発生による金銭的及び非金銭的な損失を合算した損失額は 6.7 兆円、GDP 比にして 1.3% に上ると算定されている。このような状況は、日本のみならず世界的に同様の傾向が伺える。

交通事故死傷者数の削減を試みるため、1997 年にはスウェーデン議会において交通安全戦略 Vision Zero [2] と呼ばれる交通事故死傷者を削減するという目標が採択され、「道路交通の便益を考えれば、ある程度の死傷者は止むを得ない」といった考え方を改め、「死傷者ゼロを科学技術の力を結集して成し遂げよう」という考えが国際的に広がりを見せている。よって、人間はミスをするものであるという前提にたち、自動車を運行するシステムの構成が求められることは明白であると考えられる。最近では、CCD カメラを用いた画像認識による装置 [3] やミリ波レーダを使用した装置 [4] による運転支援システムを搭載した車両も販売が始まってきた。しかし、これらのシステムは、あくまで人が運転する車両を、正常な判断・操作が可能なドライバーが搭乗していることを前提として支援するという枠に留まっている。交通事故の発生を、交通法規やインフラ等様々な方面で解決する手段と手法は存在する。しかし、将来的に交通事故を起こさない安全に走行可能な自動車の形として、著者はロボット化による手法があると考えている。

1.2 自律移動ロボット車両に関する従来研究

1980年代からコンピュータ技術の急速な発展に伴い、産業用ロボットは自動車産業及び電気電子産業を代表例とした製造現場を中心に急速に普及 [5] してきた。産業用ロボットとして実用化されている自律移動ロボット技術の一つとして、無人搬送車 (Automated Guide Vehicle: AGV) があげられる。当初、AGV は生産現場を中心に原材料、部品そして完成品等の搬送に幅広く活用されていたが、現在では製品の保管・出荷を担う物流センターや病院といった非製造業の分野へも広く導入されている。AGV の誘導制御は、大別すると磁気テープやマーカなどの誘導線に沿って車両を誘導するガイド式と Global Positioning System (GPS) のような自己位置を検出するセンサを用いて、車両を目的位置へ誘導するガイドレス式に区分される。

ガイド式の AGV は、無人工場内を移動する無人搬送台車だけでなく IMTS [6] (トヨタ自動車) や東京臨海新交通臨海線 [7] (ゆりかもめ)、欧州では City Mobil プロジェクト [8] といった次世代交通システムと呼ばれるものがある。ガイド式の特徴は、誘導線や専用マーカを床面に工事する必要や専用軌道を準備する必要があるが、軌道系交通システムの特徴でもある定時性・高速性・輸送力をもちなおかつ制御の信頼性が高いというメリットがある。

ガイドレス方式では、誘導線が不要のためフレキシブルに搬送経路を設定でき、誘導線埋設工事ができない、磁場が強く磁気誘導方式が使えない、レイアウト変更を頻繁に行うような工場等において用いられ、各種センサを使用した自己位置推定を行ないながら自律移動を実現し、機動性・汎用性・融通性に優れているのが特徴である。実用例として、大規模な野外の採掘鉱山において無人で採掘・運搬作業を行う無人ダンプトラック運行システム「Front Runner」 [9] がある。Front Runner は、電気駆動式ダンプトラックをベースマシンとして、高精度 GPS 位置情報システム、ミリ波レーダや光ファイバージャイロ



(a) Yurikamome



(b) Front Runner

図 1.1: 専用環境で活用される自動運転技術
(出典：株式会社ゆりかもめ (左)，小松製作所 (右))

等を組み合わせたユニットを搭載し、これらのセンサ情報をもとに自己位置推定を行ないながら積荷の荷揚げ・荷卸し・運搬を行うことを可能にし、過酷な環境のため人材が集まりにくい鉱山開発を可能にするとともに、鉱山運営において大幅な生産性の向上が期待されている。

一般的な市街環境の走行を目指した自律型自動車の研究 [11][12] は、国際的に行われている。なかでも、DARPA は、無人自動車向け新技術の育成のため、2005 年 10 月に米国モハベ砂漠で無人ロボット自動車レース Grand Challenge[13] が開催した。Grand Challenge では、米国スタンフォード大学 Stanford Racing Team[14] の無人ロボット自動車 Stanley[15] が、131.6 マイルの距離を 6 時間 53 分で走破し優勝した。また、2007 年 11 月に米国カリフォルニア州ビクタービルの軍事基地跡で Urban Challenge[16] が開催され、ゼネラル・モーターズ社が後援したカーネギーメロン大学 Tartan Racing[17] の無人ロボット自動車 Boss[18] (図 1.2(a)) が、街中の通りを模したコースで駐車・旋回、交通状況に応じた走行等の課題において最高得点で優勝する成果を得た。

Urban Challenge の特徴は、人が住んでいない人工的な市街地を利用し、普通の市街地らしくするために、その環境内に訓練されたドライバーが計画通り運転する自動車を走行させ、市街環境を作りだしロボット化した自動車で走らせたところにある。また、自動車の自律走行技術に必要な Light Detection and Ranging (LIDAR) やビデオカメラ等からの情報解析技術が急速に進歩したと考えられる。Urban Challenge により得られた制御技術を用いて、DARPA とカーネギーメロン大学は共同でオフロード無人車両 crusher (図 1.2(b)) の開発などを行っている。また、Sebastian Thrun らは Google driverless car[19] の開発を米国の Google 社と行っている。日本国内においても、複数の自動車会社により加速・操舵・制動を全て自動的に行うシステムを有する自動運転車の販売を目指して開発 [20][21] が進められている。



(a) Boss



(b) crusher

図 1.2: 自動運転ロボット車両

しかし、現状として Urban Challenge など自動運転ロボット車両の多くの試験環境は AGV や Front Runner などと同様に、走行環境内に一般の歩行者などが混在しないと保障された環境での実験である。また、現在研究されている多くの自動運転車は人間が自動車に乗車することが前提となり、現在市販されている自動ブレーキシステムや車線維持・逸脱防止支援システムといふドライバーの補助をおこなうシステムである。これは、実際の道路交通環境には歩行者の飛び出しなど対応しなければならない様々な状況が山積し、自律移動ロボット車両として実現するためには未だ多くの技術的な研究事項が残存していることを意味している。

よって、将来的に人々が暮らしている環境において自律移動ロボット車両を活用するためには、試作したロボットを実際の環境で働かし検証を行う必要がある。この検証結果からこそ、人間と共存して活動するロボットが、どのような機能や技術が求められているかも明らかとなると考えられる。

人の存在する環境においてロボット車両の自律走行を研究開発を試みることができる一つの機会が、2007年度より行われているつくばチャレンジ (Real World Robot Challenge: RWRC)[22] (図 1.3) である。つくばチャレンジは、自ら考え行動するロボットを実際に人が生活する街の中で、安全かつ確実に動くことを目指す技術チャレンジとして位置づけられている。よって、これらの目標を達成すべく、参加チームのロボットに対して実環境の中で実現すべき動作を課題 [23][24] として与えている。同時に、ロボットの行動する場所において既に存在する人に危害・恐怖・不快感を与えることが無いようにロボットを製作することが開発者に求められている。本研究では、この様な実環境での実験・検証を通じて安全なロボット車両の開発を進めていくことが必要不可欠であると考えている。



図 1.3: つくばチャレンジにおける自律移動ロボット車両

1.3 本論文の目的

人の存在する実環境で活用できる自律移動ロボット車両を安全にかつ適切に誘導制御する技術課題を達成するため、著者らは自律移動ロボット車両 Smart Dump[25]を開発し、GPSによる自律走行ロボット車両による技術修得する機会であるGPSロボットカーコンテスト[26]やつくばチャレンジに参加してきた。

Smart Dumpには、屋外での自律走行を実現するために必要な、操舵式車両の軌道誘導技術や自己位置推定技術など様々な技術要素が集約されている。操舵式の車両誘導技術は、滝田[27]-[34]によって提案され、AGVなどのライントレース車両と呼ばれるロボット車両を高速化走行させる技術として軌道誘導 Sensor Steering Mechanism (SSM) が用いられる。

軌道誘導SSMの実現には、車両を誘導するためのガイドが必要となる。しかし、屋外環境を十全に動き回る自律移動ロボットの実現のためには、専用のインフラを必要とするガイド式の誘導手法は適当ではない。同時に実際の都市環境には多くの通行人や予期せぬ場所に障害物が配置されている場合があり、これらを適切に回避しつつ移動を継続する必要がある。

よって、本論文では軌道誘導SSMを応用し専用のインフラを必要とせず、既知の環境において自律移動ロボット車両がどのような位置・姿勢でも、正確な誘導制御を実現するための手法として拡張軌道誘導SSMを提案する。また、提案した拡張軌道誘導SSMを実現するためには、自律移動ロボット車両の自己位置が正確に推定される必要がある。自己位置推定手法の一つとしてLIDAR情報と環境地図によるスキャンマッチングがあるが、実現には精密な環境地図情報が必要とされる。このため、計算量を抑えつつ高精度の推定が可能な三次元環境地図 Cuboid Map を提案する。そして、提案手法の有効性を検証するため開発した自律移動ロボット車両を用い、実際の都市環境などで自律走行を実現させる。

1.4 本論文の構成

本論文は、自律移動ロボット車両を実現するための提案手法と技術要素について第2章から第6章にかけて解説し、第7章に結論を述べる。

第2章では、ガイド式ライトレース車両で安定した走行を実現できる誘導手法の一つである軌道誘導SSMについて解説し、屋外で自律移動するロボット車両に適用するための手法である拡張軌道誘導SSMを提案する。拡張軌道誘導SSMを適用したシミュレーションモデルにより性能を評価し結果を示す。

第3章では、拡張軌道誘導SSMを実現するために必要な自己位置推定技術について解説する。特に、都市環境を走行する小型の自律移動ロボット車両で、高精度かつ計算量を抑えた自己位置推定を行なうのに適当な三次元環境地図Cuboid Mapを提案する。

第4章では、LIDARの視界範囲内に立体構造物が僅少な場合においても自己位置推定を継続するため、地表面のテクスチャをLIDARの取得する受光強度情報を用いてオンライン判定する手法について提案する。提案手法の有効性検証のため、拡張軌道誘導SSMと三次元環境地図Cuboid Mapによる自己位置推定技術を用いた、アッカーマン機構の前輪操舵式ロボット車両”Smart Dump 5”を開発し、実環境を用いた走行実験により検証を行った結果を示す。

第5章では、アーティキュレート式の操舵機構を有する車体を持ちいたロボット車両を開発し、屋外不整地環境における自律走行を実現する。この際、自律走行中に人間が作業する場合に負荷が大きく危険を伴う野外農作業の一つである刈払機による除草作業を行わせ、不整地環境における自律移動ロボット車両の応用例を示す。

第6章では、高齢者や足腰に障害のある人の移動支援に資するための自律移動ロボット車両の開発する。特に、移動経路途中の未知の位置に配置された探索対象をLIDARの観測情報を元に特定する手法をロボット車両に実装し、都市環境における自律移動ロボット車両の応用例を示す。

第7章では、本論文で行われた各章の研究についての結論を要約する。

参考文献

- [1] 内閣府共生社会政策交通安全対策, “ 交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査(平成 24 年 3 月)”, 2012
- [2] Deutscher Verkehrssicherheitsrat, “ Vision Zero Grundlagen und Strategien, ” http://www.dvr.de/download2/p3046/3046_0.pdf”, 2015
- [3] 富士重工, 運転支援システム EyeSight, <http://www.subaru.jp/eyesight/digest/>
- [4] 水野広, 富岡範之, 川久保淳史, 川崎智哉, “ 前方賞外部検出用ミリ波レーダ”, デンソーテクニカルレビュー, Vol.9, No.2(2004), pp 83-87
- [5] 経済産業省, 産業機械課, 2012 年 ロボット産業の市場動向”, 2013
- [6] トヨタ自動車, MTS 資料,
” <http://www.mlit.go.jp/singikai/koutusin/koutu/chiiki/2/images/09.pdf> ”
- [7] 渡邊 忠敏, “ 東京臨海新交通ゆりかもめの無人運転システム”, 自動車技術, Vol.60, No.10(2006), pp 53-59
- [8] CityMobil, ” <http://www.citymobil-project.eu/> ”, 2015
- [9] 小松製作所, リオ・ティントで無人ダンプトラック運行システムの稼働を開始, ” <http://www.komatsu.co.jp/CompanyInfo/press/2008122516010722896.html> ”, 2008
- [10] 国土交通省, オートパイロットシステムに関する検討会, “ 国内外における自動運転の取り組み概要”, 2013
- [11] 浜本貴史, 樋口祐介, 羅芝賢, “ 自動運転技術に関する現状調査と提言”, 東京大学公共政策大学院
- [12] DARPA Grand Challenge, ” <http://archive.darpa.mil/grandchallenge04/> ”
- [13] Stanford Racing Team, <http://www.stanfordracing.org/>
- [14] S.Thrun et al., “ Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge ”, Journal of Field Robotics, Vol.23, No.9 (2006), pp 661-692
- [15] DARPA Urban Challenge, ” <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/index.html> ”
- [16] Tartan Racing, ” <http://www.tartanracing.org/> ”
- [17] Chris Urmson et al., “ Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge ”, Journal of Field Robotics, Vol.25, No.8, (2008),pp 425-466
- [18] John Markoff, “ Google Cars Drive Themselves, in Traffic ”, The New York Times Retrieved 2010-10-11,(2010), pp A1
- [19] Google Official Blog, <http://googleblog.blogspot.jp/2010/10/what-were-drivingat.html>

- [20] TOYOTA Global Newsroom, トヨタ自動車、自動運転技術の開発状況について公表, <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/3932729>
- [21] NISSAN MOTOR CORPORATION, Concept of Nissan 's Autonomous Drive, http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/autonomous_drive.html
- [22] つくばチャレンジ, <http://www.tsukubachallenge.jp/>
- [23] 油田伸一, “つくばチャレンジ-趣旨と課題-”, 第8回システムインテグレーション部門講演会 つくばチャレンジ OS(キーノート講演), 941/942(2007)
- [24] 油田伸一, 水川真, 橋本秀紀, “つくばチャレンジのねらいと成果”, 計測と制御, Vol.49, No.9(2010), pp 572-578
- [25] 伊達央, 滝田好宏 “自律移動ロボット Smart Dump による実世界環境走行実験: 歩行者環境における人の群れ行動による影響と対策”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.3(2012), pp.305-313.
- [26] 一般社団法人 測位航法学会, 第19回 GPS/GNSS シンポジウム 2014, 第8回 GPS・QZSS ロボットカーコンテスト 2014, <http://www.gnss-pnt.org/symposium2014/robocar.html>
- [27] 滝田好宏, “SSM を用いた軌道誘導車両の高速化”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.65, No.630(1999), pp 622-629
- [28] 滝田好宏, 伊達央, “SSM による後輪操舵車両ロボットの軌道誘導特性”, Dynamics & Design Conference 2008, ”328-1”-”328-6”
- [29] 滝田好宏, 伊達央, 笠井健司, 西川尚紀, “SSM による後輪操舵型車両の軌道誘導”, 交通・物流部門大会講演論文集 No.17(2008), pp 385-388
- [30] 滝田好宏, 平澤順治, “SSM を用いた軌道誘導車両の高速旋回特性”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.66, No.652(2000), pp 3888-3896
- [31] 滝田好宏, “SSM を用いた軌道誘導車両のドリフト旋回特性: 動摩擦変化モデルの適用”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.68, No.675(2002), pp 622-629
- [32] 滝田好宏, 榮井弓子, 高橋武志, 伊達央, 向坂直久, “1kHz スマートカメラ搭載 SSM 軌道誘導車両の高速化: 操舵比とレバー比可変によるドリフト抑制”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.72, No.717(2006), pp 1558-1565
- [33] 滝田好宏, 榮井弓子, 伊達央, 向坂直久, “1kHz スマートカメラ搭載 SSM 軌道誘導車両によるトレーラシステムの構築と特性”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.75, No.749(2009), pp 96-103
- [34] 滝田好宏, 笠井健司, 伊達央, “アーティキュレート式車両のための軌道誘導 SSM の提案”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.76, No.765(2010), pp 1130-1138

第2章 拡張軌道誘導SSMによる ロボット車両誘導手法の提案

2.1 緒言

自律的に走行するロボット車両は、製造業の分野における効率向上、省力化そして危険な箇所で人間が作業しなくてよい環境を作る無人化の取り組みとして研究開発がなされてきた。無人搬送車両 (Automated Guided Vehicle : AGV)[1]-[3] 技術は、1980 代以降にかけて生産性向上を目的として、ファクトリーオートメーションを支える技術開発が成されてきた一つである。図 2.1 は AGV の一例を示しており、誘導方式によってガイド式とガイドレス式に大別される。

AGV の黎明期には、物理的なレールや磁気マーカなどによって軌道が予め準備されガイドローラや磁気センサを用いて軌道を追従するガイド式が工場内などで広く用いられてきた。ガイド式の AGV の問題点は、物理的な軌道を準備する必要があるため、小規模生産時など頻繁なフロア変更がある場合、柔軟性に欠ける点と、AGV の最大速度が車体の安定速度限界以下に制限されている点である。よって、柔軟性向上のため、高性能のコンピュータを用いた自己位置推定手法と高精度で環境認識が可能な LIDAR などのセンサを用いた、ガイドレス式の AGV が注目 [4] されている。そして、搬送効率の向上達成のため、一度に運搬できる量を増加させる大型化 [5]、運搬する速度を向上させる高速化 [6] 技術などが検討されている。生産現場の柔軟性を維持しつつ、各種製品製造の時間短縮を達成しようとした場合、ガイドレス方式 AGV の高速化を実現することが最も適当であると考えられる。



(a) Guided type



(b) Guideless type

図 2.1: AGV の一例 (出典 : SHIKO (左), Hitachi(右))

これまでに、AGV を含む操舵車両の軌道誘導高速化の研究開発 [7]-[10] は、多くの研究者によって試みられている。その一つとして、滝田らが提案してきた軌道誘導方式 Sensor Steering Mechanism (SSM)[11]-[18] がある。軌道誘導 SSM は、ホイールベース長と同じ長さのセンサアームを有するガイド式車両の準静的なセンサアーム角度と操舵角度から得られる幾何関係であり、前輪操舵、後輪操舵、前後輪逆相操舵そしてアーティキュレート式車両に適用が図られてきた。これまでの研究結果から、軌道誘導 SSM を適用したガイド式車両は、オーバステア特性で無ければ直線における安定速度限界がないことが分かっており、安定した高速走行が示されてきた。なお、旋回時にはタイヤ特性に依存する速度に対応することができる。しかし、既存の軌道誘導 SSM は、ガイドレス式車両を含む専用のインフラを必要としない自律移動ロボット車両にこのまま適用できる誘導手法とはなっていない。

このため、本章では軌道誘導 SSM を自律移動ロボット車両に適用可能な拡張軌道誘導 SSM を提案する。自律移動ロボット車両は、経路を設定した時点では想定していなかった障害物や歩行者などに遭遇し、回避のため一時的に誘導経路を逸脱することがある。よって、提案手法は軌道誘導 SSM の手法を誘導経路から離れた場合においても、適切に設定経路へ復帰できる誘導手法の実現を目的とする。

第 2.2 節では、ガイド式車両を安定して高速走行させることの出来る手法である、軌道誘導 SSM の概要について述べる。

第 2.3 節では、軌道誘導 SSM を拡張し、自律ロボット車両へ適用手法を提案する。

第 2.4 節では、前節で提案した誘導手法をシミュレーション上で評価する。

第 2.5 節では、本章の結言が述べられている。

2.2 軌道誘導SSMの概要

本研究室では軌道誘導SSM[11]-[18]という誘導方式を提案し、ガイド式車両の安定した高速走行について研究を行ってきた。軌道誘導SSMの特徴は、操舵式車両が準静的に円軌道を移動する場合、センサアームの長さおよび角度および操舵角を、軌道の半径の大きさに依存しない普遍的な幾何学的関係で示している点にある。本節では、これまでに示されてきた軌道誘導SSMを自律移動ロボット車両に適用するに当たり、四種類の操舵式車両に適用した際の概要について解説する。

2.2.1 前輪操舵式車両の軌道誘導SSM

図2.2は、前輪操舵車両が軌道誘導SSMの考えに従い準静的に移動する場合を二輪モデルで示したものである。点 P 及び点 Q は、それぞれ前後車輪の軸中心である。車両はホイールベース長と同じ長さ L のセンサアームを有し、点 P を中心に旋回できる。そして、センサアームの先端 S は半径 R の軌道上を滑らかに追従して走行しているものとする。この時、図2.2の幾何関係から、

$$\angle POQ = \angle POS \quad (2.1)$$

となる。よって、センサアームの角度が 2δ である場合、車両の操舵角は δ となる。前輪操舵式車両の軌道誘導SSMは、車両の最大操舵角の範囲において上記の関係を維持することでどのような回転半径にも対応できる。

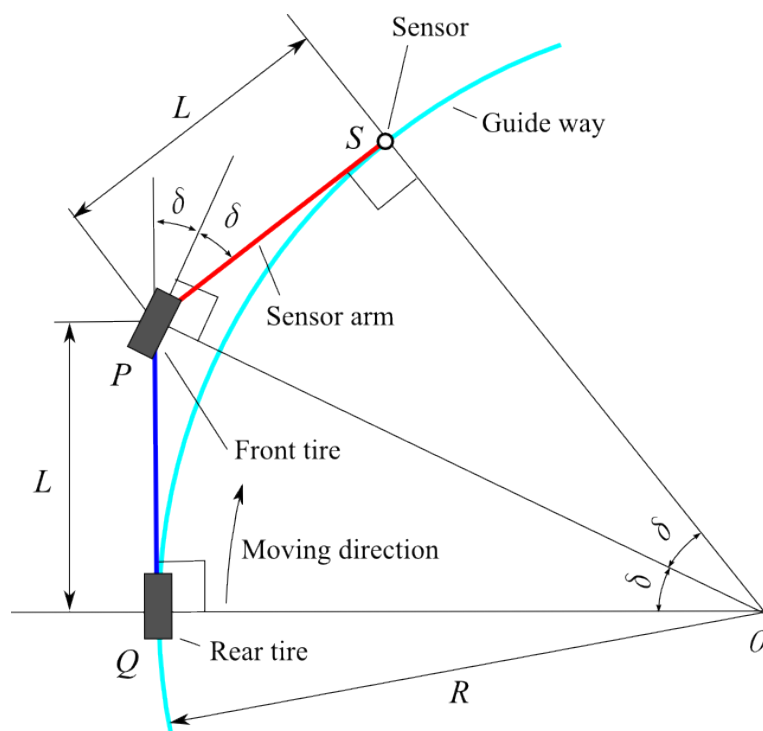


図 2.2: 前輪操舵方式車両のSSM二輪モデル

2.2.2 後輪操舵式車両の軌道誘導 SSM

図 2.3 は、後輪操舵車両が軌道誘導 SSM の考えに従い準静的に移動する場合を二輪モデルで示したものである。点 S_f は、前輪操舵式 SSM のセンサ先端となりセンサアーム QS_f のなす角度は 2δ 、操舵角は δ となる。後輪操舵式 SSM のセンサ先端 B が同一円弧状で接する時、弦長 \overline{PS} は、

$$\overline{PS} = 2R \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.2)$$

となる。この際、

$$L = R \tan \delta \quad (2.3)$$

となり、接弦定理と円周角の定理から、センサアームの角度 ϕ は、

$$\phi = \frac{\delta}{2} \quad (2.4)$$

となる。

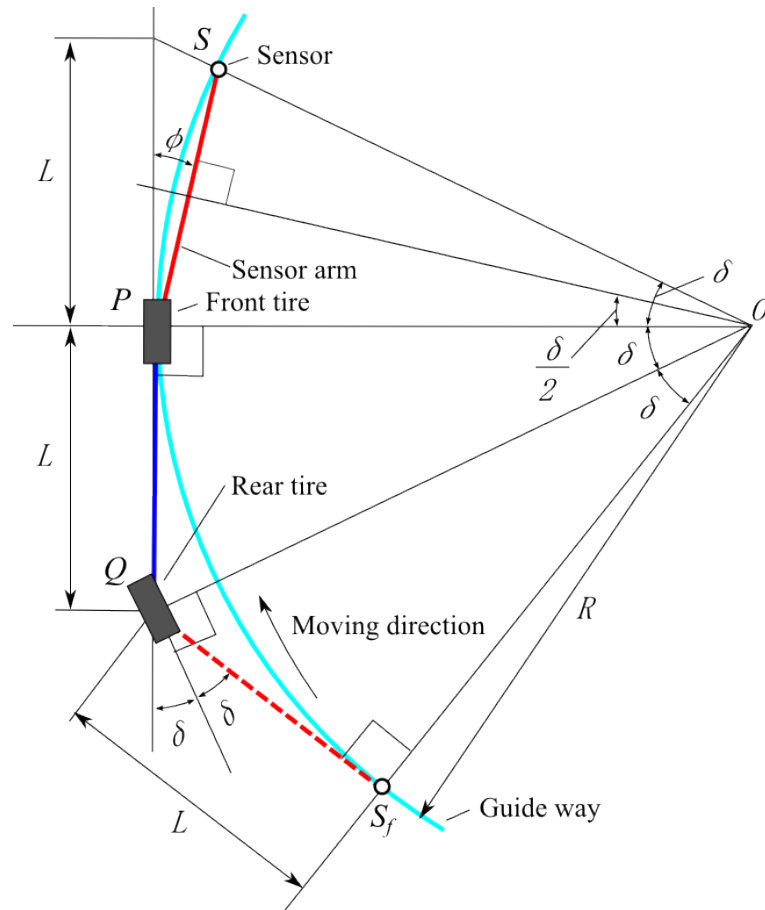


図 2.3: 後輪操舵方式車両の SSM 二輪モデル

センサアームの角度 ϕ が微小角の範囲で動作するという前提で近似した場合,

$$\overline{PS} \simeq R\delta \simeq L \quad (2.5)$$

となる。したがって、センサアームの角度と操舵角の比を 1:2 とすることで、後輪操舵式車両においても軌道追従が可能になる。

2.2.3 前後輪逆相操舵式車両の軌道誘導 SSM

図 2.4 は、前後輪逆相操舵車両が軌道誘導 SSM の考えに従い準静的に移動する場合を二輪モデルで示したものである。前輪操舵方式車両と同様に、センサアームの角度と操舵角の比は 1:2 となっている。一方、前輪及び後輪操舵式車両と異なり、前輪軸中心点 P 、後輪軸中心点 Q 及びセンサアームの先端 S それぞれが同一円軌道上に位置している。よって、前後輪逆相操舵車両は内輪差が発生しない幾何関係を有している。

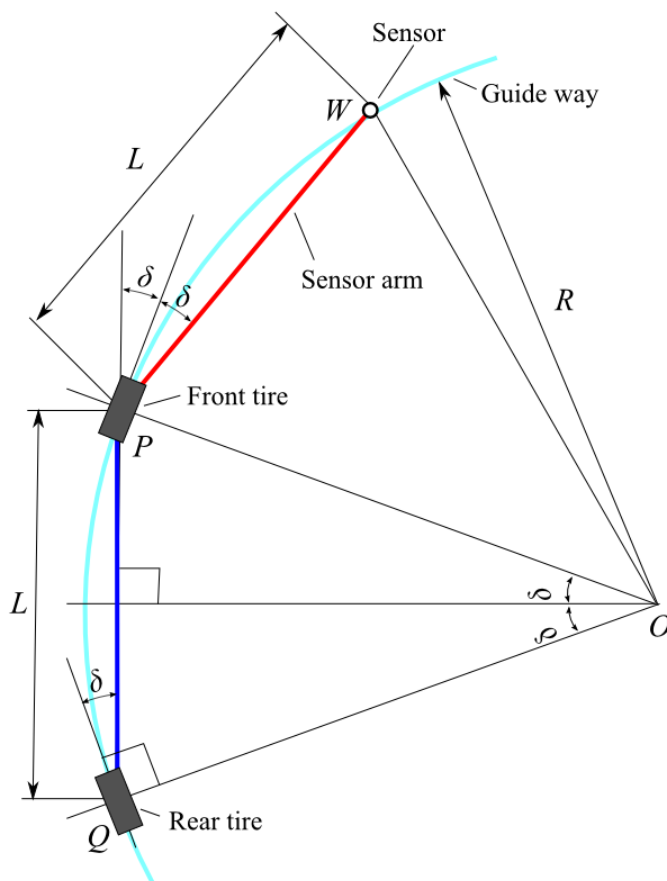


図 2.4: 前後輪逆相操舵方式車両の SSM 二輪モデル

2.2.4 アーティキュレート式車両の軌道誘導 SSM

図 2.5 は、車体中心に屈曲位置 E_a を持つアーティキュレート式車両に軌道誘導 SSM を適用した場合を二輪モデルで示したものである。アーティキュレート式車両は、一般的なアッカーマン機構を用いた前輪操舵式車両の様なりジッドフレーム構造と異なり、車体自体が屈曲することで舵を取ることで特徴である。また、操舵機構を簡略化し高い車体剛性を確保できると共に、前後輪逆相操舵式車両と同様に内輪差が発生しない。

センサアームの先端 S が滑らかに半径 R の円軌道を追従するとともに前後車輪が同軌道上を通過するには、車体前部とセンサアームのなす角を δ とした時、車体の屈曲角は 2δ となる。この時、屈曲角 2δ のとる角度が微小であれば、線分 PQ は、

$$\overline{PQ} = L \cos \delta = L' \simeq L \quad (2.6)$$

となり、ホイールベースとセンサアームの長さを同じと仮定することができる。よって、屈曲角とセンサアーム角度の比を 2:1 とすることで軌道追従が可能である。

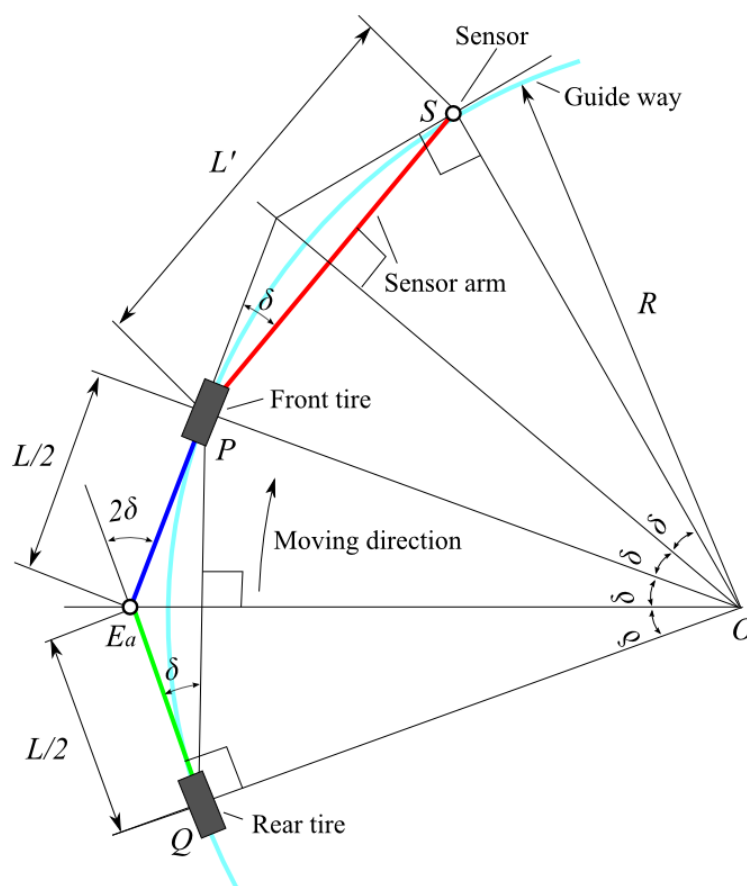


図 2.5: アーティキュレート式車両の SSM 二輪モデル

2.3 軌道誘導SSMのWP通過方法の提案

自律移動ロボット車両を都市環境で安全に誘導するためには、経路途中に現在位置から到達すべき局所的な移動目標を与えることが適当と考えられる。よって、本節は、軌道誘導SSMを自律移動ロボット車両に適用するため、自律移動ロボットが移動すべき目的地までの経路をWay point(WP)として予め与える手法を用いる。

また、これまでの自律移動ロボットの経路探索手法 [19][20] としてAアルゴリズム [21] などが提案され研究・実装がなされている。しかし、これらの軌道計画の多くはその場旋回が可能な対向二輪方式の車両を対象としており、操舵式車両の軌道を考慮しておらず操舵機構を考慮した最適な軌道が計画されているとはいえない。このため、操舵式の四輪車両の誘導制御に適した軌道誘導SSMを用いた誘導手法を件とする。そして、経路途中の障害物を回避することによってWPから逸脱する状況に合わせて対応するため、仮想誘導目標 (Virtual Way Point:VWP) を用いた誘導手法を提案する。

図 2.6 は、環境地図を基準としてロボット車両の誘導経路となるWPを編集するソフトウェアの画面を示している。本論文で用いる環境地図の構造の細部については第3章で後述する。図中では、青線で示されるラインがライントレース車両で用いる誘導ラインに相当する。WPには、回避可能幅や最大速度などの各種動作条件を記録し、ロボット車両の誘導制御に役立てることができる。

通常、軌道誘導SSMに従い走行するロボット車両は前後のWPを結ぶWay Point Line(WPL)上を追従する。しかし、WPL上に障害物などが存在すると前進の継続が難しくなる。このため、経路上の障害物を適宜回避し車両の位置及び姿勢がWPLに対していかなる状態になった場合においても軌道追従を維持することの出来る軌道誘導SSMの拡張手法を提案する。

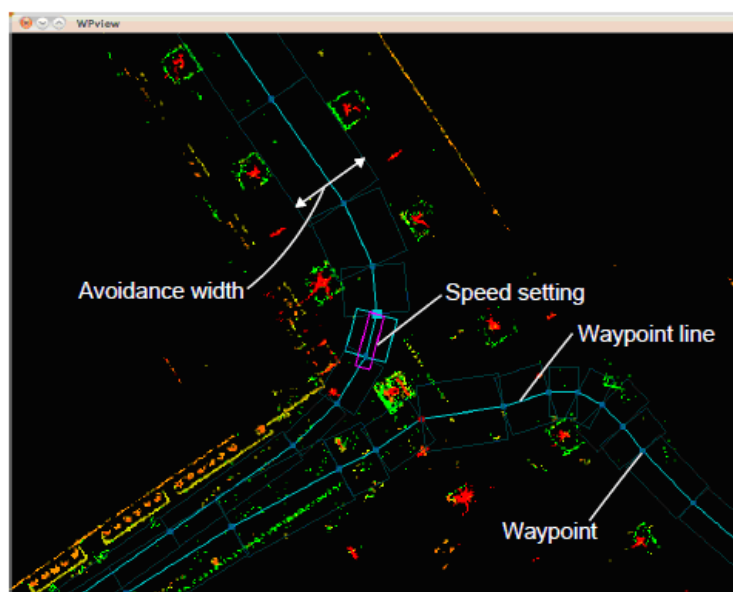


図 2.6: 環境地図を基準に設定された WP の一例

2.3.1 前輪操舵式車両の VWP 誘導手法

図 2.7 は、前輪操舵式の自律移動ロボット車両を VWP に誘導するモデルを示している。同モデルの自律移動ロボットの自己位置（前輪車軸中央点 P ）と姿勢角 θ は、既知であるとする。

自律移動ロボット車両は、ガイド式車両に搭載されていたセンサアームの代わりに、前輪車軸中央点 P からホールベース長 L と同じ長さの仮想的なアーム (Virtual Arm) を有していると仮定し、軌道誘導 SSM の幾何関係を計算するために用いられる。VWP の位置を決定するために、後輪車軸中央点 Q から近傍の WPL に法線を延ばし交点 C を得る。そして、交点 C より距離 L_p の位置に VWP の位置である点 V を設定する。点 V と点 Q を結んだ線が、Virtual arm の先端 S が追従する Virtual Guide Way (VGW) となる。点 S が VGW 上に存在するための Virtual arm 旋回角度 2δ は、軌道誘導 SSM の幾何関係から一意に求めることが可能である。結果として、軌道誘導 SSM のセンサアーム角度と操舵角の関係から、自律移動ロボットがとるべき操舵角 δ が決定される。

この手法の利点は、車両がいかなる位置に存在する場合においても点 V と点 Q を結んだ VGW 上をライントレースして当初設定した WP に向かって移動することが出来る。また、WP への追従性は点 V を設定する位置に依存するため、滑らかな追従が必要とされる場合は L_p を長くすることで対応が可能である。

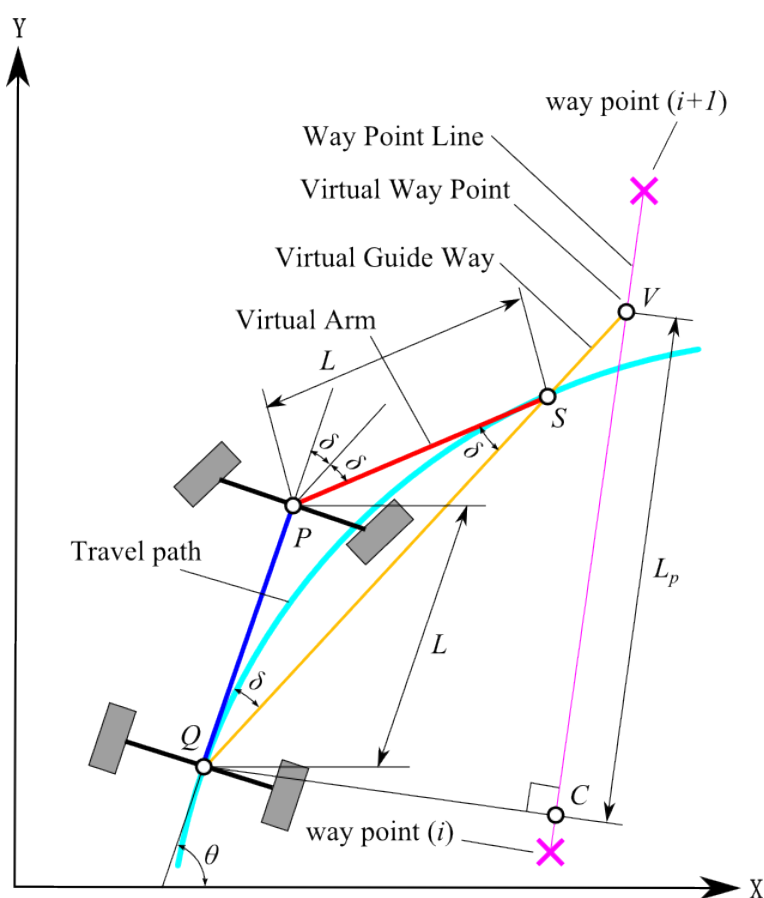


図 2.7: 前輪操舵方式車両の軌道誘導 SSM を用いた VWP 誘導手法

2.3.2 後輪操舵式車両の VWP 誘導手法

図 2.8 は、後輪操舵式の自律移動ロボット車両を VWP に誘導するモデルを示している。線分 $\overline{QS_f}$ は、前輪操舵式車両のセンサアームに相当し、円軌道に対して前輪操舵式 SSM の関係が成り立っているのが確認できる。後輪操舵式車両の VWP の位置決定手順は、前輪操舵式車両の VWP 誘導手法と同様である。点 V と点 Q を結んだ線が、Virtual arm の先端 S が追従する VGW となる。点 S が VGW 上に存在するための Virtual arm 旋回角度 ϕ は、軌道誘導 SSM の幾何関係から求めることができるため、自律移動ロボットがとるべき操舵角 δ が決定される。

また、Virtual arm の長さを旋回角度に応じて伸縮させることで、より精密な誘導制御が可能になる。

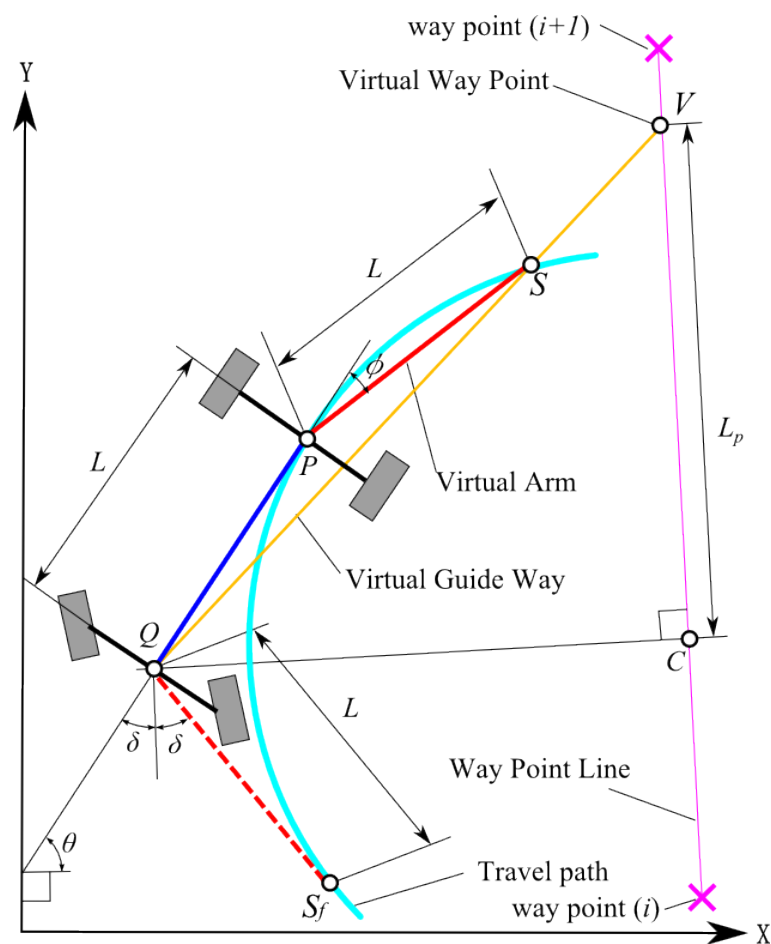


図 2.8: 後輪操舵方式車両の軌道誘導 SSM を用いた VWP 誘導手法

2.3.3 前後輪逆相操舵式車両の WP 誘導手法

図 2.9 は、前後輪逆相操舵式の自律移動ロボット車両を VWP に誘導するモデルを示している。前後輪逆相操舵式車両の VWP の位置決定手順は、前輪操舵式車両の VWP 誘導手法と同様である。点 V と点 Q を結んだ線が VGW となり、その線上に Virtual arm の先端との交点 S が追従する。点 S が VGW 上に存在するための Virtual arm の旋回角度は 2δ で、軌道誘導 SSM の幾何関係から一意に求めることができるため、自律移動ロボットがとるべき操舵角 δ が決定される。

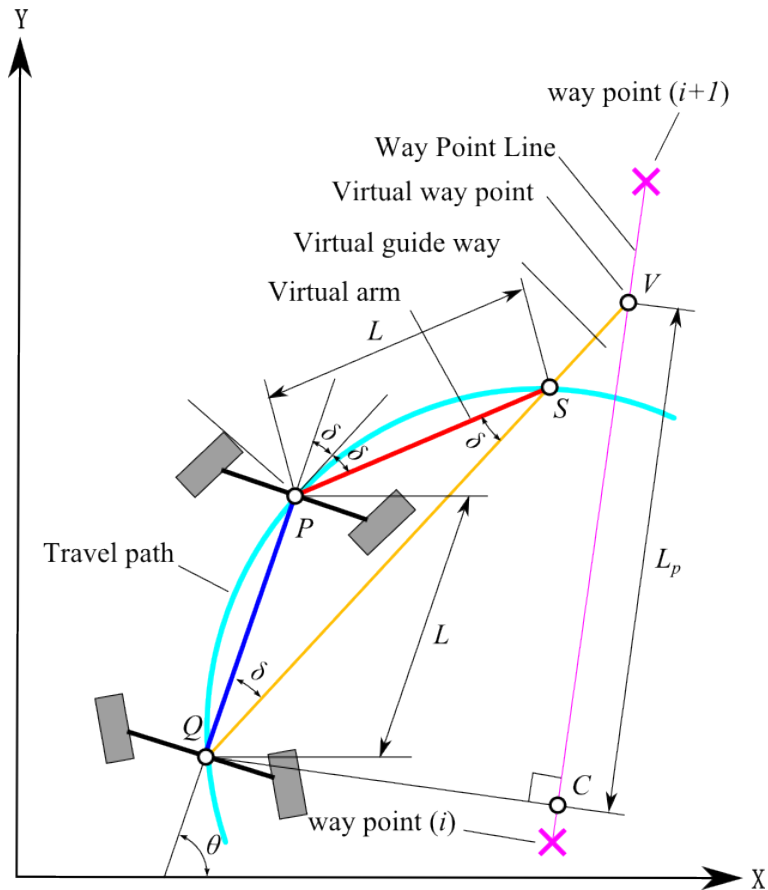


図 2.9: 前後輪逆相操舵方式車両の軌道誘導 SSM を用いた VWP 誘導手法

2.3.4 アーティキュレート式車両の VWP 誘導手法

図 2.10 は、アーティキュレート式の自律移動ロボット車両を VWP に誘導するモデルを示している。アーティキュレート式車両の VWP の位置決定手順は、前輪操舵式車両の VWP 誘導手法と同様である。点 V と点 Q を結んだ線は、Virtual arm の先端と交差する点 S が追従する VGW となる。点 S が VGW 上に存在するための Virtual arm 旋回角度 δ は、軌道誘導 SSM の幾何関係から一意に求めることができるため、自律移動ロボットがとるべき屈曲角 2δ が決定される。

アーティキュレート式車両の場合、車体を屈曲させることで仮想的なホイールベース L' の長さが伸縮する。よって、Virtual arm の長さを車体屈曲角に応じて伸縮させることで、厳密な屈曲角を導出できる。

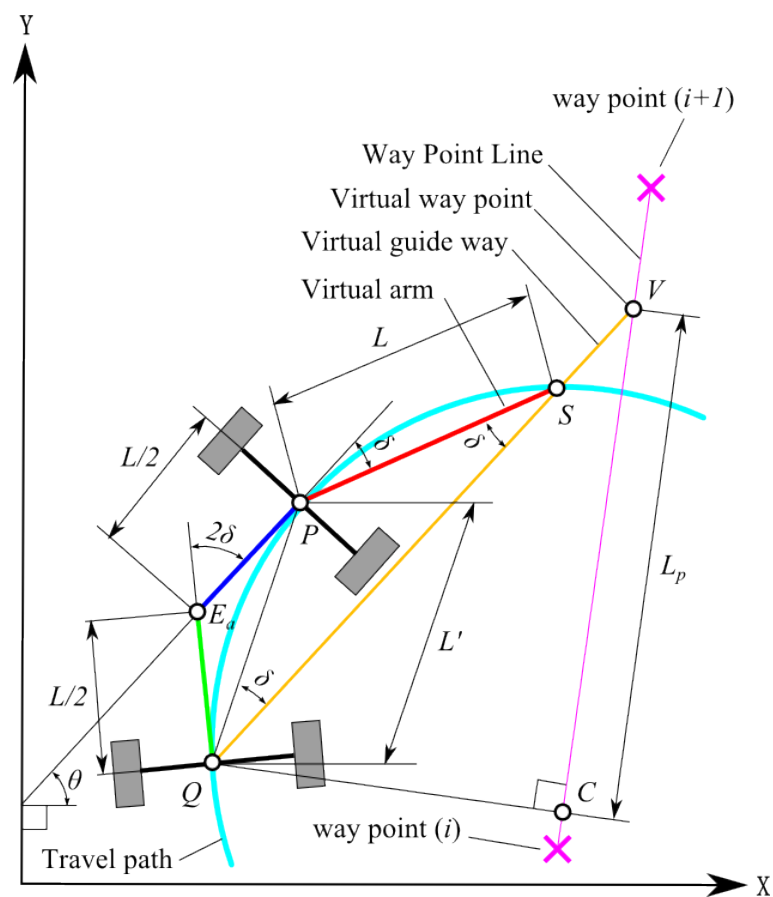


図 2.10: アーティキュレート式車両の軌道誘導 SSM を用いた VWP 誘導手法

2.4 拡張軌道誘導SSMのシミュレーション評価

軌道誘導SSMを拡張したVWP誘導手法による四種類の操舵方式の車両のWPへの追従性は、VWPを設定する L_p の長さに依存する。このため、滑らかな追従が必要とされる場合はVWPを設定する位置を決定するパラメータである L_p を長くすることで対応可能である。一方、 L_p を短く設定した場合、WPL近傍を走行している際に追従を優先し、急な操舵を繰り返し設定WPへの収束に時間と距離を必要とする状況が考えられる。このため本節では、前節で提案した拡張軌道誘導SSMを数値シミュレーションで複数の L_p 値を用いて代表的な経路軌道を走行させ、適切な軌道追従を得られる L_p 値を確定する。

2.4.1 シミュレーション条件

シミュレーションでは、VWPの位置を決定する L_p の値を変化させた際の車両の挙動を確認する。シミュレーションに用いる車両のパラメータを表2.1~2.4に示す。

前輪操舵式車両のシミュレーションパラメータは、第4章で用いる自律移動ロボットのパラメータに準拠した。

後輪操舵式車両のシミュレーションパラメータは、前輪操舵式車両のパラメータに準拠した。最大操舵角は、後輪操舵車両の軌道誘導SSMからセンサーアーム角の2倍の操舵角となっているため、前輪操舵車両の2倍として設定した。これは、一般的にフォークリフトなどの後輪操舵式車両の最大舵角が前輪操舵式車両よりも大きいことを考慮したためである。

前後輪逆相操舵式車両のシミュレーションパラメータは、前輪操舵式車両のパラメータに準拠した。

アーティキュレート式車両のシミュレーションパラメータは、第5・6章で用いる自律移動ロボットのパラメータに準拠した。

シミュレーションの間隔は、10msステップで行い、その際の車両の走行速度は0.1m/sとする。シミュレーションの走行軌跡、姿勢角及び操舵角は、VWP誘導手法を用いた幾何関係による評価から導出するものとし、車両の慣性、タイヤの摩擦、横滑りおよび操舵の遅れなどは考慮しないで構造的な拘束のみで移動するものとする。

評価するため代表的な経路軌道として、直線経路からオフセットがあった場合と、直角コーナーの走行経路の二種類を選定した。これは、自律移動ロボット車両が通常で最も多い走行パターンとして考えられるためである。

表 2.1: 前輪操舵式車両シミュレーションパラメータ

Name	Value
Wheel Base	0.30m
Sensor Arm Length	0.30m
MAX Steering Angle	$\pm 25\text{deg}$

表 2.2: 後輪操舵式車両シミュレーションパラメータ

Name	Value
Wheel Base	0.30m
Sensor Arm Length	0.30m
MAX Steering Angle	$\pm 50\text{deg}$

表 2.3: 前後輪逆相操舵式車両シミュレーションパラメータ

Name	Value
Wheel Base	0.30m
Sensor Arm Length	0.30m
MAX Steering Angle	$\pm 25\text{deg}$

表 2.4: アーティキュレート式車両シミュレーションパラメータ

Name	Value
Wheel Base	0.90m
Bent Position	0.45m
Sensor Arm Length	0.90m
MAX Articulation Angle	$\pm 40\text{deg}$

2.4.2 直線追従の数値シミュレーション

図 2.11 は、操舵方式の違いによる直線軌道への追従性を評価するために用いるシミュレーションの WP 設定を示している。車両の初期 X-Y 座標位置は $(0,1)$ 、初期姿勢角及び初期操舵角は 0 deg とする。WP に対して、各操舵方式により L_p の値をホイールベース 2~4 倍で評価する。

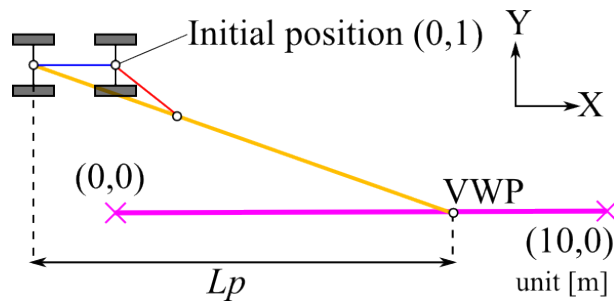


図 2.11: 直線追従シミュレーションでの想定

図 2.12～2.15 は、前輪操舵車両の走行軌跡、 L_p 値がホイールベース長の 2 倍の際の車体の動きを示したスティックダイアグラム、姿勢角及び操舵角のシミュレーション結果を示している。図 2.12 の走行軌跡の結果から、 L_p の値が短いほど短時間で当初設定した直線経路へ接近した。なお、 L_p の値がホイールベースの 2 倍である場合、VWP の位置が車両近傍に設定されているため WP に対して急角度で接近している様子が確認できた。

図 2.16～2.19 は、後輪操舵車両のシミュレーション結果を示している。図 2.12 の走行軌跡は、前輪操舵方式と同等の距離で WP の設定経路へ収束することが確認できた。前輪操舵車両に比べ大きな操舵角が取れるため、経路に対する車体の姿勢角は、より急角度で接近した。

図 2.20～2.23 は、前後輪操逆相舵車両のシミュレーション結果を示している。前後輪操逆相舵車両は、後輪操舵方式と同様に短距離で直線経路へ収束することが確認できた。これは、前後輪逆相操舵車両が前輪操舵車両と同じ操舵角をとった場合、その旋回半径は半分になるためである。

図 2.24～2.27 は、アーティキュレート式車両の走行軌跡（前輪車軸中央）、 L_p 値がホイールベース長の 2 倍の際の車体の動きを示したスティックダイアグラム、姿勢角及び屈曲角のシミュレーション結果を示している。アーティキュレート式車両は、前後輪逆相操舵車両と同様に内外輪差が発生しない特性を有するため車体のパラメータが同じであれば、軌道誘導 SSM による車両の軌道はほぼ同じになった。本シミュレーションにおけるアーティキュレート式車両のホイールベースは、前後輪逆相操舵車両の 3 倍であるため、各 L_p 値における VWP の位置は 3 倍遠方に設定される。このため、WP の追従は前後輪逆相操舵車両に比べて収束が遅くなった。

以上のシミュレーション結果から、提案した VWP 誘導手法では L_p 値を変化させることにより追従性を制御することができることが確認できた。

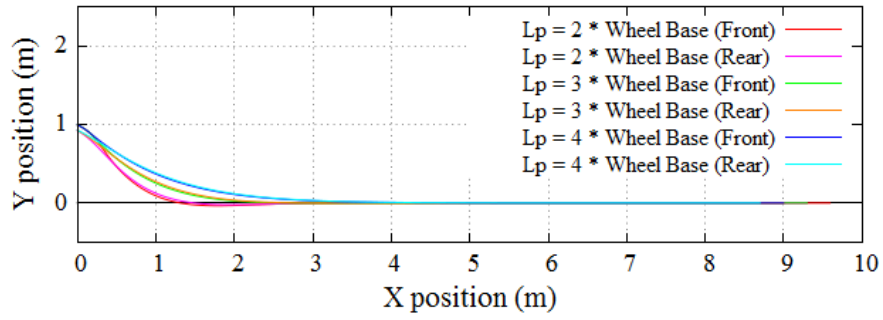


図 2.12: 走行軌跡 [前輪操舵・直線追従]

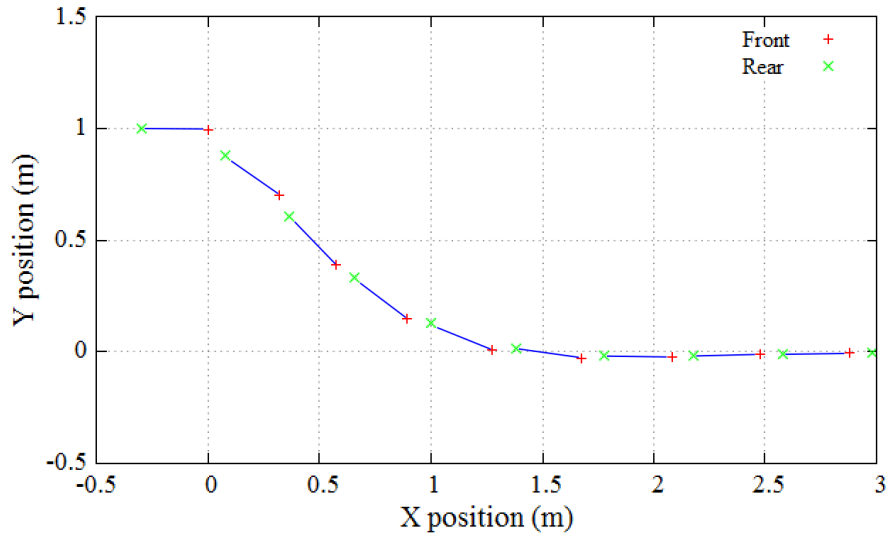


図 2.13: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [前輪操舵・直線追従]

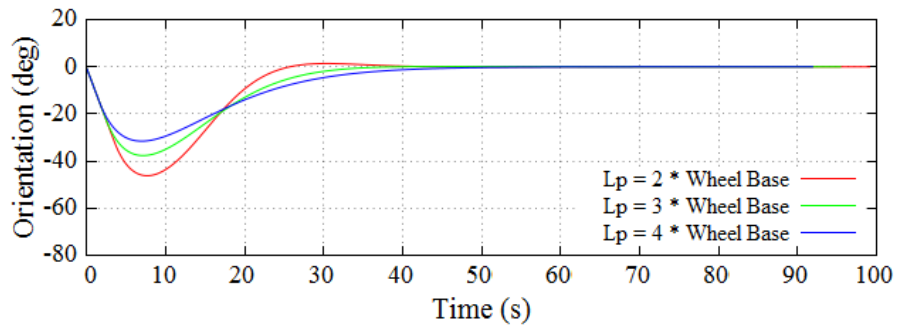


図 2.14: 姿勢角 [前輪操舵・直線追従]

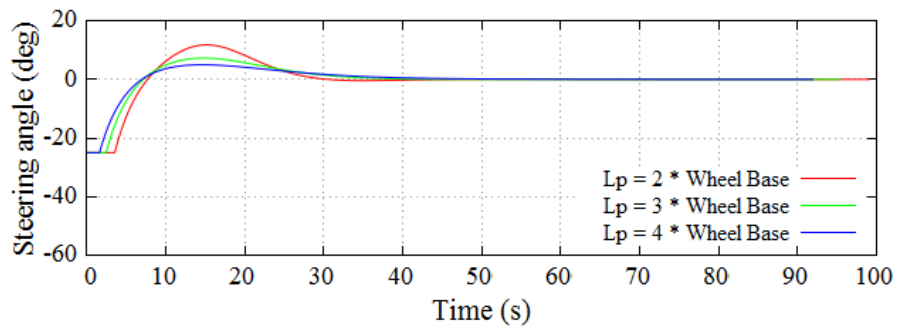


図 2.15: 操舵角 [前輪操舵・直線追従]

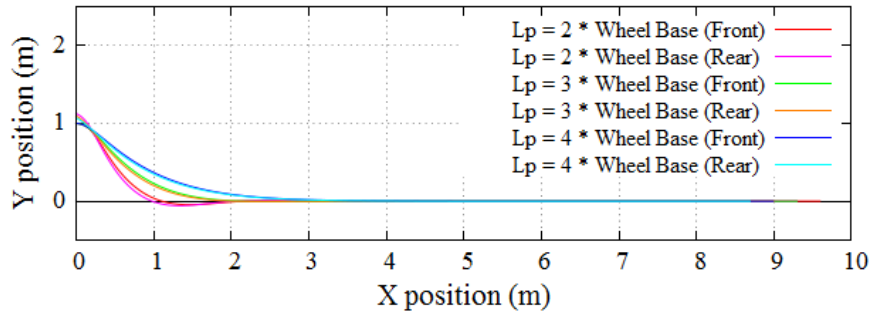


図 2.16: 走行軌跡 [後輪操舵・直線追従]

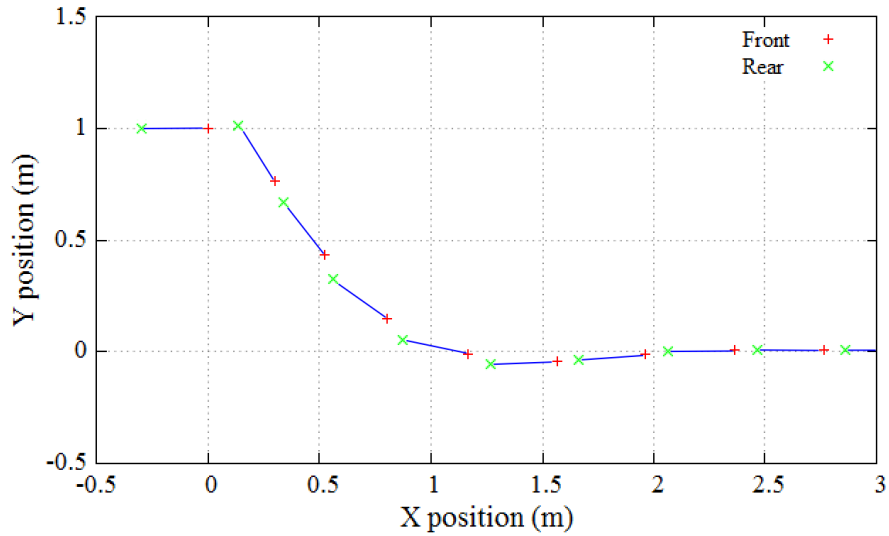


図 2.17: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [後輪操舵・直線追従]

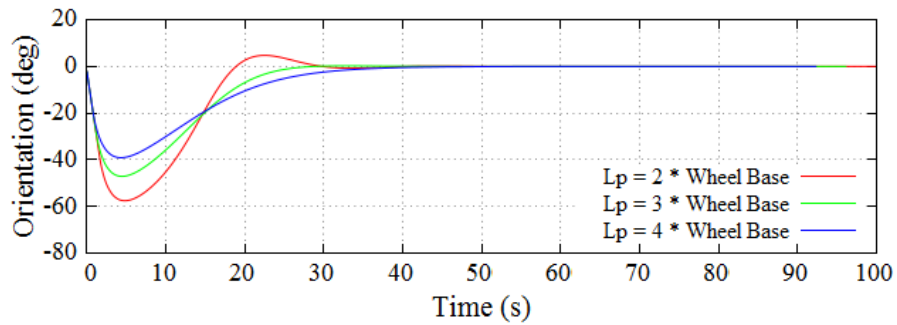


図 2.18: 姿勢角 [後輪操舵・直線追従]

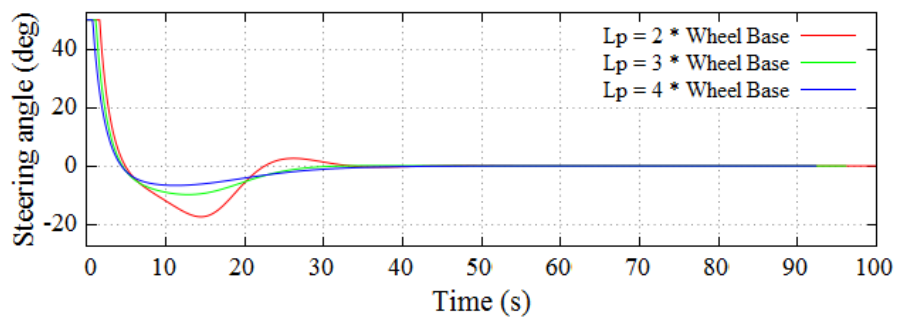


図 2.19: 操舵角 [後輪操舵・直線追従]

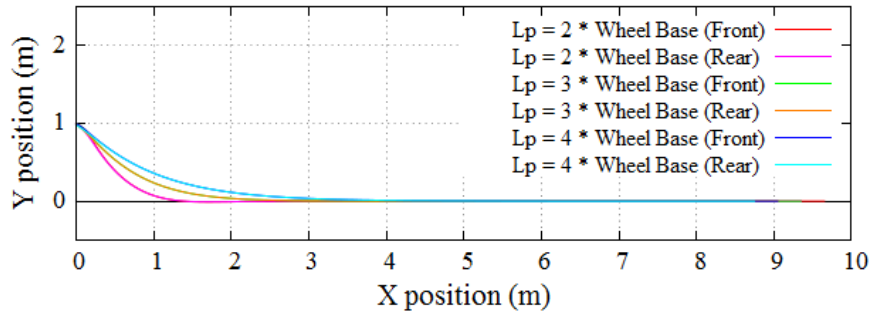


図 2.20: 走行軌跡 [前後輪逆相操舵・直線追従]

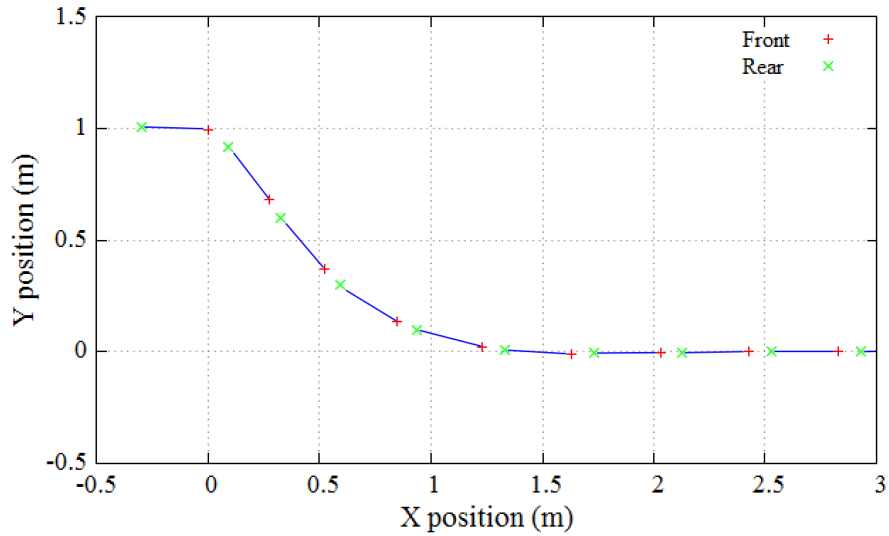


図 2.21: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [前後輪逆相操舵・直線追従]

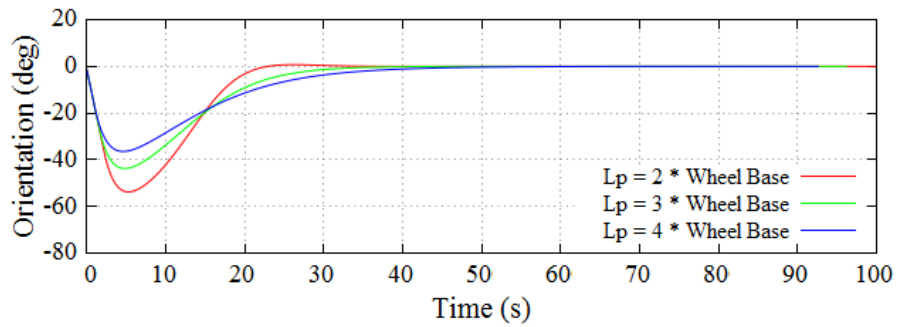


図 2.22: 姿勢角 [前後輪逆相操舵・直線追従]

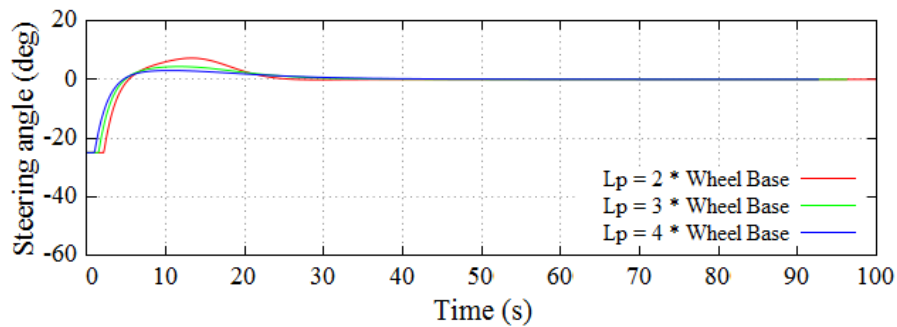


図 2.23: 操舵角 [前後輪逆相操舵・直線追従]

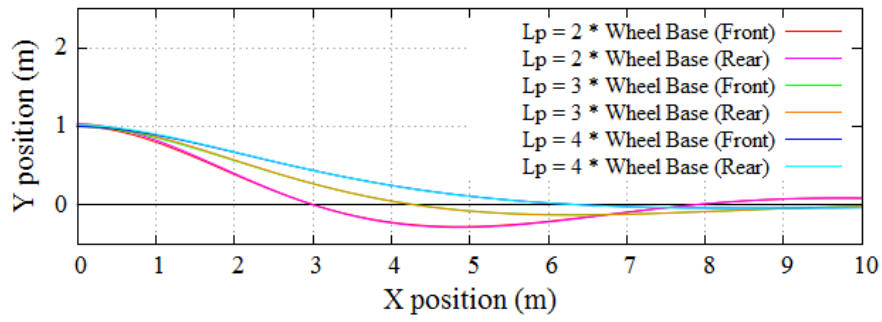


図 2.24: 走行軌跡 [アーティキュレート式・直線追従]

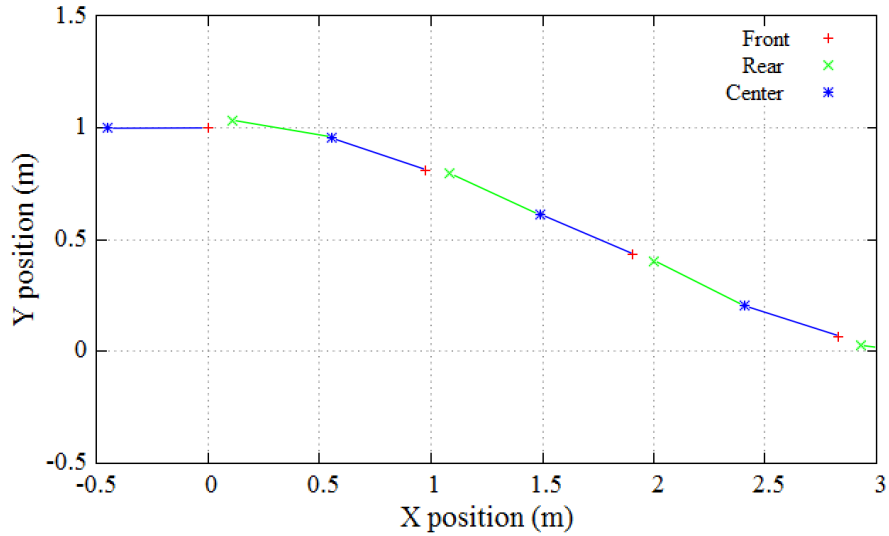


図 2.25: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [アーティキュレート式・直線追従]

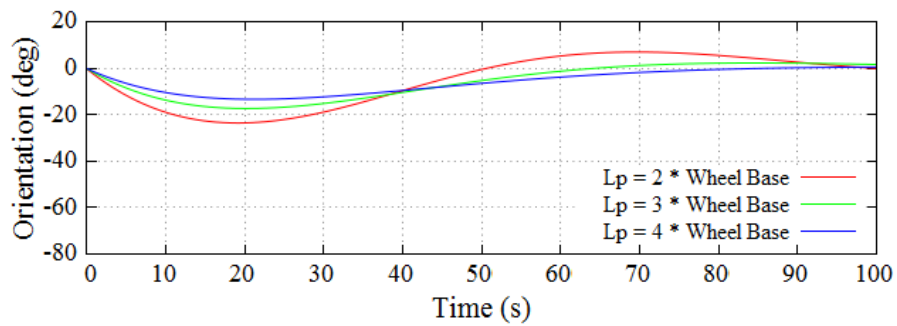


図 2.26: 姿勢角 [アーティキュレート式・直線追従]

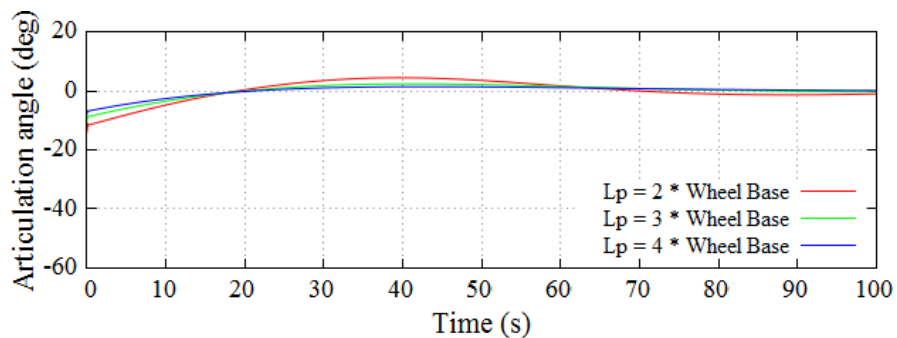


図 2.27: 屈曲角 [アーティキュレート式・直線追従]

2.4.3 直角追従の数値シミュレーション

図 2.28 は、操舵方式の違いによる直角コーナーにおける追従性を評価するために用いるシミュレーションの WP 設定を示している。車両前輪の初期 X-Y 座標位置は (0,0)，初期姿勢角は 90 deg，初期操舵角は 0 deg とする。直線追従シミュレーションと同様に、事前に設定した WP に対して各操舵方式により L_p の値をホイールベース 2~4 倍にして評価を行う。

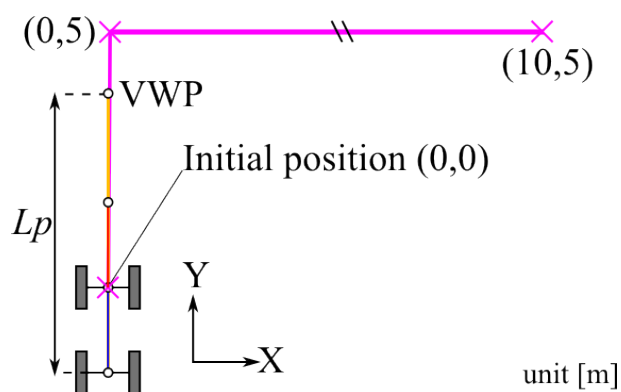


図 2.28: 直角追従シミュレーション想定

図 2.29~2.32 は、前輪操舵車両の走行軌跡、 L_p 値がホイールベース長の 2 倍の際の車体の動きを示したスティックダイアグラム、姿勢角及び操舵角のシミュレーション結果を示している。図 2.29 の走行軌跡の結果から、 L_p の値がホイールベースの 2 倍である場合、直角経路左側に対してオーバーシュートが発生している。これは、操舵を開始する地点がコーナー近傍であることと、車両の最大操舵角の制限から発生している。

図 2.33~2.36 は、後輪操舵車両のシミュレーション結果を示している。図 2.33 の走行軌跡では、前輪操舵車両にくらべ車体前部のオーバーシュート量が抑えられている。これは、後輪操舵車両の最大操舵角が最大 50° で与えられていたため、操舵を開始した地点が車両の最小旋回半径より大きかったためである。しかし、図 2.34 を確認すると、後輪操舵式車両の特性から車体の後部が大きく外側に出ている状況が確認できる。

図 2.37~2.40 は、前後逆相輪操舵車両のシミュレーション結果を示している。図 2.37 の走行軌跡の結果から、 L_p の値がホイールベースの 1 倍の場合でも、最大操舵角を 0.3 秒の間継続しているが、前輪操舵車両と異なり直角経路左側へのオーバーシュートが発生していない。前後輪操舵車両の最大操舵角は、前輪操舵車両と同じ最大 25° であるが、前後輪操舵車両の旋回半径は前輪操舵車両に比べ小さくなるためである。しかし、図 2.34 を確認すると、僅かながら車体後部が経路から外側へ逸脱している状況が確認できる。

図 2.41～2.44 は、アーティキュレート式車両の走行軌跡（前輪車軸中央）、 L_p 値がホイールベース長の 2 倍の際の車体の動きを示したスティックダイアグラム、姿勢角及び屈曲角シミュレーション結果を示している。図 2.41 の走行軌跡の結果から、 L_p の値がホイールベースの 3 倍以下の場合にオーバーシュートが発生していることが確認できる。これは、前後輪操舵車両にくらべ 3 倍のホイールベース長になったことで、最小旋回半径が大きくなったことが一因である。しかし、この時の車体屈曲角度は、最大屈曲角に達していない。最大屈曲角をとり最小旋回半径で直角コーナーを旋回したならば、よりオーバーシュート量を抑えられると思われる。

2.4.4 最適な拡張軌道誘導 SSM のパラメータ決定手法

前節までのシミュレーション結果より、実環境における直線経路の追従では設定経路外の障害物との接触防止の観点からより早い軌道への復帰が望まれるため、 L_p 値を小さく設定することが適当であると考えられる。一方、急激な旋回動作や頻繁な操舵は、ロボット車両の速度によっては転倒などの危険を招くと共に、周辺の通行人に対して脅威を与えることになると思われ、経路への追従性と滑らかな収束が求められる場合が想定される。また、直角追従の結果より L_p 値が小さい場合、急角度で屈曲した WP 経路ではコーナー外側へのオーバーシュート量が増加するため経路によっては L_p 値を大きく設定することが最適な場合も考慮しなければならない。上記の考慮事項から、表 2.1～2.4 に示すシミュレーション条件の車両の場合、経路から逸脱するオーバーシュート量と車体の姿勢格変化を小さくすると共に、操舵角を最大操舵角の半分程度に抑えることを考慮した場合、 L_p 値をホイールベース長の 2 倍～3 倍とすることが適当であると考えられる。しかし、単純に L_p 値をホイールベース長の 2 倍～3 倍と設定するだけでなく拡張軌道誘導 SSM を適用する車両の最小旋回半径を考慮した、 L_p 値の設定が必要となる。実際にロボット車両へ拡張軌道誘導 SSM を適用する際のシミュレーションとロボット車両に適用した状況の一例について、付録 A に示す。

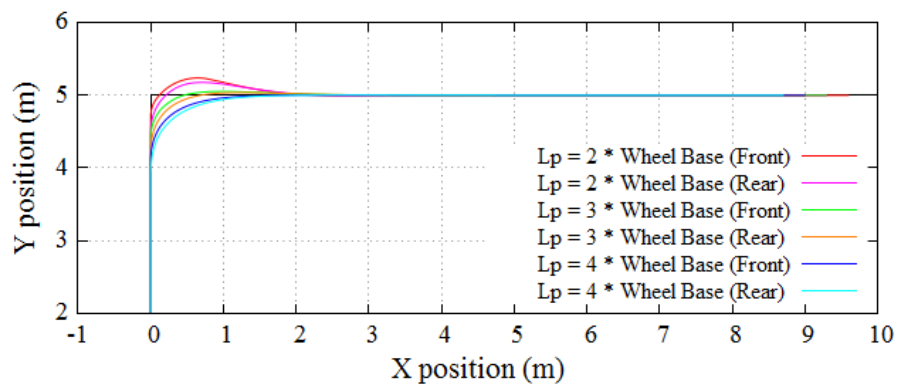


図 2.29: 走行軌跡〔前輪操舵・直角追従〕

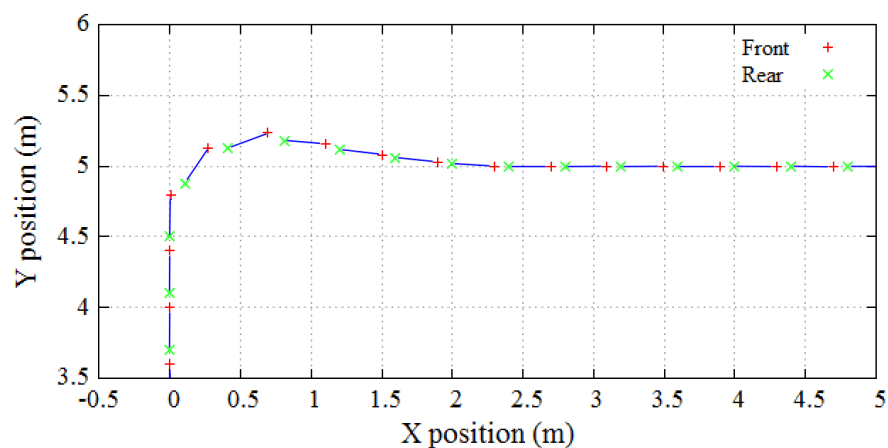


図 2.30: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム〔前輪操舵・直角追従〕

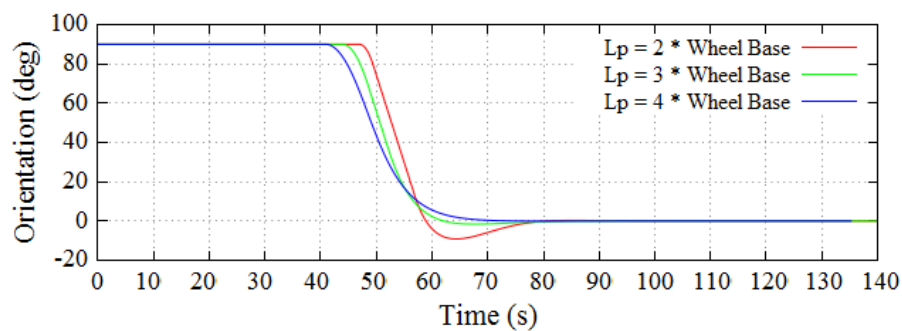


図 2.31: 姿勢角〔前輪操舵・直角追従〕

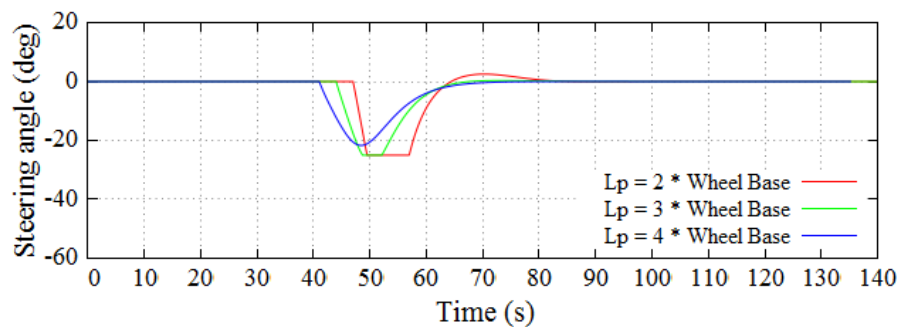


図 2.32: 操舵角〔前輪操舵・直角追従〕

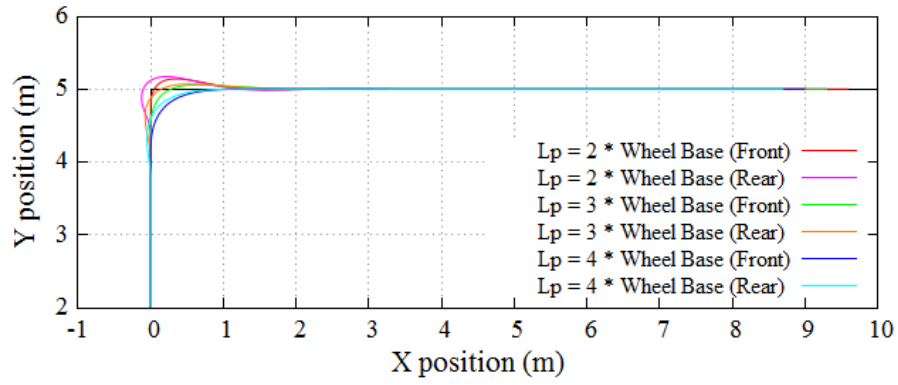


図 2.33: 走行軌跡 [後輪操舵・直角追従]

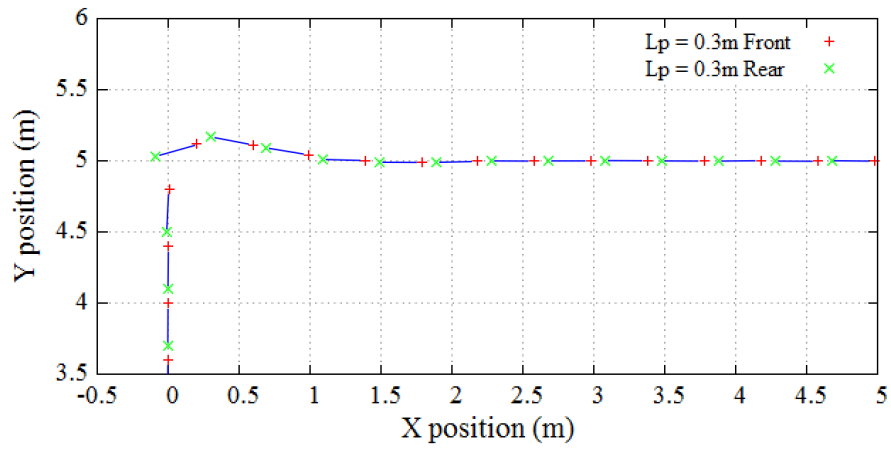


図 2.34: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [後輪操舵・直角追従]

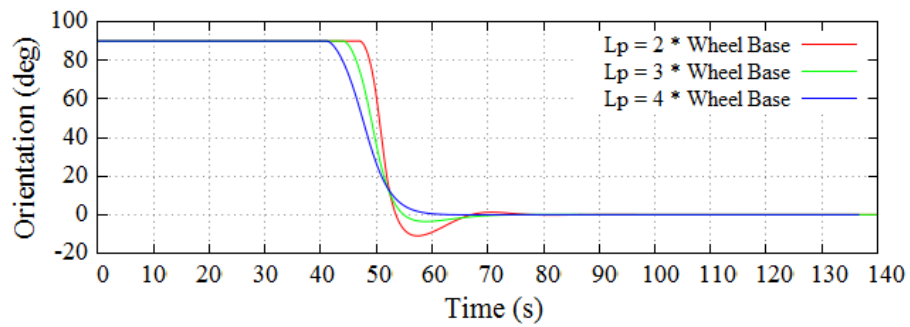


図 2.35: 姿勢角 [後輪操舵・直角追従]

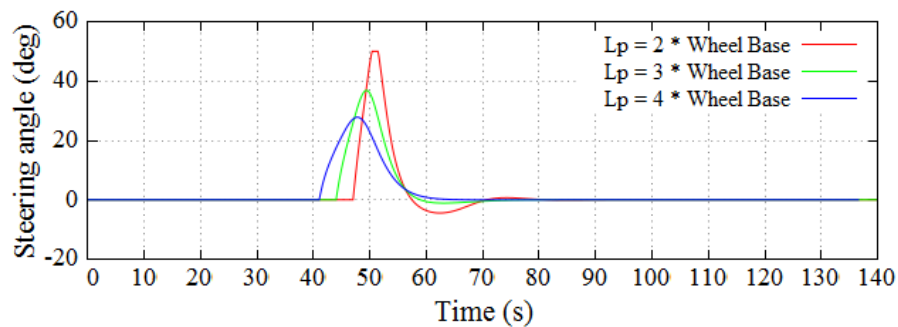


図 2.36: 操舵角 [後輪操舵・直角追従]

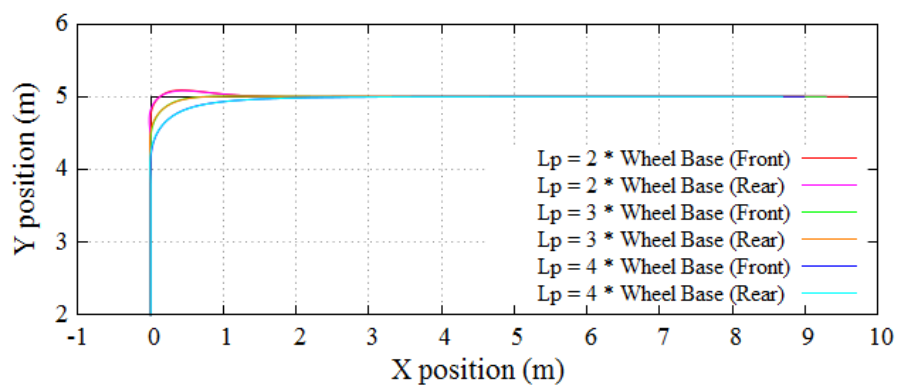


図 2.37: 走行軌跡 [前後輪逆相操舵・直角追従]

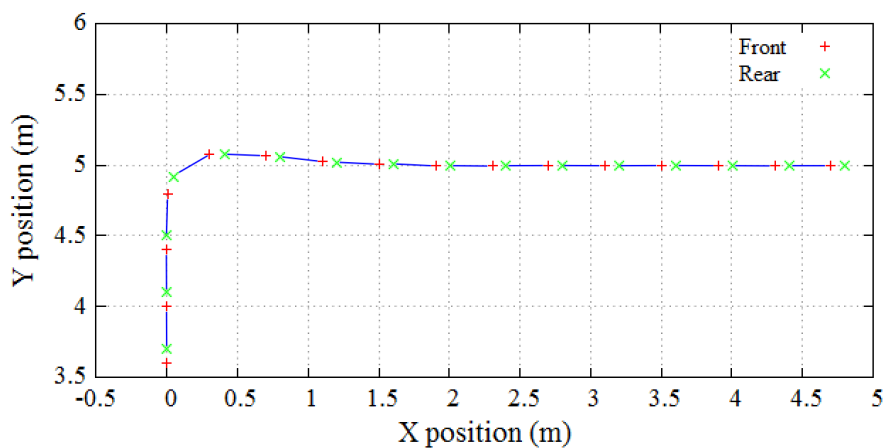


図 2.38: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [前後輪逆相操舵・直角追従]

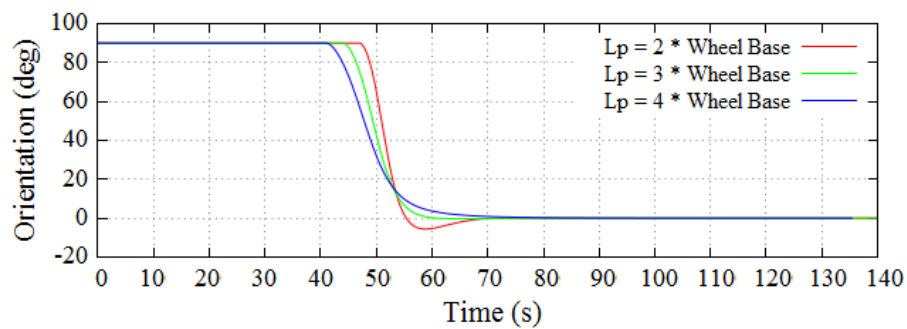


図 2.39: 姿勢角 [前後輪逆相操舵・直角追従]

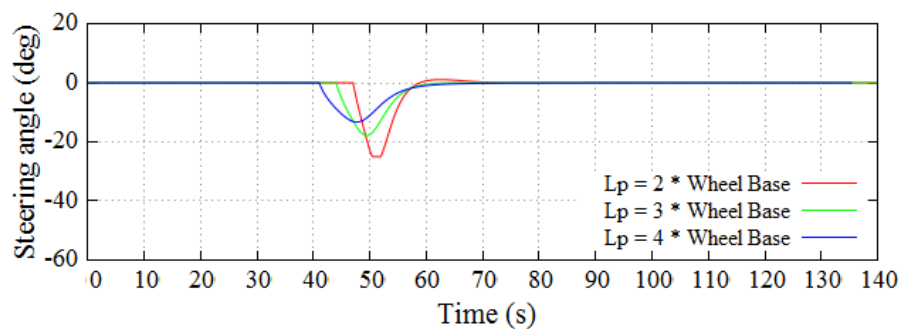


図 2.40: 操舵角 [前後輪逆相操舵・直角追従]

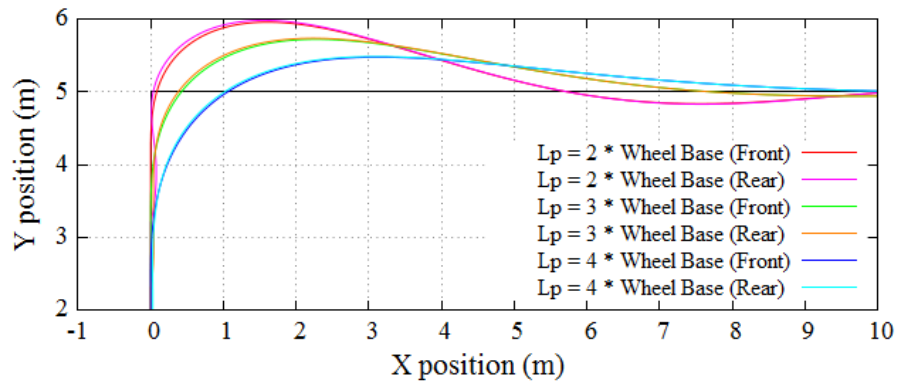


図 2.41: 走行軌跡 [アーティキュレート式・直角追従]

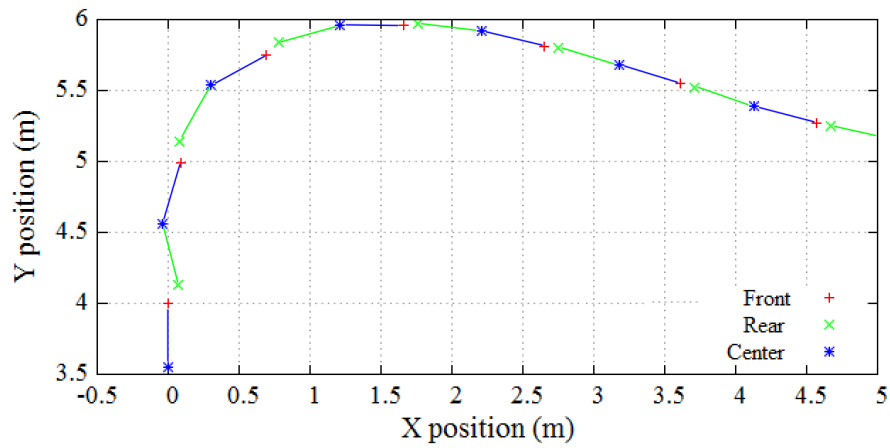


図 2.42: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [アーティキュレート式・直角追従]

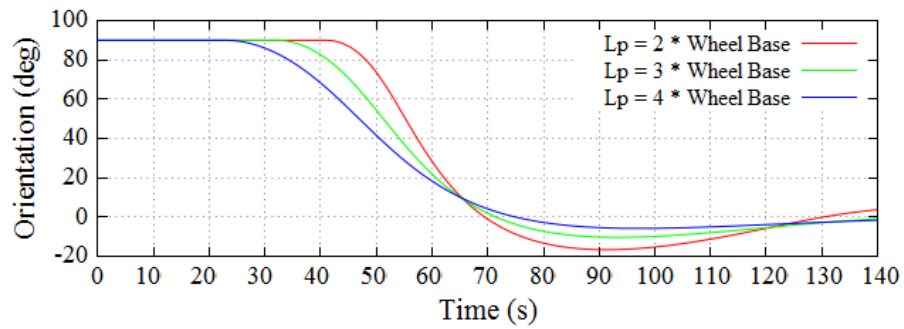


図 2.43: 姿勢角 [アーティキュレート式・直角追従]

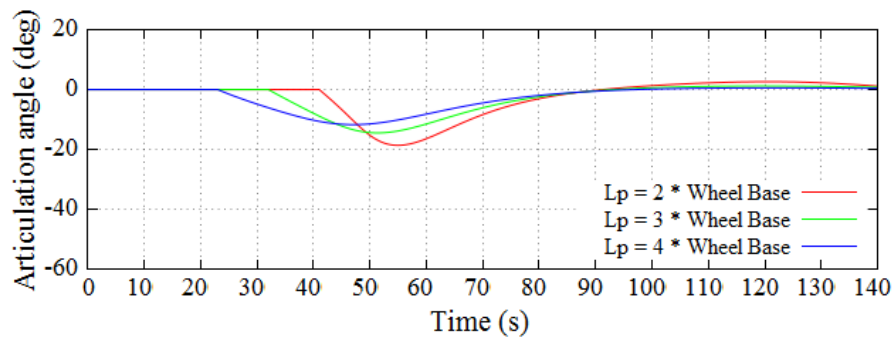


図 2.44: 屈曲角 [アーティキュレート式・直角追従]

2.5 結言

本章では、ガイド式ライントレース車両で安定した高速走行が実現できる軌道誘導SSMを、専用インフラを設置する事が難しい都市環境などにおいて自律移動するロボット車両に適用して、安定した自律走行を実現するための拡張手法について述べた。特に、遊歩道を含む市街環境の自律移動においては、ロボット車両の経路途中で不意に現れる障害物や移動する人物等により、予定された経路からの逸脱が予期される。どのような状況においても、自律移動ロボット車両には障害物回避動作の後に、設定されたWPの軌道上に適切に復帰することが要求される。このため本章では、ロボット車両がどのような位置姿勢においても軌道誘導SSMの考えに基く幾何関係から、VWPに向かうための操舵角を決定することが可能なVWP誘導手法を提案した。本提案手法を実際の自律移動ロボット車両に適用するに当たり、コンピュータシミュレーションによって追従目標とすべきVWPの設定条件により車両の軌道、姿勢及び操舵角の変化について評価を行い以下の知見を得た。

- 屋外都市環境などの自律移動のために、相互のWPを接続するWPL上に局所ゴールであるVWPを設定し、VWPとロボット車両後輪軸中心を結んだ直線を仮想的な誘導ラインとすることにより、軌道誘導SSMは屋外における自律移動に適用することができる。
- 提案手法による経路追従の性能は、VWPの設定位置と車両が持つ最小旋回半径に左右される。一般的にWPLを車両近傍に設定した場合、短時間で設定経路上に到達する。しかし、 L_p が小さい場合は動作の滑らかさが欠ける事になる。
- 経路から逸脱するオーバーシュート量と車体の姿勢角変化を小さくすると共に、操舵角を最大操舵角の半分程度に抑えることを考慮した場合、シミュレーション評価からVWPの設定位置を決定するパラメータ値である L_p 値をホイールベース長の2倍～3倍とすることが適当である。また、 L_p 値は操舵方式、速度、車両の最小旋回半径に応じて決定されることが求められる。

提案したVWPによる軌道誘導SSMの拡張手法は、適用する前提として自律移動ロボット車両の自己位置が判明していることが要求される。よって、次章以降において本手法を機能させるため、屋外都市環境において自己位置を適切に求める手法について検討する。

参考文献

- [1] 特許庁, 無人搬送車・ハンドトラック, http://www.jpo.go.jp/shiryous/s_sonota/map/kikai14/frame.htm
- [2] 星島一輝, 岡浩司, 橋本雅方, 大木芳男, 橋本雅文, 大場史憲, ” 電動 AGV の多軸駆動&多軸操舵制御の開発 ”, 日本機械学会講演論文集, Vol.39(2001), pp.379-380
- [3] L.Schulze, S.Behling and S.Buhrs, “Automated Guided Vehicle Systems: a Driver for Increased Business Performance” Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2008, Vol II IMECS (2008), pp.19-21
- [4] 経済産業省, ロボット技術導入事例集, http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2011fy/E001537-1.pdf
- [5] 水沼渉, 岡部一成, 阿部誠一郎, 篠崎朗子, 橋本英樹, ” 重量物搬送用高速無人車 (AGV) の開発 ”, 三菱重工技報, Vol.36, No.4(1999), pp.196-199
- [6] 岩村誠人, 今別府直弘, ” 車輪型移動ロボットの高速走行制御に関する研究 ”, 福岡大学工学集報, Vol.93(2014), pp 1-7
- [7] Shladover S.E , Wormley D.N., Richardson H.H., and Fish R., “Steering Controller Design For Automated Guideway Transit Vehicles ”, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 100 (1978), pp. 1-8
- [8] 見浪護, 富川久男, 簾 昌弘, ” 磁石補償式自律誘導方法 ”, システムと制御, Vol.31, No.5(1987), pp 382-391
- [9] 牧野俊昭, 大泉純一, 橋本直人, ” イメージセンサを用いた無人搬送車の高速走行, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.5(1992), pp.595-603
- [10] 綱島均, デュアルモードトラックの走行安定性解析, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.63, No.616(1997), pp 4179-4186
- [11] 滝田好宏, ” SSM を用いた軌道誘導車両の高速化 ”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.65, No.630(1999), pp 622-629
- [12] 滝田好宏, 伊達央, ” SSM による後輪操舵車両ロボットの軌道誘導特性 ”, Dynamics & Design Conference 2008, ”328-1”-”328-6”
- [13] 滝田好宏, 伊達央, 笠井健司, 西川尚紀, ” SSM による後輪操舵型車両の軌道誘導 ”, 交通・物流部門大会講演論文集 No.17(2008), pp.385-388
- [14] 滝田好宏, 平澤順治, ” SSM を用いた軌道誘導車両の高速旋回特性 ”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.66, No.652(2000), pp.3888-3896
- [15] 滝田好宏, ” SSM を用いた軌道誘導車両のドリフト旋回特性: 動摩擦変化モデルの適用 ”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.68, No.675(2002), pp.622-629
- [16] 滝田好宏, 榮井弓子, 高橋武志, 伊達央, 向坂直久, ” 1kHz スマートカメラ搭載 SSM 軌道誘導車両の高速化: 操舵比とレバー比可変によるドリフト抑制 ”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.72, No.717(2006), pp.1558-1565

- [17] 滝田好宏, 榮井弓子, 伊達央, 向坂直久, ” 1kHz スマートカメラ搭載 SSM 軌道誘導車両によるトレーラシステムの構築と特性 ”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.75, No.749(2009), pp.96-103
- [18] 滝田好宏, 笠井健司, 伊達央, ” アーティキュレート式車両のための軌道誘導 SSM の提案 ”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.76, No.765(2010), pp.1130-1138
- [19] 太田 順, 新井 民夫, 倉林 大輔, ” 知能ロボット入門—動作計画問題の解法 ”, コロナ社 (2000)
- [20] 比留川 博久, ” 経路探索問題 -ロボットの動作計画- ”, 情報処理学会誌, Vol.35, No.8(1994), pp.751-760
- [21] P.E.Hart, N.J.Nilsson, B.Raphael, ” A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimal Cost Paths ”, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol.4, No.2(1968), pp.100-107

第3章 三次元環境地図 Cuboid Map による自己位置推定手法の提案

3.1 緒言

自律移動するロボット車両の制御には、ロボット自身の状態を観測するためのセンサが必要不可欠である。ロボットに用いられるセンサ [1] は、大別すると内界センサと外界センサに分けられる。これまでに、ロボットの姿勢やマニピレータの角度といった内部状態を知るための内界センサとして、位置検出用のロータリー／リニアエンコーダやポテンシオメータ、Micro Electro Mechanical Systems 技術 [2] を用いた小型で低価格の姿勢検出用のジャイロセンサ、傾斜計、加速度計そして地磁気センサが多用されている。

一方、ロボットの存在する周辺環境である外部状態を観測するための外界センサには、CMOS センサ等を搭載した小型カメラ、超音波や赤外光を用いた距離センサなどが利用されている。しかし、これらの外界センサは周辺環境の変化が大きい屋外環境において、検出性能に制限を受ける場合がある。例えば、カメラは日照や照明の変化によって取得画像に差が生じたり、赤外線距離センサは太陽光から発せられる赤外線によりセンサが飽和したりする。よって、外部環境から影響を受けやすいセンサの利用は、移動する場所、時間など環境条件の変化に対応する必要がある移動ロボットへの精密な誘導制御に適さず、ロバスト性を保つための手段が必要となる。

変化や外乱要因が多数存在する屋外環境において有効なセンサとして、近年の技術革新により急速に性能向上と低価格を実現させてきた LIDAR [3] が注目されている。LIDAR は、レーザ光の飛翔時間を計測することにより、レーザ光が反射した対象物との距離を求めることができる。これまでに市販されている入手可能な LIDAR の多くは、光源として半導体赤外線レーザダイオードを用いている。計測に用いる赤外線レーザ光は環境光の影響を受けにくく、LIDAR が能動的にレーザ光を発信するため夜間や暗所においても使用できる。このような特徴から、2007 年に米国防総省高等研究計画局 (DARPA)[4] の主催において行われた完全自動制御の無人ロボット車レース Urban Challenge [5] において、すべてのロボット車両が多数の LIDAR を活用し、安全性・確実性を高めている [6]-[10]。このような実績から、LIDAR は屋外環境で活動する自律移動ロボット車両の開発において、必要不可欠なセンサの一つであると考えられる。

LIDAR を用いたロボットの自己位置推定に関する研究分野では、パーティクルフィルタ [11] に基く、モンテカルロ自己位置推定手法 [12] [13] が一般的となっている。モンテカ

ルロ法による自己位置推定は、推定した自己位置情報がパーティクル集合で表現された確率分布となる。このため、環境地図を有するロボットが初期の自己位置情報を与えられない場合においても、周辺環境の観測により自己位置の概定が可能である。しかし、位置推定に必要とする計算量はパーティクル数に比例して増大する。特に歩行者などが混在する都市環境内で活動する小型の自律移動ロボットの場合は、搭載可能なコンピュータの制約から計算量が限られると共に制御性の観点からリアルタイム性が重要となる。このため、自己位置推定のための計算量を抑えると共に計算時間の定常性が担保される手法が望まれる。

本章では、前章で提案した拡張軌道誘導SSMによるロボット車両の誘導制御を実現するために、LIDARによって地上を走行するロボット車両に適した三次元環境地図 Cuboid Map を提案し、Cuboid Map を用いた自己位置推定について述べる。

第3.2節では、本研究で活用するLIDARとLIDARを用いた環境認識について解説する。

第3.3節では、市街環境を自律移動するロボット車両の自己位置推定に有用な三次元環境地図の形式について考察し、三次元環境地図 Cuboid Map を提案する。

第3.4節では、三次元環境地図 Cuboid Map を用いた自己位置推定を行ない提案手法の有効性を評価する。

第3.5節では、本章の結言が述べられている。

3.2 LIDARによる環境認識

3.2.1 LIDARの概要

LIDARは、レーザ光を利用した距離計測を行うセンサである。LIDARの動作原理を簡潔に説明すると、図3.1に示すようにパルス状のレーザ光をセンサ光源から照射し、計測対象で反射した散乱光の反射時間から距離を算出する。これは、電波を用いたRADARで利用されている技術である。LIDARとRADARの基本的な相違は、LIDARが紫外線～近赤外線などのより短波長の光源を用いる点にある。1990年代では、LIDARは比較的大型・高価でリモートセンシング用の観測機材として人工衛星などに搭載されてきた[14]。技術革新の成果により2000年代からは、半導体レーザを光源とした小型のLIDARの開発が進みGrand ChallengeやUrban Challenge[5]などで有効性が示されてきた。最近では、小型化・軽量化・低価格化が進み、人間サイズの移動ロボットへの搭載が進んでいる。本項では、本研究で使用するLIDARについて示す。

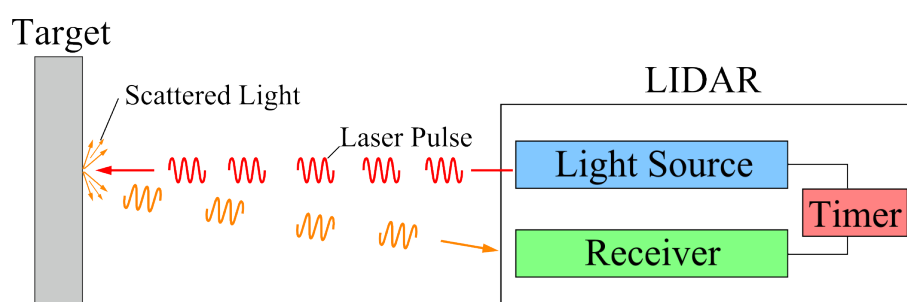


図 3.1: LIDAR の Time of Flight による距離計測

(1) 二次元 LIDAR

二次元 LIDAR は、レーザ光をセンサを中心として灯台の様に周辺をスキャンし、平面における距離計測を行うことが可能な測距センサである。図 3.2 は、本研究で開発した自律移動ロボット車両に搭載した、二次元 LIDAR の製品の一つである北陽電機社製の UTM-30LX-EW[15] の外観を示している。表 3.1 に同センサの諸元を、図 3.3 にセンサの計測範囲を示す。UTM-30LX-EW のレーザーの照射方向 θ は水平面 270 度の範囲で、計測距離 r は最大 60m で計測が可能である。

また、LIDAR 自身が発信したレーザ光が対象物で反射した強さは受光強度情報として取得可能である。この際、受光強度値は、無次元の 18 ビットデータで表現される。LIDAR 受光強度情報の細部は第 4 章で述べる。

著者の所属する研究室では、2008 年度より同センサを取得した。



図 3.2: 2D-LIDAR UTM-30LX-EW の外観 (出典: 北陽電気)

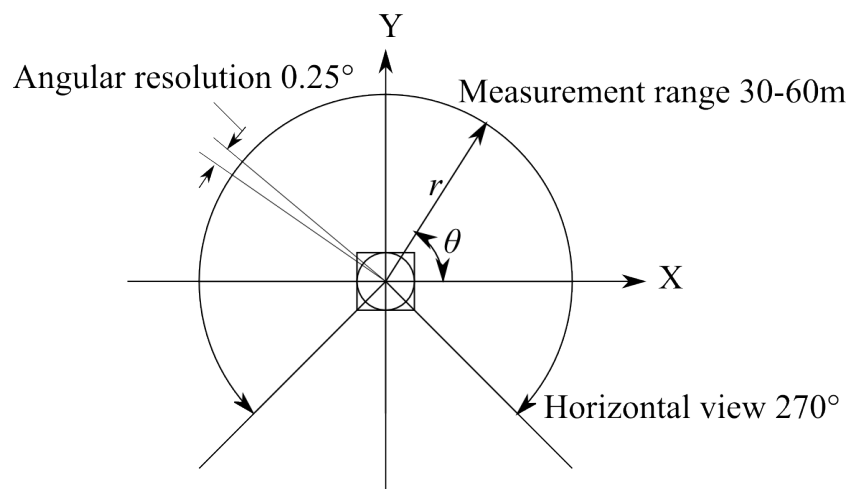


図 3.3: UTM-30LX-EW の計測範囲

表 3.1: UTM-30LX-EW 諸元

Device	UTM-30LX-EW
Laser	Class 1 - eye safety $\lambda = 905 \text{ nm}$
Measurement range	0.1m to typically 30-60m
Vertical view	one field of view
Horizontal view	270° field of view
Accuracy	<1 cm (one sigma at 10 m)
Angular resolution	0.25° (horizontal)
Power	12V @ 0.7 Amps
Weight	210g
Output	Up to 43,000 points/sec

(2) 三次元 LIDAR

三次元 LIDAR は、二次元 LIDAR と同様にレーザ光をセンサを中心として灯台の様に周辺をスキャンし周辺環境の距離計測を行うことが可能な測距センサである。三次元 LIDAR と呼ばれるセンサには、レーザ発信機及び受信機を複数搭載するものと、1つのレーザ発信機及び受信機をミラーなどの内部機構により照射方向を変化させスキャンするものがある。

図 3.4 は、三次元 LIDAR のひとつである Velodyne 社製の HDL-32e[16] の外観を示している。表 3.1 に同センサの諸元を、図 3.5 にセンサの計測範囲を示す。HDL-32e は円柱形筐体で、水平面 360 度全周を計測可能である。HDL-32e の内部には、計測用の受光素子が 32 個使用され、 $+10.67$ 度 ~ -30.67 度の範囲で 1.33 度ごとに取り付け角度 $\phi_i (i = 1, \dots, 32)$ を変えて設置されている。

HDL-32e は、計測に用いたレーザ光の対象物で反射した強さに応じてレーザパワーを切り替える機能を有している。このレーザパワーのレベルを対象物がレーザを反射した受光強度情報として利用可能である。このため、反射率が高い計測対象の場合受光強度値は低くなる。この際、受光強度値は、無次元の 8 ビットデータで表現される。

著者の所属する研究室では、2012 年度より同センサを取得した。



図 3.4: 3D-LIDAR HDL-32e の外観 (出典: Velodyne)

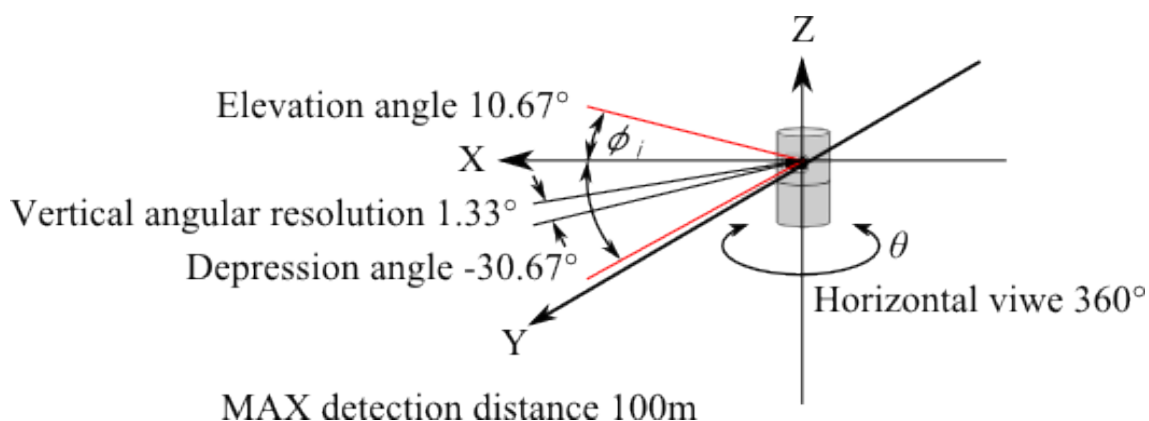


図 3.5: HDL-32e の計測範囲

表 3.2: HDL-32e 諸元

Device	HDL-32e
Laser	Class 1 - eye safety $\lambda = 905 \text{ nm}$
Measurement range	0.1m to typically 80-100m
Vertical view	+10.67 to -30.67 degrees field of view
Horizontal view	360° field of view
Accuracy	<2 cm (one sigma at 25 m)
Angular resolution	1.33° (vertical)
Power	12V @ 1 Amps
Weight	1kg
Output	Up to 700,000 points/sec

(3) 揺動機構による二次元 LIDAR の三次元化

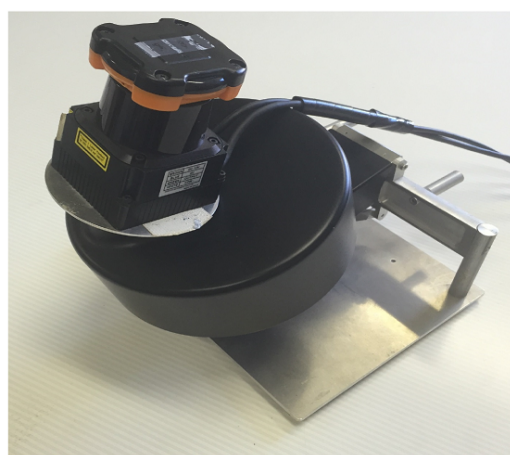
複数のレーザ発信機及び受信機を搭載した三次元 LIDAR は、一般的な傾向として二次元 LIDAR よりも計測距離及び計測点数に優れる高性能な製品が多いが、非常に高価格である。このため、二次元 LIDAR と各種機構を用いて動きを与えることで、立体的な周辺環境の情報を収集するためのシステムが考案されてきている。これまでに、揺動式機構 [17] やパンチルト機構 [18] が用いられてきており、一部は商品化されている。

本研究室では同様の考えにもとづき、図 3.6 に示すようなチルト式、パン式及び回転揺動式の機構を用いた揺動式 3D-LIDAR を作成し、自律移動ロボット車両へ搭載してきた。揺動式 3D-LIDAR は、揺動機構の動きの特徴から収集できる計測点に違いがある。このため、目的に応じた揺動機構の採用が必要となる。各揺動機構を用いた揺動式 3D-LIDAR の細部は、付録 B に示す。

なお、回転揺動式は 2011 年、チルト式は 2012 年、パン式は 2014 年に試作し研究に使用している。



(a) Tilting mechanism



(b) Roundly swinging mechanism

図 3.6: 各種揺動機構による 2D-LIDAR の三次元化

3.2.2 LIDAR のによる周辺環境の計測と課題

前述した性能と特徴を有する LIDAR を用いて、不特定多数の人や車両そして様々な障害物が存在する環境の中でロボット車両が自律的に移動するためには、まずその活動環境の基本情報である地図が必要となる。通常これらの地図は、建物の図面や各種入力ツールによりあらかじめ自律移動ロボット車両に入力されていなければならない。このような、ロボットの自己位置推定とマップ構築を同時に行う手法は、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)[19] と呼ばれている。なかでも、図 3.7 に示すような LIDAR から得られるスキャンデータと環境地図の位置合わせを行うことにより自己位置を求める手法を、スキャンマッチングと呼ぶ。

スキャンマッチングはこれまでに様々な手法が提案され、大別すると大域的マッチングと局所マッチングに区分される。大域的マッチングとしては、不変特徴量を用いた Signature-based Scan Matching[20] や Anchor Point Relationships[21] が挙げられる。一方、局所マッチングを用いるためには、初期値を必要とするため、ある程度の自己位置が判明している必要がある。移動ロボットにおいては、多くの場合オドメトリ等によって初期値を得られることが多いため、局所マッチングを用いることが多い。局所マッチングとしては、その代表に Iterative Closest Point(ICP) アルゴリズム [22] がある。

ICP アルゴリズムを端的に説明すると、2つの図形のうち1つの図形を平行・回転移動を行ないながら対応点間の距離を最小に収束させるアルゴリズムである。ICP を応用したものとしては、Color ICP と呼ばれる、カメラの取得した色を特徴量として用いた位置合わせ手法 [23] や Intensity-ICP と呼ばれる、LIDAR の受光強度を特徴量として用いた位置合わせ手法 [24] も存在する。本研究においても、観測地点から一定距離と高さが離れた観測点をランドマークとした Landmark Based SLAM により地図を生成した。

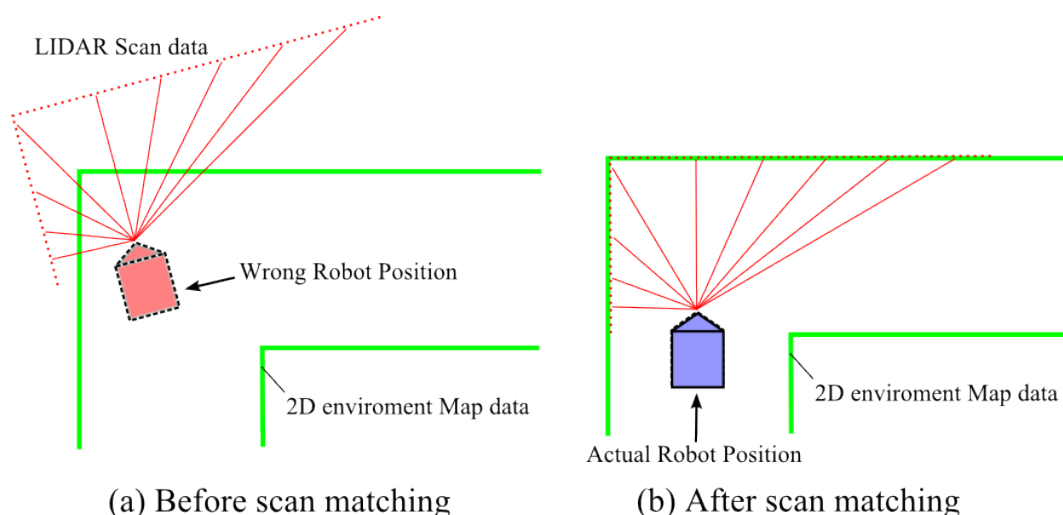


図 3.7: 環境地図と LIDAR のスキャンデータの重ねあわせによる自己位置推定

自律移動ロボットのための環境地図の形式では、図 3.8(a) に示すような周辺環境における障害物の有無の確率を記録した図 3.8(b) に示す占有格子地図 (Occupancy Grid Map: OGM)[25] が二次元平面空間での環境地図として広く用いられている。OGM の利点は、LIDAR の特性を生かしレイキャスティング更新を行うことにより、観測点の付近までは自由空間 (Free)、観測位置 (Occupied)、その後背位置を不明 (Unknown) として記録することができる。OGM は、観測した上で安全だと判定された領域のみを用いて自律移動ロボットのナビゲーションに活用することが可能であり非常に安全な自律移動が可能となる。

しかし、OGM と二次元 LIDAR を用いた自己位置推定手法を環境の変化の大きい市街環境での自律移動に適用した場合、不安定になる状況が想定される。図 3.9 は、不安定になる可能性が高い状況例を示している。二次元 LIDAR は、地面に対して水平にロボットへ搭載されているため、多くの歩行人がロボットの周辺に位置した場合オクルージョンが発生し環境地図と観測点のマッチングが十分出来なかったり、傾斜路ではロボットの姿勢が変化した結果 LIDAR の視界に変化が生じる。また、広場の様な場所では LIDAR 設置水平面に立体構造物が僅少となる。よって、都市環境で活動するロボット車両の自律移動には、このような環境の変化に対応できるロバストな観測手法と環境地図が求められる。

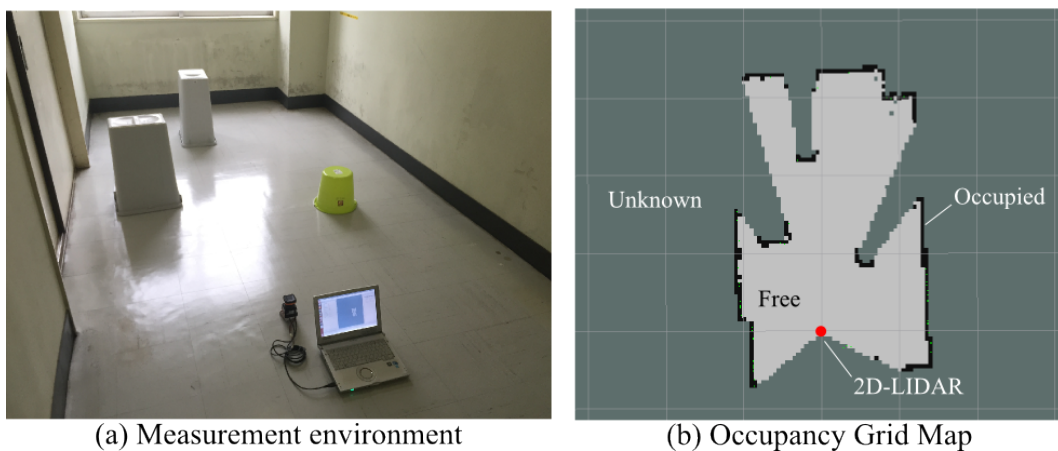


図 3.8: 占有格子地図の一例



図 3.9: 二次元 LIDAR により自己位置推定が不安定となることが危惧される環境

3.3 特徴的な高さ情報を記録した Cuboid Map の提案

3.3.1 三次元環境地図の表現手法

図 3.10 は、これまでに提案されている三次元環境地図の代表的な表現手法について示したものである。OGM を三次元環境情報を記録するために適用した場合、Voxel 形式の地図として記録されデータ量が爆発的に増加することになる。自律移動ロボットはスキャンマッチングにより自己位置推定を行なうが、参照する環境地図情報が高分解能すぎて過大である場合、リアルタイム処理が難しくなることが予想される。よって、自律移動ロボットが実時間で環境地図による自己位置推定を行うためには、参照する地図データ量を小さくする工夫が求められる。

これまでに提案されているグリッド構造を維持した三次元環境地図は、三次元点群の二次元グリッド地図への投影 (Projection plane)[26]、数値標高モデル (Digital Elevation Map)[27] 及び二次元グリッド地図に多層の高さ情報を持たせた Multi Level Surface Map (MLS map)[28] などが提案されている。図 3.10 中、左から右に移るにつれてデータ量の軽い地図となっている。以下に其々の手法の解説を行う。

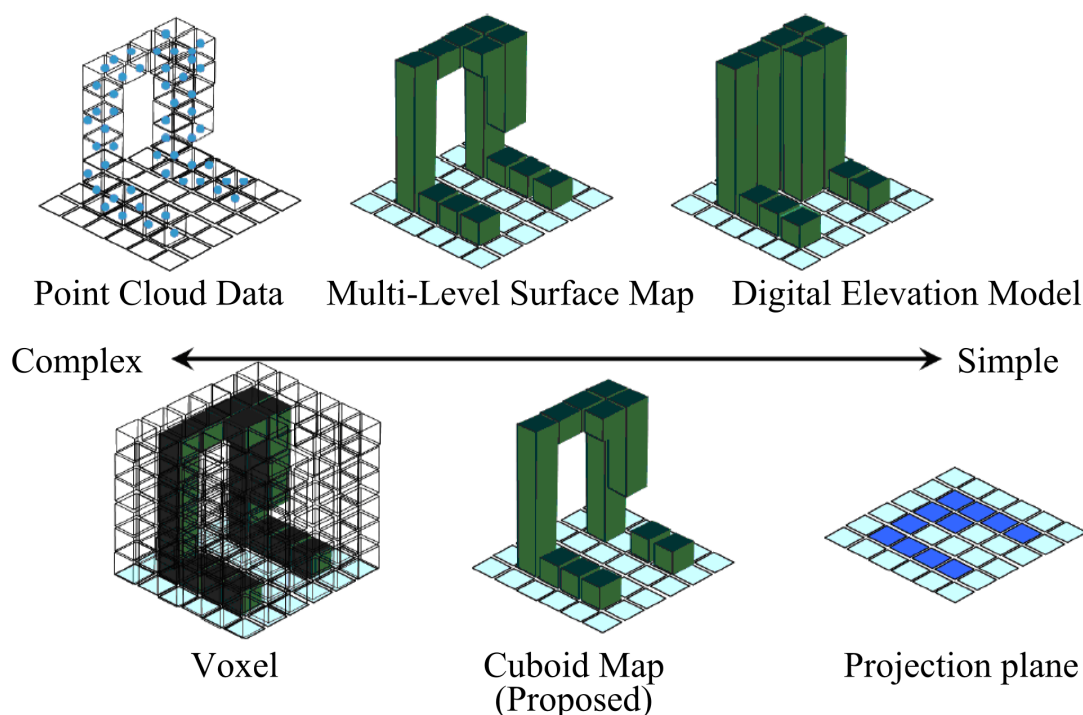


図 3.10: 三次元環境地図の表現法

(1) 三次元点群の二次元グリッド地図への投影 (Projection plane)

同手法は、筑波大の吉田らのグループにより使用されている手法 [26] である。まず、三次元 LIDAR により取得した三次元点群データを地表面に投影し、局所二次元グリッド地図を生成する。次に、局所二次元グリッド地図とあらかじめ生成した参照用の二次元グリッド地図と比較し、尤度が最も大きい位置を計算し自己位置としている。これにより、三次元 LIDAR により得られた広視野の環境情報を二次元グリッド地図に要約することでデータ量を削減しつつ、二次元平面スキャンと同等の高速な照合を実現させている。しかし、同手法では、三次元環境情報を二次元グリッド地図へ射影することにより、地図上に表現される物体の高さ情報が欠落してしまう。よって、三次元空間中の物体の有無は判別可能だが、他の手法に比べて環境変化の影響を受けやすいといった特徴がある。

(2) 数値標高モデル (Digital Elevation Model)

数値標高モデル (Digital Elevation Model)[27] は、リモートセンシング技術を用いて大域の地勢を表現する際によく用いられる手法である。数値標高モデルを利用したものの代表例は、アメリカ地質調査所 (United States Geological Survey) [29] が提供する USGS DEM がある。同手法によって表現された地図は、二次元グリッド毎に標高値が記載されている。この形式の地図は、三次元点群情報を二次元グリッド上へ投影した地図に次いでデータ量が少ない。また、各地点における標高値を有しているため、三次元点群の二次元グリッド地図への投影よりも再現性が高い。しかし、空洞のある構造物や屋内においては、殆どのグリッドが天井の高さを持つことになり、屋内や複雑な形状を持つ箇所におけるナビゲーションに適さない。

(3) Multi Level Surface map (MLS map)

MLS map は、R. Triebel らによって提案 [30] された、グリッドごとに物体が高さ方向に連続した長さを持つ箇所の最低値及び最高値を多層に記録する手法である。派生型として、小型 UAV が飛行するための自由空間情報を記録した Multi-Volume Occupancy Grids[31] が、The City University of New York の William.M らによって、屋内環境を少ないデータで表現することを目的とした正六角格子によって地図を表現する手法 [32] が、東北大の水内らによって提案されている。同手法によって表現された地図は、二次元グリッド地図に多層の高さ情報を保持することで Digital Elevation Map では表現できなかった、地形地物を表現することが可能になり三次元環境情報の再現性を向上させている。しかし、高さ方向の分解能や、記録する層の増加に比してデータ量が増加する。また、地図に記録する連続点の選定要領も工夫をこらす必要があり、移動ロボットをナビゲーションするための適切なスケールの地図とパラメータを設定する必要がある。

このほかにも、ツリー状のデータ構造により地図を表現した OctMap[33] などが提案されているが、グリッド形式の環境地図に比べ自律移動ロボットへの実装や地図の更新が複雑になる傾向がある。

3.3.2 三次元環境地図 Cuboid Map の提案

前項の様に、様々な様式の三次元地図が移動ロボットを誘導するために提案されている。しかし、これらの手法はデータ量を抑える事で折角の高さ情報が失われていたり、再現度を高めるためにデータの削減が不十分であったりと、一長一短であると思われる。このため、市街地を走行する移動ロボットに必要な地図情報を精選する必要がある。

地表面付近のみの立体構造物を用いた三次元環境地図は、走行する自動車や人の移動などの影響を受けやすく、環境の変化に対応することは非常に難しい。一方、自動車又は歩行者以上の高さを有する立体構造物であれば、環境の変化が少ない箇所が存在する。また、樹木などの植生は、特に日本のような四季の移り代わりによる気象変化による落葉などで見え方が変化する箇所が出現する。しかし、幹部分など変化の少ない部分も存在する。以上の点を考慮したとき、都市環境を走行するロボット車両にの自己位置推定に効果的なランドマーク情報は、垂直方向に一定以上の連続長を持った構造物であると考えられる。

例えば、建物や樹木を 3D-LIDAR により計測した場合、図 3.11(a) の様に垂直方向にまとまった三次元点群情報を取得することになる。この三次元点群情報を、一定間隔で丸め量子化すると、図 3.11(b) に示すような Voxel の集合として表現される。ここで、自己位置推定に効果的に使用可能なランドマーク情報は、垂直方向に一定以上の大きさを持った立体構造物である。よって、量子化した Voxel 空間を高さ (Z 軸) 方向に捜査し、最も長く連なった Voxel の最低位置と最高位置を記録する。この際、木々の葉の様な不連続に分散して存在する一定以上の連続長を持たない Voxel は、ノイズとして除去する。結果、図 3.11(c) に示す様な直平行六面体 (Cuboid) の集合で表現される Cuboid Map を作成した。

図 3.12 は、Cuboid Map の構造を示している。表 3.3 は、図 3.12 に対応した Cuboid Map の記録テーブルの一例を示している。Cuboid Map は、地図情報として一定の連続長を有する二次元グリッド座標位置のみが記録される。そして、該当 XY 座標の最低位置 h_{min} と最高位置 h_{Max} を記録することで、直方体の位置を定めている。このような地図構造とすることにより、Voxel 形式の地図では多数を占める障害物の記録されない空間のデータを除くことができる。また、各 XY 座標の最低位置を記録することで、DEM では埋められてしまうドームなどのドーム形状を有する立体構造物をより高い再現度合で表現することが可能となる。

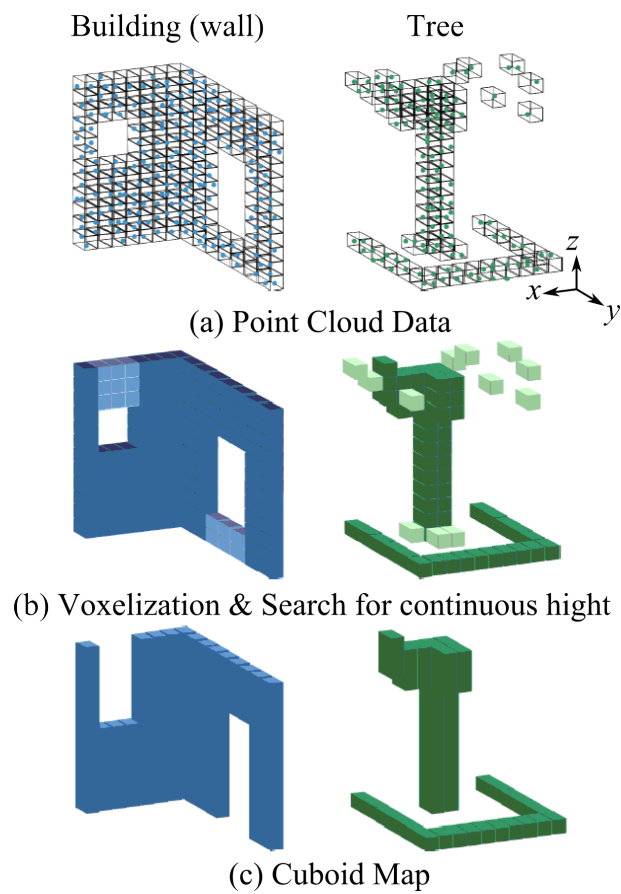


図 3.11: 三次元環境地図 Cuboid Map 作成のための量子化手順

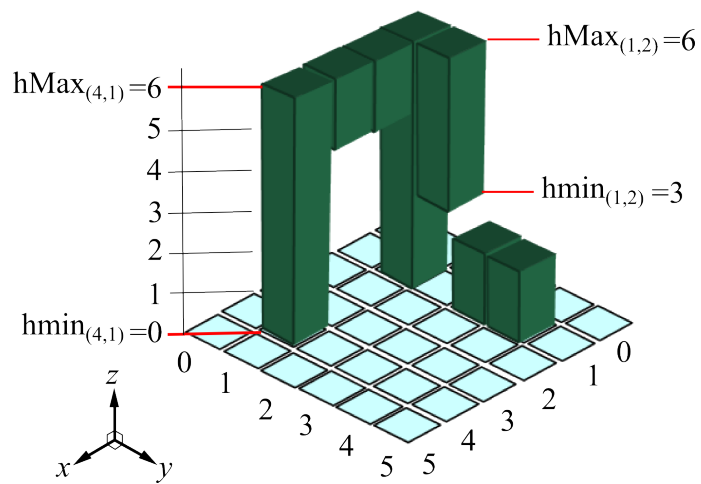


図 3.12: Cuboid Map の構造

表 3.3: Cuboid Map の記録テーブル例

X position	Y position	hmin	hMax
1	1	0	6
1	2	3	6
1	3	0	2
1	4	0	2
2	1	4	6
3	1	4	6
4	1	0	6

3.3.3 三次元環境地図 Cuboid Map の作成

提案手法による三次元環境地図の表現具合を検証するため、図 3.13 に示す茨城県つくば市街の遊歩道を用いて Cuboid Map を作成した。三次元点群の収集は回転揺動式 3D-LIDAR を用い、Landmark Based SLAM に三次元点群データのマッチングを行った。図 3.14 は、収集した三次元点群を可視化している。遊歩道周辺に 6m 以上の樹木が点在しており、樹木上部に木々の葉が点在している状況が確認できる。この三次元点群情報を 10cm 格子の Voxel で量子化し、地表面を高さの基準として高さ方向に対する Voxel の連続長の走査を行った。この際、高さ 20cm 以下の Voxel の連なりはノイズとして除去した。

図 3.15 は、作成された Cuboid Map を可視化した様子である。Cuboid Map では、不連続点である木々の葉は取り除かれ、太い枝及び幹部分又周辺の壁といった高さ方向に連続長を有する立体構造物が記録されている様子が確認できる。一方、樹木上部の葉部分は、不連続データとして除去されている。この結果、風や季節の変化により変化の大きいデータが取り除かれ、影響を受けにくい特徴的な高さを有するランドマークを適切に記録した地図が得られた。

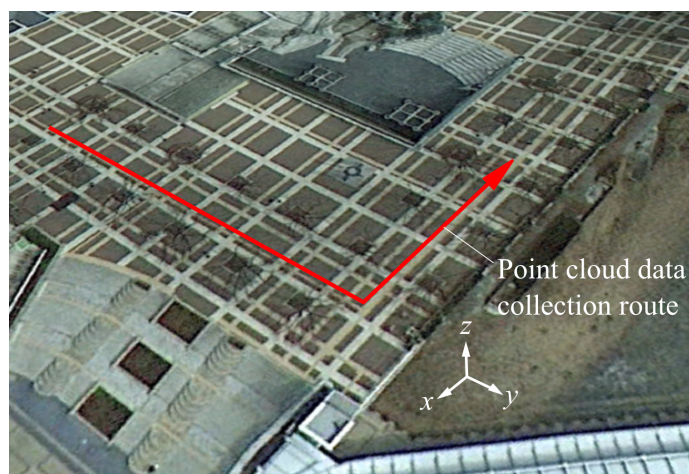


図 3.13: 三次元環境情報を収集した地点の景況

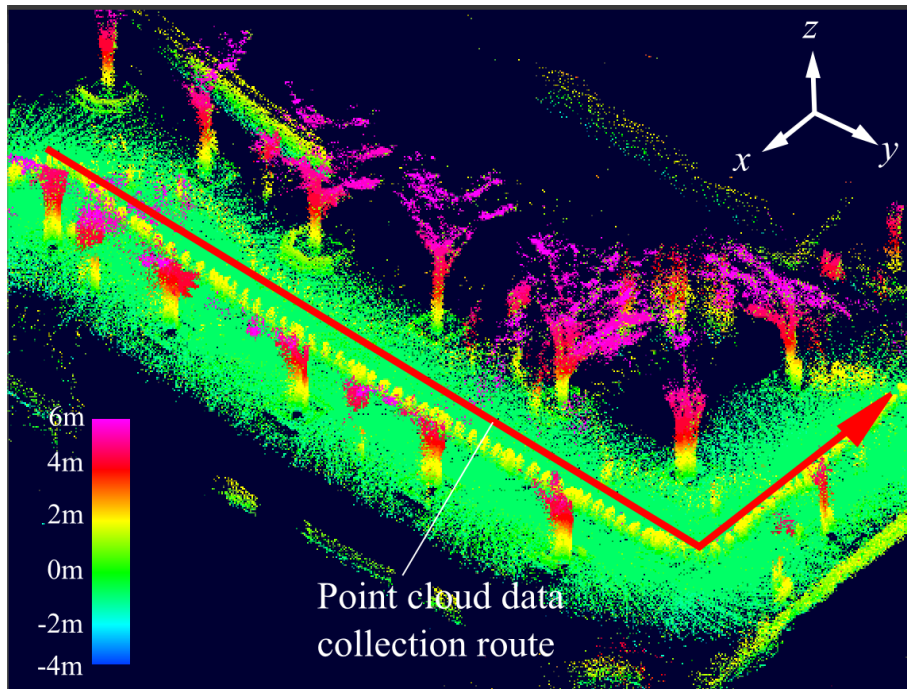


図 3.14: 三次元点群による表現

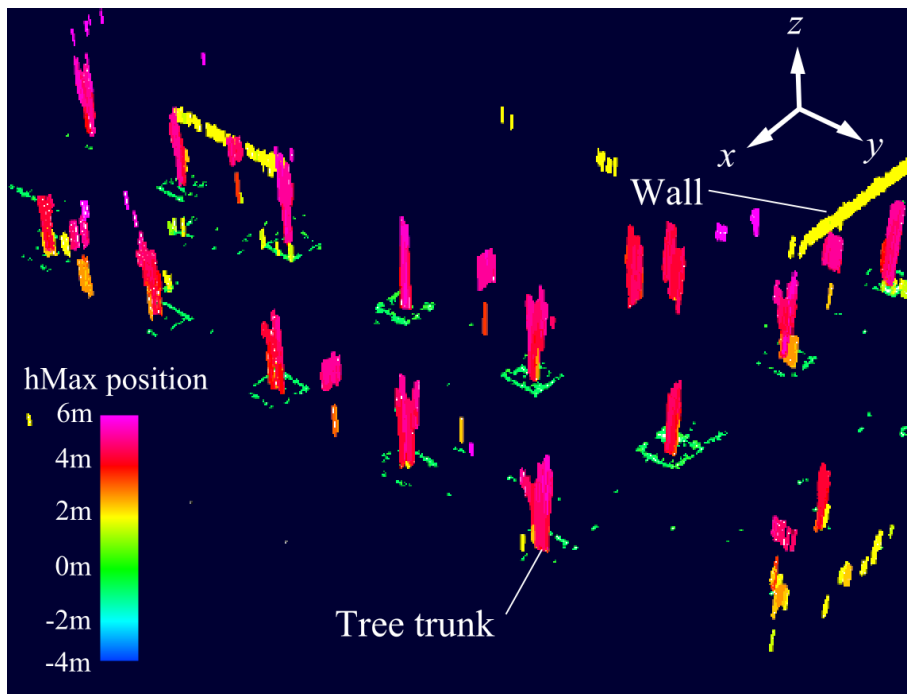


図 3.15: Cuboid Map による三次元環境の表現

3.3.4 Cuboid Map を用いた自己位置推定手法

緒言で述べたように、LIDAR を用いたロボットの自己位置推定は、推定した自己位置情報がパーティクル集合で表現されるモンテカルロ法 [11]-[13] が一般的である。同手法は、初期位置が与えられない状況においても、LIDAR による観測情報と環境地図のマッピングから自己位置を割り出すことが可能である。しかし、通行人などの移動障害物により視界が制限された場合、自己位置推定が不安定になるおそれがある。よって、自己位置推定のロバスト性の確保のため、地上を走行する自律移動ロボットには LIDAR 以外のセンサが搭載されることが多い。車輪を用いる自律移動ロボットの場合、タイヤにエンコーダを取り付け回転数を計測するホイールエンコーダが搭載されている。

ホイールエンコーダを用いたオドメトリシステムによる相対的な自己位置推定手法は、デッドレコニング (Dead reckoning : DR) と呼ばれる。ステアリング式の 4 輪ロボット車両の場合、ステアリングの角度、タイヤの回転量、トレッド、ホイールベースそしてタイヤ径などの車両パラメータから得られる幾何学的関係から位置と姿勢を推定することができる。だが、DR は車両モデルの誤差やホイールエンコーダのスリップなどにより影響され、走行距離に比例し位置推定誤差が拡大してしまうという問題を有している。

このため、ホイールエンコーダによる DR の累積誤差を LIDAR を用いたマップマッチングによって補正する自己位置推定手法を採用する。LIDAR を用いたマップマッチングには、前節で提案した Cuboid Map を用いる。図 3.16 は、Cuboid Map を用いたマップマッチングの要領について示している。マップマッチングの要領は、OGM を用いた手法を踏襲し Cuboid Map に最新の LIDAR による観測データを重ね合わせ、評価関数の取る値が最も高い位置を最新の自己位置及び姿勢として更新する。最新の LIDAR による観測データ P は N 個の点から構成され、 i 番目の観測点 p_i は三次元座標位置 (x_i, y_i, z_i) 及び LIDAR 光源から観測点までの距離情報 r_i を記録している。記録された Cuboid Map の XY 座標位置の集合をそれぞれ MapX, MapY とし、座標 (x, y) における最低位置と最高位置を $h\text{Min}_{(x,y)}$, $h\text{Max}_{(x,y)}$ とする。この時、地図データと重なり合う観測データの集合 I_{match} は、

$$I_{\text{match}} = \{i | x_i \in \text{MapX} \cap y_i \in \text{MapY} \cap h\text{Min}_{(x_i, y_i)} \leq z_i \leq h\text{Max}_{(x_i, y_i)}\} \quad (3.1)$$

となる。探索位置 $(robo_x, robo_y)$ と姿勢 $robo_\theta$ における評価関数 $lh_{(robo_x, robo_y, robo_\theta)}$ は、

$$lh_{(robo_x, robo_y, robo_\theta)} = \sum_{i \in I_{\text{match}}} r_i^2 \quad (3.2)$$

で与えられる。

この評価関数は、Cuboid Map と合致した観測点の記録している LIDAR 光源から観測点までの距離 r_i を 2 乗した値の総和を探索位置・姿勢における尤度としている。これは、遠方の観測点情報を重視することで、センサ近傍の観測情報に惑わされにくくすることを

狙っている。

評価関数による自己位置及び姿勢角の探索範囲は、オドメトリシステムを用いたDRによる累積誤差を考慮した範囲を定めている。パーティクルフィルタによる自己位置推定手法の場合は、計算量がパーティクルの総数に影響を受ける。一般的に空間の大きさに比例してパーティクル数が増加するため、広い環境によっては多くの計算量を必要とする。一方、高精度のオドメトリシステムによるDRは、短距離の自己位置推定であれば高い信頼性が期待できるので、狭い範囲に絞った探索を行うことができる。

図3.17は、DRの累積誤差を考慮したスキャンマッチングの探索範囲を示している。当初、ロボットの過去の位置からDRにより推定した位置を求める。位置誤差 X error 及び Y error, 姿勢角誤差 θ error の範囲は、ロボット車両に搭載したオドメトリシステムから想定される誤差の範囲と設定する。このような考えを適用すると一定ステップで全探索するマップマッチングを行うことでDRによる推定誤差を補正すると共に、計算時間の定常性を確保することが出来る。

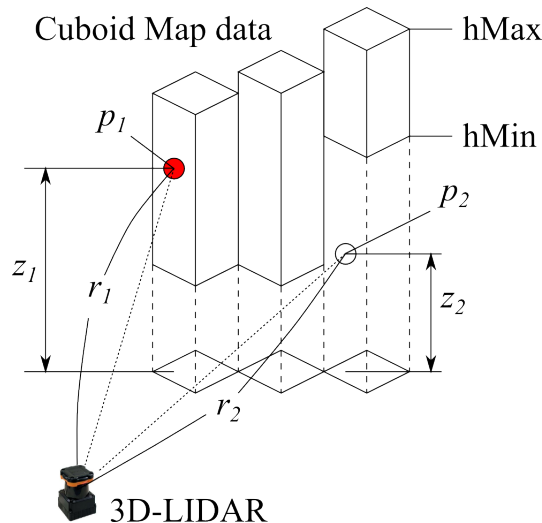


図 3.16: Cuboid Map によるマップマッチング

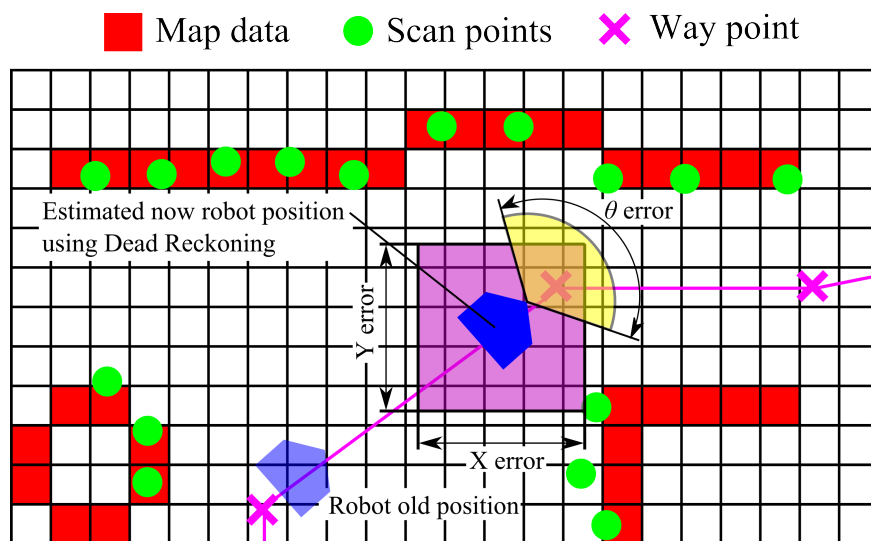


図 3.17: オドメトリシステムの累積誤差を考慮した探索範囲

3.4 スキャンマッチング度合の比較検証実験

3.4.1 実験条件

提案した三次元環境地図 Cuboid Map と三次元 LIDAR によるスキャンマッチングの性能を評価するため、Voxel 形式で作成した三次元環境地図との比較を行う。それぞれの環境地図作成に用いる環境データは、回転揺動式三次元 LIDAR を搭載したロボット車両を手動操縦で走行させて収集した。環境情報周遊に用いたロボット車両は、第 4 章で解説する Smart Dump 5 を用いる。細部は次章を参照されたい。

図 3.18(a) は、三次元地図の再現状況を確認するために環境情報の収集を行った壁面の景況を示している。図 3.18(b) と図 3.18(c) は、それぞれ収集した環境情報を元に作成した Cuboid Map と Voxel 形式で記録した環境地図を示したものである。図 3.18(c) に示す Voxel 形式の環境地図は、ディスプレイに描画する関係上、上下方向に連続する Voxel を一つの直方体として表現している。Voxel 形式の再現は、高さ方向に不連続な Voxel を全て記録しているため、窓などの形状が明瞭となっている様子が確認できる。一方、図 3.18(b) の Cuboid Map での再現は、高さ方向に窓などを含む箇所は 1 階と 2 階の窓の間の壁面の情報のみが記録されている。しかし、それ以外の高さ方向に連続長のある壁面については、Voxel 形式による再現されたほぼ同様に記録されている。

図 3.19 の屋外経路を用いて、作成した Cuboid Map 形式で作成した環境地図を図 3.20 に示す。同様に、Voxel 形式の地図も作成した。図 3.20 に黒線で示すロボット車両の軌跡は、地図を作成した後に、再度ロボット車両を手動操縦で走行させてスキャンマッチングの比較検証に用いるためのスキャンデータを収集した、Cuboid Map を基準とした走行軌跡を示している。同経路を走行中に収集した回転揺動式三次元 LIDAR の観測情報を、それぞれの形式の環境情報と重ね合わせ、スキャンマッチングの度合を比較し、提案した Cuboid Map を評価する。

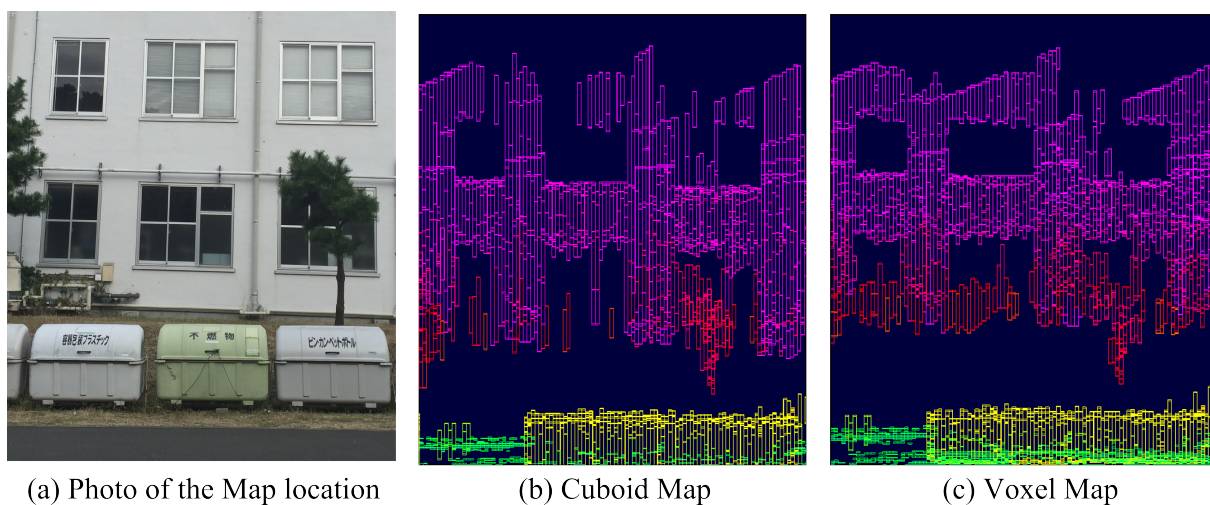


図 3.18: 三次元地図の比較

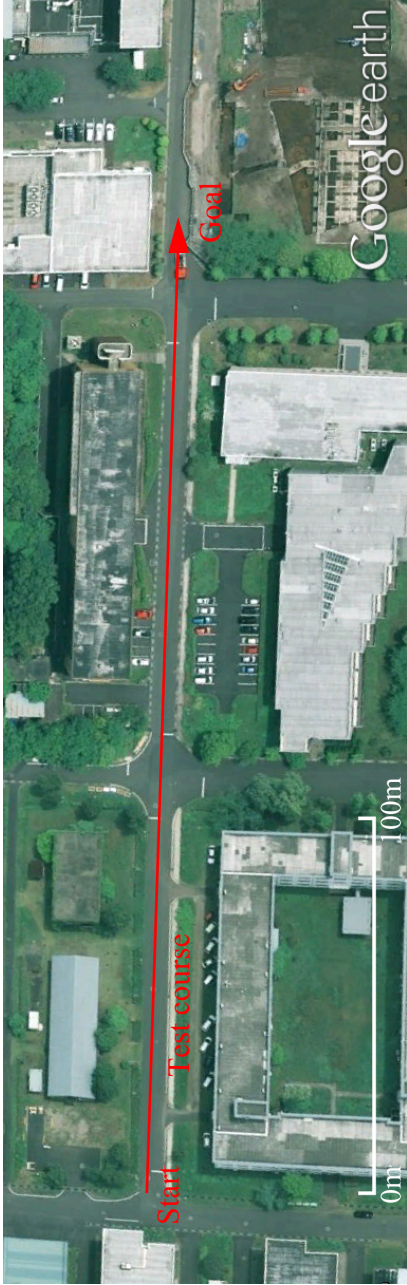


図 3.19: 環境地図作成に用いた環境

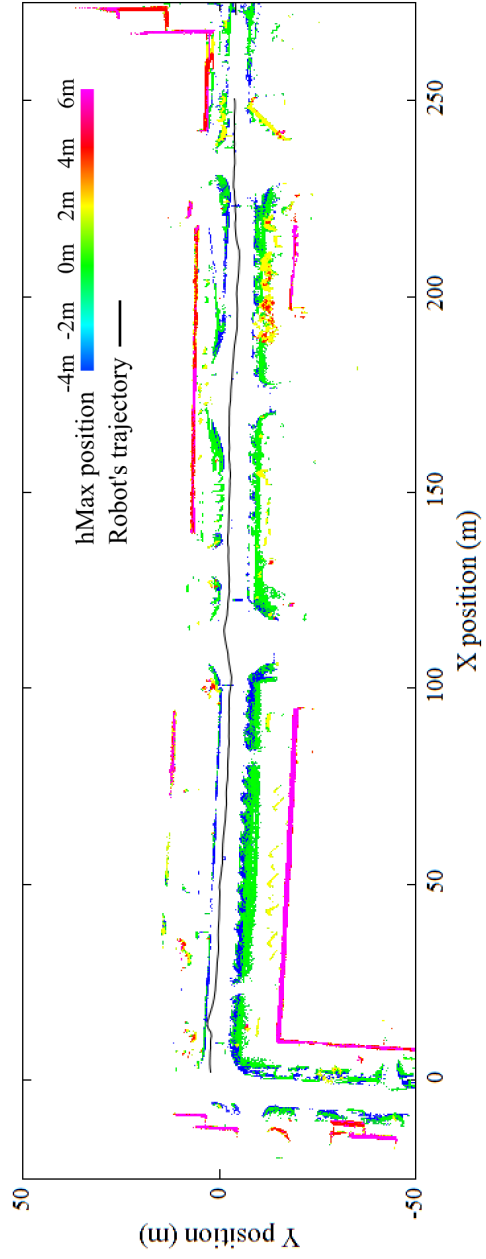


図 3.20: Cuboid Map 形式による環境地図

3.4.2 実験結果

図 3.21 は、Cuboid Map 及び Voxel 形式の三次元環境地図を用いて、第 3.3.4 項で示した自己位置推定手法に従い評価関数が最大となった位置・姿勢において環境地図と重なり合った計測点の総数を示している。この際、自己位置推定の評価関数が最大となる位置・姿勢はそれぞれの地図によって異なるため、常に Voxel 形式の地図のマッチング点が Cuboid Map よりも大きくなる状況が発生した。より多くの環境情報が記録されている Voxel 形式の環境地図は、Cuboid Map よりも地図と観測点のマッチング点数が多い傾向があった。しかし、回転揺動式三次元 LIDAR が 1 秒間に観測する 21640 点のうち、走行距離 250m 間におけるマッチング点数の最大差は 531 スキャン点、平均差は 138.8 スキャン点であった。

図 3.22 は、三次元環境地図形式ごとの自己位置推定に用いる評価関数の最大値を示している。地図形式の違いによる評価関数の差は、最大差は 8.80×10^6 、平均差は 1.88×10^6 であった。

Voxel 形式の地図を基準とした Cuboid Map のマッチング点数及び評価関数の最大値比較の結果は、総合的に大きな差が発生しないという結果を確認した。これは、Cuboid Map の作成指針である高さ方向に連続長を有する環境情報が、自律移動ロボット車両の自己位置推定において多く活用されており、ランドマークとして適当であることを示している。

一方、両方の環境地図において X 位置 100m~140m の間に、マッチング点数及び評価関数の最大値が特に低下しているのが確認できる。これは、計測用のロボット車両が交差点を通過した時点で発生している。これは、回転揺動式三次元 LIDAR の有効計測距離が約 30m であるため、交差点近傍付近では LIDAR の視界内に観測できる立体構造物が僅少となるためである。このような状況は、交差点以外にも片側二車線道路や駐車場、公園内の広場といった多くの場所で散見される。このため、同様の環境でロボット車両に安定した自己位置推定を行なわせるためには、LIDAR の視界範囲内で観測される立体物以外の計測対象に注目して環境地図を構築することも考えられる。

また、この時に記録された 300m × 100m の範囲で 10cm 分解能の環境地図の容量は、Cuboid Map が 2.26MB、Voxel Map は 18.50MB であった。

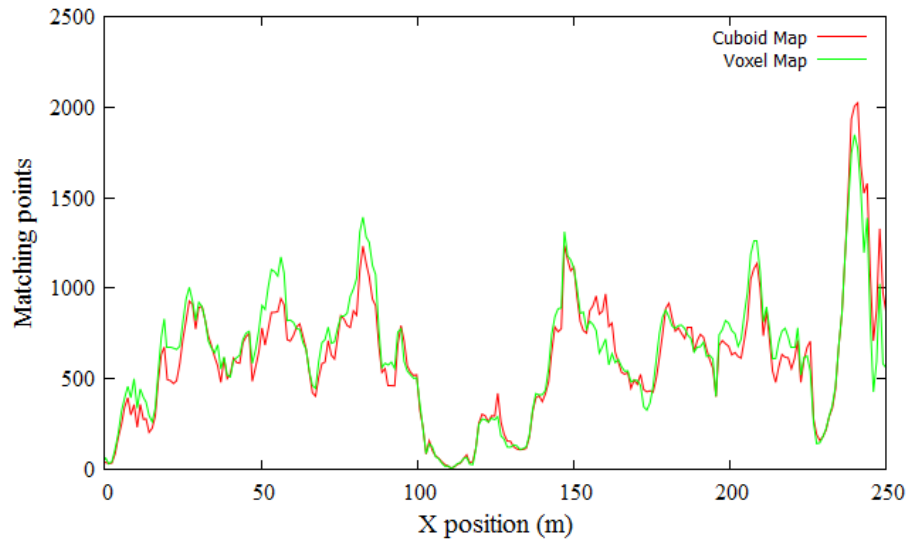


図 3.21: 三次元 LIDAR の観測点と環境地図が合致した点数の比較

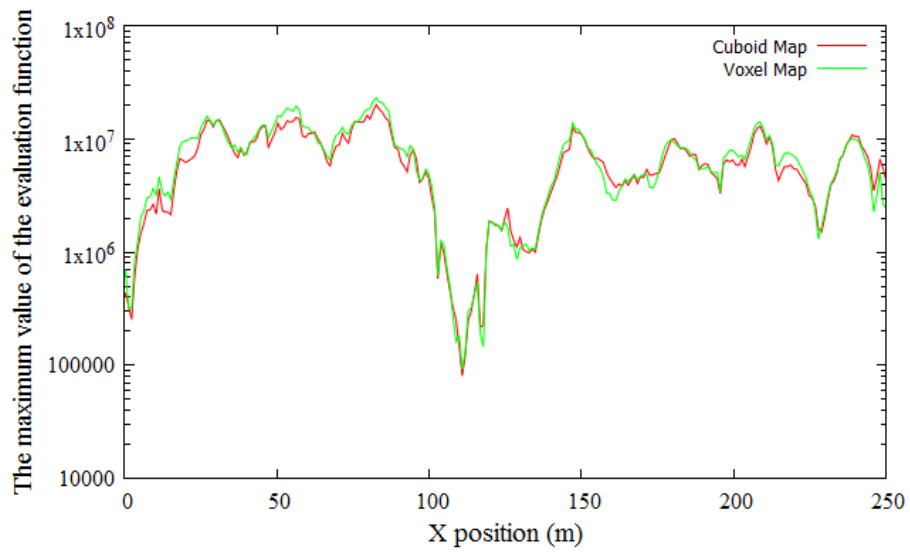


図 3.22: 環境地図の違いによる評価関数最大値の比較

3.5 結言

本章では、自律移動及び作業を行うロボットに用いるセンサとして LIDAR に注目し、比較的小型で計算量の制限されるロボット車両を用いて都市環境内で自己位置推定を行なうために適当な三次元環境地図である Cuboid Map 形式の地図を提案した。提案した Cuboid Map と Voxel 形式の地図を比較検証し、以下の知見を得た。

- 三次元 LIDAR による自己位置推定は、二次元 LIDAR と二次元地図を単純に三次元空間に拡張した場合、計算機パワーのあるコンピュータの必要性から小型の移動ロボットには非常に負荷が大きくなることが考えられる。このため、二次元地図に各位置における特徴的な高さ情報を高さ方向へ伸びる直方体として表現した、三次元 Cuboid 地図を提案した。同形式の地図は、いくつかの条件式を付加するのみで三次元環境情報を用いた自己位置推定に用いることが可能である。
- 提案した Cuboid Map と Voxel 形式で作成した環境地図を比較した結果、Voxel 形式の地図を基準とした場合、三次元 LIDAR と環境地図のマッチング点数差は平均して 18.5% の低下、評価関数の最大値の差は平均して 20.6% の低下であり、データ量の抑えた Cuboid Map を用いた効果的な自己位置推定が可能であると考えられる。
- LIDAR の有効視界内に観測できる立体構造物が僅少となる場合、立体構造物のみを記録した三次元環境地図では安定した自己位置推定の継続が難しいと考えられる。このため、LIDAR の視界範囲内で観測される立体物以外の計測対象に注目して環境地図を構築する必要がある。

以上を基に、前章で提案した拡張軌道誘導 SSM と本章における提案手法を用いた自律移動ロボット車両を開発し、実環境における走行実験を行い提案手法の有効性を示す。

参考文献

- [1] 大山恭弘, 橋本洋志, “ 図解ロボット技術入門シリーズ ロボットセンシング ”, オーム社, (2007)
- [2] 前田 龍太郎, 青柳 桂一, 澤田 廉士, “ MEMS/NEMS の最先端技術と応用展開 ”, フロンティア出版, (2006)
- [3] H. Kawata, W. Santosh, T. Mori, A. Ohya and S. Yuta, “ Development of ultra-small lightweight optical range sensor system ”, Proceedings 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3277-3282, Aug. 2005
- [4] Defense Advanced Research Projects Agency,
<http://www.darpa.mil/>
- [5] The DARPA Urban Challenge,
<http://archive.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>
- [6] S.Thrun et al., “ Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge ”, Journal of Field Robotics, Vol.23, No.9(2006) , pp 661-692
- [7] C.Urmson et al., “ Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge ”, Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol.56, pp 1-59
- [8] M.Montemerlo et al., “ Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge ”, Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol.56, pp 91-123
- [9] J.Leonard et al., “ A Perception-Driven Autonomous Urban Vehicle ”, Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol.56, pp 163-230
- [10] J.Bohren et al., “ Little Ben: The Ben Franklin Racing Team ’ s Entry in the 2007 DARPA Urban Challenge ” Springer Tracts in Advanced Robotics, Vol.56, pp 231-255
- [11] Sebastian Thrun, “ Particle Filters in Robotics ”, In Proceedings of Uncertainty in AI (UAI), 2002.
- [12] Dieter Fox, Wolfram Burgard, Frank Dellaert, and Sebastian Thrun. Monte Carlo localization: Efficient position estimation for mobile robots. In AAAI/IAAI, pp. 343-349, 1999.
- [13] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox, et al. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005.
- [14] Yiyun Y. Gu, Chester S. Gardner, Paul A. Castleberg, George C. Papen, and Michael C. Kelley, “ Validation of the Lidar In-Space Technology Experiment: stratospheric temperature and aerosol measurements ”, Applied Optics Vol. 36, Issue 21, pp. 5148-5157, 1997
- [15] 北陽電機株式会社 UTM-30LX-EW,
<http://www.hokuyo-aut.co.jp/search/single.php? serial=146>

- [16] Velodyne HDL-32e,
<http://velodynelidar.com/lidar/hdlproducts/hdl32e.aspx>
- [17] 松本光広, 吉田智章, 森利宏, 油田信一, 回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.760(2009), pp.3314-3323.
- [18] 大野和則, 桜田健, 竹内栄二郎, 小山順二, 田所論, 高速で密な形状計測を行う小型3次元スキャナーの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2009, (2009), 1A1-E04.
- [19] S.Thrun, W.Burgard, D.Fox, 上田隆一 (翻訳), ”確立ロボティクス”, 毎日コミュニケーションズ (2007)
- [20] M.Tomono, “A Scan Matching Method using Euclidean Invariant Signature for Global Localization and Map Building”, Proc. of ICRA ' 04 ,(2004)
- [21] J.Weber, K.W.Jorg, and E.V.Puttkamer, “ APR - Global Scan Matching Using Anchor Point Relationships”, Proc.of IAS-6, (2000) .
- [22] Szymon Rusinkiewicz, Marc Levoy, “ Efficient Variants of the ICP Algorithm ”, The Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, (2001).
- [23] Andrew.E.Johnson, and Sing.B.Kang, “Registration and Integration of Textured 3-D Data”, Proc.of Int. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, (1997).
- [24] 原祥堯, 川田浩彦, 大矢晃久, 油田信一 “ 測域センサの反射強度データを用いたスキャンマッチングによる移動ロボットの自己位置推定”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06 講演論文集,(2006) ,2P1-C29.
- [25] Sebastian Thrun and Arno Bucken, ”Integrating Grid-Based and Topological Maps for Mobile Robot Navigation”, Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence, (1996), pp. 944-950.
- [26] 吉田智章, 入江清, 小柳英次, 友納正裕 “ 広視野 3D レーザスキャン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(2010), pp 608-611.
- [27] Paula Messina, “Terrain Analysis Home Page”, Spatial Analysis and Remote Sensing Lab at Hunter College.
- [28] Kummerle. R, Pfaff. P, Triebel. R, and Burgard. W, “ Active monte carlo localization in outdoor terrains using multi-level surface maps ”, Autonome Mobile Systeme 2007,(2007), pp.29-35.
- [29] United States Geological Survey,
<http://ned.usgs.gov/>
- [30] R. Triebel, P. Pfaff, and W. Burgard. Multi level surface maps for outdoor terrain mapping and loop closing. In Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2006.
- [31] William Morris, Ivan Dryanovski, Jizhong Xiao, “3D Indoor Mapping for Micro-UAVs Using Hybrid Range Finders and Multi-Volume Occupancy Grids ”, 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems,(2010)
- [32] 水内健祐, 永谷圭司, 吉田和哉, “ 正六角格子の拡張 DEM による三次元測域センサを用いた屋内環境のモデリング ”, 第 8 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 論文集, (2007), pp.713-714

- [33] Armin Hornung , Kai M. Wurm, Maren Bennewitz, Cyrill Stachniss, Wolfram Burgard, "OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees", Autonomous Robots April 2013, Volume 34, Issue 3, pp 189-206
- [34] 滝田好宏, 伊達央, " Smart Dump 3 で実現した自律機能, 計測と制御 ", Vol.49, No.9 (2010),pp 636-639.

第4章 地表面LIDAR受光強度を 活用した自律移動手法の提案

4.1 緒言

多数の人が生活する都市環境で活動するロボットの開発のためには、現実の人々が暮らしている環境でロボットを働かして検証を行う必要がある。この検証結果によって、人間と共存して活動するロボットにどのような機能や、そのための技術が求められているかが明らかとなると考えられる。そのためには、何よりも実験と検証ができる空間と機会が必要である。日本国内では、このような機会の一つとして2007年度より公益財団法人ニューテクノロジー振興財団が主催する、つくばチャレンジ (Real World Robot Challenge :RWRC)[1] が実施されている。

つくばチャレンジは、自ら考え行動するロボットが、図4.1及び図4.2に示すような実際に人の生活する市街で、安全かつ確実に動くことを目指す技術チャレンジとして位置づけられている。これらの目標を達成すべく、参加チームに対してロボットが実環境の中で実現すべき動作を課題 [2] として与えている。ロボットが実環境で人々と親和性を保って動作するためには、人に危害・恐怖・不快感を与えたり環境内にいる人間の行動を妨害したりすることがあってはならない。この様に、つくばチャレンジの課題はロボットの行動の結果を後から見て人々と親和性が満たされていけば良いのではなく、はじめから危険な状況が発生することがないようにロボットが製作された下で達成されねばならない。

当研究室においてこれまでのつくばチャレンジでは、二次元環境地図と二次元LIDARを組み合わせたロボットにより約1kmの市街経路を走行する課題に取り組み、自律移動ロボット車両の研究 [3]-[10] がなされてきた。これまでは、自律移動ロボット車両の走行する経路周辺に立体構造物が比較的多く配置された課題経路が提案されてきた。この経路は、つくばチャレンジに参加する多くの研究者が使用するセンサの平均的な計測距離性能が30mであることを考えると、センサの性能上ロボット車両の位置から周辺の建物や木々が計測不可能な状況はなかった。しかし、我々が生活する環境では、公園広場や交差点など場所によってはセンサの性能の制限から視界が足りない状況が想定される。よって、このような経路を自律移動ロボット車両が走行する場合において、安定した自己位置推定の性能が求められる。

よって、本章では LIDAR の計測範囲内に立体構造物が僅少な環境においても、地表面のテクスチャを LIDAR 受光強度情報により判別し自己位置推定を行なう手法について提案する。あわせて、つくばチャレンジで提供される市街環境において、これまで提案してきた拡張軌道誘導 SSM[11][12] と LIDAR を用いた自己位置推定手法を適用した自律移動ロボット車両 “Smart Dump 5” により、提案手法の有効性を検証する。

第 4.2 節は、LIDAR の計測可能範囲内に立体構造物が僅少な経路で、LIDAR 受光強度情報により地表面のテクスチャを用いて自己位置推定を行う手法について提案する。

第 4.3 節は、検証実験のために開発した、アッカーマン機構を用いた前輪操舵式自律移動ロボット車両 “Smart Dump 5” の構成について述べる。

第 4.4 節は、提案手法によって自律移動ロボット車両 “Smart Dump 5” の自律移動を実現し、有効性を検証し結果を示す。

第 4.5 節は、本章の結言が述べられている。



図 4.1: つくばチャレンジ 2011 課題経路 (出典: つくばチャレンジ 2011)



図 4.2: 課題経路周辺の航空写真 (出典: Google earth)

4.2 LIDARの受光強度情報を用いた地表面素材の識別

自律移動ロボット車両のLIDARを用いた自己位置推定は、LIDARの計測距離性能により制限を受ける。このため、LIDARの視程内に立体的な構造物が僅少又は無い場合、自己位置を見失う原因となる。一般的に市販されているLIDARの平均的な計測距離を30mとした場合、屋外環境では片側2車線道路の交差点や公園内広場の通路などの半径30mの範囲に立体構造物が僅少な場所を散見することが出来る。よって、建物や木々といった高さのみを記録した三次元環境地図では、適切な自己位置推定を実現できない恐れがある。立体的な構造物が少ない場所においても安定した自律走行を実現するためには、他の目標物に注目して自己位置推定を行なう必要がある。

一般的な市街地であれば、白線で塗装された走行区分ライン、公園内であれば舗装路と周辺の芝生といった、目標物となる様な境界が存在することは珍しくない。このような地表面のテクスチャを取得するためには、カメラで周辺環境を撮影し地表面の色分布のクラスタリングなどにより情報を取得する方法が考えられるが、計算量の限られる小型のコンピュータを搭載した小型の自律移動ロボットのリアルタイム処理には適当とはいえない。それに対して、LIDARの取得することが出来る受光強度情報を適切に判定することが出来れば、地表面のテクスチャ情報を取得することが可能であると考えられる。

これまでも、植生とアスファルトといった計測するLIDARの受光強度値の差を活用して、計測対象素材の推定手法 [13] が研究されている。LIDARの計測距離情報、受光強度情報に振動センサ等のセンサ情報を組み合わせ Support Vector Machine (SVM)[14] を用いて分離識別を行う手法が Wurm.K.Mらによって提案 [15] されている。しかし、この分離識別手法はオフラインにおける計算処理を必要とする手法であるため、自律移動ロボットの移動間に判定を行うには適さない手法である。自律移動ロボットの移動間の自己位置推定や物体判定に役立てるためには、計算量を抑さえオンラインで判定できる手法が求められる。本節では、素材ごとの計測距離に応じた受光強度値が一定であるという仮定に基づき、LIDARの計測距離と受光強度情報を判別する分離曲線の設定による素材判定手法について示す。

4.2.1 LIDARの計測する受光強度の原理

物体にはそれぞれ強く電磁波を反射・吸収・放出する特定の波長域がある。これは分光反射特性 [16] と呼ばれ、衛星からのレーザを利用したセンサのリモートセンシングデータから植生、土壌、水域及び構造物などを判別する指標として用いられている [17]。図 4.3 は、植物、土、水の反射・放射の強さを波長帯毎に表している。図から確認できるように、各波長帯における反射・放射の強さは、物質ごとに異なることが知られている [18]。このような機材と同様に LIDAR は、計測用レーザ光として波長 905nm の赤外線レーザが多く利用されている。このため、LIDAR の受光強度情報は用いられるレーザ光の波長 (905 nm) に対する物体の反射率特性に応じて変化するとが予想される。

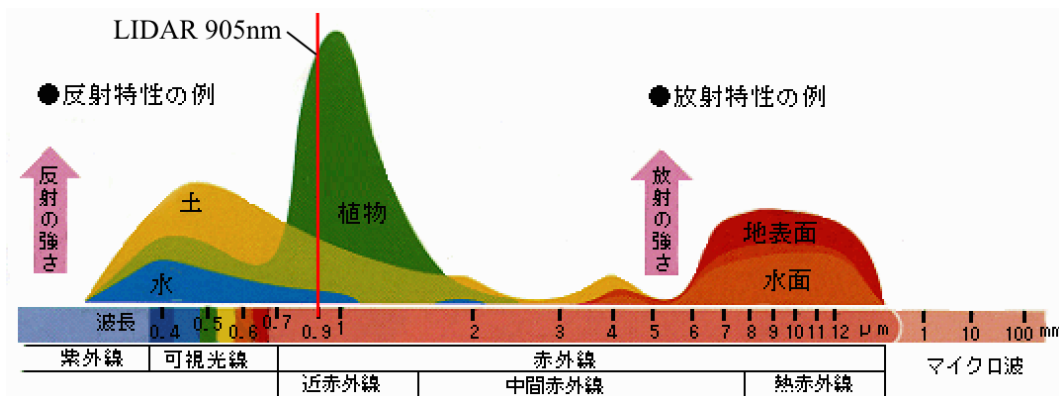


図 4.3: 各波長帯における植物，土，水の電磁波の反射と放射の強さ（出典：JAXA）

また，一般的な傾向としてレーザー光は，照射距離に応じて減衰が発生する．よって，LIDAR が受光するレーザー散乱光も，LIDAR の計測距離に応じて変化すると考えられる．これらの事から，LIDAR の計測する受光強度情報のレーザー光を照射する計測対象と計測距離に応じた変化を調査・分析する．

4.2.2 LIDAR 受光強度情報と分離曲線による地表面素材判定手法の提案

素材ごとの LIDAR の計測距離と受光強度情報の関係を知るため，図 4.4 に示す神奈川県横須賀市に所在する防衛大学の敷地内にて，2011 年 8 月 30 日の 13:00～14:00 に回転揺動式三次元 LIDAR により芝生及びアスファルト路面の情報を収集した．図 4.5 は，回転揺動式三次元 LIDAR の計測した計測距離と受光強度の関係を示している．図中縦軸の LIDAR 受光強度値は，センサが受光強度値として出力する整数値をそのまま示している．図 4.5 の点群の分布から，芝生（緑色）及びアスファルト（赤色）の間には空白領域が存在することが確認できる．

計算量を抑えたシンプルな識別を行うため，芝生及びアスファルト点群の間隙に沿うような分離曲線を設定する．そのため，図 4.5 の黄色丸印に示すような，両点群間の中間点を 2m から 10m 観測距離 20m までの範囲で 1m 毎に目視により選び出し，

$$f(x) = \frac{a}{x} + b \quad (4.1)$$

に示す双曲線により近似して分離曲線を求め，最小二乗法 [19] により， $a = 6552e03$ ， $b = -250$ を得た．観測された点の距離を r ，受光強度を b としたとき，

$$N(r, b) = \frac{b}{f(r)} \quad (4.2)$$

で表される正規化式を用いて，この値が 1 以上であれば芝生，そうでなければアスファルトと判定する．

式 (4.2) に基き神奈川県横須賀市（防衛大学校）及び茨城県つくば市（中央公園広場）それぞれ異なる場所と時間に、芝生及びアスファルトが均一に分布している場所において判定した結果を表 4.1 に示す。識別結果からは、アスファルトを芝生と誤答する割合に比べて芝生をアスファルトと誤答する割合が高かった。この原因は、芝生領域中に土のような反射率の低い物体が混在していたためだと考えられる。いずれの場合においても、80%を超える判定率で識別できることが確かめられた。

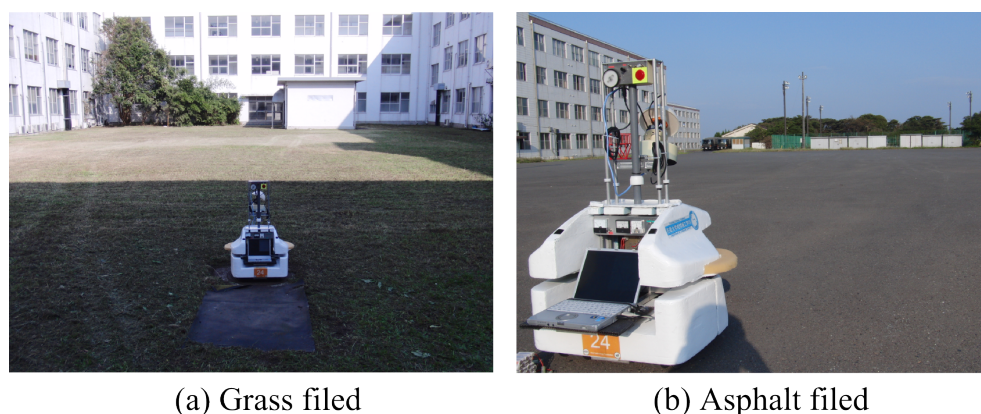


図 4.4: 回転揺動式三次元 LIDAR を用いて受光強度情報を収集した環境

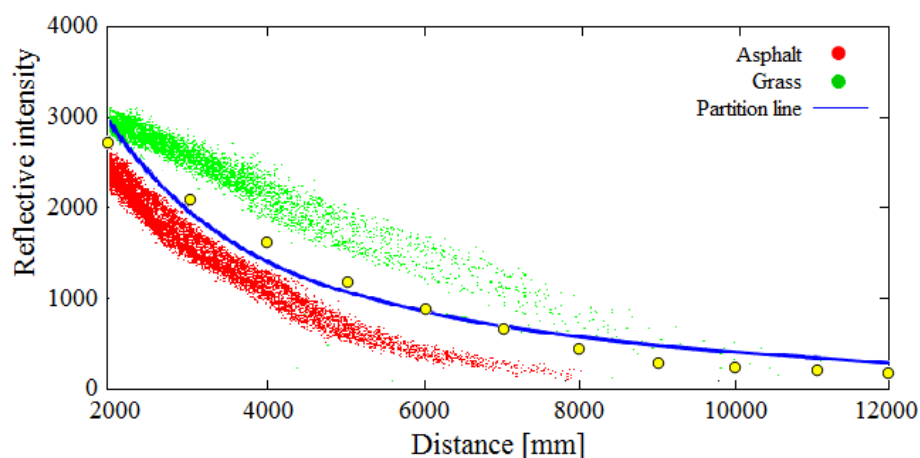


図 4.5: 回転揺動式三次元 LIDAR による計測距離と受光強度情報の関係

表 4.1: 分離曲線を用いた LIDAR 受光強度情報による識別結果

		NDA Campus				Tsukuba Park	
		2011.8.30 (13:00~14:00)		2011.8.31 (1:00~2:00)		2011.7.30 (10:00~12:00)	
		Asphalt	Grass	Asphalt	Grass	Asphalt	Grass
Identified Result	Asphalt	100 %	1.2 %	83.72 %	1.3 %	99.7 %	12.9 %
	Grass	0.0 %	98.8 %	16.28 %	98.7 %	0.28 %	87.1 %

この分離曲線を用いて、図 4.6 に示す防衛大校内の場所で、アスファルト路面と芝生の識別状況を確認した。図 4.7 は、図 4.6 における識別結果である。図中赤色はアスファルト路面，緑色が芝生を示している。航空写真との比較から明らかなように、アスファルト路面と芝生は正しく識別できているのが確認できる。



図 4.6: LIDAR 受光強度を収集した場所（防衛大校内航空写真）

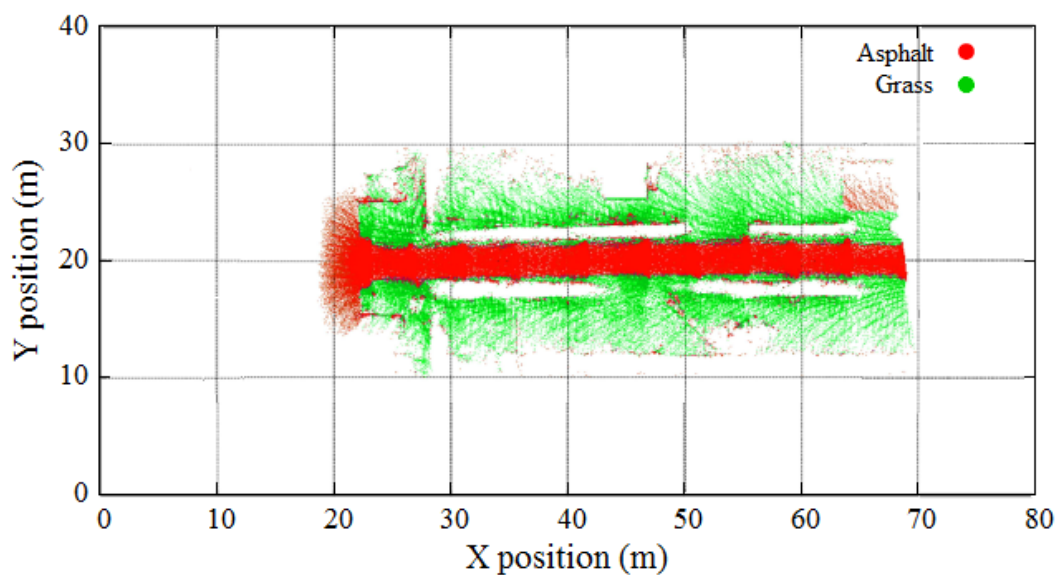


図 4.7: 防衛大校内路面識別結果

また、同じ分離曲線による識別を、図 4.8 に示すつくば市中央公園で事前に収集した観測データに適用した。図 4.9 は、図 4.8 における識別結果である。この結果から LIDAR の受光強度情報が特定の場所に依存せず、路面素材の識別に利用可能であることがわかった。

分離曲線による路面素材識別手法は、アスファルトとアスファルト路面に描かれた道路標示塗料などを識別することに応用が可能である。同手法を応用した研究の細部を付録 C に示す。



図 4.8: LIDAR 受光強度を収集した場所（つくば中央公園内航空写真）

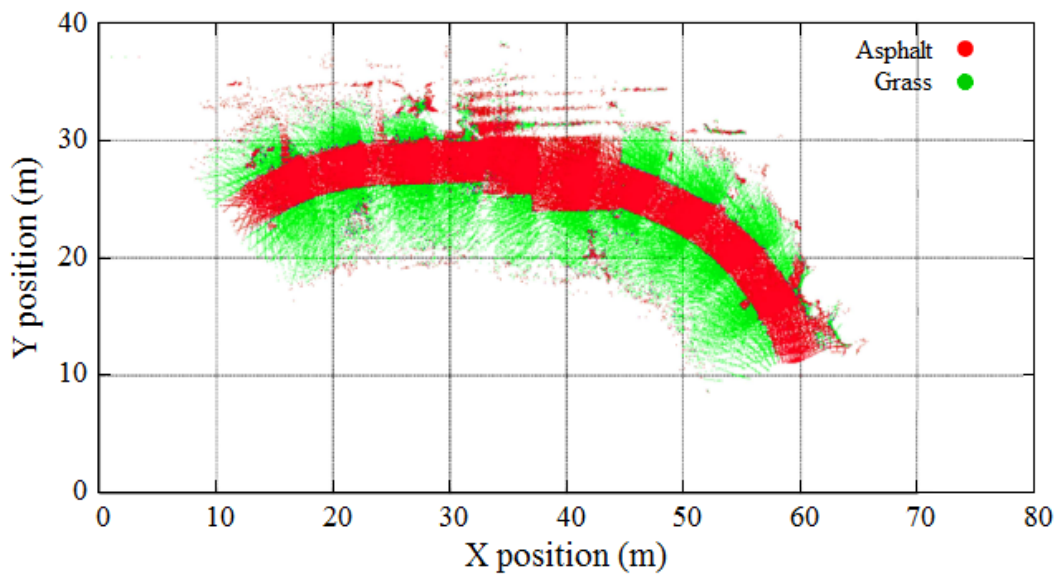


図 4.9: つくば中央公園路面識別結果

4.2.3 植生情報を有する三次元環境地図

地表面のLIDAR 受光強度情報を分離曲線式で判定することにより、植生とアスファルトを識別することが可能となった。提案した手法は、計測距離とLIDAR 受光強度値を用いた式により求められるため、リアルタイムでの判定が可能である。よって、判定によって得られた地表面のテクスチャ情報を、三次元環境地図情報として事前に記録しておくことで自律移動ロボット車両の自己位置推定に役立てることができる。

地表面の情報を記録する方法としては、地図の格子に素材の種類情報を付加する方法が考えられる。今回、求めた分離曲線式は、芝生とアスファルトという二値化された判定結果が得られる。一般道路や遊歩道などロボット車両が人工的に整備された都市環境を走行する場合、経験的に受光強度値が高い素材が少ないという傾向があった。よって本研究では、アスファルト路面周辺に分布すると考えられる芝生の位置情報を高さ0m位置の最小厚みの三次元地図情報として記録する。また、記録の際には、芝生の上方に樹木等の障害物が存在する場合は地表面の情報を優先して記録した。

図4.10は、受光強度情報の地図への反映の確認のために用いた地域の航空写真である。検証のために同地域を、図中左上の公園内小路から公園広場を經由して図中右側の公園外の歩道へと通じる経路を回転揺動式三次元LIDARを用いて環境情報を収集した。図4.11は、回転揺動式三次元LIDARにより収集したデータを元に作成された三次元Cuboid地図を俯瞰したものである。図4.11において赤色が、高さ方向に十分な長さを持つ公園内の建物、木の幹そして生垣等が記録された箇所である。公園内の中央付近は、十分な高さを有する物が存在せず、地図情報が粗となっている状況が確認できる。図4.11に示す三次元Cuboid地図で自律走行を行った場合、センサの計測範囲内に地図情報と合致する計測点を得られ無い場合、オドメトリによるDRに100%依存することになり、長い距離の走行により自己位置推定が狂い走行不能に陥る可能性が高い。

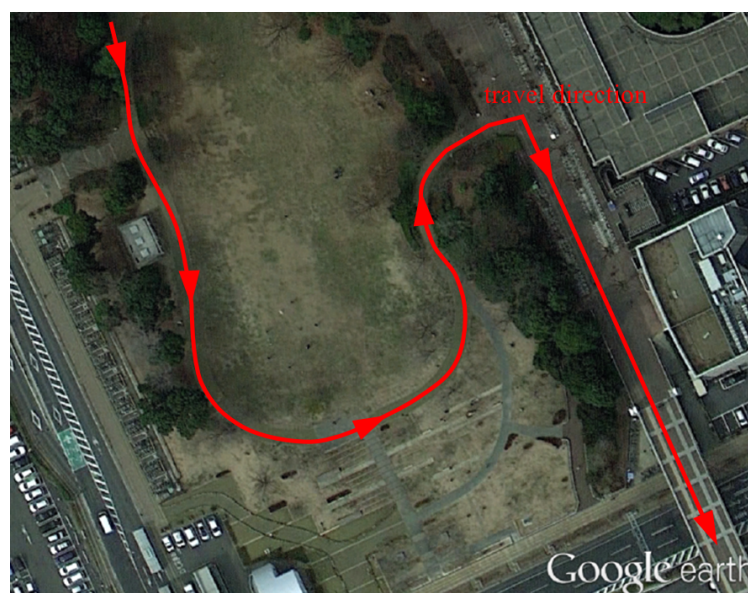


図 4.10: 植生の受光強度情報記録のために検証に用いた場所（つくば中央公園の航空写真）

図 4.12 は、図 4.11 の地図に LIDAR 受光強度情報から判定した植生の位置情報を付加したものである。図 4.12 中に緑色で示された箇所が、芝生として判定された箇所である。図 4.12 の地図では、図 4.11 で立体構造物が少なく十分な地図情報が記録されていなかった付近においても、芝生の位置情報からアスファルト路面と芝生の境界が明確に確認できる。

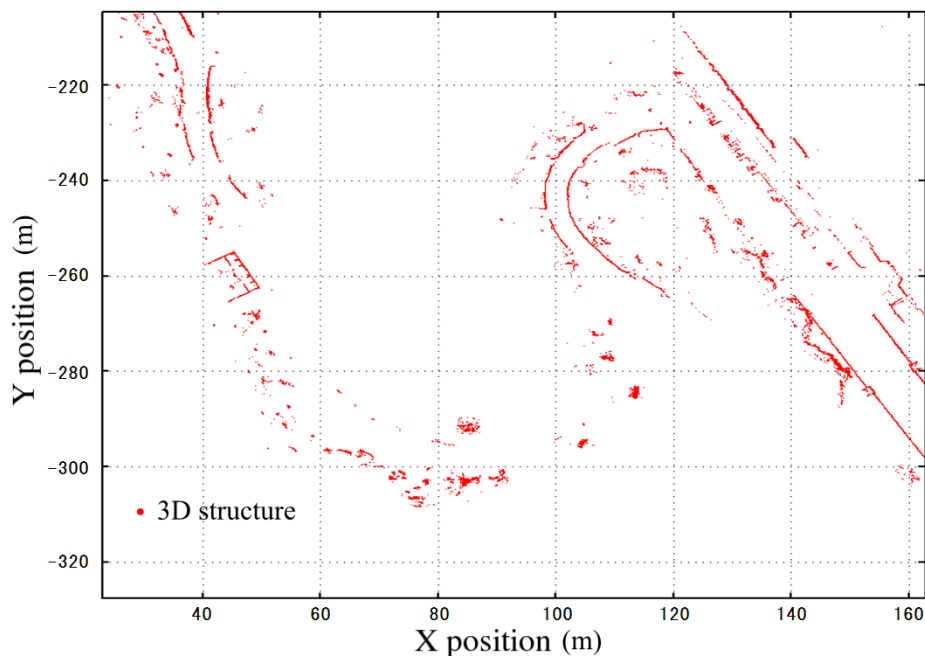


図 4.11: 立体構造物のみを記録した Cuboid Map

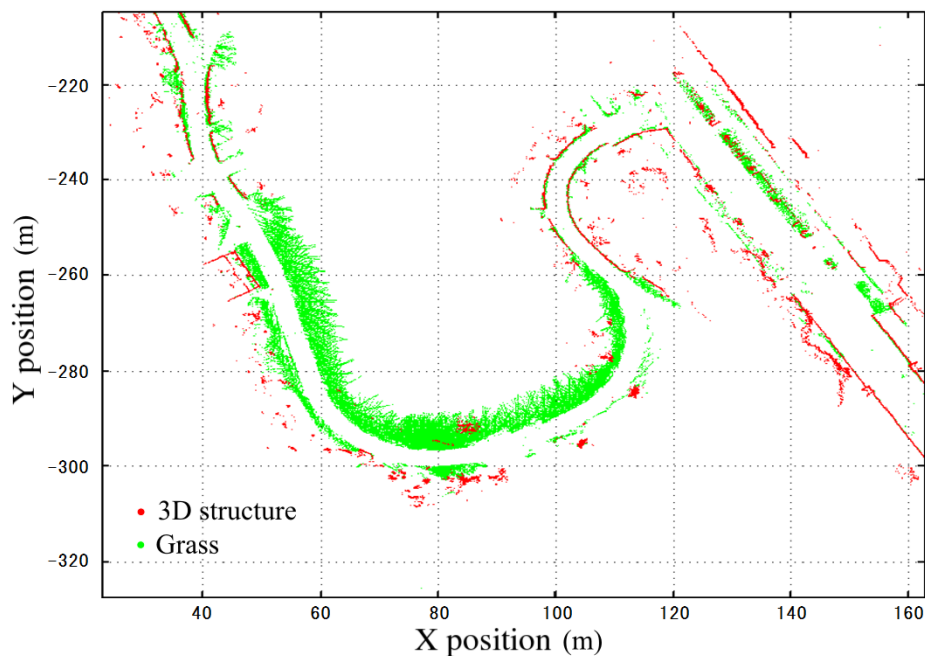


図 4.12: 地表面の芝生位置を地図情報として追加記録した Cuboid Map

4.2.4 路面情報を記録した三次元環境地図による自己位置推定の提案

LIDAR を用いた自律移動ロボット車両の自己位置推定は、第3章で述べたオドメトリによるDRとLIDARを用いたマップマッチング手法を用いている。植生位置情報を記録した三次元環境地図による自己位置推定手法は、第3章で述べたマップマッチング手法にLIDARの計測距離と受光強度情報から分離曲線による識別結果を用いることで実現する。

図4.13は、地表面の植生情報を記録した三次元Cuboid地図によるマップマッチングの要領について示している。三次元Cuboid Mapの最高値および最低値の範囲内に含まれるスキャン点の集合 I_{match} は式(3.1)で、マッチング度合を求める評価関数は式(3.2)で与えられる。ここで、 p_i に含まれる地表面のスキャン点群 p_{ground} で、受光強度より芝生として判定された p_{grass} に含まれる点を評価関数に加算する。スキャン点の集合は I_{match} は、

$$I_{match} = \{i | x_i \in \text{MapX} \cap y_i \in \text{MapY} \cap \text{hmin}_{(x_i, y_i)} \leq z_i \leq \text{hMax}_{(x_i, y_i)} \cap (p_i \in p_{grass} \cup p_i \notin p_{ground})\} \quad (4.3)$$

となる。

拡張した自己位置推定手法の検証を行うために、図4.14に示す場所においてスキャンマッチングを試みた。図4.15は、自律移動ロボット車両が図4.14付近において三次元Cuboid Mapと回転揺動式三次元LIDARのデータを用いて自己位置推定を行なっている様子を可視化したものである。図中では、赤及び橙色で示された直方体が三次元構造物を、緑色と黄緑色で表された箇所が地表面の芝生の位置を示している。自律移動ロボット車両は、黒丸で示した場所に位置している。この位置から回転揺動式三次元LIDARを用いて周辺をスキャンした点が、青色点と桃色点である。スキャン点の受光強度が分離曲線に従い芝生と判定された箇所は、桃色点で示されている。

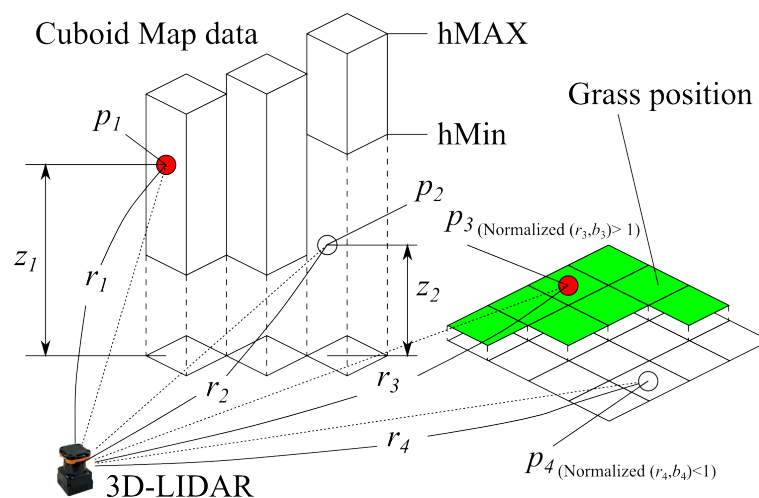


図 4.13: 路面情報を記録した三次元環境地図による自己位置推定要領

図 4.15 右側に注目すると木の幹と思われる立体構造物の地図上に、青色のスカン点が高さ方向に合致していることが確認できる。また、図 4.15 左側において、芝生として記録されている地図データと芝生と判定されたスカン点が合致していることが確認できる。この手法を採用することによって自律移動ロボット車両は、立体構造物が僅少な箇所において芝生として記録されている地図データとスカン点を重ね合わせることで自己位置推定を継続させることができる。



図 4.14: スキャンマッチングの検証に用いた環境

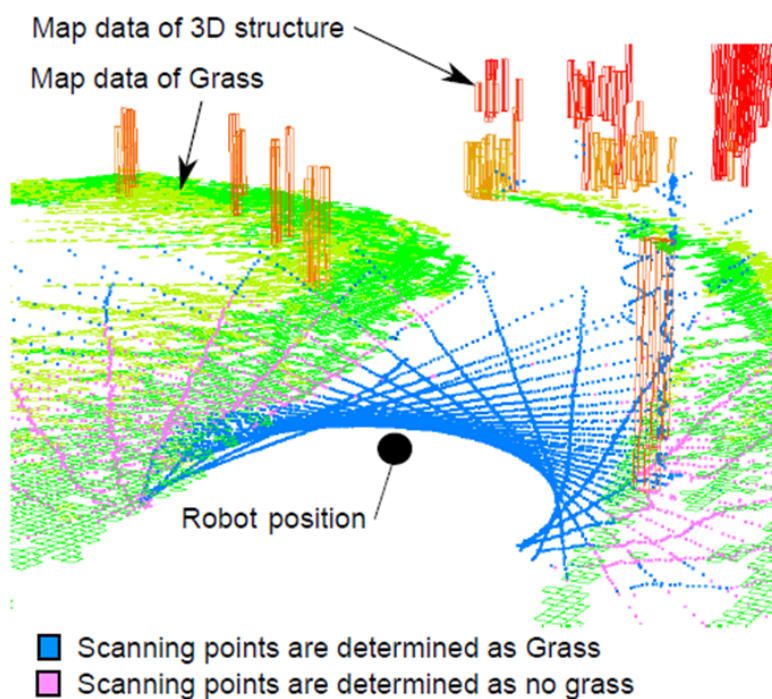


図 4.15: 路面情報を記録した三次元環境地図を用いたスキャンマッチング

4.3 自律移動ロボット車両 ” Smart Dump 5 ”

4.3.1 車体構成

図 4.16 に前輪操舵式自律移動ロボット車両 ” Smart Dump 5 ” の外観を，図 4.17 にロボット車両の構造と外形寸法について示す．表 4.2 に Smart Dump 5 の車両諸元を示す．

駆動機構は，各種重量のあるセンサ等を搭載した状態でも高い走行能力を獲得するため，各車輪にギアボックス付き Maxon DC motor RE25 118743(Maxon 社製)を配した四輪駆動方式を採用している．操舵機構は，一般的な乗用車と同様の操舵特性を得るため，アッカーマン機構を用いた前輪操舵方式を採用している．近距離の自己位置推定を高精度に行うためのオドメトリ用計測車輪は，移動ロボットの後輪車軸上の外側左右に配置している．また，GPS コンパス V100/21(ITS21 製)をロボット車両上部に搭載し，ロボット車両の移動間の GPS 座標系における位置・姿勢角の記録を行う．周辺環境を認識のために LIDAR である UTM-30LX を 3 台使用している．UTM-30LX は，第 3.2 節で示した UTM-30LX-EW と同性能を有した LIDAR である．使用している LIDAR のうち 2 台を，Smart Dump 5 の両側に設置して，277mm の高さでロボット車両全周 360 度の平面をスキャンすることが可能である．残りの 1 台の LIDAR は，車体上部に設置された揺動機構上に搭載することにより，立体的な周辺環境情報を取得している．

車体前面上部には，回転揺動式三次元 LIDAR(付録 A 参照)を配置している．回転揺動式三次元 LIDAR は，ターンテーブルの回転面に対して 15 度の傾斜角を持たせて取り付けられている．図 4.18 は，Smart Dump 5 が搭載した回転揺動式三次元 LIDAR によりえられる視界範囲を示している．これにより，車両前方地表面を注視し死角を削減すると共に，車両左右の高所を確認することが可能である．

表 4.2: Smart Dump 5 の諸元

Item	Value
Length	550 mm
Height	1170 mm
Width	620 mm
Wheel base	290 mm
Tread	280 mm
Weight	19 kg
Drive motor	maxon DC motor RE25 118743 × 5
Steering motor reduction gear ratio	164:1
Drive motor reduction gear ratio	33.2:1
Wheel diameter	150 mm
Power	12V 1900mAh × 3



図 4.16: Smart Dump 5 の外観

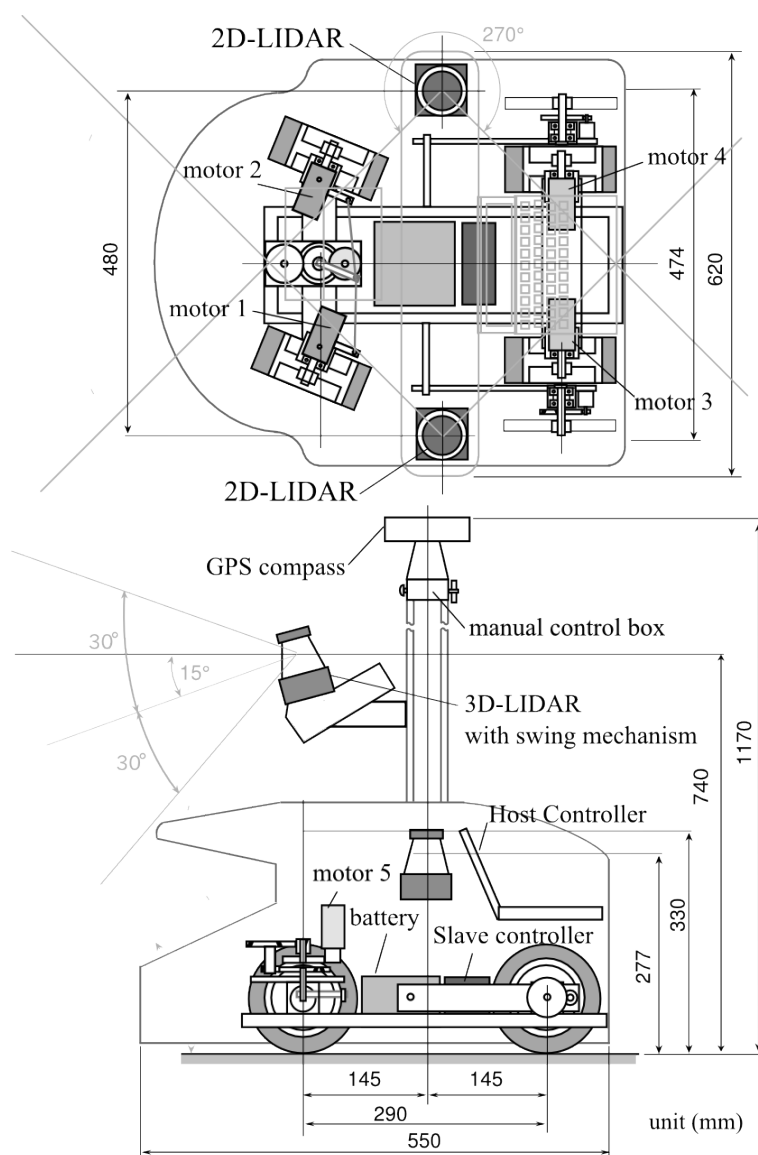


図 4.17: Smart Dump 5 の外形

図 4.19 に示す地域において、回転揺動式三次元 LIDAR を用いて 1 秒間と 10 秒間周辺環境の点群を取得したものを図 4.20 と図 4.21 に示す。図から確認できるように、回転揺動式三次元 LIDAR は、LIDAR の計測周期とターンテーブルの回転を非同期とすることで、同一地点にとどまった場合でも時間に比例して周辺環境の異なる計測点を収集することができる。この際、回転揺動式三次元 LIDAR に搭載した UTM-30LX は、一度の走査で 1081 個までの点を取得できる性能を有しているが、測距情報に加え受光強度情報を得るため、取得する点数を 541 点に制限した設定となっている。LIDAR の計測する受光強度情報の細部については第 4.3 節で解説する。

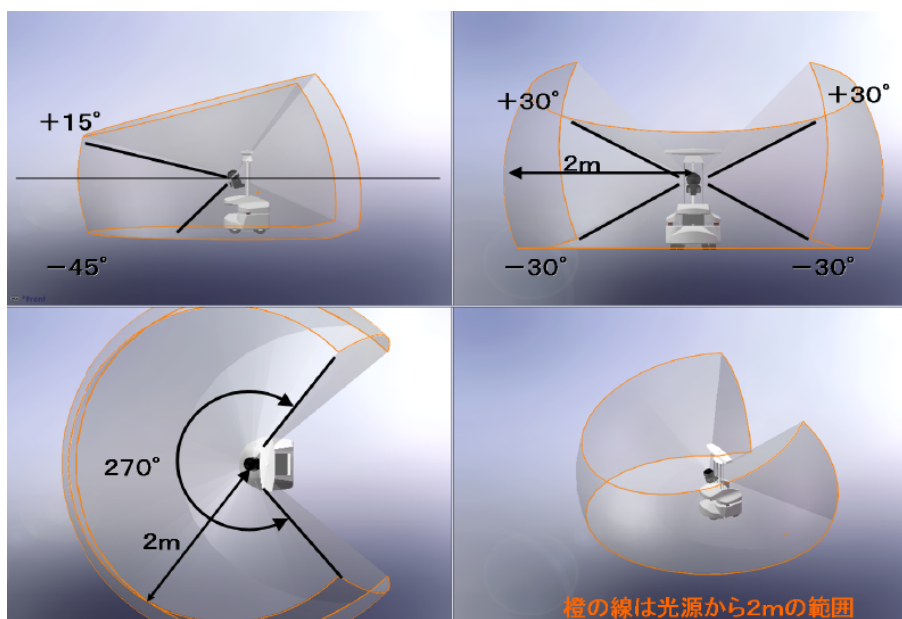


図 4.18: 回転揺動式 3D-LIDAR を Smart Dump 5 に搭載した際の視界範囲

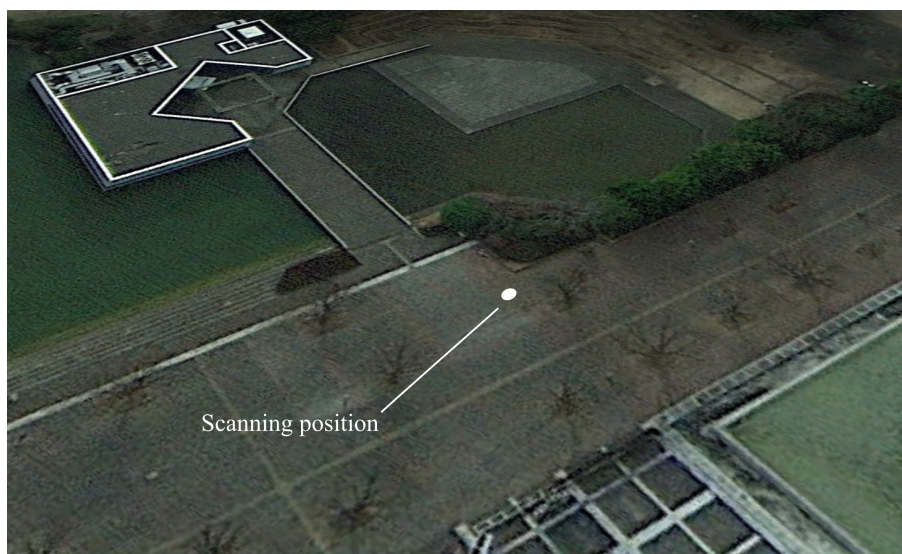


図 4.19: 回転揺動式 3D-LIDAR により周辺環境情報を収集した地点

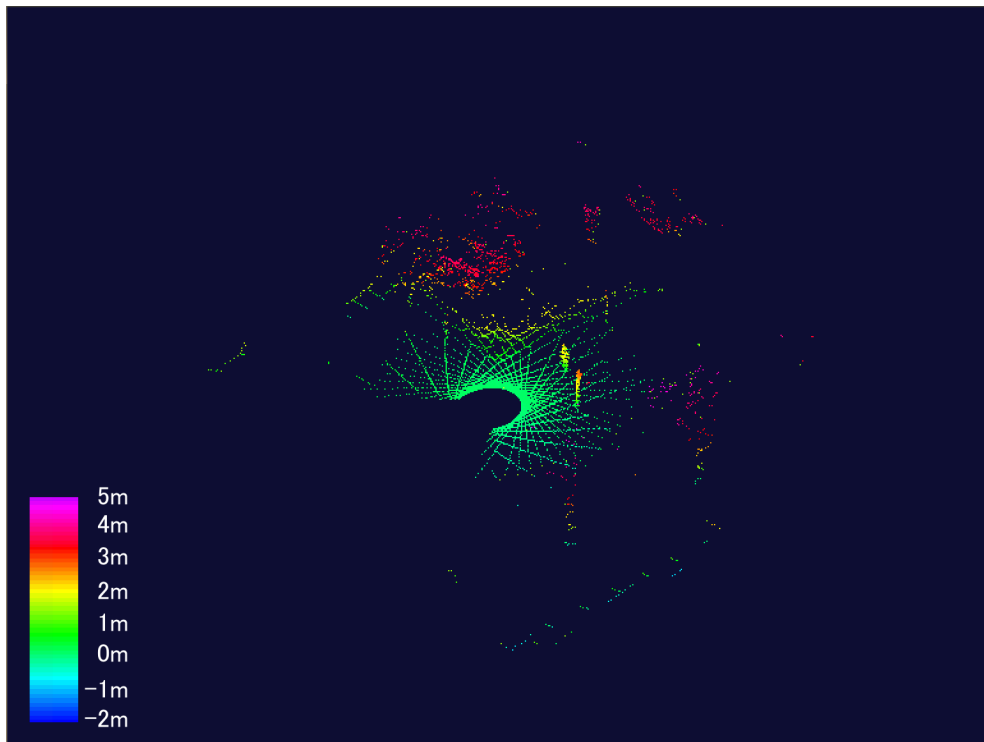


図 4.20: 回転揺動式 3D-LIDAR で収集した 1 秒間の 3 次元点群情報

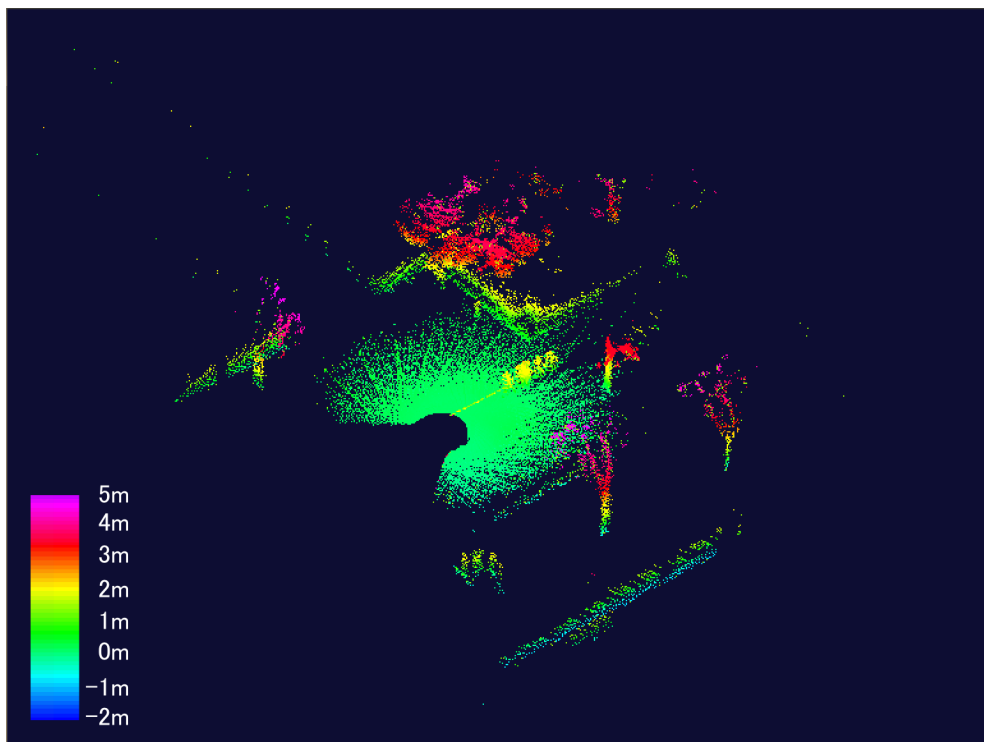


図 4.21: 回転揺動式 3D-LIDAR で収集した 10 秒間の 3 次元点群情報

4.3.2 制御システム

図 4.22 に Smart Dump 5 の制御システムの構成について示す。Smart Dump 5 は、自己位置推定及びナビゲーション用の Host Controller，駆動機器制御用の Slave Controller 及び LIDAR 及び GPS コンパスで構成されている。Host Controller には、Ubuntu 10.04 LTS のカーネル 2.6.33-29rt を搭載したノート PC CF-R9J(Panasonic 製)を使用している。そして、各種センサの情報から自己位置推定及び軌道誘導を行い、スレーブコントローラへ目標操舵角及び走行速度の指示を行っている。Slave Controller には、H8SX/1582 (Renesas 製) CPU を用いたマイコンボードを使用し、走行用モータ 4 個，操舵用モータ 1 個の制御，オドメトリの計測及び手動制御パネルからの指令値の処理を行っている。Host Controller と各種センサ及び Slave Controller は USB2.0 (Full Speed) により接続され、各ノード間の通信を行なっている。

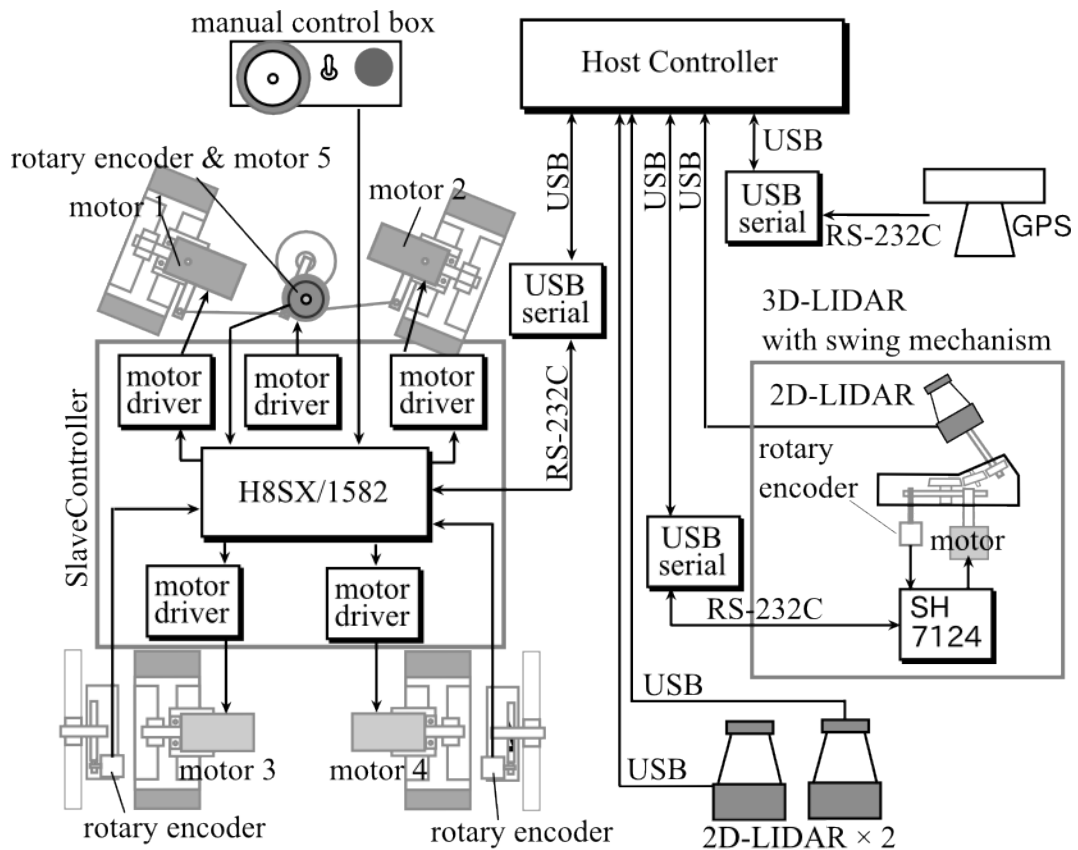


図 4.22: Smart Dump 5 の制御システム

4.4 Smart Dump 5 による自律移動実験

4.4.1 実験条件

植生位置情報を記録した三次元環境地図 Cuboid Map と回転揺動式三次元 LIDAR による自己位置推定手法の有効性を、二次元環境地図と二次元 LIDAR による自己位置推定手法と比較し検証を行う。このため、検証の場として用いる走行経路は、LIDAR の計測範囲に観測対象が存在しない又は僅少な図 4.23 に示す経路を用いる。

試験走行経路は、道幅約 5m のアスファルトコンクリートで舗装された公園内経路である。同経路周辺は、一様に刈られた芝生状の広場を有し、立体構造物が比較的少ない地域である。試験走行に用いるロボット車両は Smart Dump 5 を使用し、三次元環境地図を用いた自律走行では回転揺動式三次元 LIDAR と車体左右に配置した二次元 LIDAR によって周辺環境を計測する。一方、二次元環境地図を用いた自律走行では、車体左右に配置した二次元 LIDAR によって計測を行う。上記を除く軌道誘導手法、制御システム及び走行経路を事前に指示した WP の設定は同一のものを使用した。

Smart Dump 5 に実装した自己位置推定のマップマッチングの探索範囲は、これまで DR により推定した自己位置と姿勢角を基準として XY 方向に対して $\pm 0.5\text{m}$ 及び $\pm 1.5^\circ$ である。この探索範囲内を位置 10cm 及び姿勢角 0.5° ステップでマッチング度合を全探索する。

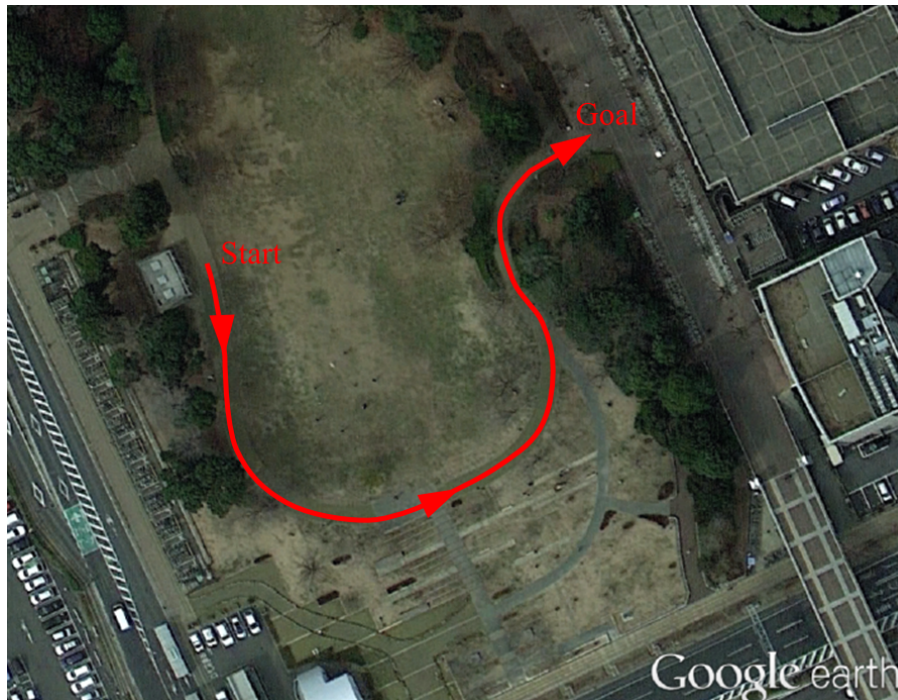


図 4.23: 検証実験に用いた走行経路

4.4.2 実験結果

図 4.24 は、Smart Dump 5 による走行実験結果を示している。図中青色で示す線が三次元環境地図と回転揺動式三次元 LIDAR を用いた走行軌跡，マゼンダ色で示す線が二次元環境地図と二次元 LIDAR を用いた走行軌跡である。二次元環境地図と二次元 LIDAR を用いた自律走行は，経路途中の LIDAR 設置平面に観測対象が僅少となりかけた付近でアスファルト歩道から脱輪しコースアウトする結果となった。一方，三次元環境地図と回転揺動式三次元 LIDAR による自律走行は，二次元環境地図と二次元 LIDAR を用いた自律走行では走行が継続できなかった場所においても自律走行を継続し，目標地点まで到達している。

図 4.25 は，事前に設定した Way point(WP) を基準として，実際に走行経路が Way point line(WPL) の横方向にどれだけずれて走行したかを示している。二次元環境地図と二次元 LIDAR を用いた自律走行は，走行開始直後から WPL からの逸脱が 1 m 以上発生し十分な追従ができていない。三次元地図と回転揺動式三次元 LIDAR を用いた自律走行では，距離 50m の位置で約 0.6m の誤差が発生しているものの，その後，WP に追従している様子が確認できる。距離 50m の位置で発生した誤差は，障害物回避動作により回避したものである。この際，LIDAR が障害物として観測した点は，周辺光が原因のノイズと考えられる。よって，回避動作を除いた三次元地図と回転揺動式三次元 LIDAR の自律走行では，WP からの横方向誤差約 0.3m の追従精度で走行を達成していることを確認した。

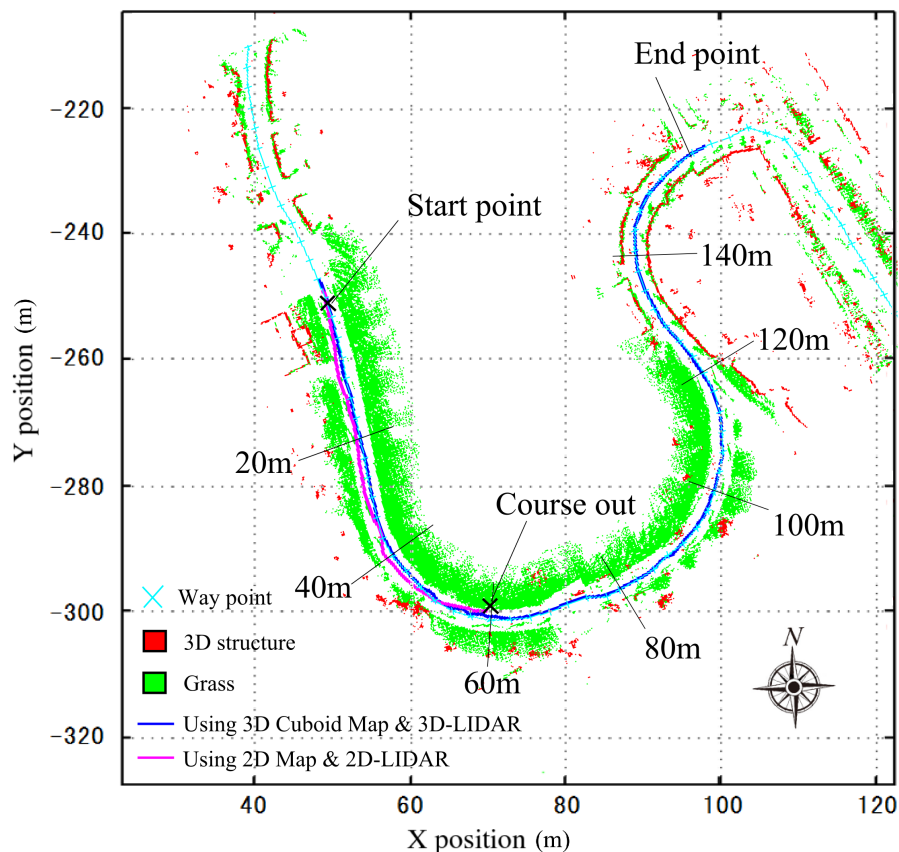


図 4.24: 実験走行結果

図 4.26 は、伊達らの研究によって実装されたオドメトリを基準としたマップマッチングの誤差評価手法 [20] によって得られた誤差楕円長径を示している。オドメトリを基準としたマップマッチングの誤差評価を行うため、Smart Dump 5 にはソフトウェア上でリセット周期の異なる 10 個のオドメトリ変数を定義し、過去 10 m のオドメトリに対するマッチングのずれを評価している。本評価方法による誤差楕円は、楕円直径が大きくなり始める時点でマッチングのずれが発生していることを示している。また、誤差楕円が発生する要因としてマップマッチングのエラー以外に、路面の凹凸などから与えられるオドメトリに対するノイズや環境地図の精度に影響を受けることに注意する必要がある。

三次元地図と回転揺動式三次元 LIDAR を用いた自律走行では、一時的に最大 2m の誤差楕円長が発生しているが 10m 後に収束していた。よってこれらの誤差楕円発生要因は、オドメトリの乱れ又は地図精度がマップマッチングに影響を与えたものと推定される。特に立体構造物が僅少な距離 60~80m 付近で誤差楕円長が約 0.2m に抑制されて、地表面の LIDAR 受光強度を自己位置推定が有効に機能していることを確認した。

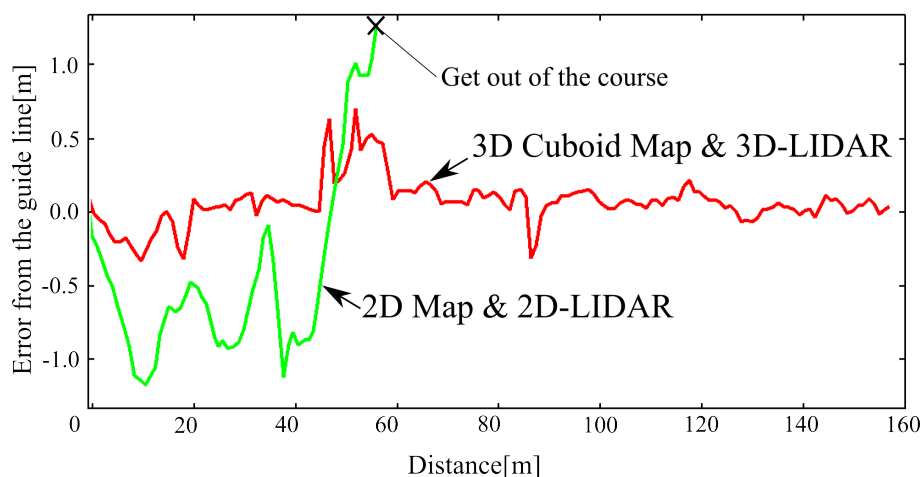


図 4.25: 走行位置の WP からの誤差

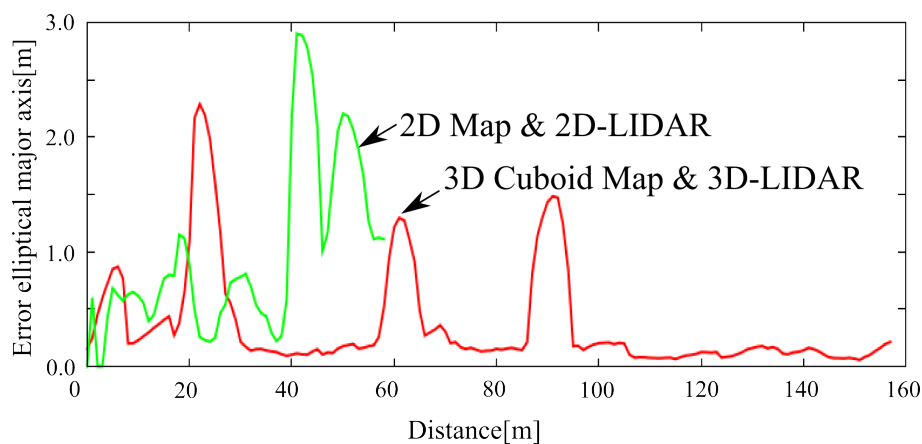


図 4.26: オドメトリを基準とした自己位置推定精度の比較

図 4.27 は、二次元環境地図と二次元 LIDAR を用いた自律走行でコースアウトした付近を拡大したものである。図 4.27 中の楕円はオドメトリを基準としたマッチングの精度を示す誤差楕円で、1m 間隔でプロットしている。この際、図 4.27 における誤差楕円の中心位置は走行時点で Smart Dump 5 が自己位置推定によって認識している結果を示しており、実際のロボットの位置と図中に示される走行位置は必ずしも一致していない。これは、誤差評価が地図とオドメトリの相対評価となるためである。

二次元環境地図と二次元 LIDAR を用いた自律走行は、誤差楕円長が拡大した距離 40m 地点からコースアウトするまで誤差楕円が収束しておらず、マップマッチングが不安定な状況が継続したことを意味している。距離 40m 付近で誤差楕円長が急激に増加していることから、この時点でミスマッチが発生したと考えられる。ミスマッチの発生点では、誤差楕円長径が約 3 m に拡大し狂いが生じている状況が確認できる。それに対して、三次元地図と回転揺動式三次元 LIDAR を用いた自律走行では、同地点の誤差楕円長径は約 0.1m 程度と誤差が抑制されている状況が確認できる。このような結果の比較から、二次元環境地図と二次元 LIDAR の自律走行と比較し、立体的な視界と地表面の LIDAR 受光強度情報を活用できる三次元地図と回転揺動式三次元 LIDAR を用いた自律走行の有効性を確認できた。

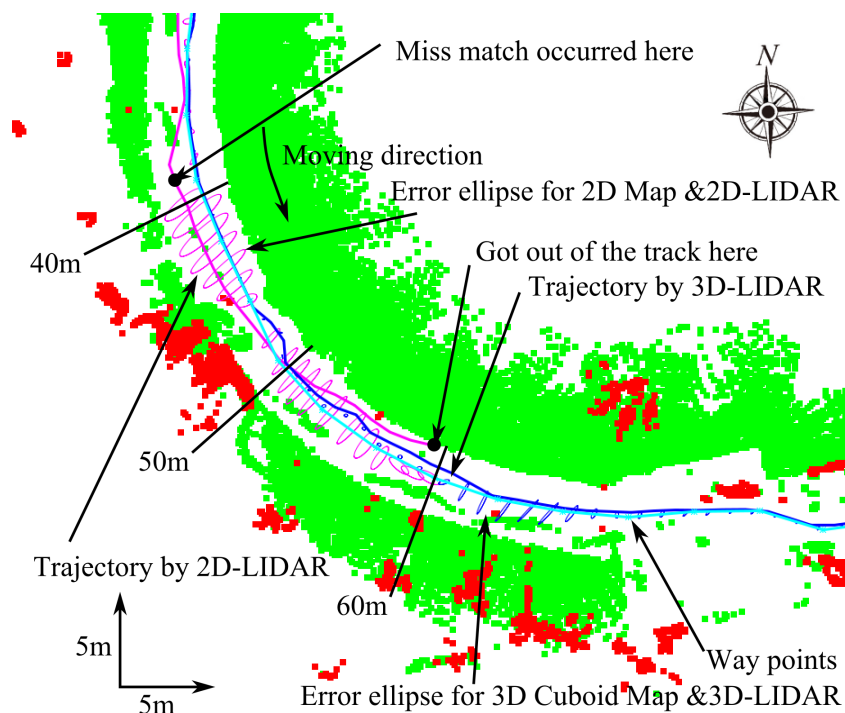


図 4.27: 実験走行結果

4.4.3 つくばチャレンジ 2011 での走行結果

Smart Dump 5 は、提案した拡張軌道誘導 SSM と三次元 Cuboid 地図及び回転揺動式三次元 LIDAR を用いた自己位置推定手法を用いて、つくばチャレンジ 2011 の最終実証走行に挑んだ。図 4.28 は、つくばチャレンジファイナルにおける Smart Dump 5 走行軌跡を示したものである。

つくばチャレンジ 2011 には、69 チームが参加した。そのうち 23 チームが、2011 年 11 月 15 日に行われたトライアル走行を通過した。トライアルのゴール付近は、立体構造物がほとんどない場所に設置されていたため、ゴール寸前でリタイアするロボットが多かった。

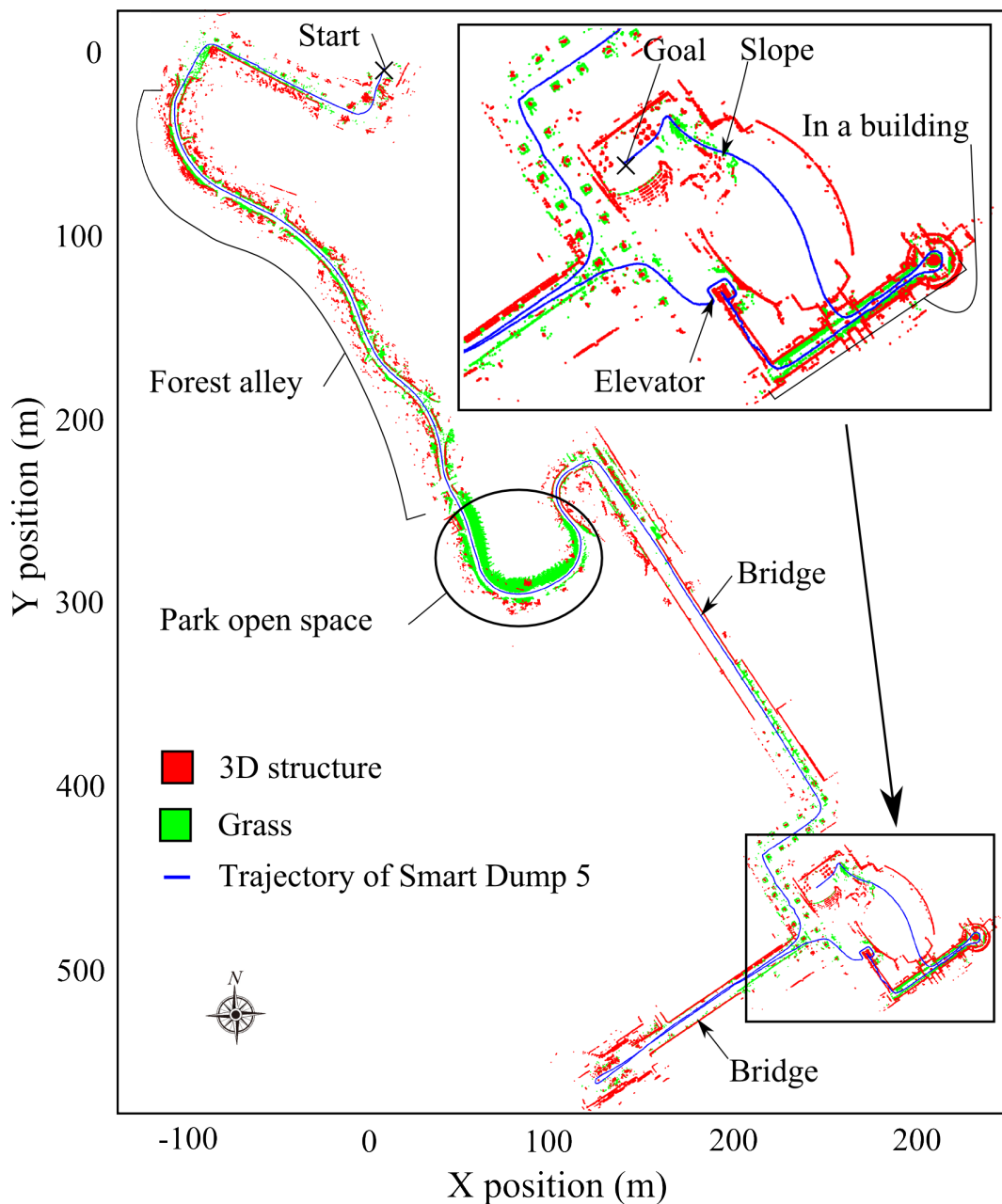


図 4.28: 実験走行結果

Smart Dump 5 は、出走直後に他のロボット車両を追い越し動作を行い、接触寸前の状況が発生したが、重大事故には至らなかったことが幸いして、トライアルは 8' 23" で通過した。このような状況の発生は、他のロボット車両の回避動作を想定していなかったことに原因があると考えられる。

実行委員会推薦の 2 チームと合せた 25 チームが翌日に行われた約 1.5 km のファイナル走行に参加し、6 チームが完走する結果 [21][22] となった。Smart Dump 5 の走行結果は、ファイナル走行を 27' 15" で走破し、つくばチャレンジ 2011 に参加した全ロボットの内最速で課題を達成する成果を得た。

4.5 結 言

本章では、アッカーマン機構の前輪操舵式ロボット車両 Smart Dump 5 により、つくばチャレンジ 2011 における屋内外都市環境の自律走行経路を用いて提案手法の有効性検証を行った。二次元環境地図と二次元 LIDAR を用いた自律走行システムでは、自己位置推定が難しいと考えられる経路において、地表面の LIDAR 受光強度情報を記録した三次元環境地図と回転揺動式三次元 LIDAR の組み合わせにより安定した自律走行を達成した。立体構造物が僅少な経路における走行実験結果とつくばチャレンジ 2011 を通じた成果から、同様の環境を安定して走行させるための技術的手法について以下の知見を得た。

- 屋外経路上を走行するロボット車両の自律走行には、高さ方向に長さを有するランドマークを注視する事が、自己位置推定を安定させる目標物として効果的である。このようなランドマークを活用するために、人が混在する環境でも変化の少ない人間の身長以上の高所を観測するセンサが有効である。
- ランドマークが無い又は僅少な場所でも、地表面に特徴的なテクスチャが存在する場合、LIDAR の受光強度情報を用いて識別した表面の受光強度差を活用することで自己位置推定が安定し自律走行の継続が可能である。この際、物体の反射特性を元に、計測距離に応じた LIDAR 受光強度の分離曲線を求めることで、リアルタイム判定ができる。よって、センサの計測距離の問題があっても、地表面にレーザの反射率が異なる素材が分布しているならば自己位置推定に活用が可能である。
- 拡張軌道誘導 SSM、三次元 Cuboid Map 及び LIDAR 受光強度情報を組み合わせた自律移動ロボット車両は、適切な環境地図が作成され LIDAR の計測範囲内に目標物又は路面情報が得られる環境であれば、自律走行が可能である。

次章では、ロボット車両の活動範囲を広げるため、Smart Dump 5 で培った技術を用いて、都市環境とは異なる環境で人間の作業を代替し自動的な作業を行いながらの自律走行を目指す。このため、実験環境を雑草などが生えた屋外不整地環境に注目し、適切な車体機構構造、センサ処理アルゴリズムの提案を行う。

参考文献

- [1] つくばチャレンジ, 公益財団法人ニューテクノロジー振興財団, <http://www.ntf.or.jp/challenge/>
- [2] 油田伸一, 水川真, 橋本秀紀, “つくばチャレンジのねらいと成果”, 計測と制御, Vol.49, No.9(2010), pp 572-578
- [3] 滝田好宏, 伊達央, “Smart Dump 3 で実現した自律機能, 計測と制御”, Vol.49, No.9 (2010),pp 636-639.
- [4] 渡辺 敦志, 阪東 茂, 品田 和洋, 油田 信一, “方位検出と交差点認識を用いた道なり走行ベースの屋外自律ナビゲーション”, 日本ロボット学会誌, Vol. 30 (2012), No. 3, pp.271-279
- [5] 山田 大地, 石田 卓也, 関口 誠, 岡村 公望, 福永 和海, 大矢 晃久, “高所特徴による自己位置推定を用いた明示的な動作計画に基づく屋外自律ナビゲーション”, 日本ロボット学会誌, Vol. 30 (2012), No. 3, pp. 253-261
- [6] 竹内 栄二郎, 山崎 将史, 田中 一志, 大野 和則, 田所 諭, “複数の外界センサを用いた位置推定モジュール群による屋外環境における自己位置推定”, 日本ロボット学会誌, Vol. 30 (2012), No. 3, pp.296-304
- [7] 富沢 哲雄, 村松 聡, 平井 雅尊, 佐藤 晶則, 工藤 俊亮, 末廣 尚士, “グリッドマップのマッチングに基づく未知障害物にロバストな自己位置推定”, 日本ロボット学会誌, Vol. 30 (2012), No. 3, pp.280-286
- [8] 原 祥堯, 大島 章, 小野 幸彦, 網野 梓, 山本 健次郎, “人込み歩道環境に適応した自律移動技術の開発と実験機 Sofara-T を用いた実環境での評価”, 日本ロボット学会誌, Vol. 30 (2012), No. 3, pp.287-295
- [9] 江口 純司, 尾崎 功一, “DGPS を用いて設定したウェイポイント経路追従による実環境自律移動法の開発 -つくばチャレンジ 2010 における完走およびリタイヤに関する考察-”, 日本ロボット学会誌, Vol. 30 (2012), No. 3, pp.314-323
- [10] 寺岡 章人, 松岡 毅, 家永 貴史, 有田 大作, 荒屋 亮, 木室 義彦, “地図コンテンツ業界の方法論によるロボット用環境情報の構築と利用の分離-マップデジタイズ法によるロボットを用いない環境情報構築-”, 日本ロボット学会誌, Vol. 30 (2012), No. 3, pp.324-331
- [11] 滝田好宏, “SSM を用いた軌道誘導車両の高速化”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.65, No.630(1999), pp 622-629
- [12] 滝田好宏, 平澤順治, “SSM を用いた軌道誘導車両の高速旋回特性”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.66, No.652(2000), pp 3888-3896
- [13] 滝田好宏, 伊達央, “Smart Dump 3 で実現した自律機能, 計測と制御”, Vol.49, No.9 (2010),pp 636-639.
- [14] V. N. Vapnik. *Statistical Learning Theory*. Wiley, New York, 1998.

- [15] Wurm.K.M, Kummerle.R, Stachniss.C, and Burgard.W, Improving robot navigation in structured outdoor environments by identifying vegetation from laser data, The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2009), pp.1217-1222.
- [16] 大政健次, “「農業・環境分野における先端的画像情報利用」 -ファイトイメージングからリモートセンシングまで”, 農業電化協会, (2007), pp 117-125
- [17] 島崎彦人, ”衛星リモートセンシングによる地球環境観測”, 国立環境研究所ニュース, 第24巻4号, (2005)
- [18] JAXA, ”リモートセンシング基礎講座”,
http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/experience/rm_kiso/top.html
- [19] 中川徹, 小柳義夫, ”最小二乗法による実験データ解析”, 東京大学出版会, (1982)
- [20] 伊達央, 滝田好宏 “自律移動ロボット Smart Dump による実世界環境走行実験：歩行者環境における人の群れ行動による影響と対策”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.3(2012), pp.305-313.
- [21] つくばチャレンジ 2011 結果報告,
<http://www.ntf.or.jp/challenge/challenge11/11result.html>,
- [22] 油田信一, 水川真, 橋本秀紀, 田代泰典, 大久保剛史, ”移動ロボットに遊歩道を自律走行させるつくばチャレンジ-公開走行実験の考え方と 2010 年度の結果”, システム/制御/情報：システム制御情報学会誌 Vol.55, No.7(2011), pp.278-283,

第5章 刈払ロボットによる 自動刈払作業の実現

5.1 緒言

耕作地や緑地公園などを適切に維持管理するためには、定期的な除草作業が必要不可欠である。しかし、農業にかかわる労働環境は、他の業種に比べて機械化が難しく、人の手による負荷が大きいと共に刃物を用いる危険な作業を伴うことが多い。なかでも、頻度が多く負荷の高い農作業の一つに除草作業が挙げられる。

除草作業では、広大な開豁地域や整備された広場などの芝刈りには大型の機械が使用されるようになってきた。しかし、頻繁に刈払作業の行えない錯雑地や不整地の多くは、桿式や背負式の刈払機を用いて人力によって行われているのが一般的である。だが、刈払機は高速回転する刃物が露出した状況で用いられるため、年間数十件の死傷事故が報告 [1] されている。このような背景の中、農作業の労働環境を改善し負担を軽減する技術開発のため、農林水産省は「農作業の軽労化に向けた農業自動化・アシストシステムの開発」[2] と題して研究を行っている。

これまで自動化・ロボット化が困難と思われてきた場所の刈払作業を人間に代わって行うことができるロボット車両を開発することが出来れば、負担軽減、効率化そして安全化に貢献できると考える。自律移動ロボット車両を安全に自律走行させるためには、精度の高いセンサと複雑な制御システムが必要となる。これまでに、ロボット車両の研究として米国 DARPA の主催した Grand Challenge[3] を代表に LIDAR, GPS, ステレオビジョンカメラ等多くのセンサを用いた研究がなされている。また、これらの技術を用いて案内ロボット [4] や清掃ロボット [5] などのサービスロボットが研究・実用化されてきている。案内ロボットの場合は、ロボット自身を所定の目的地に誘導することがオペレーションであるため、ロボットの移動軌跡自体が問題になることはない。他方、清掃ロボットの場合は、与えられた領域を隈無く走行することが動作の目標となるため、ロボットの動作計画が非常に高い精度で要求されることになる。

農業分野の研究においては、自己位置推定のためのセンサとして GPS を用いた手法 [6][7] が多く用いられている。これは、大規模農場といった開豁し高精度で GPS 測位情報を取得可能な環境における行動を想定していると共に、既知点からの補正観測情報をによりロボット車両に搭載する移動局 GPS が最大 2~3cm 程度の高精度で現在位置を観測することができる Real Time Kinematic GPS (RTK-GPS) を用いることで誘導を可能にしてい

る。除草作業自動化の研究分野でも、RTK-GPS や高精度のジャイロセンサを使用し、乗用型草刈機の自動化 [8][9] が試みられている。しかし、ロボットの動作範囲が RTK 補正信号発信基地局からの信号到達範囲に制約されるとともに、専用のインフラを設置する必要がある。また、山間部や木々の多い場合や、建築物がある付近では、GPS の観測可能個数の低下やマルチパスの影響等により測位精度が必ずしも良好ではない場合がある。この様な問題から、危険な刃物を露出した状況で取り扱うロボットには安全面での不安が残るため、GPS の受信状況に影響を受けないロバストなシステムが望まれる。

民生用の自動草刈機の分野では、障害物回避を行うセンサを有し、作業範囲を埋め込み式のマーカー等により設定することで自動的な除草作業を実現する製品 [10][11] がある。これらのロボットが対象とする作業環境は、ゴルフ場、サッカー場、公園及び庭といった常に整備され、除草対象の草が十数 cm 程度の芝が一様に広がっている箇所での作業を対象としている。一方、農業分野や頻繁に作業が行えない土地では、人の膝丈以上の背丈を有するメヒシバやセイタカアワダチソウ等の大型雑草が多く分布している。このため、より錯雑した環境で使用に耐える自律移動ロボット車両の開発が必要と考えられる。

また、錯雑した刈払作業を必要とする環境では、雑草の中に石等の様々な障害物が混在している場合がある。高速で回転する刈払機の刃物に障害物が接触すると、障害物や破片が数 m 程度飛散する恐れがあり、事故事例も報告されている [12]。よって、自動的に除草作業を行う刈払ロボットにも石片の様な地表面付近に点在し背が低く比較的小さく、飛散する可能性の高い障害物を適切に検出し刃物との接触を回避する機能が求められる。この様な障害物を事前に検出するためには、光学式カメラの活用が考えられる。だが、光学式カメラは環境光や季節変動による植物の色の変化の影響を受けやすいと共に、検出のための画像処理に計算機のパワーを必要とする特徴がある。一方、本論文では第 4 章で LIDAR の受光強度情報を活用して植生とアスファルトを識別する手法について検討を行ってきた。LIDAR による植生内にまぎれた他の素材で出来た障害物の検出には、LIDAR の受光強度情報の活用が有効と考えられる。

以上のことから、屋外不整地環境で刈払作業を実現するため、車体剛性と接地性の高いアーティキュレート式車両と、LIDAR を用いた自己位置推定システムにより雑草を自動的に刈払う作業ロボットを開発する。同時に、LIDAR の受光強度情報を用いて刈払作業時に必要とされる作業領域内の障害物検出手法について検討する。

第 5.2 節では、屋外錯雑不整地で刈払作業を行う、アーティキュレート式車両の刈払ロボットの構造について述べる。

第 5.3 節では、開発した刈払ロボットを用いて、屋外環境において刈払作業実験を行い、アーティキュレート式車両に適用した拡張軌道誘導 SSM のと LIDAR による自己位置推定手法の屋外作業環境における有効性を確認する。

第 5.4 節では、LIDAR 受光強度情報を用いて、刈払作業領域内に含まれる障害となる恐れのある石質の障害物を検出する手法について述べる。

第 5.5 節では、本章の結言が述べられている。

5.2 刈払作業ロボット車両

5.2.1 車体構成

図5.1は刈払作業ロボット車両の外観を、図5.2は外形を示している。表5.1に刈払作業ロボット車両の性能諸元を示す。刈払作業ロボット車両は、車体中央で屈曲するアーティキュレート方式車体を用い、各車輪にモータを配置した4輪駆動方式を採用している。車体後部の体幹一カ所にねじれ軸を設けることによりサスペンションと同様の接地性を確保している。車体には、比較的平坦な地域での運用を企図して、直径0.21m、幅0.05mのタイヤを装着し、最低地上高が0.07mとなっている。地形に凹凸や礫が存在する箇所では、より大径のタイヤに交換することにより対応する。各車軸及び屈曲部の駆動は、ロータリーエンコーダ付DCモータ RE40 24V 150W(Maxon製)を使用し、駆動用には26:1 屈曲部には285.7:1 ギアボックスを用いている。

自己位置推定のためのセンサとして、UTM-30LX(北陽電機製)LIDARを3台、GPSコンパス V-100/21 (ITS21製)を1台、車両前部のロータリーエンコーダをオドメトリとして使用している。2台の二次元LIDARは、前輪車軸上に配置して設置水平面360度全周の視界を取得する。残りの1台は、車両前方上部のチルト式の揺動機構上に設置してチルト式三次元LIDARを構成し、刈払機の刃物周辺の植生等の受光強度情報と車両左右高所の三次元環境情報を取得する。GPSコンパスは、車両上部に配置しされGPS測位情報と姿勢角を取得する。オドメトリは、得られたデータを元に移動距離と姿勢角の計算を行っている。

表 5.1: 刈払作業ロボット車両の諸元

Item	Value
Length	1050 mm
Height	1040 mm
Width	600 mm
Wheel base	900 mm
Tread	585 mm
Weight	31 kg
Drive motor	maxon DC motor RE40 24V 150W × 5
Steering motor reduction gear ratio	285:1
Drive motor reduction gear ratio	26:1
Wheel diameter	150 mm
Power	12V 1900mAh × 6



図 5.1: 刈払作業ロボット車両の外観

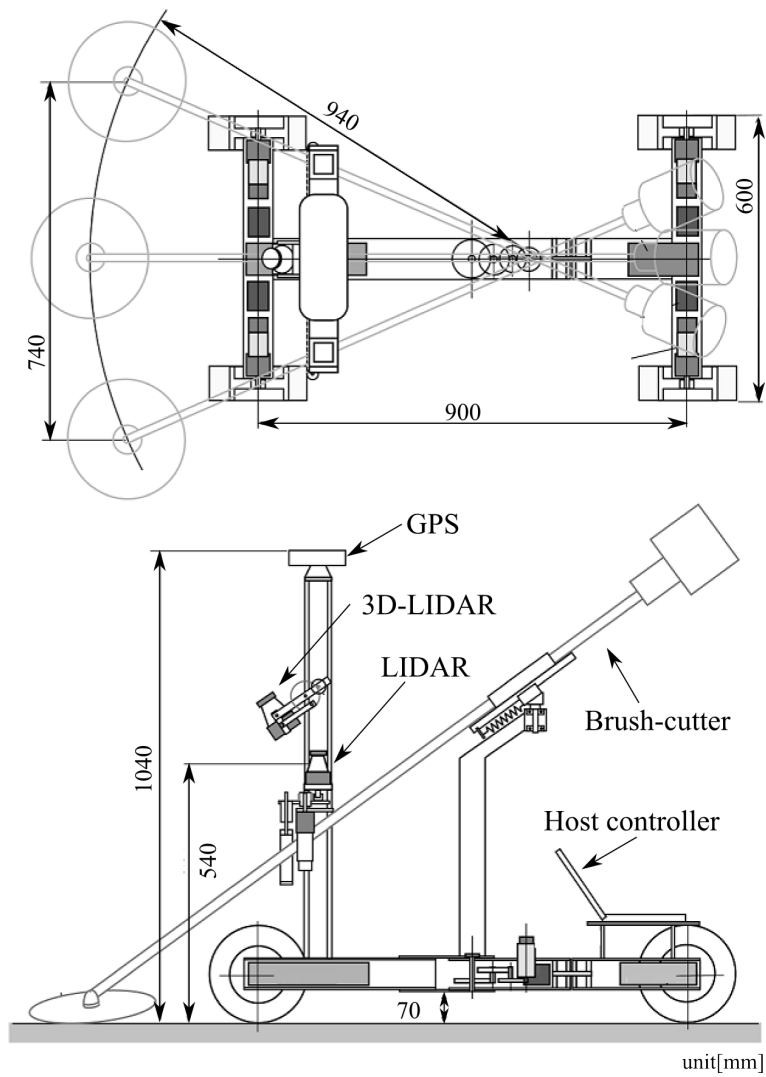


図 5.2: 刈払作業ロボット車両の外形

5.2.2 制御システム

図 5.3 は、刈払ロボットの制御システムの構成を示している。刈払作業ロボット車両の制御システムは、自己位置推定及びナビゲーション用の Host controller, 車体駆動機器制御用の Slave controller, 刈払機制御用の Brush cutter controller, LIDAR 及び GPS コンパスで構成されている。Host controller は、Linux 2.6.33-29 のリアルタイム OS を搭載したノート PC CF-R9J(パナソニック製) を使用している。そして、LIDAR からの環境情報と GPS コンパスの座標情報と姿勢角を取得し、Slave controller へ目標屈曲角及び走行速度の送信とオドメトリデータの受信を行う。Slave controller 内には、SH7125(Renesas 製)CPU とモータドライバにより構成されたコントローラが、モータ毎に配置されている。各コントローラ間の通信には RS-485 規格の半二重通信方式を使用した高速ネットワークを構成し、Host controller と接続された Manual controller で統合され、指示値に従い車両の姿勢や速度を制御しオドメトリデータの送信を行っている。Brush cutter controller は、H8S/2258(Renesas 製)CPU により構成され、チルト式三次元 LIDAR の制御を行なうと共に、刈払機を左右に旋回し刈払い動作を行うスライダを制御している。

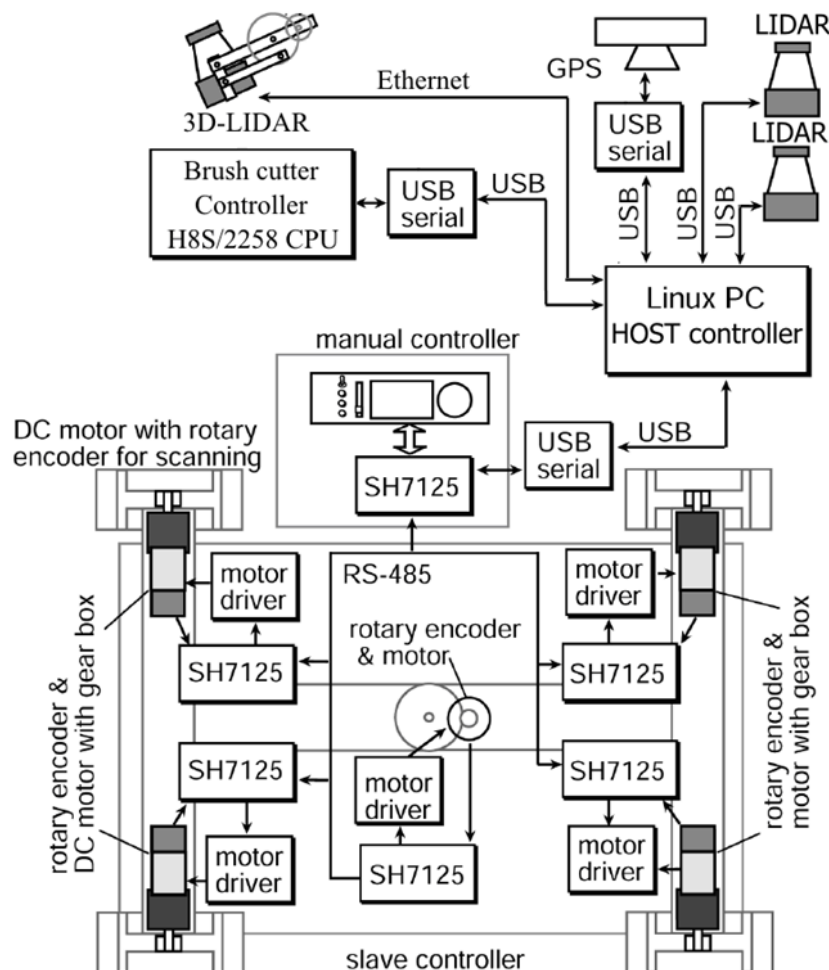


図 5.3: 刈払作業ロボット車両制御システムの構成

5.2.3 刈払機操作機構

刈払機作業ロボット車両は、車体中央部に刈払機の搭載部と車両前輪軸線上部に刈払機を左右に回転させるスライダ機構を配置して、刈払機の操作を行なっている。刈払機は、人手によって操作される棍式のエンジン動力式刈払機（リョービ社製EEK-220A）を搭載している。刈払機は、高速に回転する刃物を用いて草から細い枝まで切断する機械で、安価で作業効率が高いことが知られている。刃物の回転方向は左回転で共通化されて、右から左へと円盤の左上側を使うと安全で効率が良いとされている。

人間の操作では腰と腕を使って刈る運動と戻りとでは同じ経路を通らないようにしている。しかし、このような運動を機械で実現するのは複雑な機構を必要とする。また、刈り取った草を規則正しく車体の左側に切り倒すように工夫をすることで、後処理の作業性の向上を図る必要がある。そこで、刈払機操作機構はできるだけ簡単な構造とするために、刈払機の回転中心を刃物から遠くにして大きな円を描くようにし、刃物に近い点をサーボモータ (Maxon 製) で左右に駆動させている。また、刈払機はリニアスライド上に 34 度傾斜させ、ばねで支持することで刃物の前後方向に発生する力を逃がすことができる。これにより刈払機ロボットは、スライダー機構部の走査幅と刃物の径により車体前部正面に約 1.0m の刈払い幅を有し、刈払機作業時は車体前部の刈払い幅を走査したものとみなした。

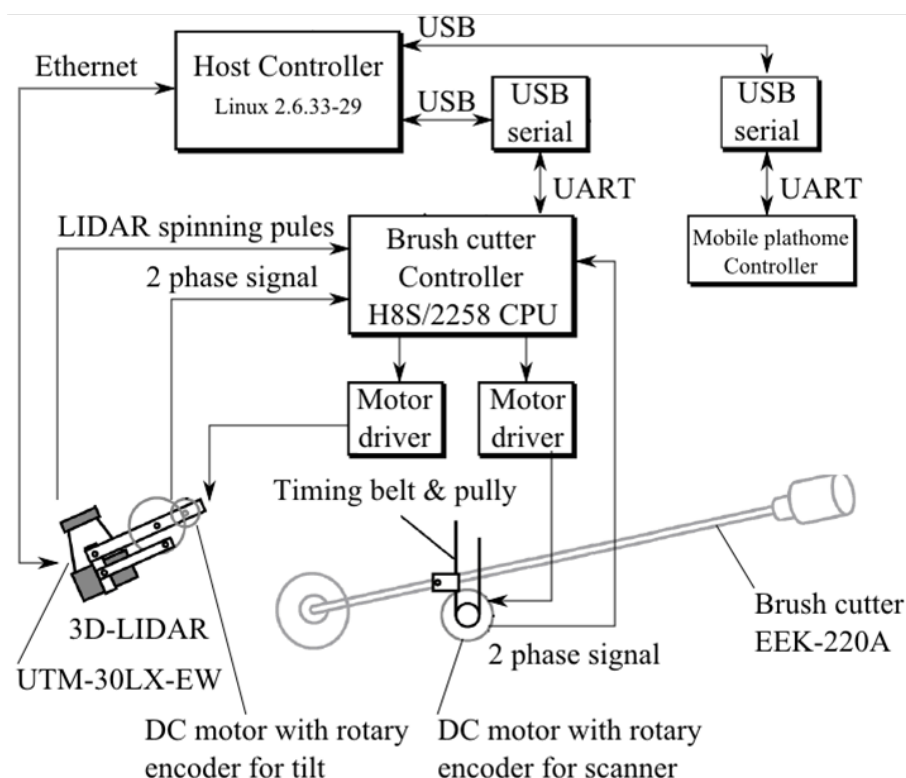


図 5.4: 刈払機操作制御システムの構成

5.3 屋外環境における自動刈払作業の検証

5.3.1 不整地環境での走行実験

Smart Dump 5 で有効性を検証してきた自己位置推定システム，アーティキュレート式操舵車両及びアーティキュレート式車両に適用した拡張軌道誘導 SSM を用いて，刈払作業を行う屋外環境で自律走行の性能を評価した。

図 5.5 は，走行実験に用いた防衛大学校理工学 4 号館中庭広場の景況を示している。走行実験では，刈払作業を行う錯雑地を想定して 0.35m~0.75m の背丈を持つ雑草が生えている箇所における走行性能を確認する。走行実験中は，刈払動作を行わずに走行させ，最大速度設定は 0.5km/h 以下とした。自己位置推定のための環境地図は，第 3 章で示した Cuboid Map を事前に作成し使用した。

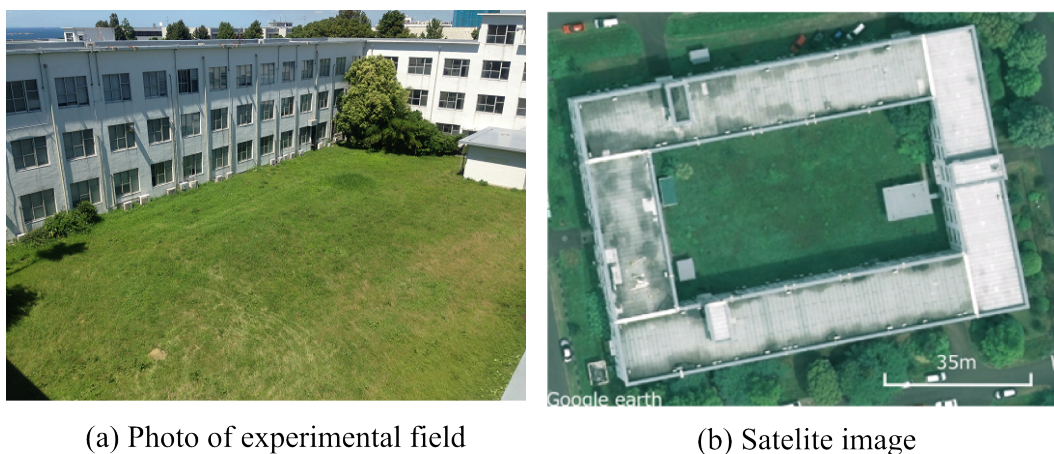


図 5.5: 刈払ロボット走行実験環境

5.3.2 走行実験結果

図 5.6 に走行実験結果を示す。図中，赤色で示す地図情報と×印で示す WP を用いて自律走行を行なった。青色線は，刈払ロボットが走行中に自己位置推定を行なって得た自己位置座標，緑色線は GPS コンパスの取得した座標である。GPS から得られた座標は，走行領域の中央付近での測位精度は良いものの，建物等の影響により取得座標が安定せず GPS 単体での自己位置推定が難しいことがわかる。

図 5.7 は，WP を基準とした走行軌跡の誤差を示している。走行距離 170m の間に最大 0.7m の誤差が発生しているのが確認できる。特に 10m~20m 及び 90m 付近で大きく誤差が発生している。これは，経路に対する滑らかな追従を企図して，第 2 章で示したアーティキュレート式操舵車両の軌道誘導 SSM における VWP の位置を定める定数 L_p 値をホイールベース長の 6 倍に設定していたため，カーブ走行時における収束が遅くなったためである。

図 5.8 は、GPS の GPGST 信号から得た誤差楕円長径と、オドメトリを基準としたマップマッチングの誤差評価 [13] によって得られた誤差楕円の変化を示している。GPS の誤差楕円は、スタート地点では建物などの影響から十分な収束ができず 20m 以上に誤差楕円が拡大している。また、40m や 60m 付近でも拡大しており、測定位置に影響され安定した測位が出来ていない様子が確認できる。一方、オドメトリを基準としたマップマッチングの誤差評価では、20m、60m、90m 及び 110m 付近において 2m 付近まで誤差楕円が拡大している。図 5.9 は、オドメトリを基準としたマップマッチングの誤差評価による誤差楕円を 1m おきに地図上にプロットしたものである。アスファルト路面等地盤の状態の良い経路の自律走行と異なり、タイヤの横滑りが発生しやすい旋回動作時に誤差楕円が大きくなっていること確認できる。これは、進行経路に対して横方向に誤差楕円の長手方向があることから、車輪が草の影響により恒常的にスリップを起こしているためと考えられる。よって、同様の場所を走行する際においては、各車輪に取り付けられているオドメトリデータを確認してスリップの発生を監視するシステムが必要であることを確認した。

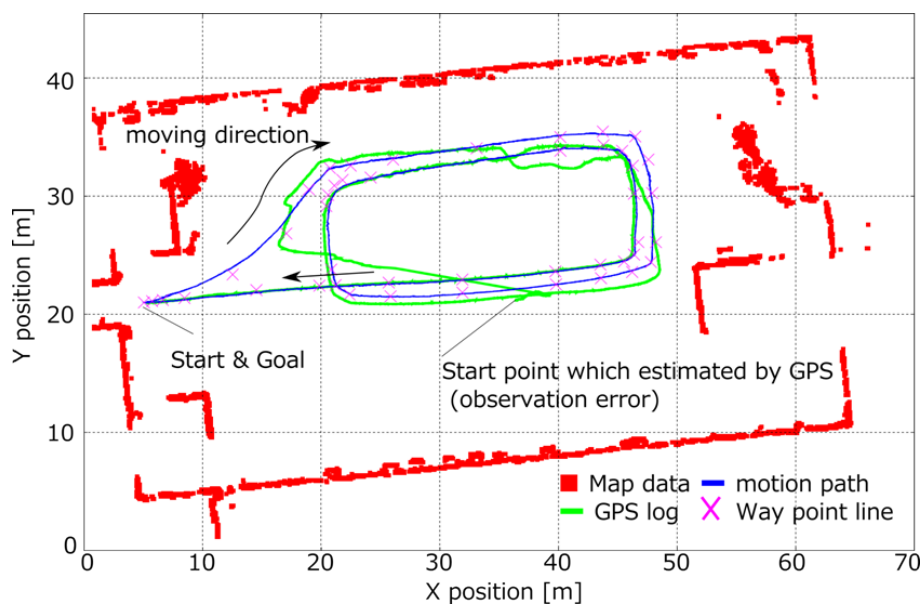


図 5.6: 走行実験環境結果

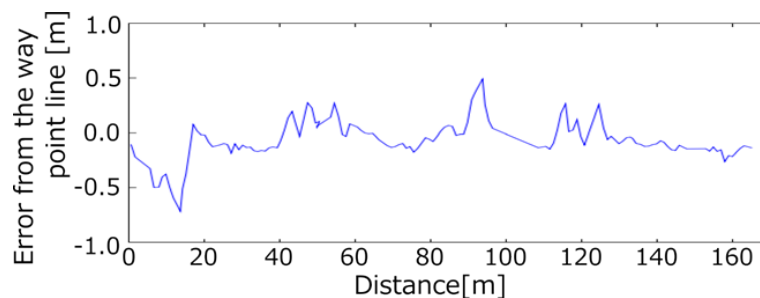


図 5.7: WP を基準とした走行軌跡の誤差

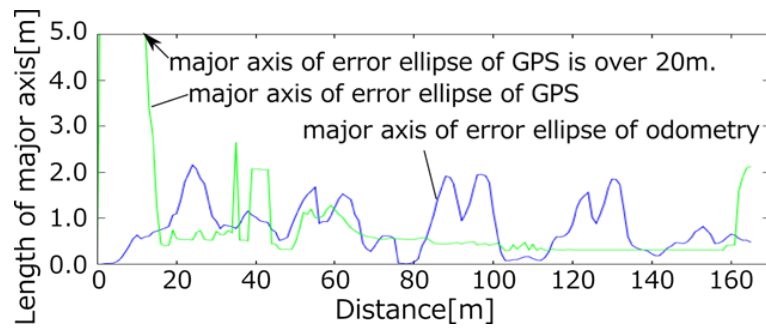


図 5.8: GPS とオドメトリを基準としたマップマッチングの誤差評価

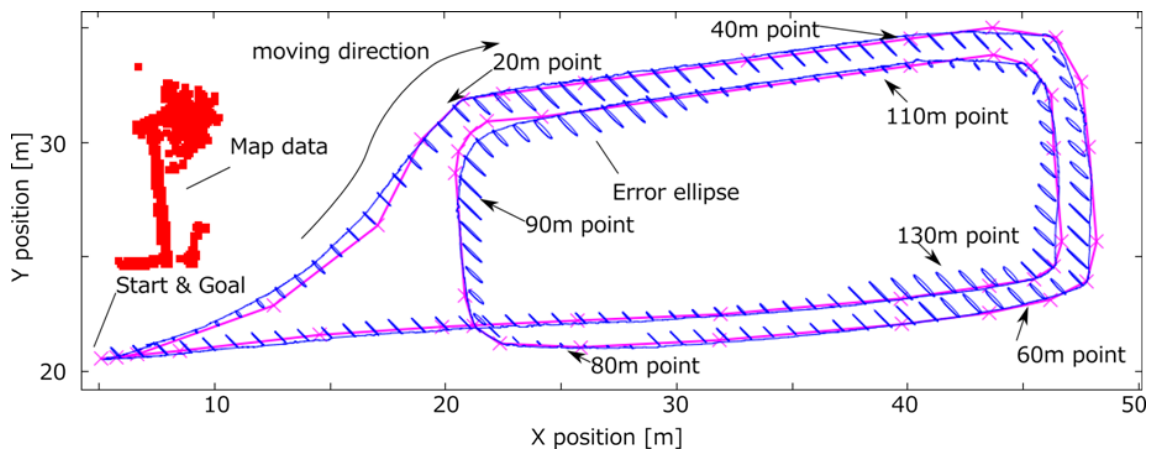


図 5.9: 各走行位置におけるマップマッチングの誤差評価

5.3.3 自動刈払作業実験

刈払ロボットによる自動刈払作業の性能を評価するため、走行実験と同じ図 5.5 に示した場所において自動刈払作業実験を行った。走行環境の状態及び利用した環境地図は、走行実験と同様の設定を使用した。実験走行時の最大速度は、走行実験結果を基にオドメトリスリップ対策をソフトウェアアルゴリズムに加えると共に、刈払作業時の最大走行速度を 0.20km/h 以下と設定した。

刈払ロボットの走行精度を評価するため、ロボット自身が自律走行中に推定した自己位置と外部に設置した三次元 LIDAR の観測結果を用いた。そのため外部計測装置として、三次元 LIDAR HDL-32e を外部に固定設置して使用した。外部計測装置で観測するために、刈払いロボットの前輪車軸中心の GPS 上に直径約 85mm、高さ約 0.8m の円筒を設置する。この円筒をスキャンさせ、得られた観測点を元に円筒の中心座標を計算し刈払ロボットの自己位置として用いた。

刈払作業の軌道計画においては、刈り残しが発生せず、速いことが求められる。また、アーティキュレート車両は内輪差が発生しないため、車体が走行した軌道に刈払幅分を足した領域を草刈が完了した場所と考えることができる。刈払ロボットの刈払機操作方法と

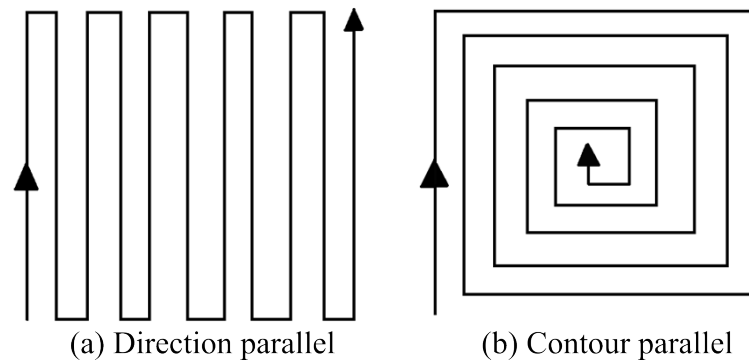


図 5.10: 刈払作業時の走行経路の考え方

刈り残しの発生防止のための、作業経路を決定する必要がある。作業領域を全て覆い尽くす最短な軌道計画の代表例として、Direction parallel 型 (図 5.10(a)) と Contour parallel 型 (図 5.10(b)) とが用いられている [14]。加藤らの研究 [15] によると、屋外刈払作業ロボットのためには direction parallel 型が適していると、述べられている。しかし、彼らの研究はその場旋回が可能なスキッドステア車両を用いて行われおり、アーティキュレート式車両と刈払機操作の特性から適当でないと考えられる。このため、アーティキュレート式車両の最小旋回半径と刈払機操作の方式から、Contour parallel 型の軌道を WP の設定に用い、直進走行部分の WP 間の横間隔を 0.8m とし、0.2m のオーバーラップを設けた。

5.3.4 刈払作業実験結果

図 5.11 は、刈払作業実験の走行軌跡を示している。青色線は、刈払ロボット自身が走行中に自己位置と推定した軌跡である。緑色線は、外部計測設置 (3D scanner) により観測した刈払ロボットの位置である。

図 5.12 は、WP を基準とした走行軌跡の誤差を示している。刈払ロボットの自己位置推定では、一時的に約 0.75m の誤差が発生した。これは、オドメトリにスリップが発生したことによる一時的な推定の乱れと考えられる。一方、外部計測装置による観測結果から得られた刈払ロボットの走行軌跡の WP からの誤差は、約 0.2m に抑えられていた。これは、自己位置推定のための地図のグリッドサイズが 0.1m 格子であることを考慮すると、刈払ロボットに搭載された二次元 LIDAR と Cuboid Map を用いた自己位置推定手法が予定通りの性能を発揮していた結果と考えられる。また、アーティキュレート式車両に適用した拡張軌道誘導 SSM が、車両の最小旋回半径にしたがって設定した WP に追従することで走行軌道の誤差を最小限に抑え、屋外における追従性の高い自律走行を実現した。

図 5.13 は、実験中に刈払作業を行いながら自律走行する刈払ロボットの写真である。写真から、刈り取った雑草を車両の前進方向に対して左側に除けながら作業を継続している様子が確認できる。図 5.14 は、刈払作業実験後に刈払われた雑草を清掃除去した直後の写真である。直線走行部分では概ね刈残しなく作業を達成している様子が確認できる。一方、旋回部分では一部に刈残しが発生してしまっている。これは、アーティキュレート

式車両の機構上の最小旋回半径と実際の動きの誤差及び自己位置推定の誤差から発生したものと推定される。このため、旋回中の誤差が発生しやすい部分での適切な Way point 設定と、軌道誤差を縮小させる手当てを行う必要がある。

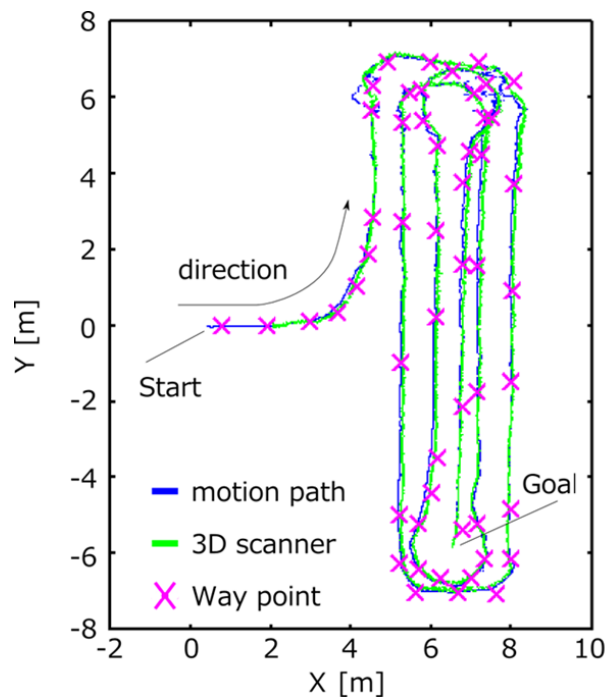


図 5.11: 刈払作業実験の走行軌跡

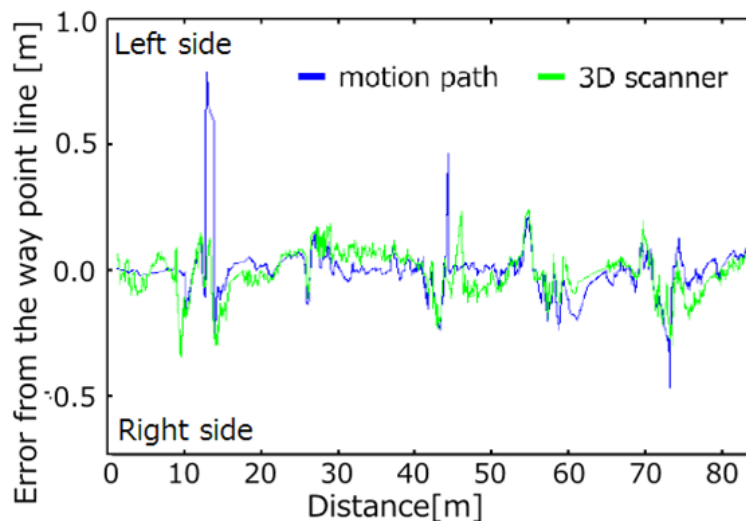


図 5.12: WP を基準とした走行軌跡の誤差



図 5.13: 刈払作業中の様子



図 5.14: 自動刈払作業実験結果

5.4 LIDARの受光強度情報を用いた障害物検出手法

5.4.1 受光強度値の分散を考慮した分離曲線式の系統的導出法

第4章では、LIDARの計測距離と受光強度情報の関係から植生とアスファルトを判定するための分離曲線を導出した。それは、2つのクラスを分離することができる中間点を目視で選び出し、最小二乗法による近似式を導出する手法であった。しかし、目視による分離点の選定とそれによる分離曲線の設定は、計測者の感覚に依存するため個体差が生じる原因となる。よって、LIDARを用いて植生に混在する障害物を検出するために、クラス毎の分散の影響を考慮しシステムティックに分離線を導出する手法について提案する。

図5.15に示す写真の様に、防衛大学校敷地内の芝生、土壌及びアスファルトの場所を選定して受光強度情報を収集した。図5.16は、2013年12月17日13時から14時の間に、チルト式三次元LIDARを用いて測定した距離と受光強度値の関係を示している。図5.16では、芝生を緑色、土壌を青色、アスファルトを赤色で示しているこのように、LIDARの受光強度値は植生、土壌、アスファルトの順に低くなる傾向がある。

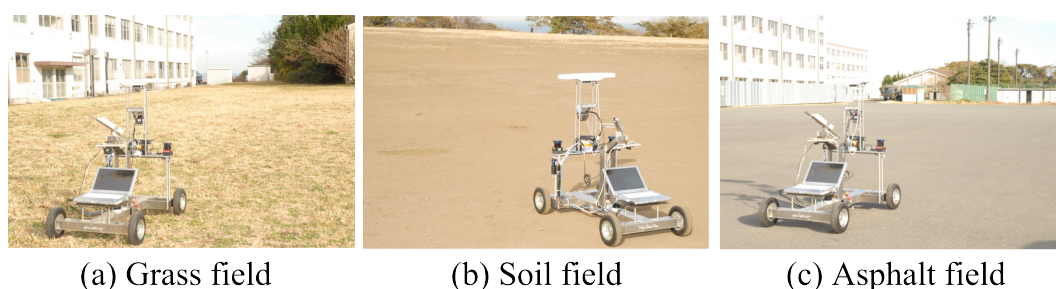


図 5.15: チルト式三次元LIDARを用いて受光強度情報の収集した環境

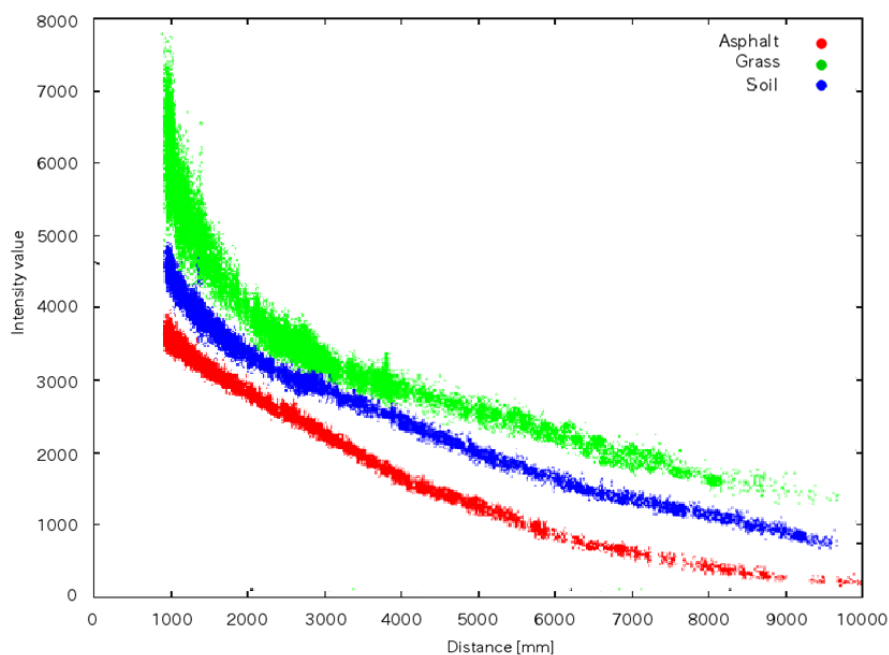


図 5.16: チルト式三次元LIDARによる計測距離と受光強度情報の関係

チルト式三次元 LIDAR を用いて収集した LIDAR 受光強度情報のうち、芝の集合を $\alpha = \{\alpha_i\}$ 、アスファルトの集合を $\beta = \{\beta_i\}$ とする。LIDAR の受光強度情報に対応する計測距離情報の集合をそれぞれ $r^\alpha = \{r_i^\alpha\}$ 、 $r^\beta = \{r_i^\beta\}$ とする。この際、芝とアスファルトの集合に含まれる受光強度情報の総数は N^α 、 N^β とする。これらの集合を一定の距離間隔 ($r_{k-1} \leq r < r_k, k = 1, 2, \dots$) で分けたとき、 k 番目の区間の添字集合をそれぞれ $I_k^\alpha = \{i | r_{k-1} \leq r_i^\alpha < r_k\}$ 及び $I_k^\beta = \{i | r_{k-1} \leq r_i^\beta < r_k\}$ と表し、総数をそれぞれ N_k^α 、 N_k^β とする。この時、 k 番目の区間における受光強度情報の平均値 μ_k^α と μ_k^β 、分散 $(\sigma_k^\alpha)^2$ と $(\sigma_k^\beta)^2$ は、

$$\mu_k^\alpha = \frac{1}{N_k^\alpha} \sum_{i \in I_k^\alpha} \alpha_i \quad (5.1)$$

$$(\sigma_k^\alpha)^2 = \frac{1}{N_k^\alpha} \sum_{i \in I_k^\alpha} (\alpha_i - \mu_k^\alpha)^2 \quad (5.2)$$

$$\mu_k^\beta = \frac{1}{N_k^\beta} \sum_{i \in I_k^\beta} \beta_i \quad (5.3)$$

$$(\sigma_k^\beta)^2 = \frac{1}{N_k^\beta} \sum_{i \in I_k^\beta} (\beta_i - \mu_k^\beta)^2 \quad (5.4)$$

で与えられる。

図 5.17 中の青色+点が芝、青色×点がアスファルトの各距離区間の中間における平均値である。芝とアスファルトの境界となる分離曲線を求めるために、各区間における下限と上限を求める必要がある。しかし、単純に各区間内の最小値や最大値を使うと、外れ値の影響を受ける恐れがある。具体的には、芝生を計測する際に芝の葉以外にも土がわずかに観測されることがあり、これらの受光強度は芝の葉より遥かに低い傾向がある。そこで統計量を用いて、正規分布を仮定した場合の信頼区間 95.45% となる平均から 2σ 離れた点を境界とみなすこととする。すなわち、分離曲線を設定する際に比較する素材のうち、より大きな受光強度を示す α (芝生の受光強度情報) の下限の点列は、

$$sp_k^\alpha = \mu_k^\alpha - 2\sigma_k^\alpha \quad (5.5)$$

で与えられ、小さな受光強度を示す β (アスファルトの受光強度) の上限の点列は、

$$sp_k^\beta = \mu_k^\beta - 2\sigma_k^\beta \quad (5.6)$$

で与えられる。

図 5.17 中のマゼンタ+点は式 5.5 で求めた α (芝生の受光強度) の下限の点列、マゼンタ×点は式 5.7 で求めた β (アスファルトの受光強度) 上限の点列を示している。式 5.5 と 5.7 を用いることにより、 α の下限の点列と β の上限の点列の中間点である分離点列は、

$$sp_k = \frac{sp_k^\alpha + sp_k^\beta}{2} \quad (5.7)$$

で表される。図 5.17 中のシアン色○点は求めた分離点を示している。分離点列と任意の近似式 $f(r)$ について、

$$E = \sum_{k=1}^K \left(f\left(\frac{r_k + r_{k-1}}{2}\right) - sp_k \right)^2 \quad (5.8)$$

を最小二乗法により最小化する $f(r)$ を求める。図 5.17 に示す受光強度情報を測定距離 1m から 10m の間において分離するために、当てはめる関数として今回は、

$$f(r) = c_2 r^2 + c_1 r + c_0 \quad (5.9)$$

に示す二次関数で近似すると、 $c_2 = 3.9266e - 05$, $c_1 = -0.7832$, $c_0 = 4652.8725$ を得た。この結果を元に、LIDAR の測定距離 r と受光強度値 b に関する正規化式を求めると、第 4 章の正規化式と同様に

$$Normalized(r, b) = \frac{b}{f(r)} \quad (5.10)$$

の形で与えられる。 $Normalized > 1$ であれば芝生，そうでなければアスファルトと判定できる。本項では自律移動ロボットの軽快なオンライン処理のために当てはめに用いた関数を二次関数として設定したが、より詳細な分離を求める際はより高次関数で当てはめを行うことで対応が可能である。

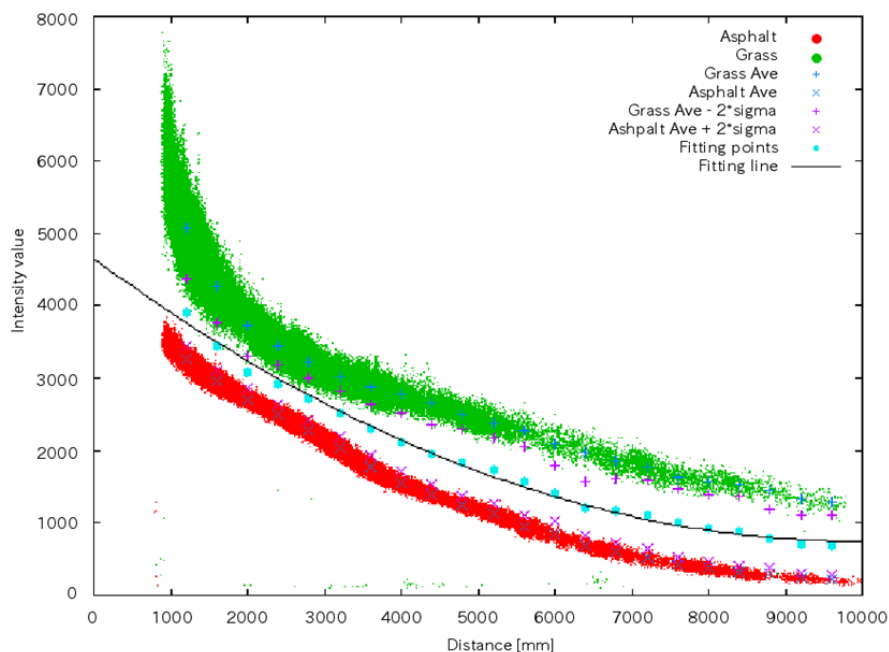


図 5.17: LIDAR 受光強度情報の分散を考慮した分離曲線導出

5.4.2 外部環境がLIDAR 受光強度情報に及ぼす影響の検証

屋外で活動するロボットは様々な気象条件で活動することが求められる。性能上極端な強風や豪雨の場合を除外するとしても、黎明、薄暮といった昼夜間の光量変化や多少の雨天には対応が求められる。図 5.18 は、図 5.15 のデータを収集した同じ場所で雨天時に得られたデータを加えたものである。アスファルトの受光強度値は全域で減少し、芝生は 3m 以下の近距離において受光強度値の減少が確認された。この結果から、それぞれ計測対象が天候条件によって取得される受光強度情報が異なる可能性があることを確認した。

よって、特定の日照等の環境条件のみを考慮して前項で示した手法による分離曲線を導出した場合、誤検出の発生が予期される。誤検出を防止するために LIDAR の受光強度情報に影響を与える周辺環境の要因を調査し、適切な補正を加える必要がある。これまでの研究には、LIDAR が環境から受ける影響を定量的に評価検証したものが無い。よって、これらの影響を排除するため、環境の変化に応じた補正式を求め、適切に対象素材を判定する手法を提案する。この際、外部環境の影響が大きかった計測距離 1m 付近を中心に芝生の受光強度情報に対する影響について検証する。

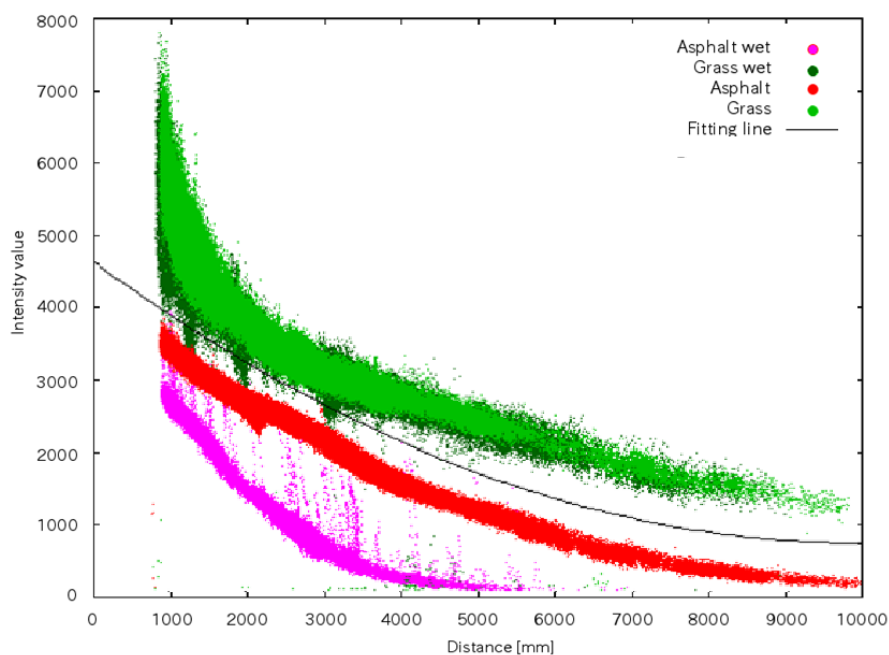


図 5.18: LIDAR 受光強度情報の晴天時と雨天後の比較

(1) 環境光が与える影響の検証

環境光量を変化させた際の LIDAR 受光強度を検証するため、実験室の模擬環境を用いた計測を行う。測定対象には姫高麗芝を使用し、乾燥状態を基準とするため1日以上常温室室内で保管したものを使用した。環境光量の計測は Light Meter HS-1010 照度計を使用し、周辺環境光の調整はハロゲン白熱電球の照明を使用した。

図 5.19 は、環境光 0lx と 5000 lx の時の姫高麗芝の受光強度と距離の関係を示している。図 5.20 は、環境光を 0lx から 5000lx の間で変化させた時の姫高麗芝の平均値を示している。姫高麗芝の受光強度の平均値の変化は、周辺環境光量の増加に伴い増加する傾向が確認された。この増加量は、素材ごとに異なると考えられる。

図 5.21 は、環境光を 0 lx から 5000 lx の間で変化させた時の標準偏差を示している。周辺照度 5000lx の計測の際の 800mm から 1000mm, 1130mm から 1270mm の間において一部例外が見られるものの、周辺照度が増加するに従って分散が大きくなる傾向が見られた。これは、周辺照度が増加することにより計測点で反射する周辺光量の振れ幅が大きくなった影響と考えられる。また、測定距離が LIDAR のレーザ光源に近いほど測定する受光強度の値の分散が大きくなった。この傾向は、LIDAR の照射するレーザ光の面積が近傍であるほど小さく表面の影響を受けやすいためと考えられる。

検証データを元に、周辺環境光の影響を補正する補正式導出のためのデータを収集した。図 5.22 は、測定対象領域において周辺環境光を変化させた際、0lx を基準とした時の平均値の変化量を示している。エラーバーは、照度毎の計測距離 800mm から 1400mm の間での 100mm 刻みの標準偏差を示している。照度の平均値に対して対数近似を行うと、照度 l に対する LIDAR の植生をスキャンした際の変化量の関係式として、

$$g_L(l) = \begin{cases} 255.564 \ln l - 1423 & (l \geq 261.93) \\ 0 & (l \leq 261.93) \end{cases} \quad (5.11a)$$

$$(5.11b)$$

が得られた。以上の結果から、日照の影響を考慮して適切な分離曲線を決定するためには、周囲光を測定するためのセンサを用意し補正を加えることで、より正確な検出を行うことが可能である。

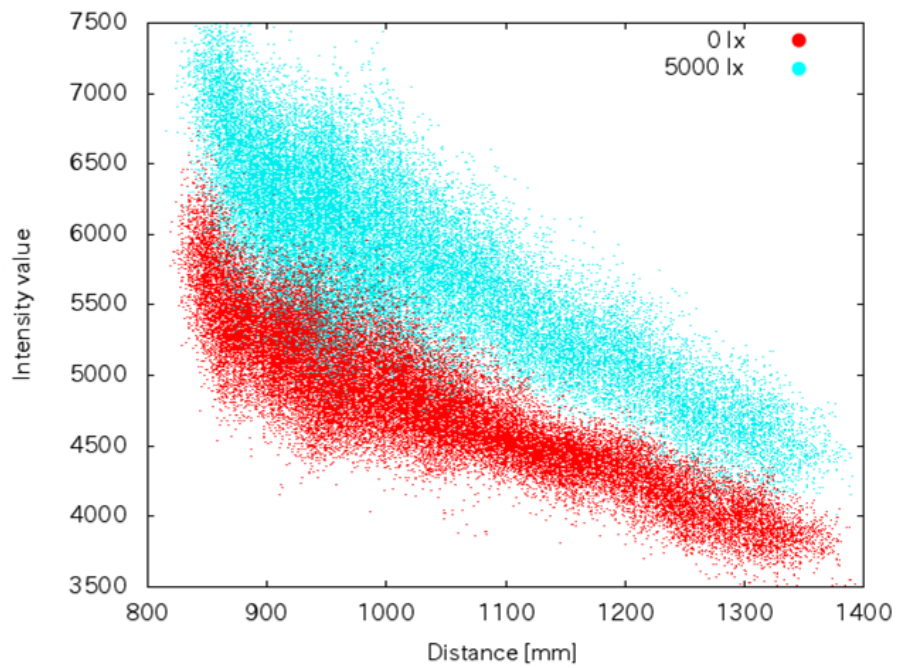


図 5.19: 周辺照度の異なる環境における姫高麗芝の受光強度値の変化

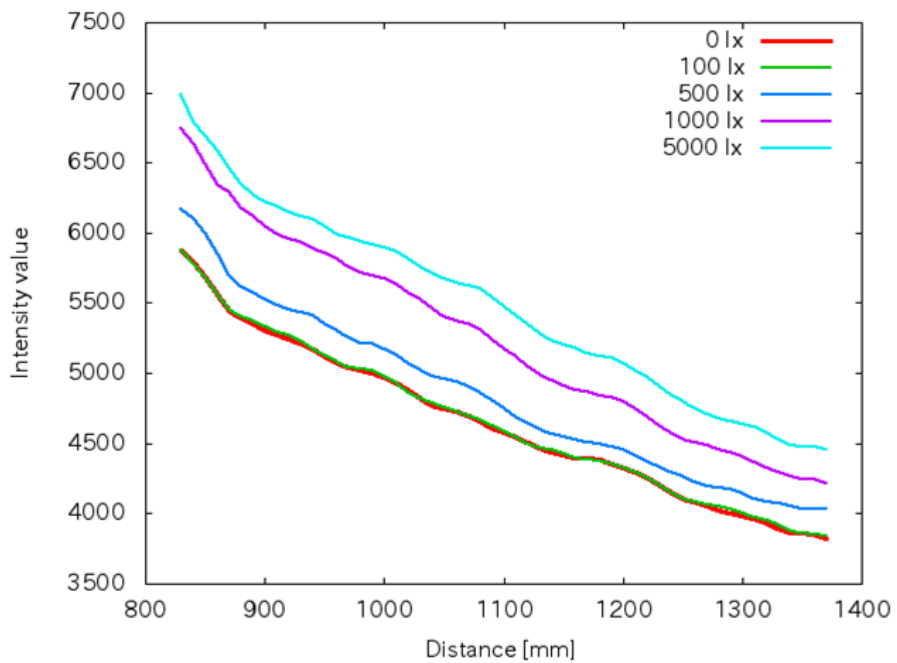


図 5.20: 周辺照度を変化させた際の各距離における受光強度値の平均値

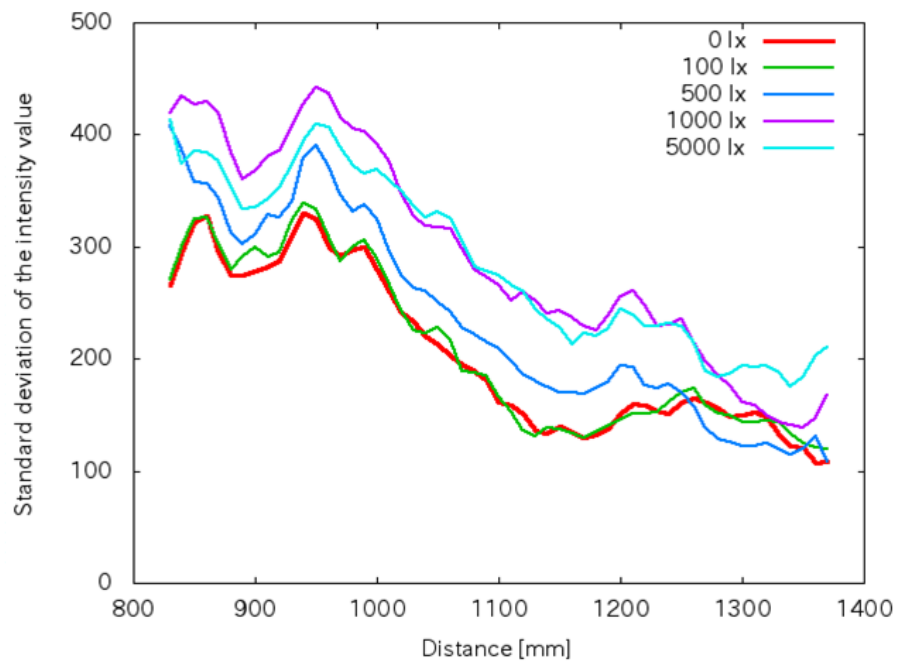


図 5.21: 周辺照度を変化させた際の各距離における受光強度値の分散

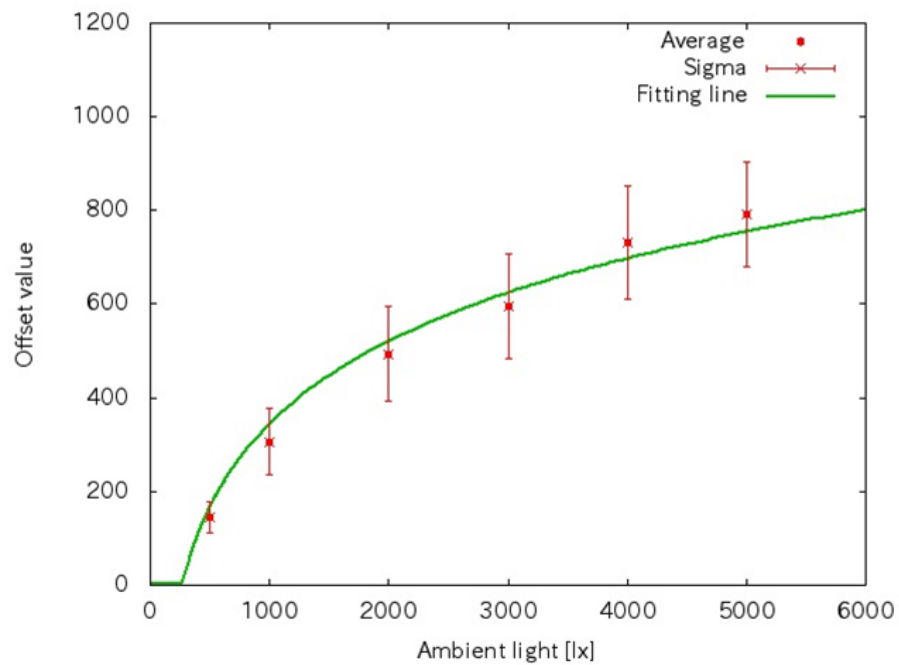


図 5.22: 0lx 基準とした各照度における受光強度値のオフセット量

(2) 湿潤条件が与える影響の検証

測定対象の濡れ具合が受光強度値に及ぼす影響について検証するため、実験室の模擬環境での計測を行なった。実験室内の照度は蛍光灯を用いた照明を使用して、約 100 lx に設定した。計測対象は乾燥状態と湿潤状態を準備した。乾燥状態の測定対象は 1 日以上室内常温保管したものを使用し、湿潤状態は対象を水没させた後のものを使用した。

図 5.23 は姫高麗芝の乾燥と湿潤状態で計測した受光強度を示している。赤点は乾燥状態、緑点は湿潤状態の測定点を示している。図 5.24 は、赤線と緑線は平均値を、青線とマゼンダ色線は標準偏差をそれぞれ示している。湿潤状態の測定対象は乾燥状態の対象に比べ受光強度値が低下する傾向が確認された。また、乾燥状態に比べ湿潤状態は若干分散が拡大する傾向も確認された。乾燥状態を基準とした湿潤状態の低下量は、測定距離 800mm から 1400mm の間において平均 200 であるという結果を得た。よって、測定対象の乾湿状況を示す変数として w を用い、乾燥している場合を $w = 0$ 、湿潤状態を $w = 1$ とした時、

$$g_w(w) = -200w \quad (5.12)$$

と与えられる。湿潤条件の判定は、計測するオペレータの判断によって変数を変更する。今後、正確にこの問題を検証するために物体の水分含有量を測定する手段を得ることが必要である。

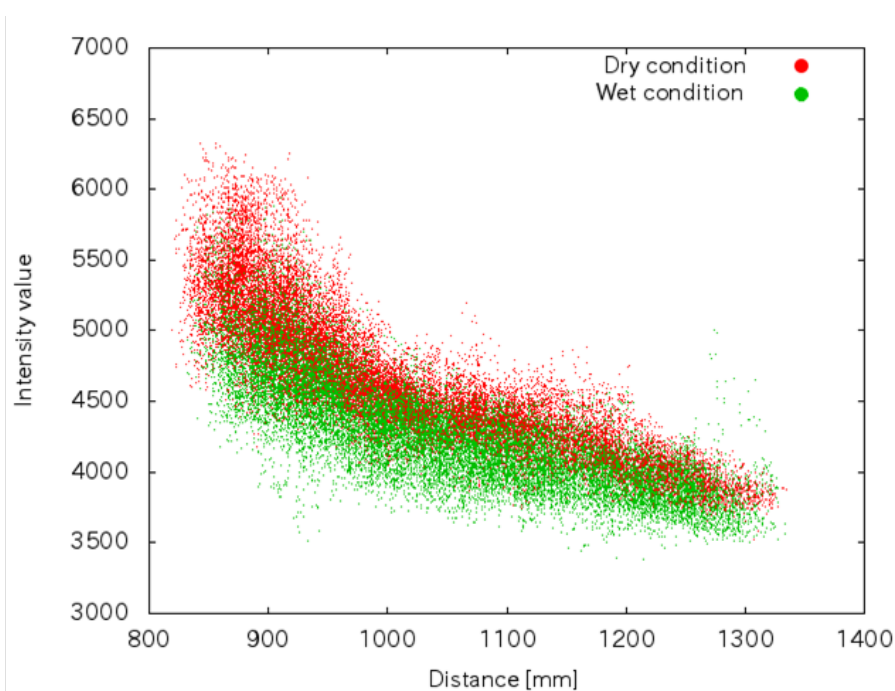


図 5.23: 湿潤条件の異なる環境における姫高麗芝の受光強度値の変化

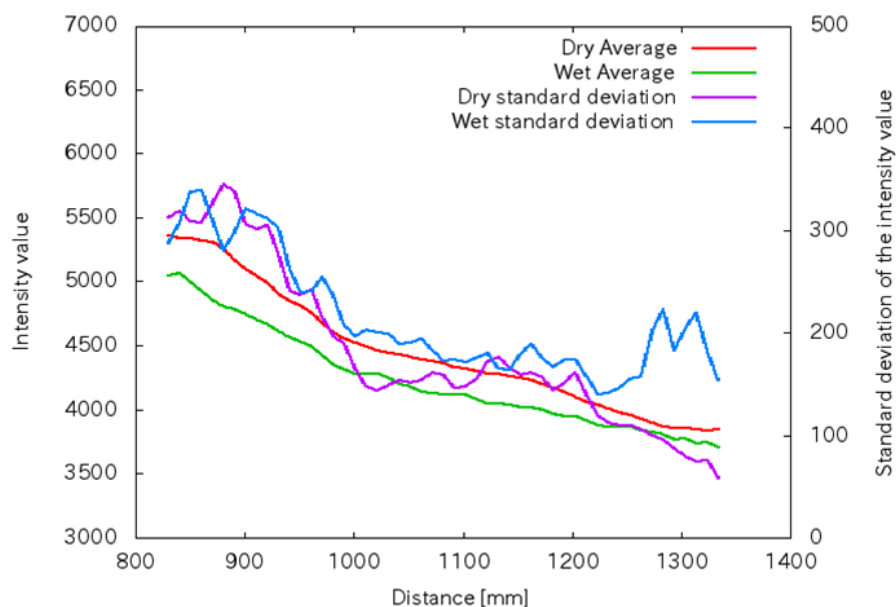


図 5.24: 湿潤条件の異なる環境における受光強度値の平均値と分散

(3) 周辺環境の変化に応じた分離曲線の補正式

周辺環境光と計測対象の湿潤条件が変化しないという条件下において、植生の受光強度の下限值を示す点列は、式 (5.5) の様に与えられる。よって、この点列を用い任意の関数に当てはめ、式 (5.5) を最小化することで、植生の受光強度の下限值を示す曲線が得られる。周辺照度が $l = 0$ 、湿潤条件が $w = 0$ の時の下限値の近似曲線を $f(r)$ とすると、周辺照度 l 、湿潤条件 w における下限値 $f'(r, l, w)$ は、

$$f'(r, l, w) = 3146 + g_L(l) + g_W(w) \quad (5.13)$$

となる。よって、この式を式 (5.10) の $f(r)$ と置き換えることで、周辺光量及び計測対象の湿潤条件が変化した場合でも $Normalized > 1$ であれば植生と判定することが可能となる。

5.4.3 周辺環境の変化を考慮した分離曲線による障害物の判定

本項では、屋外において異なる環境条件下で計測された植生の受光強度の下限值を推定する提案手法の有効性を確認する。実験の構成は、図 5.25 に示す条件で行う。計測は、二次元 LIDAR である UTM-30LX-EW（北陽電機製）を搭載したチルト式三次元 LIDAR を用いて行う。周辺照度の測定は、LIDAR 付近に配置した照度計を用いて行う。

図 5.26 は、基準となる植生の受光強度の下限值を設定するため、2013 年 12 月 27 日に防衛大学校学理工学 4 号館中庭の草地で計測した結果を示している。この時の環境条件は、周辺の照度 5000 lx で、観測対象は湿潤状態であった。図 5.26 の赤点は受光強度と距離の関係を示し、緑点は距離間隔毎の平均値、青点は式 (5.5) から求めた下限の点列であ

る。本実験では簡単化のため、計測距離 900mm から 1100mm の範囲を重視したデータを用いて定数の下限値を求めた。この範囲の受光強度情報のサンプル点の傾向から、図 5.26 中の青点に対して定数関数で導出した結果、

$$f'(r, 5000, 1) = sp^\alpha = 3740 \quad (5.14)$$

が得られた。式 (2.11) より $f(r)$ は、

$$f(r) = 3740 - (g_L(5000) + g_W(1)) = 3146 \quad (5.15)$$

と求められる。よって、本実験の受光強度の分離曲線は以下の式により与えられる。

$$f'(r, l, w) = 3146 - (g_L(l) + g_W(w)) \quad (5.16)$$

導出された補正式 (5.16) を用いた検出評価実験は、計測対象を乾燥状態に維持した状態で周辺照度条件が変化した場合と、周辺照度が同一の環境で計測対象の乾湿条件を変化させた場合に分けて行う。

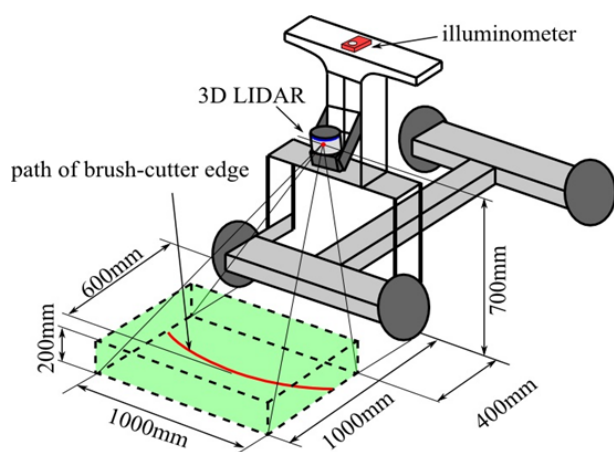


図 5.25: 実験環境及び機材構成

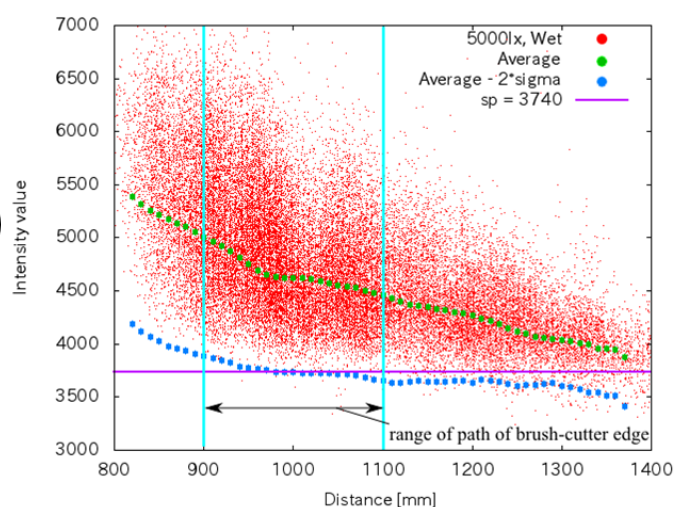


図 5.26: LIDAR 受光強度情報を基にした植生の受光強度情報下限値の導出

(1) 照度条件が変化した実環境での実験結果

図 5.27 は、照度条件が異なる時間に作業領域内に置かれた障害物の検出を試みた時の実験環境を示している。計測対象の植生は、2013 年 12 月 29 日に防衛大学校敷地内にある一様に刈揃えられた乾燥状態の芝生を用いた。

図 5.28 は、それぞれの照度条件で LIDAR が取得した反射強度情報とその時の距離の関係を示している。赤色は図 5.27(a)，緑色は図 5.27(b) の環境で収集したデータである。青色とマゼンダ色の線は式 5.16 から推定した植生の受光強度の下限值である。

図 5.29 及び図 5.31 は、図 5.27(a) 及び図 5.27(b) それぞれの観測データを下限値 3900 で判定した X-Y プロットグラフである。緑色は下限値以上で植生と判定され、赤色は石質障害物として判定された計測点である。図 5.29 では、図 5.27(a) に示した写真と等しく石の形状が確認できる。一方、図 5.30 では、石の中央部分に植生として判定された計測点が出現した。これは周囲の照度が上昇したことにより、LIDAR の取得する受光輝度に変化が発生したためと考えられる。

この変化に対応するため式 (5.16) に基づき下限値を再計算したところ、下限値 4183 を得た。図 5.32 は、下限値 4183 で図 5.31 のデータを再判定した結果である。図 5.31 と比較し、石の中央部分に植生として誤判定された箇所がなくなり石の形状がはっきりと確認できるように改善された。一方、下限値 4183 で図 5.29 のデータを再判定したものが図 5.32 である。照度条件が異なる下限値で判定したため、本来の植生部分が石として誤判定されている様子が確認できる。

この様に、LIDAR の近距離で周辺照度の影響を受ける受光強度情報でも外部環境光の計測を行ない、適切な補正を加えることで実環境下の判定に有効であることが確認できた。



(a) Environmental light 5000 lx



(b) Environmental light 15200 lx

図 5.27: 周辺環境照度が変化した同一計測地点の景況

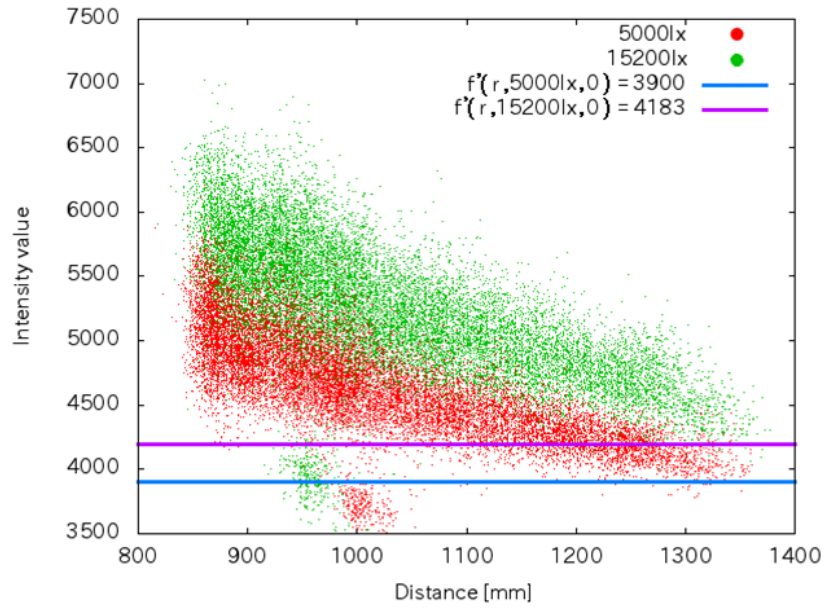


図 5.28: 周辺環境照度が変化した場合の LIDAR 計測距離と受光強度値の関係

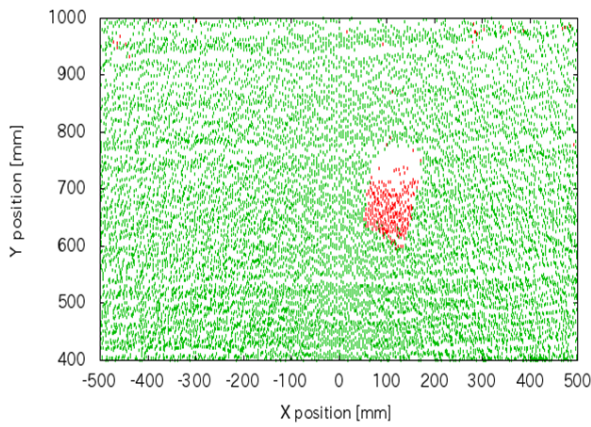


図 5.29: 周辺環境光 5000 lx 時における
閾値 3900 での判定結果

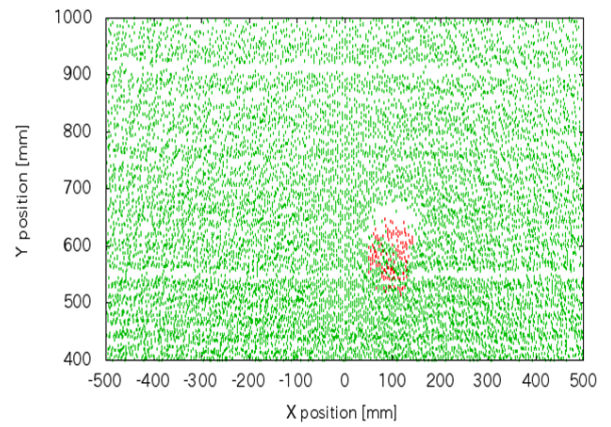


図 5.30: 周辺環境光 15200 lx 時における
閾値 3900 での判定結果

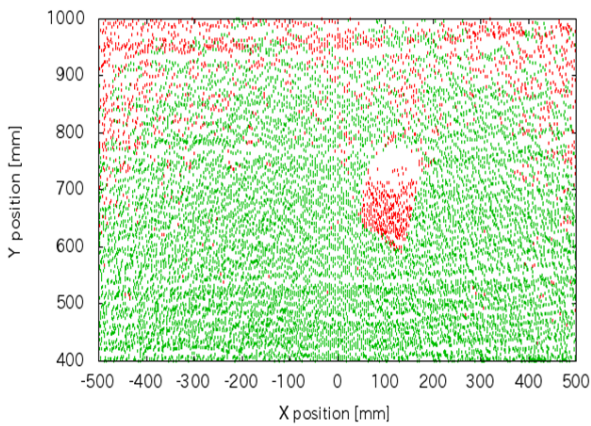


図 5.31: 周辺環境光 5000 lx 時における
閾値 4183 での判定結果

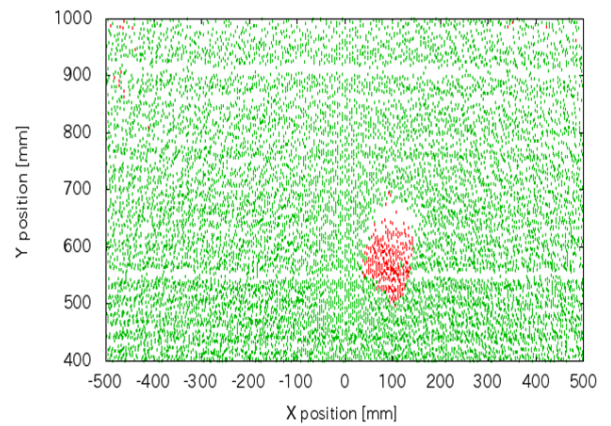


図 5.32: 周辺環境光 15200 lx 時における
閾値 4183 での判定結果

(2) 湿潤条件が変化した実環境での実験結果

図 5.33 は、計測対象の湿潤条件を変化させた状況で作業領域内に置かれた障害物の検出を試みた時の実験風景を示している。計測対象の植生は、2014 年 1 月 8 日に防衛大学校敷地内にある 5cm から 10cm 程度に成長したヨモギを用いた。図 5.33(a) は乾燥状態、図 5.33(b) は湿潤状態の植生と配置した障害物の写真である。計測時のそれぞれの周辺照度は 5000 lx である。

図 5.34 は、それぞれの状況における LIDAR が取得する反射強度情報とその時の距離の関係を示したグラフである。赤色は乾燥状態で計測、緑色は湿潤状態で収集したデータである。青色とマゼンダ色の線は式 (5.16) から推定した植生の反射輝度の下限値でそれぞれ 3900 と 3700 である。観測された植生のデータは、照度条件を変化させた際に計測した芝のデータに比べ分散が大きくなっていった。これらは、対象植物の葉の大きさや植生の密度状況に左右されていると考えられる。しかし、照度条件を変化させた場合と同じく周辺環境の照度 5000 lx と植物が乾燥状態であるとして式 (5.16) より求めた。乾燥状態の植生の下限値 3900 を用いて判定したところ、図 5.35 の結果が得られ、石の形状が確認できる。一方、同場所を湿潤状況にして計測した結果が図 5.36 である。石が置かれた場所以外に多数の誤判定が出現している様子が確認できる。この原因は、乾燥状態から湿潤状態に計測対象が変化したため、LIDAR の取得する反射強度が降下したためと考えられる。

式 (5.16) を用いて計測環境が湿潤状態として求めた新たな下限値は 3700 となり、再度判定した結果が図 5.38 である。図 5.38 は、図 5.36 に比べて誤判定が減少している様子が確認できる。同じく、図 5.33(a) の環境を下限値 3700 で判定した結果が図 5.37 である。閾値が低下したことにより本来石として判定される部分に植生として判定され他箇所が出現しており、適切な下限値から外れている様子が確認できる。

以上の結果から、実際の環境を用いた場合でも計測対象の乾湿状態を判定すれば、条件に応じた適切な補正值を設定する提案手法の使用により検出が可能であることが示された。

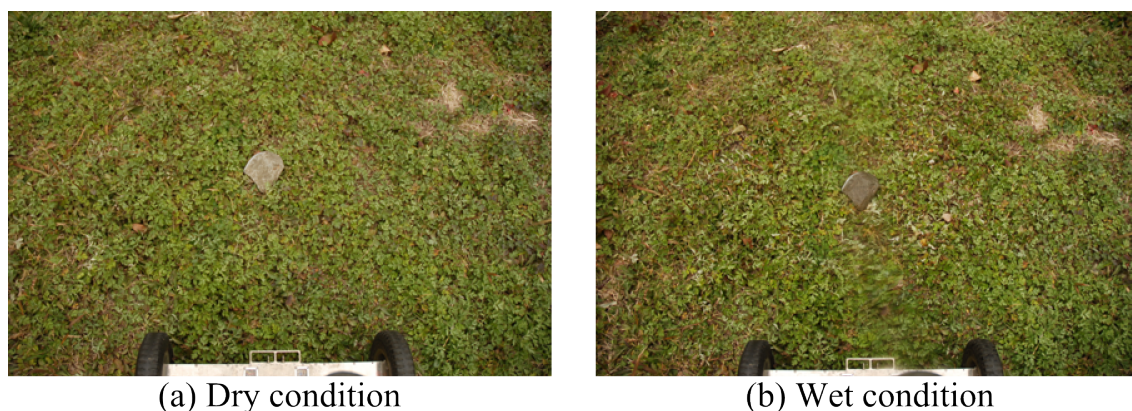


図 5.33: 湿潤条件が変化した同一計測地点の景況

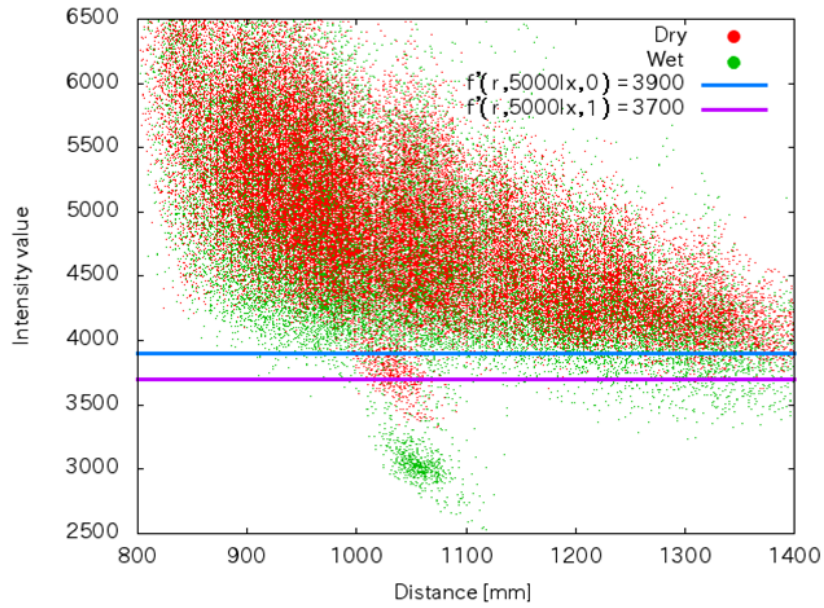


図 5.34: 湿潤条件が変化した場合の LIDAR 計測距離と受光強度値の関係

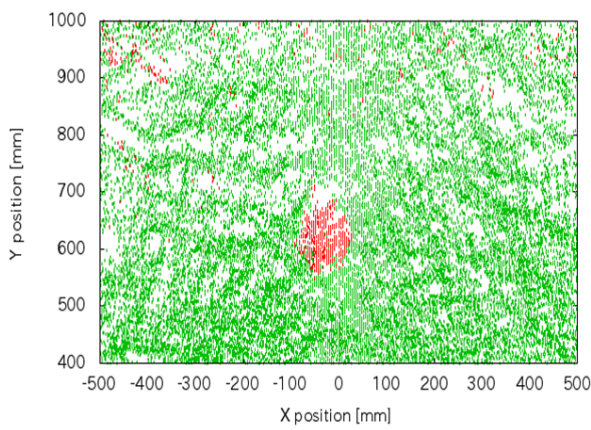


図 5.35: 乾燥時における
閾値 3900 での判定結果

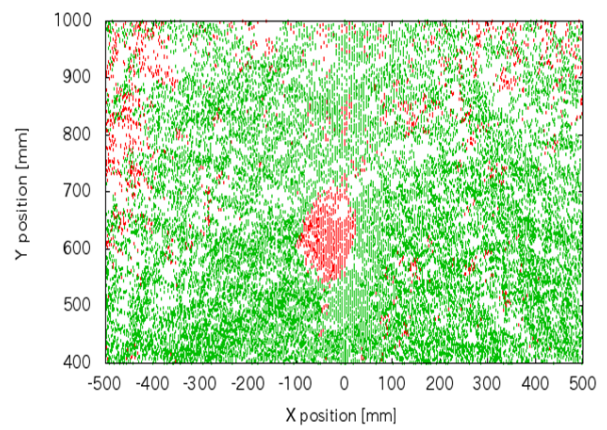


図 5.36: 湿潤時における
閾値 3900 での判定結果

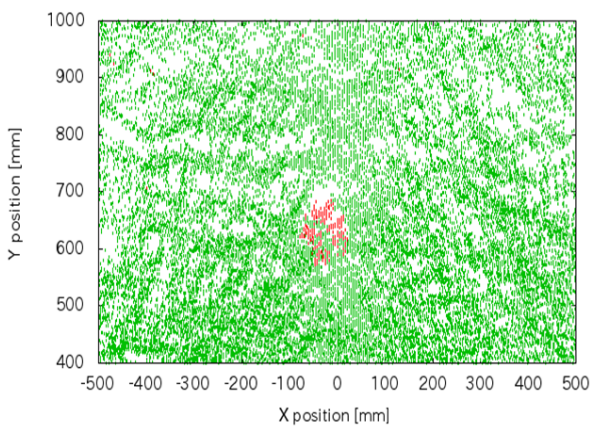


図 5.37: 乾燥時における
閾値 3700 での判定結果

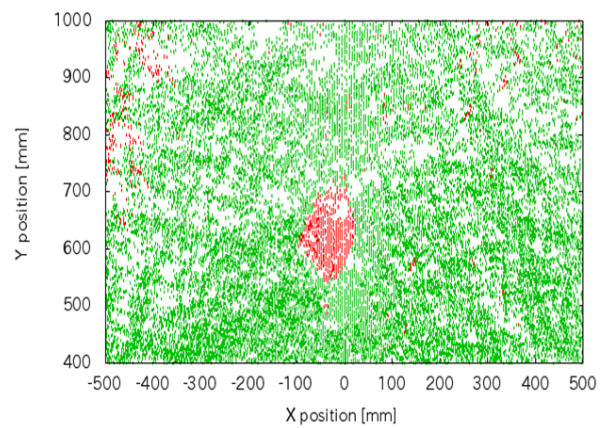


図 5.38: 湿潤時における
閾値 3700 での判定結果

5.5 結 言

本章では、これまでに提案してきた拡張軌道誘導 SSM と自己位置推定手法を屋外不整地において適用し有効性を検証するため、作業負荷が高く刃物を扱う危険な刈払作業を自律的に行う刈払ロボット車両を開発した。刈払ロボットは、アーティキュレート式操舵車両に適用した拡張軌道誘導 SSM と LIDAR 情報による自己位置推定システムを用いて、屋外不整地環境において自律移動実験及び自動刈払作業実験を行った。また、刈払作業中に障害となる雑草内にまぎれた石質障害物の検出を LIDAR の受光強度情報によって検出を試み、次の結論を得た。

- LIDAR を用いた自己位置推定手法に、アーティキュレート式ロボット車両に適用した軌道誘導 SSM を応用することで、アスファルト路面などの都市環境とは異なる雑草を有する不整地環境における走行に活用可能であることを確認した。ただし、屋外不整地環境は整備された市街路面環境と異なり不定量のタイヤスリップが発生する可能性が高く、速度指示値に対するスリップ監視又は従輪によるオドメトリデータ取得等による対策が必要である。
- 走行結果の分析から、LIDAR を用いた自己位置推定手法とアーティキュレート式ロボット車両と軌道誘導 SSM を用いた場合、WPL に対する走行軌道の誤差は約 0.2m であった。この誤差は、環境地図が 10cm 格子のグリッドで構成されていることから最小誤差での走行が実現できている。このため、この誤差を考慮し約 0.2m のオーバーラップを設けた刈払作業の走行経路を設定すれば刈残しを発生させずに作業を行うことが可能である。
- LIDAR の計測距離情報と受光強度情報を用いた分離曲線の設定のためには、事前に素材ごとの受光強度値サンプルを収集しそのばらつきを考慮することでシステムティックに分離曲線を設定することができる。
- 近距離で計測した LIDAR の受光強度情報は、周辺環境光量及び計測対象の湿潤条件に影響を受けることがわかった。これらの外乱による影響を補正するために、光量及び対象の湿潤条件を考慮した補正項を与えることにより、適切な検出が可能である。

今後の課題は、刈払作業時の動作計画を効率的に行ない、任意の刈払作業範囲を指定することでアーティキュレート式車両の軌道計画を自動的に事前作成するとともに、作業中に刈残し発生を検出し再作業を行うソフトウェアの開発を行う必要がある。また、今回提案した石質障害物を検出する手法を用いてより錯雑した作業環境で刈払ロボットが適切に動作するよう改善を図る必要がある。

参考文献

- [1] 国民生活センター, 刈払機 (草刈機) の使い方に注意, http://www.kokusen.go.jp/news/data/n-20130704_1.html
- [2] 農林水産省, 農林水産技術会議, 農作業の軽労化に向けた農業自動化・アシストシステムの開発, <http://www.s.affrc.go.jp/docs/project/information/ashisuto.htm>
- [3] Defense Advanced Research Projects Agency, The DARPA Urban Challenge, <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>
- [4] 岐阜県情報技術研究所, http://www.imit.rd.pref.gifu.lg.jp/research_guide.php
- [5] 石川和良, 青山元, 関淳也, 岡村三男, 石村左緒里, 尾崎功一, 横田和隆, 山本純雄, 屋外清掃ロボットの実用化, 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 6 (2007), pp. 802-812.
- [6] Noguchi, N., Reid, J., Will, J. and Benson, E., Vehicle Automation System Based on Multi-Sensor Integration, American Society of Agricultural Engineers Meeting (1998), Paper No. 983111.
- [7] 木瀬 道夫, 野口 伸, 石井 一暢, 寺尾 日出男, RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第 2 報) : 作業計画マップによるほ場作業の自律化, 農業機械学会誌, Vol. 63, No. 5 (2001), pp. 80-85.
- [8] Batava, P., Roth, S.A., and Singh, S., Autonomous Coverage Operations in Semi-Structured Outdoor Environments, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2002, (2002).
- [9] 富士重工業 屋外自律走行ロボットシステムを開発, https://www.fhi.co.jp/news/01_7_9/01_07_11.htm
- [10] 川上 俊明, 小林 浩, 山村 誠, 丸山 修平, ロボット芝刈り機 Miimo の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.2 (2013), pp.52-57.
- [11] Robomow, <http://www.robomow.com/en-USA/products-usa>
- [12] 国民生活センター, 刈払機 (草刈機) の使い方に注意, http://www.kokusen.go.jp/news/data/n-20130704_1.html
- [13] 伊達央, 滝田好宏 “自律移動ロボット Smart Dump による実世界環境走行実験 : 歩行者環境における人の群れ行動による影響と対策”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.3(2012), pp.305-313
- [14] 大田順, 倉林大輔, 新井民夫, “知能ロボット入門”, コロナ社, (2001)
- [15] 加藤大示, 稲垣詠一, 小森谷清, “環境走査型ロボットシステム 未走査領域を考慮した経路計画と移動制御実験”, ロボティクスシンポジウム予稿集 12th, (2007), pp 447.347

第6章 アーティキュレート式ロボット 車両による移動支援と人物探索

6.1 緒言

日本は高齢化が進んだ国の一つであり、今後一層の高齢者人口の増加が予想される。特に脚部の運動能力が低下した場合、外出回数が減少し社会参加の機会が失われることになりかねない。この様な背景から経済産業省支援のもと NEDO により「生活支援ロボット実用化プロジェクト」[1] など、高齢者・障害者の自立を支えるロボット技術に注目が集まっている。

移動支援に関する分野では、これまでに電動車いすや電動カート等が主に用いられてきた。電動車いすは、高齢者の移動をサポートすると同時に重い荷物も軽易に運搬することが出来る。しかし、これらの車両は、10 度以上の坂道や 5 度程度の傾斜地の横断は走行を避けることが推奨されており、段差や溝等走行困難な箇所も市街地には多数存在する。このような路面環境を高齢者に適切に判断させつつ運転させることは、使用者にとって負担であると考えられる。また、走行を避けるべき場所や困難な場所に誤って侵入したことによる、転倒・転落等により死亡を含む重大事故が発生している状況が報告 [2] されている。このため、このような支援車両に自律移動性能を持たせることで事故を防止し安全な支援効果が期待されている。

これらの機能の実現のために、走行システムに都市環境内での自律移動を実現してきた自律移動ロボット SmartDump[3] のシステムとアーティキュレート式車両 [4]-[5] に適用した拡張軌道誘導 SSM を組み合わせたロボット車両を開発した。これまでの研究で、人の混在する遊歩道等の都市環境における安全な自律走行の達成を目的とした移動ロボットの研究 [6]-[11] は、多くの研究者によって取り組まれている。実際に人の生活する市街で、安全かつ確実に動くロボット技術の開発・向上を目指すつくばチャレンジ [12] においても様々なアプローチの元に研究が進められている。しかし、つくばチャレンジに参加しているロボットを含む多くの研究は、独自開発又は既成部品の組み合わせによるロボットのみが移動する小型のプラットフォームを採用しており、人間を含む重量物の運搬や牽引の能力に乏しいと考えられる。

一方、人物運搬用プラットフォームを目指して研究された独自開発のロボットを用いた研究 [13]-[15] や、既成のシニアカートや車椅子活用して自律ロボット化する研究 [16][17] が試みられている。だが、これらのロボットのほとんどが対向二輪や前輪操舵方式のロ

ロボット車両であり、障害物回避や旋回時の巻き込みの発生の恐れがあり、多くの人が存在する市街環境では安全確保のため障害物回避のための多くの演算を必要とする。だが、逆相 4WS 車両と同様に内外輪差の発生しない車体中央で屈曲するアーティキュレート式を採用することにより、これらの問題は前進径路上の障害物回避のみで達成される。本章では、アーティキュレート式操舵機構を用いたロボット車両を開発して、つくばチャレンジ 2014 で与えられた課題経路において自律走行と各種課題に取り組み、提案手法を用いて開発したロボット車両の有効性を検証する。

第 6.2 節では、自律移動ロボット車両が屋外環境を走行する上で障害となる段差検出や課題経路中に配置された検出対象を LIDAR 情報を用いて検出する手法について述べる。

第 6.3 節では、人が搭乗し移動支援を可能にする、アーティキュレート式のロボット車両 ” AR Chair ” の構造について述べる。

第 6.4 節では、つくばチャレンジ 2014 の課題経路において、AR Chair を用いた自律移動実験を行い提案手法の有効性を確認する。

第 6.5 節では、本章の結言が述べられている。

6.2 LIDAR 情報の活用による物体検出

6.2.1 地表段差検出手法

移動支援を目的とした自律移動ロボット車両が自律的に市街地を走行する上で、考慮しなければならない事項の一つに都市環境内における微小な段差がある。近年車椅子等の利用を考慮して車道や遊歩道のバリアフリー化がなされてきてはいるが、車輪を用いる移動手段においては小さな段差でも大きな障害となりうる。図 6.1 は、市街経路上に存在している花壇周囲の段差やスロープ両側等の段差の一例である。このような段差をロボットが事前に確認し回避しなければ、安全に目的地までの到達が難しい。このため、図 6.2 と図 6.3 に示すパン式機構を用いた三次元 LIDAR で、地表面の段差の検出を試みる。

LIDAR データを用いた段差検出には、計測点の高さ方向の差を考慮した自動車道路の境界を検出する研究 [19] や LIDAR 受光強度情報を用いたアスファルト路面と芝生境界段差を検出する研究 [20] が行われている。しかし、これらの研究はロボットの側方の段差を検出する手法の提案であった。後藤らの研究 [21] では、階段の下方方向への段差を LIDAR 計測距離から階段の段差高さを閾値として警告を発する視覚障害者向けの支援システムを提案している。同研究は、自律移動ロボット車両に求められる前進経路上の凹凸検出の目的に合致するが、段差検出の手法がクラスタ解析の重心法を用いているため、屋外空間にある緩傾斜面や多数の凹凸等が存在した場合、誤検出の発生が予想される。よって、本研究では、LIDAR で取得するスキャン 1 回分のデータから、緩傾斜面を除外しつつ移動障害となる凹凸を検出する手法を用いる。以下にそれらの要領について述べる。



(a) roadside curb



(b) slope road

図 6.1: 市街に存在するロボット車両の障害になる段差の一例



図 6.2: パン機構に配置して構成した三次元 LIDAR の外観

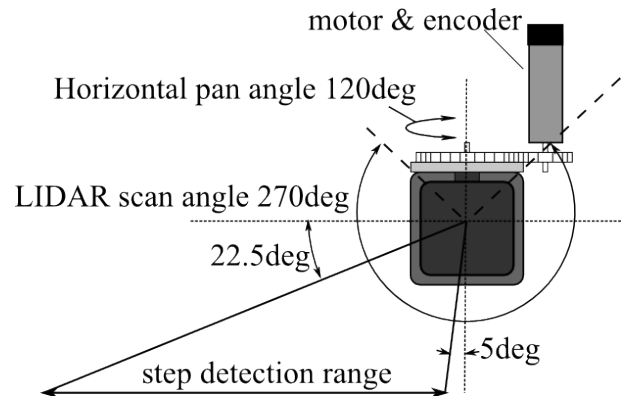


図 6.3: パン式三次元 LIDAR の構成

(1) 凹部検出要領

三次元 LIDAR を用いて地表面の計測を行った場合、地表面が一様な水平であれば隣接するスキャン点の相互の距離は事前に予測することが可能である。この特性を用いた凹部の検出要領を示したものが、図 6.4 である。図中に青色で示されたスキャン点を基準とし、地面が一様な水平であった時、次に得られるスキャン点の位置は黒色で示されたスキャン点となる。一方で、実際に測距された点が赤色で示されたスキャン点であった場合、青色のスキャン点との距離は黒色のスキャン点に比べ大きくなる。この 2 点間の高さの差を許容することの出来る緩傾斜面の変化割合以上であれば、移動障害となる計測点として青色で示されたスキャン点位置を障害物の開始位置として出力する。この要領を用いて凹部の検出を行なっている。実装においては、誤検出やノイズ除去及び最近傍の凹部検出のためのアルゴリズムを同時に用いている。

同手法を用いて図 6.5(a) に示す環境で階段をスキャンした際の計測結果が、図 6.5(b) である。図 6.5(b) では、凹部障害位置として検出されたスキャン点位置を赤色で示している。緑色点は凸部障害位置であり、検出手法は後解説する。検出結果からは、凹部障害位置として示された赤色の点が階段のエッジ部分に対応している様子が確認できる。

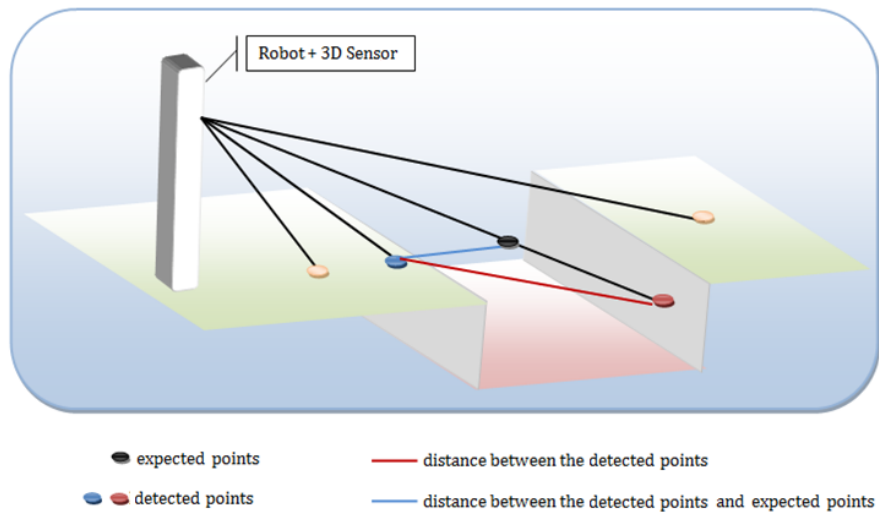


図 6.4: 凹部検出要領

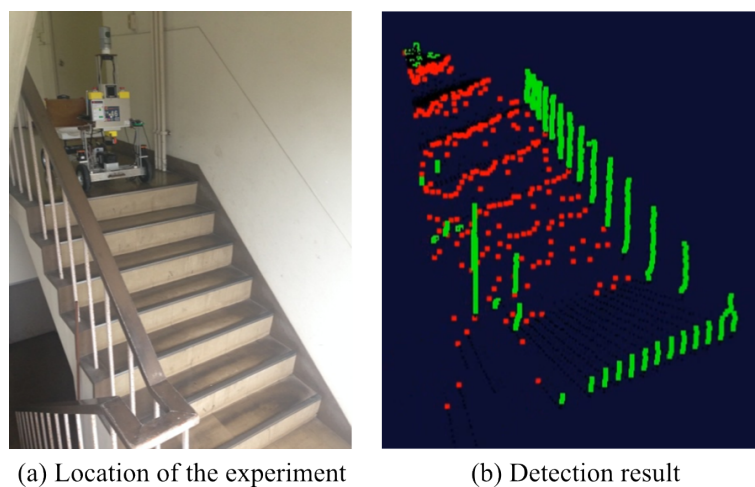


図 6.5: 凹部検出の状況

(2) 凸部検出要領

凸部検出要領についても、凹部を検出した要領を踏襲して実装することが考えられる。しかし、凹部検出のアルゴリズムを凸部で用いた際に、計測距離が一つ前の計測点と大きく変化しない場合や、上部がせり出した形状の障害物をスキャンした際に誤検出及びノイズが発生するという結果が得られた。よって、スキャン点の位置関係から求められるベクトル方向を基準とした判定を行う。

図 6.6 は、凸部の検出要領の概略を示している。地表面が一様な水平であれば隣接するスキャン点の位置関係が判明しているため、事前に前後のスキャン点がつくるベクトル方向を求めることが可能である。図中赤矢印で示されたベクトルは、水平面を測距した場合に得られるはずだったスキャン点から次のスキャン点に向かうベクトルである。紫色の矢印で示されたベクトルは、現在測距した際のスキャン点から次のスキャン点に向かうベクトルである。基準となる赤矢印のベクトルから方向が大きく異なる結果となった次の点、凸部段差の位置となる。

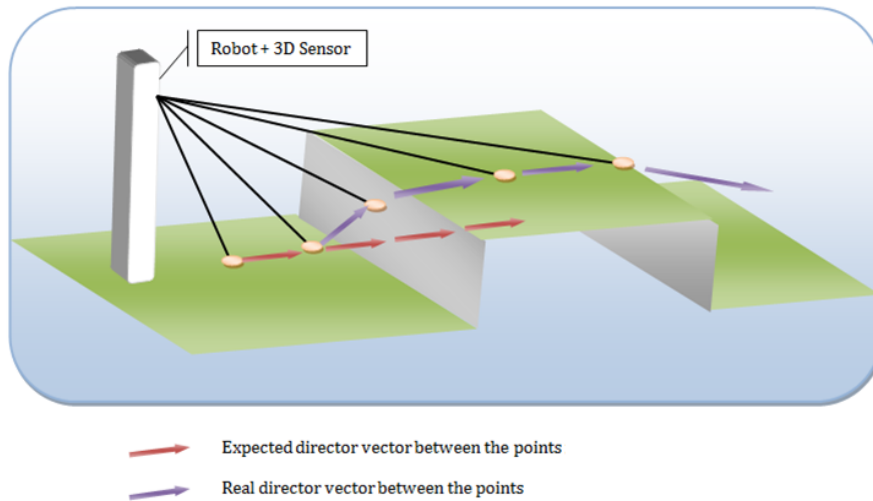


図 6.6: 凸部検出要領

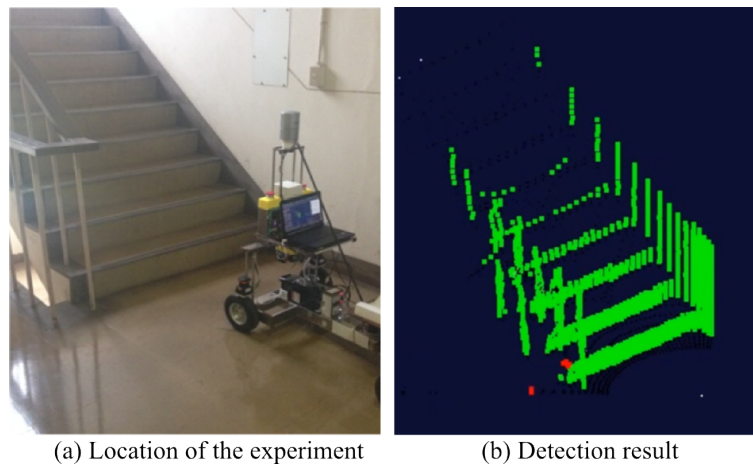


図 6.7: 凸部検出の状況

同手法を用いて図 6.7(a) に示す環境で階段をスキャンした際の計測結果が、図 6.7(b) である。図 6.7(b) では、凸部障害位置として検出されたスキャン点位置を緑色で示している。検出結果からは、凸部障害位置として示された緑色の点が階段ステップの蹴込・蹴上部分に対応している様子が確認できる。また、壁面部分も垂直成分のベクトルを検出するため同時に凸部障害物として認識されていることが確認できる。

6.2.2 クラスタリングによる人物検出手法

三次元 LIDAR HDL-32e の三次元点群データは、垂直に並んだ 32 本のレーザが時計回りに走査することで得られる。この関係を利用し、1 周分のスキャンデータを、縦軸をレーザ光源の番号に割り当て、横軸をスキャン時の角度とした二次元グリッド上に整列させ、二次元距離画像として扱うことで検出対象の大きさを特定する。

(1) 三次元点群情報のクラスタリング手法

図 6.8 は、三次元 LIDAR HDL-32e で取得したデータを取得した環境の模式図を示している。図 6.9 は、図 6.8 で示す環境で三次元点群情報を取得したものを可視化した状況を示している。図 6.10 は、図 6.9 で示した人と物体を検出したデータを二次元距離画像として扱った場合の模式図を表している。各グリッドには LIDAR で取得した計測距離と受光強度情報が記録されている。クラスタリングは、隣接した各グリッドに記録されている距離データ間のユークリッド距離が隣接点として判断できる距離以下のものに同じラベル付け割り当てるラベリング処理 [22] を行うことで実現する。

図 6.11(a) は、図 6.11(b) における人物検出の様子の一例である。LIDAR から取得したデータをクラスタリングし、着座状態の人物及び自転車として検出されたクラスタを四角柱の枠で表している。この手法は整列された点群情報を扱うため、PCL (Point Cloud Library)[23] のセグメンテーションアルゴリズムのように点群内の木構造を新たに探索する必要がないのが特徴であり実時間での人物検出が可能である。

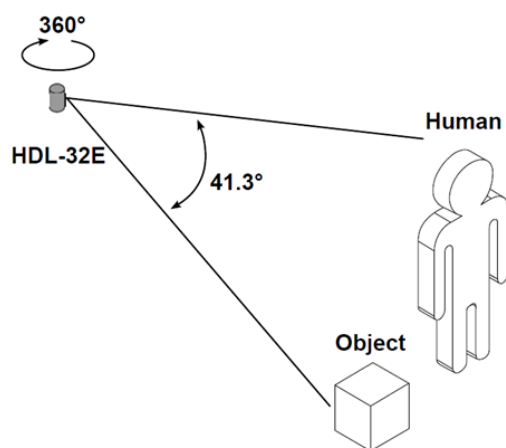


図 6.8: スキャン環境模式図

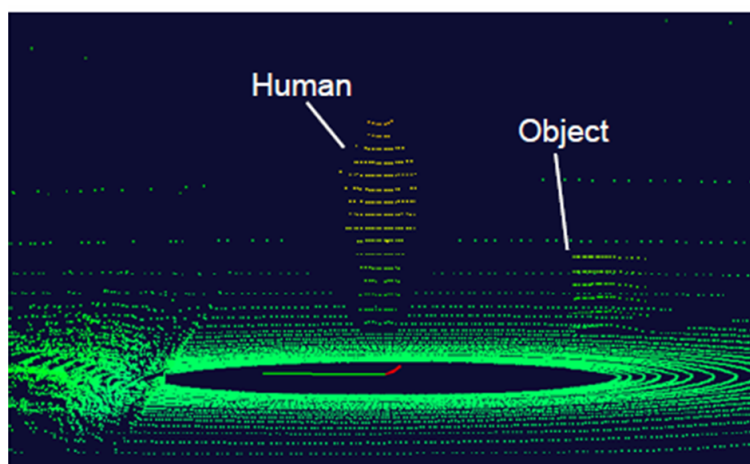


図 6.9: スキャン結果

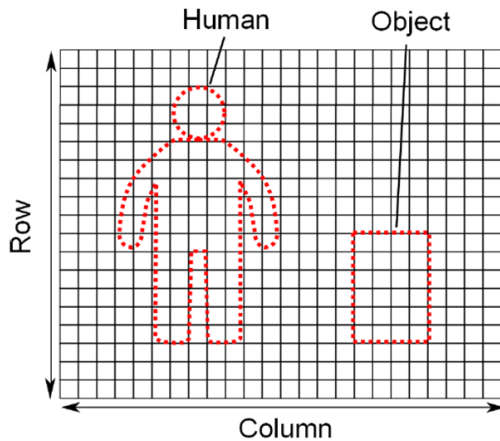
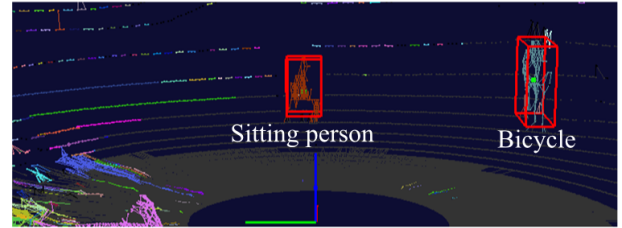


図 6.10: 三次元点群情報を二次元距離画像として扱う場合の模式図



(a) Photo of clustering situation



(b) Result of clustering and detection

図 6.11: LIDAR データのクラスタリングによる物体検出の一例

(2) ヒストグラムフィルタを用いた探索対象位置の確定

三次元点群データのクラスタリングのみではロボットが移動する際のセンサのノイズ、蔽物等による隠蔽や部分的な観測によって一時的に検出されなくなる問題点がある。この問題に対処するため、三次元地図を基準として対象のクラスタが存在した場所を一時的に記録し、クラスタの位置に対してヒストグラムフィルタを適用することにより時間軸上の変化を平滑化する手法により対処する手法 [24] を採用した。

この手法の概略を以下に述べる。目標とするクラスタが検出された場合、クラスタの重心位置にあるグリッドが保持するクラスタの存在確率を更新する。環境地図を基準とした座標 (x, y) における存在確率 lh_s は、検出されたクラスタの幅、奥行き、高さをそれぞれ w, d, h 、目標とするクラスタの大きさの平均値が μ_w, μ_d, μ_h であるような正規分布に従って式 (6.1) のように求めた。

$$lh_s(x, y) = C_s e^{\left(-\frac{(w-\mu_w)^2}{2\sigma_w^2} - \frac{(d-\mu_d)^2}{2\sigma_d^2} - \frac{(h-\mu_h)^2}{2\sigma_h^2}\right)} \quad (6.1)$$

ここで C_s は定数、 $\sigma_w, \sigma_d, \sigma_h$ は標準偏差である。本手法では、実験的に $\mu_w = \mu_d = 0.7[\text{m}]$, $\mu_h = 1.1[\text{m}]$, $\sigma_w = \sigma_d = \sigma_h = 0.13[\text{m}]$ とした。実装した三次元データのクラスタリングとヒストグラムフィルタによる探索対象位置の確定手法の細部は既報 [25] を参照されたい。

6.3 移動支援ロボット車両 ” AR Chair ”

6.3.1 機体構成

図 6.12 はアーティキュレート式ロボット車両 ” AR Chair ” の外観を，図 6.13 は外形を示している．表 6.1 に刈払作業ロボットの性能諸元を示す．AR Chair の車体は，道路交通法施行規則の原動機を用いる身体障害者用の車いすの基準に定められている電動車いすの大きさ [18] に近いサイズで設計される．

AR Chair は，車体中央で屈曲するアーティキュレート方式を採用している．このため，逆相 4WS と同様の機動が可能であり，内輪差が発生しない構造となっている．これは，屋外での自律移動の際，他の操舵方式に比べ障害物との接触を防止した軌道計画をしやすいという利点がある．

駆動方式は，各車輪にモータを配した 4 輪駆動方式を採用すると共に，後部の体幹一カ所にねじれ軸を設けたことにより高い機動性と接地性を確保している．各車軸及び屈曲部の駆動は，ロータリーエンコーダ付 DC モータ RE40 24V 150W (Maxon 製) を使用し，駆動用には 26:1 屈曲部には 285.7:1 ギアボックスを用いている．

周辺環境を観測するセンサには，UTM-30LX (北陽電機製) を 3 台，HDL-32e (Velodyne 製) を 1 台使用している．2 台の UTM-30LX は，前輪上に配置され設置水平面 360 度全周の視界を取得している．1 台の UTM-30LX は，車体前方に設置したパン式機構と組み合わせて三次元 LIDAR を構成し，前進経路上の段差や凹凸を検出するために用いる．HDL-32e は前輪車軸中央上部に配置され，三次元 LIDAR として立体的に 360 度全周の視界を有し，自己位置推定及び人物探索のための環境情報を収集している．

図 6.14 は，自己位置推定に用いる HDL-32e と両舷に取り付けた UTM-30LX によって得られる視界の範囲を示したものである．残り 1 台の UTM-30LX は，前輪車軸中央部にパン式の揺動機構上に設置してパン式三次元 LIDAR を構成し，車両前方の微小段差を計測している．移動距離と姿勢角の検出には，駆動モータに直結されたロータリーエンコーダをオドメトリとして使用している．



図 6.12: AR Chair の外観

表 6.1: AR Chair の諸元

Item	Value
Length	1050 mm
Height	1040 mm
Width	650 mm
Wheel base	900 mm
Tread	585 mm
Weight	31 kg
Drive motor	maxon DC motor RE40 24V 150W × 5
Steering motor reduction gear ratio	285:1
Drive motor reduction gear ratio	26:1
Wheel diameter	150 mm
Power	25V 13.2Ah × 1

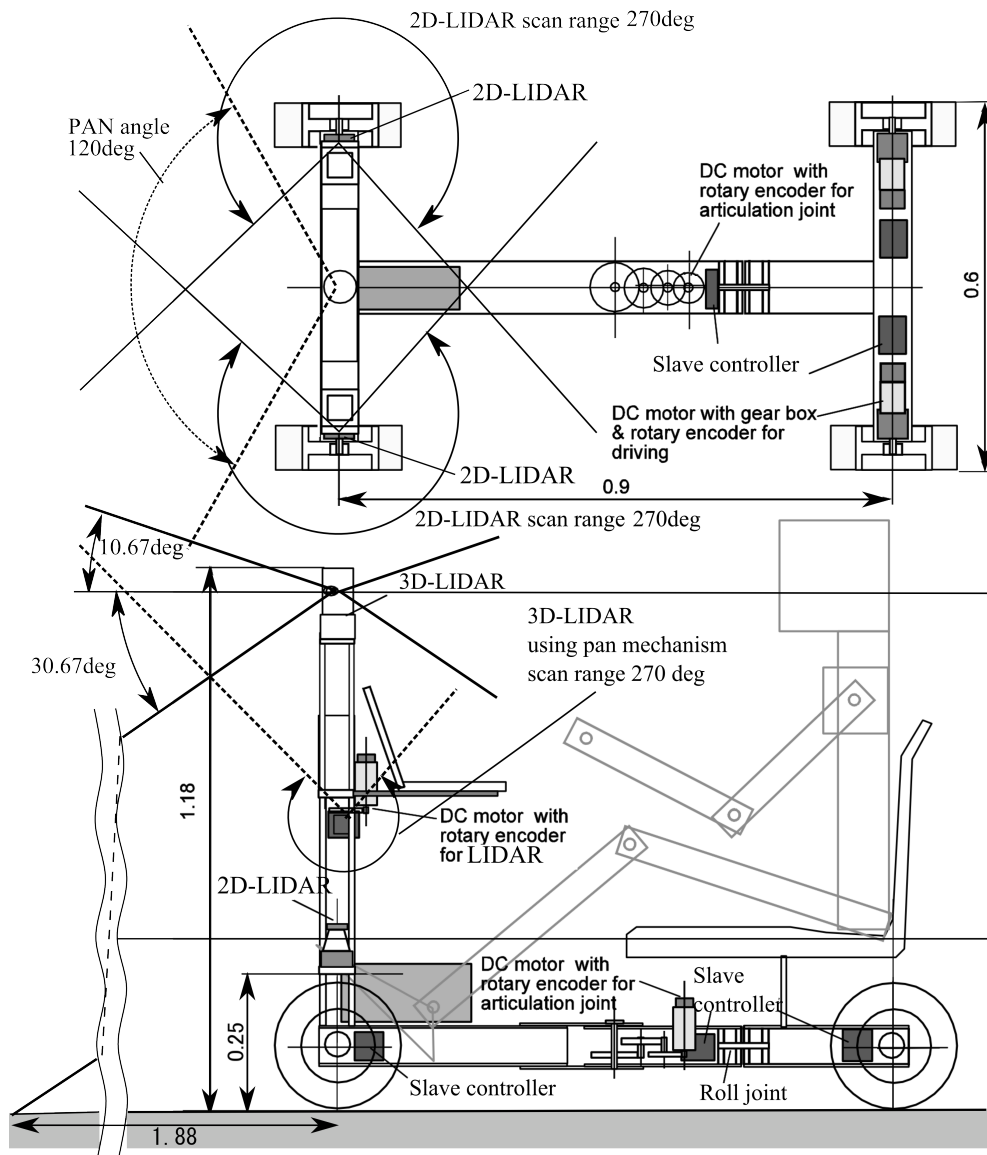


図 6.13: AR Chair の外形

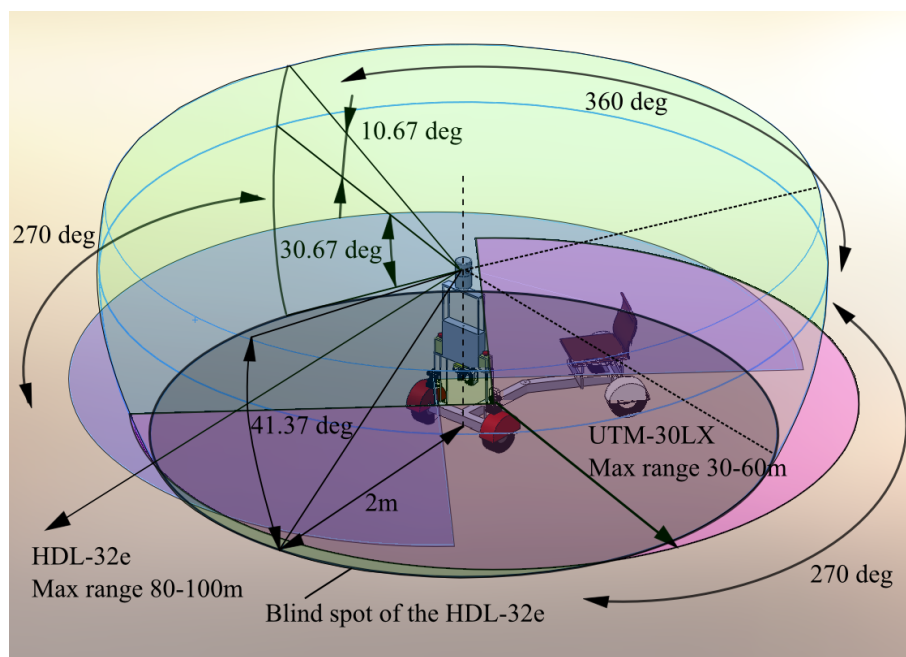


図 6.14: AR Chair の視界範囲

6.3.2 制御システム

図 6.15 は，AR Chair の制御システムの構成を示している．AR Chair の制御システムは，自己位置推定及びナビゲーション用の Linux PC，車体駆動機器制御用の Manual Controller と Slave Controller，及び各種センサで構成されている．Linux PC は，車体に搭載された LIDAR 及び各車輪に直結したオドメトリのデータを統合して，自己位置推定及びナビゲーションを行なう．自己位置推定とナビゲーションに基づいた速度の指令値と屈曲角の目標値を受信し，Manual Controller を介して Slave Controller 内の各モータ制御ユニットに送信する．

ロボット車体の制御は，RX621(Renesas 製) CPU で構成したモータ制御ユニットとマニュアルコントローラにより行われる．図 6.16 は，モータ制御ユニットの構成を示している．図 6.17 は，モータ制御ユニットによる試験中の様子を示している．RX621 (Renesas 製) CPU と XC9572 (Xilinx 製) CPLD により PWM 信号を作り出し，Hブリッジを構成する 4 個の N チャンネル MOSFET を駆動する FET ドライバに送られ，モータを制御している．FET のスイッチングの際に，ハイサイドとローサイドがスルーにならないデッドタイムは PWM 信号の一次遅れ回路を通した信号と組み合わせて作り出しているため，

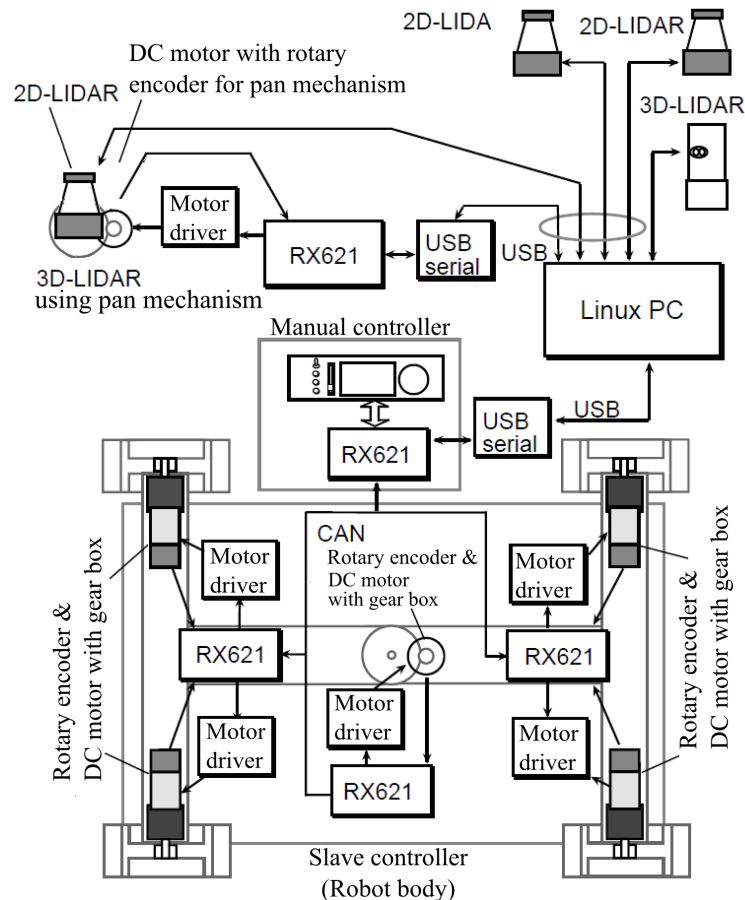


図 6.15: AR Chair の制御システム

抵抗またはコンデンサにより、FET の特性に合わせる方式としている。本ドライバのFETはPWM オフ時に発生する逆起電力の対策として60V100A仕様のを採用し、内部オン抵抗は3mΩであることから大きな放熱器は不要となっている。

Linux PC と Slave Controller 間の通信には、USB シリアル変換器を用いたシリアル通信を用いる。Manual Controller は、Slave Controller 側の各 CPU から車輪の回転数と屈曲角を20ms毎に収集し、Linux PC に送信する。モータ制御ユニットと Manual Controller 間の相互の通信には、自動車等の分野で活用される Controller Area Network (CAN) を用いている。

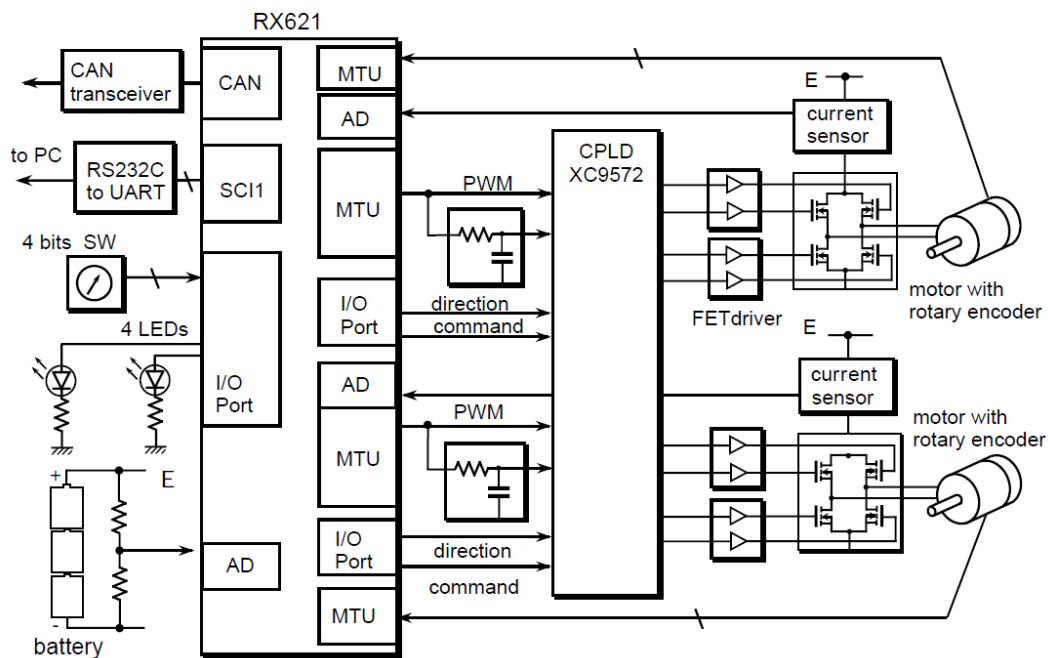


図 6.16: モータドライバの構成

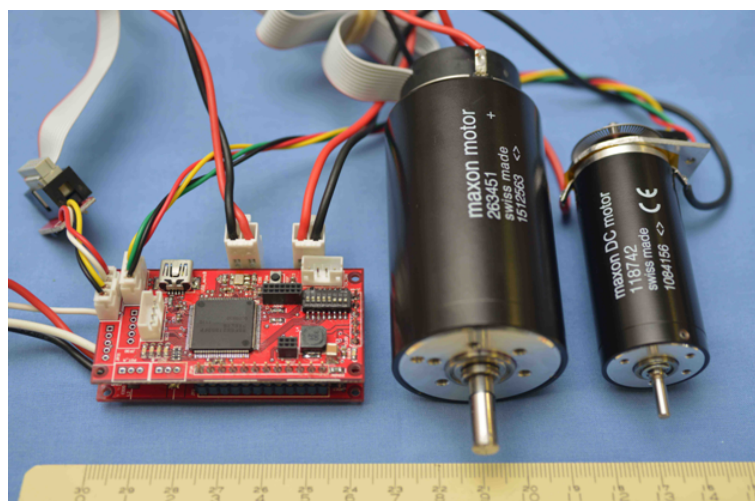


図 6.17: モータドライバの外観

6.4 アーティキュレート式ロボット車両 AR Chair による 自律移動実験

6.4.1 実験条件

本実験では、つくばチャレンジ2014本走行に参加して、アーティキュレート式車両の自律移動プログラムの検証と走行実験を行った。図6.18は、つくばチャレンジ2014において提供されたつくば市大清水公園～駅前広場一連の場所を示している。つくばチャレンジ2014では移動間のロボットが行う課題として、経路途中にそれぞれ人物探索エリアが設けられ、図6.19に示すような服装の椅子に座った人物を計5名発見する課題が与えられた。

自律走行に用いる環境地図 Cuboid Map は自律走行前に作成し、走行経路を決定した WP データを用意している。この際、本走行に用いた WP の距離の合計は約 1400m であった。

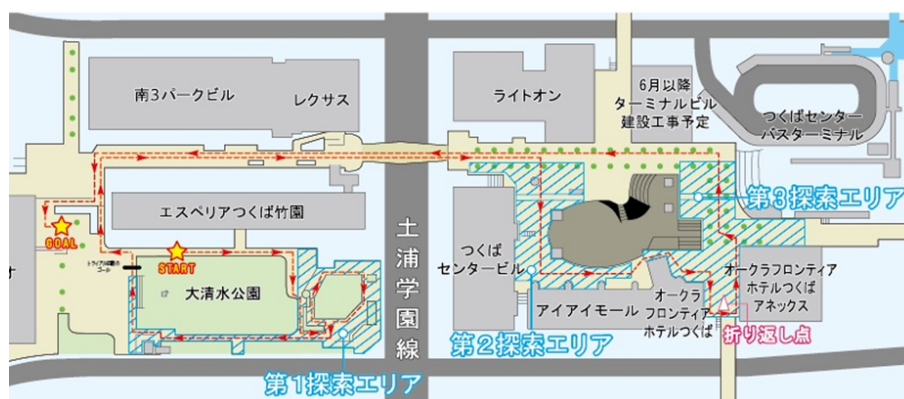


図 6.18: つくばチャレンジ2014 課題経路 (出典：つくばチャレンジ2014)



図 6.19: 探索対象の人物の一例 (出典：つくばチャレンジ2014)

6.4.2 自律走行結果

図 6.20 は、自律走行に使用した環境地図と WP（青線）及び走行軌跡（緑線）を示している。図中紫丸印で示した場所に探索対象が配置された。図 6.21 は、つくばチャレンジ 2014 本走行中の速度、車体屈曲角度、設定された WP からの誤差そして HDL-32e の視野範囲内での探索人物の存在尤度 [25] の最大値を示している。

本走行では、総走行距離 1483m を 42 分で走行を達成した。この間の平均速度は約 0.6m/s であった。走行間は探索した人物に対するアプローチのために一時的に WP から離脱した場合及び第 2 探索エリアにおいて多数の歩行者を回避した場合を除き、WP からの誤差は 1m 以下に抑えられている結果を得た。これらのことから、AR Chair で活用した自己位置推定手法と中央で屈曲するアーティキュレート式車両に適応した拡張軌道誘導 SSM の追従精度が、実際の屋外環境の自律走行において有効であることを確認できた。

図 6.22 は、図 6.20 の Area 1 における人物探索の誤判定と人物探索成功時のアプローチ軌道の詳細を示している。図 6.23 と図 6.24 は、それぞれ図 6.22 における走行速度と車体屈曲角、WP を基準とした走行位置の誤差を示している。当初、図 6.20 の Area 1 では、周囲で見学していた歩行者に接近アプローチが行われた。この原因は、見学者が探索対象と同じ様なクラスサイズを有し、一定時間その場に停止していたため誤判定をする結果となった。図 6.23 から、アプローチ終了後に 2 回後退を行ってコースに復帰している様子は、グラフ中の速度が負値になっている結果から確認できる。その後、Detection target 1 の場所に配置された着座状態の人物を適切に検出し接近アプローチを行った。

図 6.25 は、図 6.20 の Area 3 における Detection target 3a の人物探索成功時のアプローチ軌道を示している。図 6.26 と図 6.27 は、それぞれ図 6.25 における走行速度と車体屈曲角、WP を基準とした走行位置の誤差を示している。Detection target 3a への探索対象へのアプローチは、結果的に次に向かうべき WP が車体の向きと間逆の位置にある状況が発生した。しかし、後退切り返しを 3 回継続することで適切に WP に復帰している様子が確認できる。

図 6.28 は、Area 3 の Detection target 3a 付近の景況を示した写真である。図 6.28 から判るように、Detection target 3a 付近では街路樹が 10cm 程度の高さを持つ縁石によって囲われており、AR Chair の走行の際に適切に回避しなければならない障害物である。これらの縁石に接近した場合は、車両左右に設置した 2D-LIDAR と中央上部に設置した HDL-32e の死角となり確認することが出来ない。しかし、搭載したパン式三次元 LIDAR により縁石で作られるギャップを検出することにより、縁石に接触することなく Detection target 3a の探索対象にアプローチを達成した。この結果から、パン式三次元 LIDAR とベクトル方向を考慮したギャップ検出手法が有効であることを確認した。

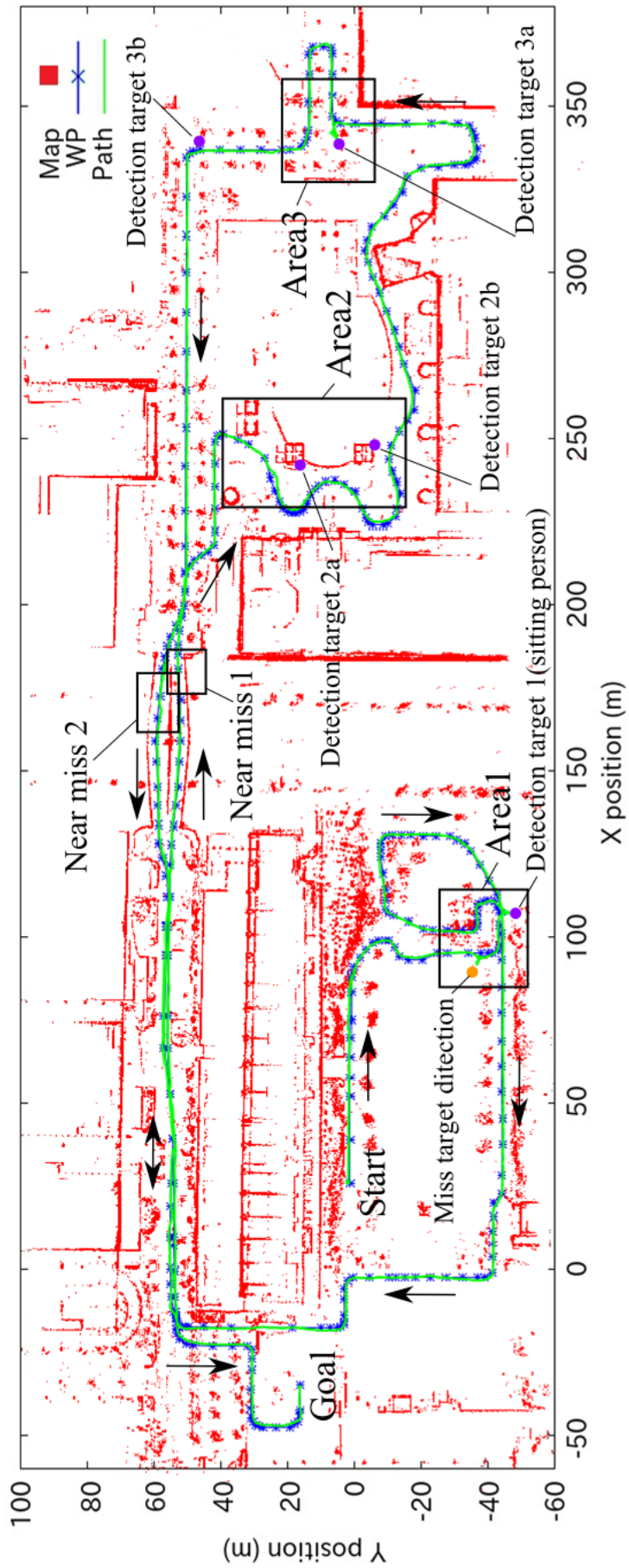


図 6.20: つくばチャレンジ 2014 に使用した環境地図と WP 及び走行結果

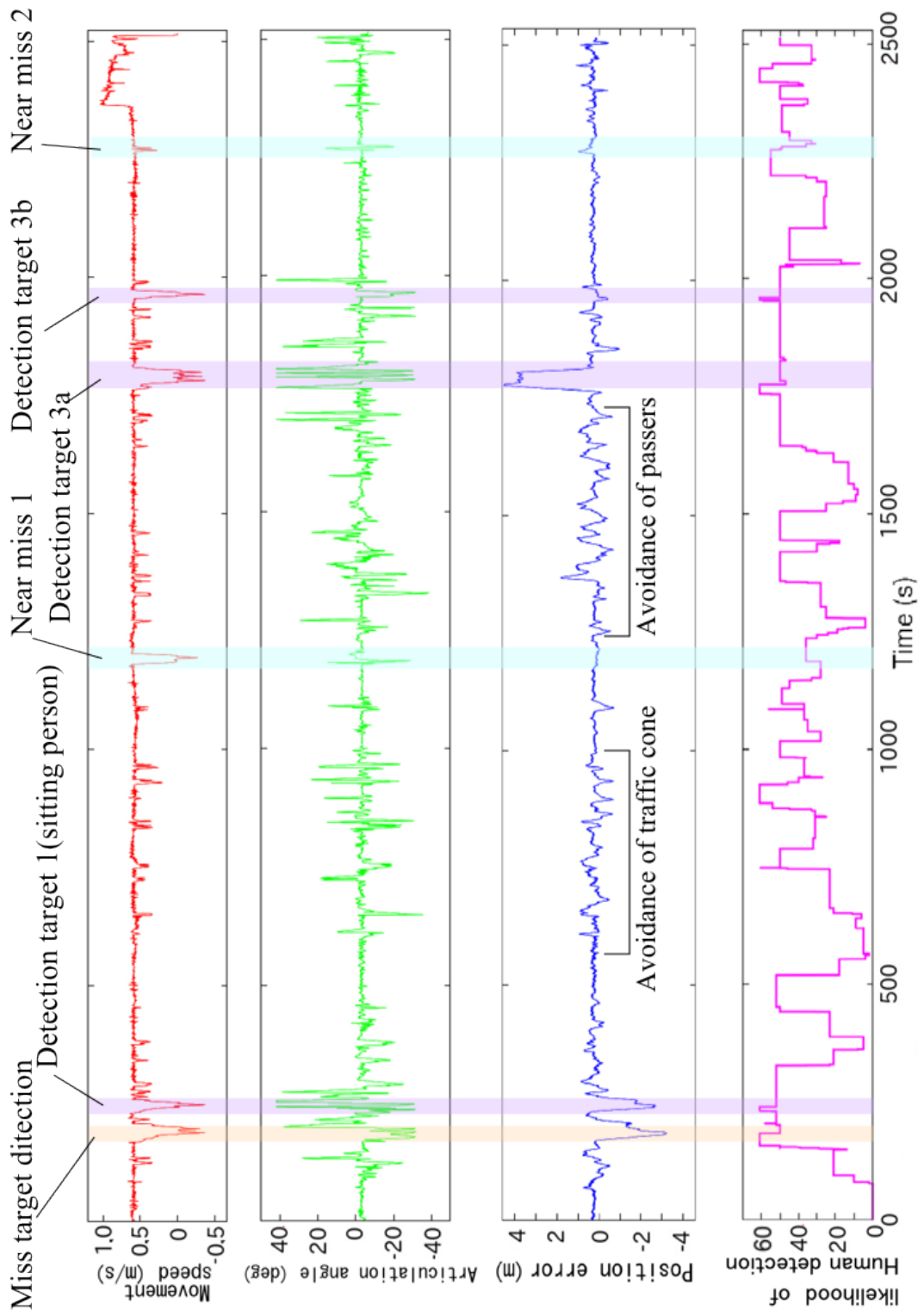


図 6.21: つくばチャレンジ2014 本走行における AR Chair の走行状態

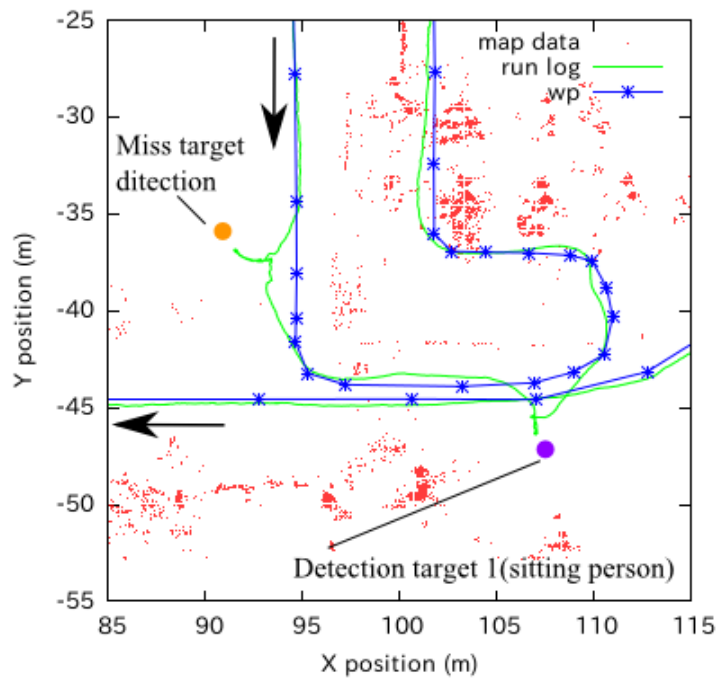


図 6.22: Area 1 における走行軌跡

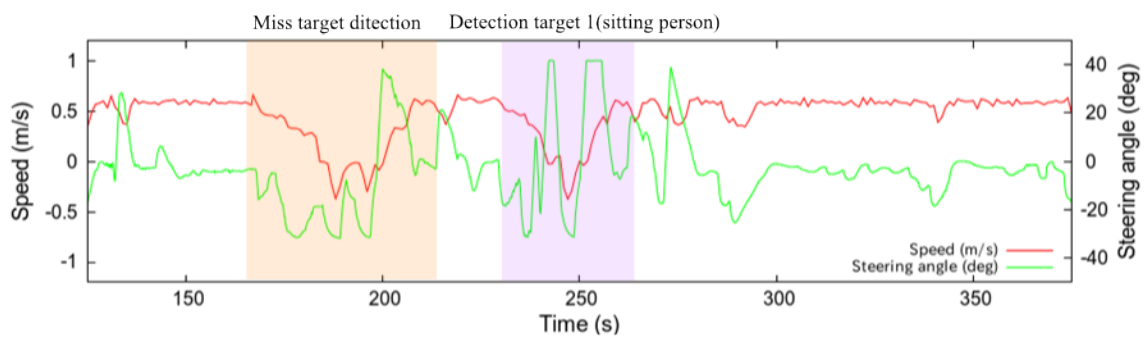


図 6.23: Area 1 における走行速度と車体屈曲角

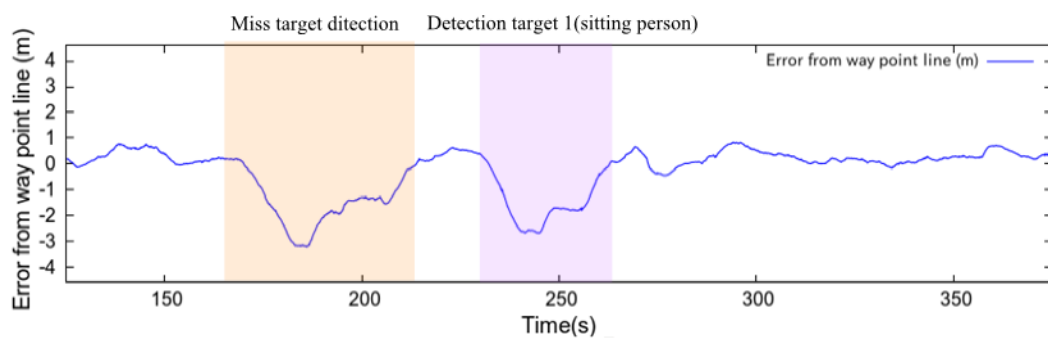


図 6.24: Area 1 における WP からの走行位置の誤差

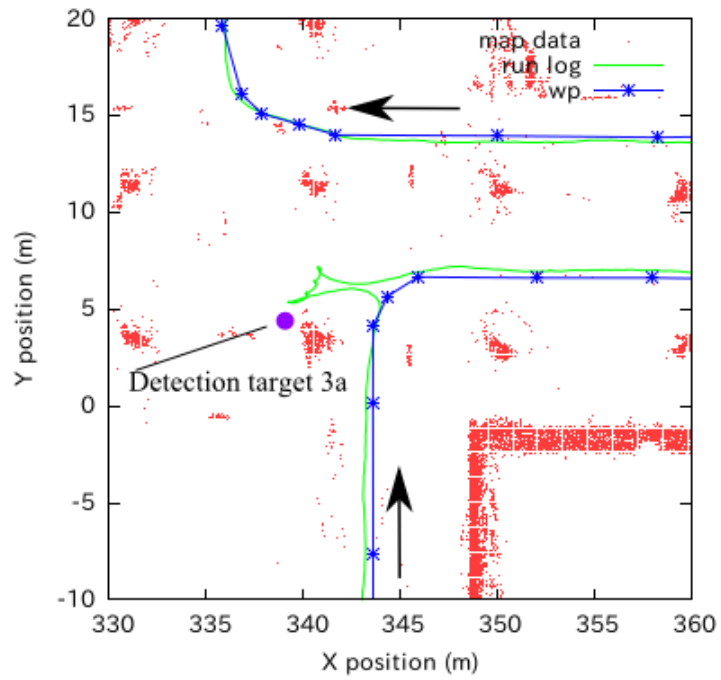


図 6.25: Area 3 における走行軌跡

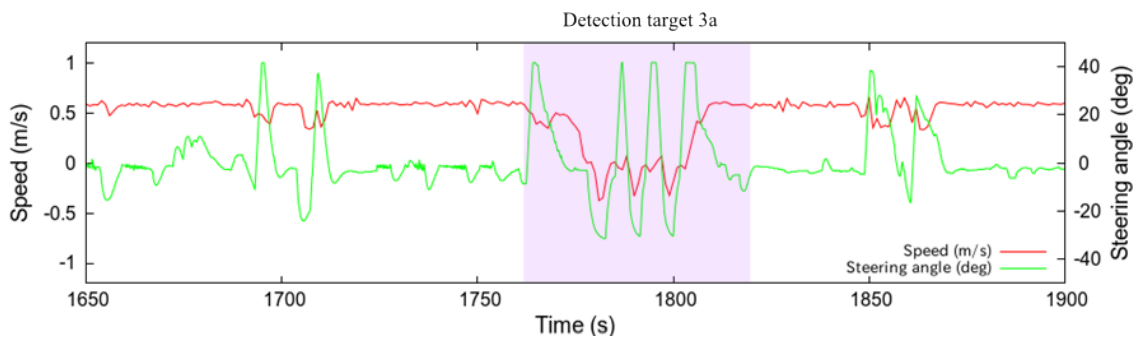


図 6.26: Area 3 における走行速度と車体屈曲角

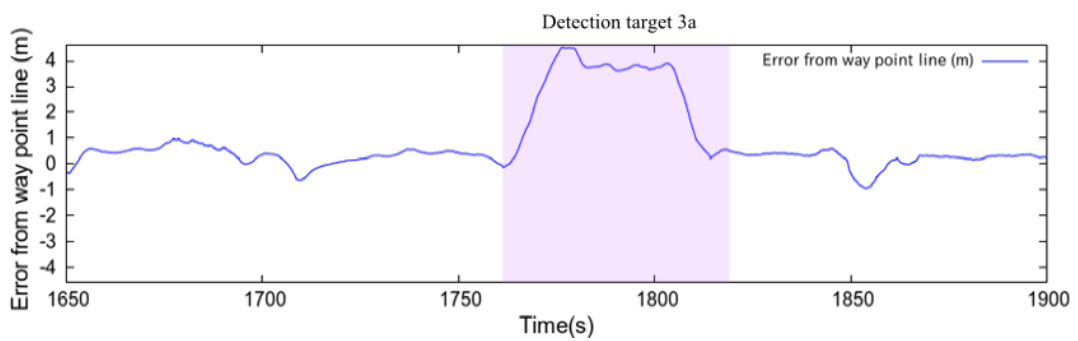


図 6.27: Area 3 における WP からの走行位置の誤差



図 6.28: Area 3 の Detection target 3a 付近の景況

6.4.3 探索対象人物の検出結果

つくばチャレンジ 2014 の課題の一つである人物探索の結果は、探索対象者 5 人に対して、第 1 探索エリアで 1 名及び第 3 探索エリアで 2 名の合計 3 人を検出する結果となった。

図 6.29～図 6.31 は、それぞれ Area 1～Area 3 における走行間に探索対象に該当するクラスタが存在した尤度を、第 6.2.2 項で述べたヒストグラムフィルタを用いて確定した結果を示している。図 6.14 に示す HDL-32e の視野範囲内で、探索人物の存在尤度の最大値が式 (6.1) に従い $lh_s(x, y) = 60$ を満たした場所を発見した場合、AR Chair は探索対象がその場所に存在すると判断する。そして、探索対象が存在すると判断された最近傍の WP から探索対象への接近アプローチを開始する。図 6.29 及び図 6.31 から、地点 b 及び地点 f の場所周辺の探索人物の尤度が高いことを示している。

一方、第 2 探索エリアの探索対象が存在した図 6.30 では、探索人物の存在尤度が上昇していないことが確認できる。この原因は、Detection target 2a の探索対象は、周辺の他のロボットの参観者及び通行人により探索対象への視界が遮られたことにより、検出対象者を検出するクラスタが十分な時間確認することが出来なかったためである。また、Detection target 2b の探索対象は、対象者と周辺建物の壁面との距離が十分に離れておらず、人物のクラスタとして識別ができなかったため検出が出来なかった。

このような検出失敗の結果から、通行人等が混交する際の適切な探索対象搜索のため経路計画と建物等に隣接した対象を LIDAR 情報以外で検出する手法を考案し、より適した探索手法を確立する必要がある。

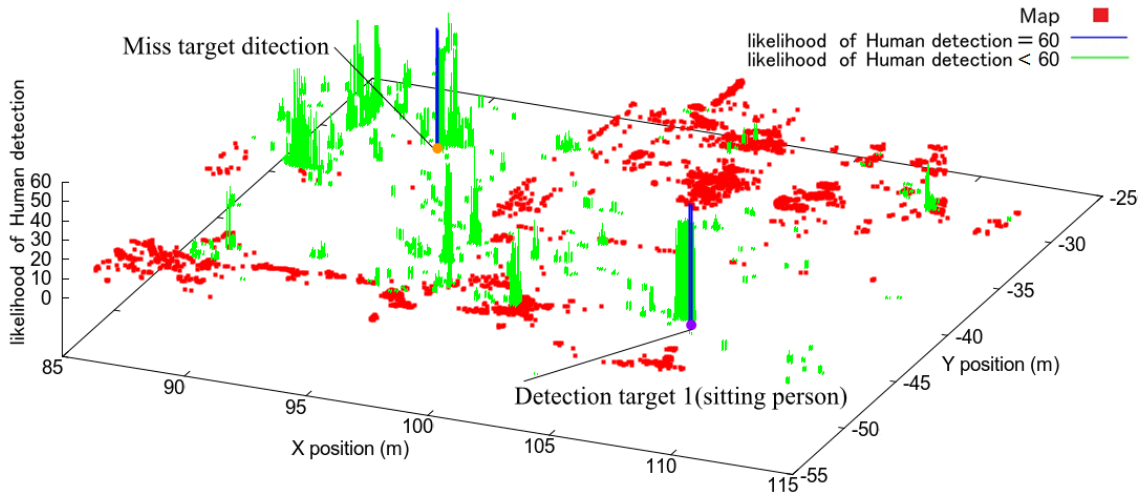


図 6.29: Area 1 における探索対象位置推定のための尤度値

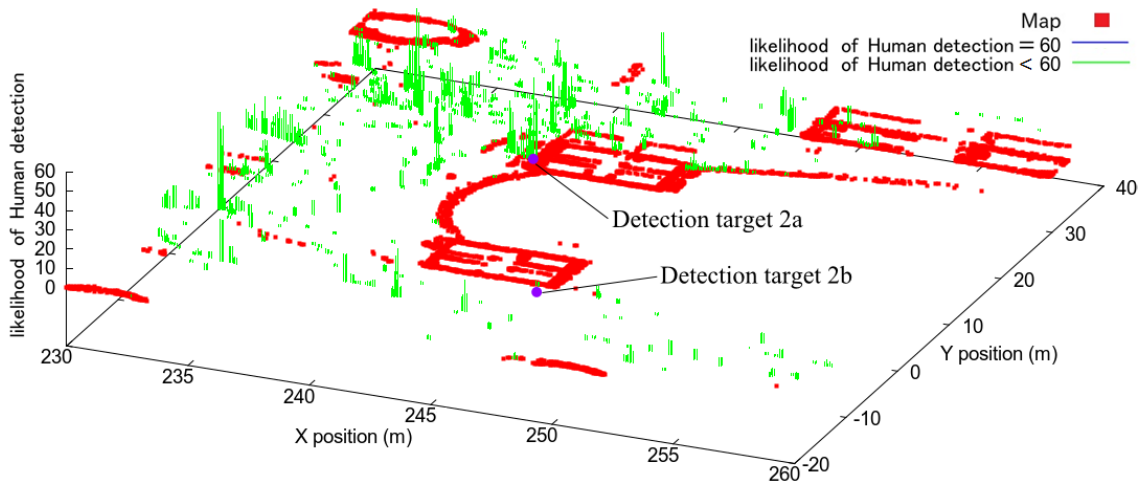


図 6.30: Area 2 における探索対象位置推定のための尤度値

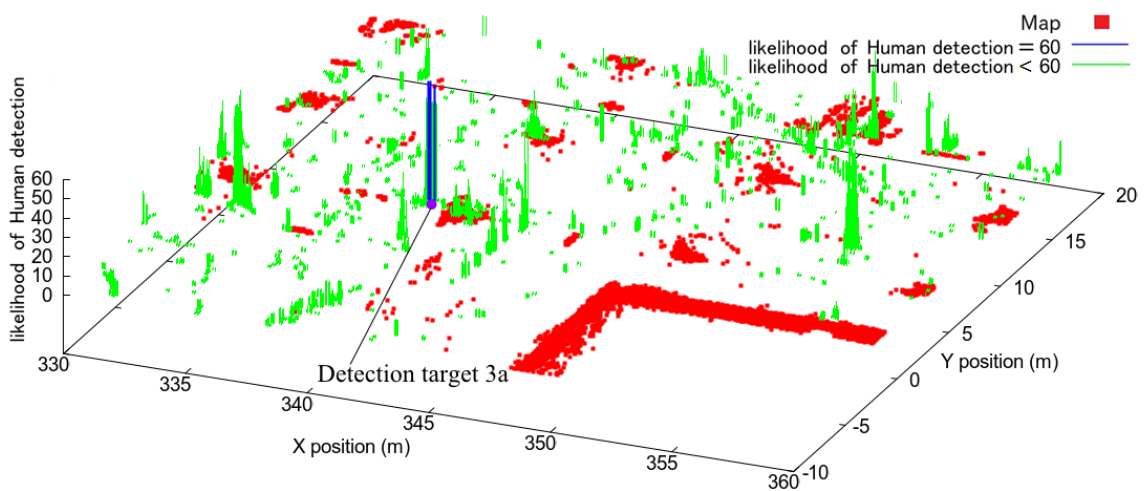


図 6.31: Area 3 における探索対象位置推定のための尤度値

6.4.4 すれ違い時における回避動作結果

AR Chair のつくばチャレンジ 2014 本走行中には、他のロボットと 2 回接近した。図 6.32 は、図 6.20 の Near miss 1 において No.1425 ロボットと接近した状況を示している。図 6.33 は、AR Chair が No.1425 ロボットと最接近した時点のセンサ情報を示している。図 6.34 は、センサデータを元に推定した No.1425 ロボットと AR Chair の動きの時間に応じた変化をプロットしたものである。図 6.35 は、この時の AR Chair の移動速度と車体屈曲角を示している。図 6.34 と図 6.35 の 0s は、図 6.33 に示す No.1425 ロボットと最接近した時点とする。

AR Chair は、前進経路をふさぐ形で接近してきた No.1425 ロボットを -5s 時点で前進経路上の障害物として減速と回避動作を試みている。しかし、No.1425 ロボットと周辺の通行人のため適切な前進経路を見つけ出すことが出来ず、約 6 秒間の停止の後に後退動作を開始している。一方、No.1425 ロボットは AR Chair の左側面方向へ前進を継続した。AR Chair が事前に障害物を回避する経路を選定せず停止・後退動作に至った原因は、No.1425 ロボットのオペレータが進路を塞ぐ位置にいたためである。



図 6.32: Near miss 1 付近の景況

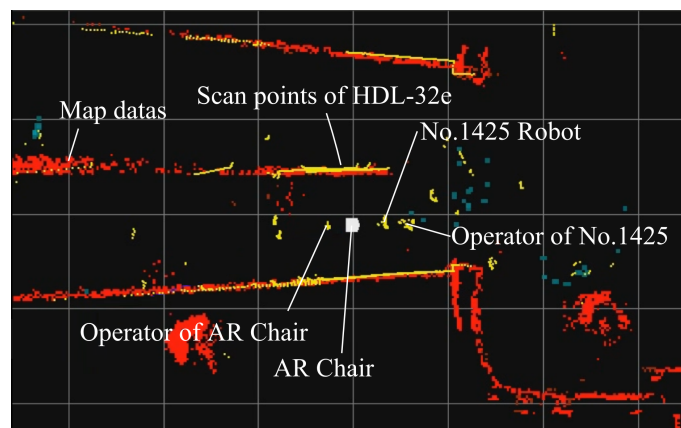


図 6.33: No.1425 ロボットとの再接近時の状況 (0s)

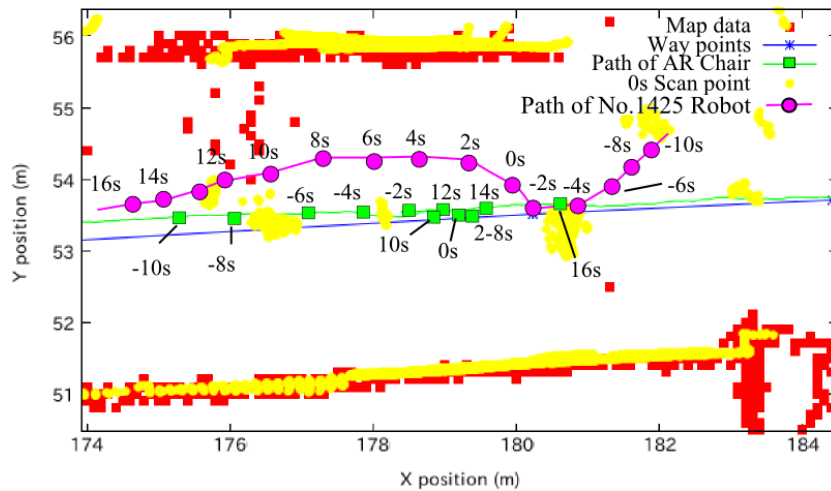


図 6.34: Near miss 1 付近における AR Chair と No.1425 の動き

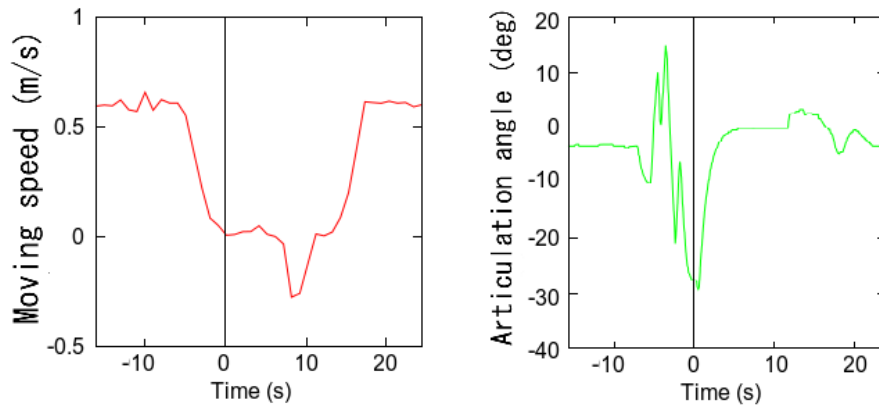


図 6.35: Near miss 1 における走行速度と車体屈曲角

図 6.36 は、図 6.20 の Near miss 2 において No.1401 ロボットと接近した状況を示している。図 6.37 は、AR Chair が No.1401 ロボットと最接近した時点のセンサ情報を示している。図 6.38 は、センサデータを元に推定した No.1401 ロボットと AR Chair の動きの時間に応じた変化プロットしたものである。図 6.39 は、この時の AR Chair の移動速度と車体屈曲角を示している。図 6.38 及び図 6.39 の 0s は、図 6.37 に示す No.1401 ロボットと最接近した時点とする。

AR Chair は前進経路に対して No.1401 ロボットと周辺の通行人が前進方向に対して右側に存在していたため、左側に障害物回避動作を行った。No.1425 ロボットとの行き違いと異なり、AR Chair は -6s 時点の相互距離 8m の位置において No.1401 ロボットを検出しており、最接近する -2s 時点には操舵動作を行っていることが記録データから確認された。ただし、今回の行き違いについては、一般公道で自動車は左側通行で左側に回避するのが一般的であるが、ここでの行動選択は AR Chair の障害物回避プログラムが選択した結果であり、左方回避を優先した結果ではない。なお、障害物を早期に発見出来れば滑らかな回避動作と移動の継続ができることが確認された。

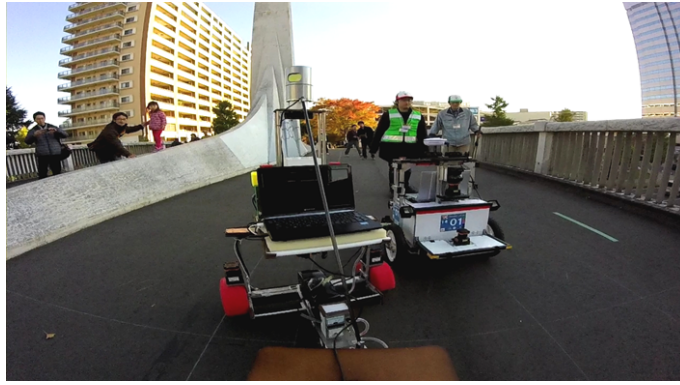


図 6.36: Near miss 2 付近の景況

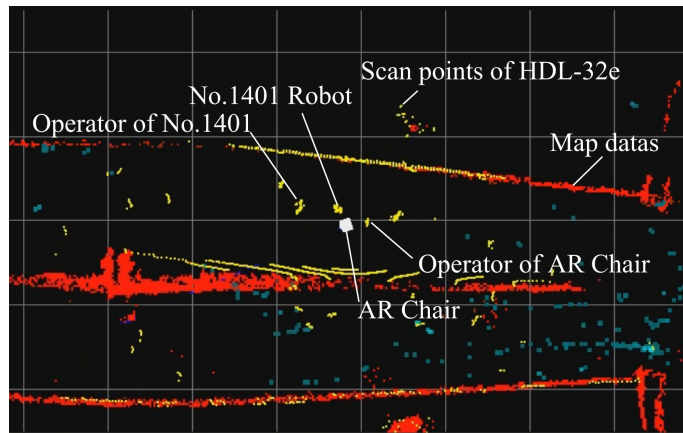


図 6.37: No.1401 ロボットとの再接近時の状況 (0s)

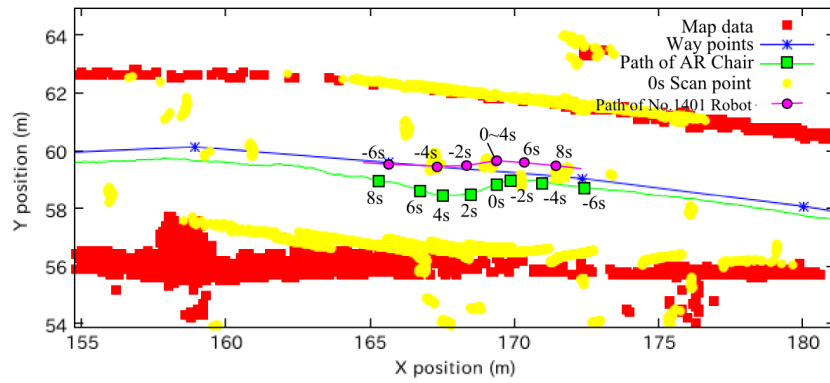


図 6.38: Near miss 2 における AR Chair と No.1401 の動き

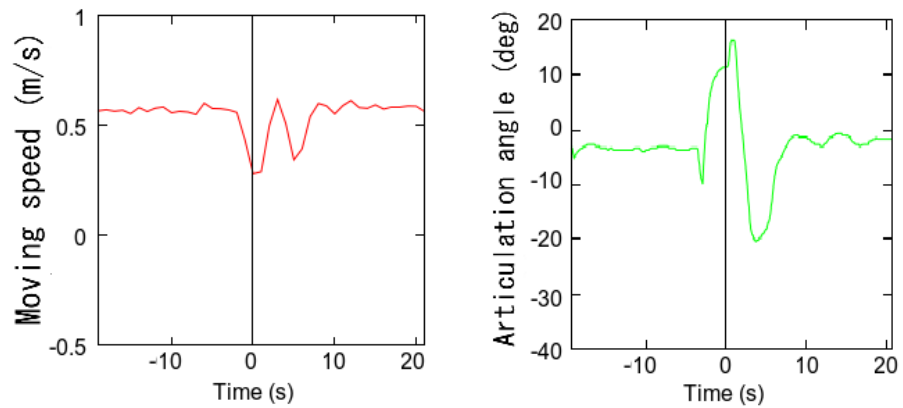


図 6.39: Near miss 2 における走行速度と車体屈曲角

6.5 結 言

本章では、人間を搭乗させることが可能な約 100kg の可搬重量を有するアーティキュレート式のロボット車両 AR Chair により、つくばチャレンジ 2014 における屋外環境の自律走行経路において提案手法の有効性検証を行った。また、課題経路途中において人物探索の課題が与えられ、移動間における探索行動を実施した。つくばチャレンジ 2014 の最終走行結果は、人物探索作業を含めた約 1.5km の距離を 42 分で完走するという結果を得られた。これらの結果から、以下の知見を得た。

- 都市環境内での自律移動を実現してきた自律移動ロボット SmartDump のシステムと、アーティキュレート式操舵車両に適用した拡張軌道誘導 SSM を組み合わせたロボット車両 AR Chair は、つくば市街の遊歩道環境において安定した自律走行を実現した。特に他のロボットとの異常接近時においては、内輪差の発生しないアーティキュレート式車両の特性から、適切な回避動作を行い衝突を回避した。
- パン式三次元 LIDAR による微小段差検出を組み合わせた障害物回避動作により、街路樹の生垣等これまでのセンサ配置では回避困難であった障害の適切な検出が可能となった。
- LIDAR データを用いたクラスタリングによる人物探索は、視界と 10m 以内の視程条件であった場合に実現可能である。しかし、探索対象が遠方にある場合や対象が構造物に隣接し手いる場合には分離が難しく検出不良が発生した。LIDAR データを用いたクラスタリング単体ではなく、他の手段と複合したロバスト性の高い手法の考案が必要である。

AR Chair は、同規模の車体形状では剛性が高く操舵性の良いアーティキュレート式車体を用いた。つくばチャレンジの屋外環境の人物探索を含む自律走行実験からその有効性が示された。今後はここで示した以外の各種作業への適用を考える必要がある。

参考文献

- [1] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 生活支援ロボット実用化プロジェクト, http://www.nedo.go.jp/activities/EP_00270.html
- [2] 独立行政法人製品評価技術基盤機構, 電動車いすによる自己の防止について (注意喚起), <http://www.nite.go.jp/data/000005195.pdf>
- [3] 伊達央, 滝田好宏, ”自律移動ロボット Smart Dump による実世界環境走行実験: 歩行者環境における人の群れ行動による影響と対策”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.3(2012), pp 305-313
- [4] 滝田好宏, 平澤順治, ”SSM を用いた軌道誘導車両の高速旋回特性”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.66, No.652(2000), pp 3888-3896
- [5] 滝田好宏, ”SSM を用いた軌道誘導車両のドリフト旋回特性: 動摩擦変化モデルの適用”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.68, No.675(2002), pp 622-629
- [6] J. Eeguchi and K. Ozaki, ”Development of the Autonomous Mobile Robot for Target-Searching in Urban Areas in the Tsukuba Challenge 2013”, J. of the Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp166-176, 2014
- [7] S. A. Rahok, H. Oneda, A. Tanaka and K. Ozaki “A Robust Navigation Method for Mobile Robots in Real-World Enviroment”, J. of the Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp177-184, 2014
- [8] M. Saito, K. Kiuchi, S. Shogo, T. Yokota, Y. Fujino, T. Saito and Y. Kuroda, ”Pre-Driving Needless System for Autonomous Mobile Robots Navigation in Real World Robot Challenge 2013”, J. of the Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp185-195, 2014
- [9] K. Okawa, “Three Tiered Self-Localization of Two Position Estimation Using Three Dimensional Environment Map and Gyro-Odometry”, J. of the Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp196-203, 2014
- [10] T. Suzuki, M. Kitamura, Y. Amano and N. Kubo, ”Autonomous Navigation of a Mobile Robot Based on GNSS/DR Integration in Outdoor Enviroments”, J. of the Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp214-224, 2014
- [11] T. Shioya, K. Kogure and N. Ohta, ”Minimal Autonomous Mover - MG-11 for Tsukuba Challenge -”, J. of the Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp225-235, 2014
- [12] つくばチャレンジ, つくばチャレンジ 2014, <http://www.tsukubachallenge.jp/tc2014>
- [13] 原祥堯, 大島章, 小野幸彦, 網野梓, 山本健次郎, ”人込み歩道環境に適応した自律移動技術の開発と実験機 Sofara-T を用いた実環境での評価”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.3, 287-295, 2012
- [14] N. Akai, K. Inoue, and K. Ozaki, ”Autonomous Navigation Based on Magnetic and Geometric Landmarks on Enviromental Structur in Real World”, J. of the Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp158-165, 2014

- [15] 山本 健次郎, 一野瀬 亮子, 荒井 雅嗣, ” 歩道を自律走行する搭乗型移動支援ロボット ”, 自動車技術, Vol. 67, No.3(2013), pp 2-7
- [16] S Muramatsu, T. Tomizawa, S. Kudoh and T. Suehiro, ” Development of Intelligent Mobile Cart in a Crowded Enviroment - Robust Localization Technique with Unknown Objects - ”, J. of the Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp204-213, 2014
- [17] M. Yokozuka and O Matsumoto, ” A Reasonable Path Planning via Path Energy Minimization ”, J. of the Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.2, pp236-224, 2014
- [18] e-Gov 法令データ提供システム, 道路交通法施行規則, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S35/S35F03101000060.html>
- [19] Wende Zhang, ” LIDAR-based road and road-edge detection ”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), (2010), pp 845-848
- [20] 熊田大輔, 原祥亮, 坪内孝司, 皿田滋, ” レーザスキャナで取得した受光強度と局所形状を特徴量とした路面属性認識 ”, 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, (2014), 1F3-6
- [21] 後藤伸也, 渡邊謙太郎, 戸田英樹, GENCI Capi, ” 視覚障害者のための LRF を用いた障害物・段差検出機能を持った歩行支援システム ”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.111, No.57(2011), pp 35-38
- [22] 田村秀行, ” コンピュータ画像処理 ”, オーム社, 2004.
- [23] PointClouds.org, <http://pointclouds.org/>
- [24] 菊地惇, 伊達央, 大川真弥, 滝田好宏, 小林和弘, ” 三次元 LIDAR を用いた着座状態にある人物の検出 ”, 日本ロボット学会, 第31回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, (2013)
- [25] 菊地惇, 伊達央, 大川真弥, Vincent Labat, 滝田好宏, ” 自律移動ロボットによる人物探索のカメラと LIDAR を用いた階層的アプローチ ”, 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講演概要集, (2013)

第7章 結 論

本論文は、屋外都市環境で十全に活動することができるロボット車両を実現するために、拡張軌道誘導SSMとLIDARによる自律化を試みた。提案手法の有効性検証のため実環境を用いてロボット車両の自律移動実験に取り組み、実験を通じて以下の知見を得た。

第2章では、ガイド式ライトレース車両で安定した高速走行が実現できる軌道誘導SSMを、屋外で自律移動するロボット車両に適用するための拡張手法について示した。提案した拡張軌道誘導SSMは、地図を基準としたWPを設定することで仮想的なSSM幾何関係を維持することが可能となる。提案手法を前輪操舵、後輪操舵、前後輪逆相操舵及び中央屈曲アーティキュレート式の車両に適用したシミュレーションを行い、拡張軌道誘導SSMによる誘導はVWPの設定位置により設定軌道への追従性を制御できることを確認した。この結果は、第4～6章でロボット車両の軌道誘導に適用した。

第3章では、自律移動及び作業を行うロボットに用いるセンサとしてLIDARに着目し、都市環境を自己位置推定を行ないながら走行する際に適切な三次元環境地図Cuboid Mapを提案した。Cuboid Mapは、積載要領の限られる小型ロボット車両において、Voxel地図に比べデータ量の削減しつつ高い再現度を達成した。提案したCuboid MapとVoxel Mapとの比較検証では、Voxel Mapと同等のスキャンマッチングが実現できることを確認した。しかし、LIDARの計測距離の制限から、都市環境を走行中に立体構造物が観測できなくなる状況が発生した場合においても、安定した自己位置推定を継続する手法の必要性を示した。

第4章では、アッカーマン機構の前輪操舵式ロボット車両SmartDump5により、つくばチャレンジ2011における屋内外都市環境の自律走行経路を用いて提案手法の有効性を検証した。つくばチャレンジ2011のコースでは、二次元平面環境地図と二次元LIDARの組み合わせでは自己位置推定が難しいと考えられる経路が課題として与えられた。このため、LIDARが計測可能な受光強度情報に注目して路面情報を環境地図に埋め込み自己位置推定に役立てる方法を提案した。LIDARの取得する受光強度情報は、計測対象の素材毎に距離に応じた受光強度値に差が生じた。この特性から、受光強度に差がある異なる2つの素材の識別は、2者間を分離する適切な分離曲線の設定により、実時間での識別が可能であることを示した。これらの情報を環境地図に追加記録することで、つくばチャレンジ2011において約1.5kmの経路を安定した走行を実現し、拡張軌道誘導SSM、Cuboid Map、三次元LIDARそして受光強度情報活用の有効性を示した。

第5章では、これまで開発した誘導手法と自己位置推定手法を用いて屋外不整地における自律刈払ロボットの開発を試みた。ロボット車両には、他の操舵方式に比べ簡単かつ高

剛性で車体を設計できるアーティキュレート式を採用し、同方式に適用した拡張軌道誘導SSMを用いた。実験環境としては、屋外不整地環境は整備された市街路面環境と全く異なる環境であり、適切な対策と不安定な状況に陥らないためのシステム構築についての検証が成され、刈払ロボット車両は約 $45m^2$ の作業範囲を約1時間で除草が可能な性能を有するに至った。また、刈払作業時には飛散物発生防止と機材保護のため高速回転する刃物と障害物の接触を避ける必要に迫られた。LIDARの受光強度の活用をして障害物検出を試みたところ、LIDARの受光強度情報が周辺環境光量や計測対象の湿潤条件に左右される結果を得た。よって、この分析結果から変化を補う補正式を求め、実環境で補正式を適用し検証した。結果、環境条件が変化した場合においても補正式を用いた分離曲線により適切な識別が可能であることを示した。

第6章では、第5章で有効性を示したアーティキュレート式車体を人間を搭乗させることが可能な約100kgの可搬重量を有する自律移動ロボット車両AR Chairに改修した。つくばチャレンジ2014では、経路途中に不特定の位置に配置された目標を探索する課題が与えられ、AR ChairはLIDAR情報のクラスタリングによる検出手法を実装した。探索目標への接近アプローチを実現するためには、一時的に指定されていない経路へ意図的に出なければならず、接近及び離脱時の詳細な障害物検出が要求される。このため、パン式三次元LIDARを用いて地表面の凹凸をスキャンし、走行不可能な経路の探索を行う手法を用いた。また、通行人や他のロボットと混交する都市環境の自律走行経路では異常接近発生時においても適切な動作により衝突を回避することを実現した。これらは、障害物手法や内輪差の発生しないアーティキュレート式車両による成果であり、生活空間における自律走行に必要な技術要素について有効性を示した。

一連の提案手法検証のための実験を通じた知見は、屋外活動する安全な自律移動ロボット車両の開発のためには、ロボット車両に採用する制御機構に対応した軌道誘導手法を適切に用いることが重要であることを確認した。また、最適な軌道誘導のために必要な精度の高い自己位置推定の実現には、常に周辺環境をセンサの範囲内に収めることが重要となる。このため、使用環境に応じた計測性能を有するLIDARの活用の必要性を確認した。

自律移動ロボット車両を人が生活する環境において安全に運用するための技術手法について知見を深めることができた。本研究で得られた成果の多くは、既存の提案手法を応用・拡張するものであるが、実環境において既存手法を適用することは理論と現実に乖離が存在し、実際に活動する自律移動ロボット車両の開発には多くの新規手法や工夫を必要とした。特に本研究では、軌道誘導SSMを屋外都市環境において用いるための拡張手法と、LIDARの受光強度情報の分析を通じた物体種類検出や障害物判定手法といった展開を実現するに至った。これらの技術は、ロボットが人と同じ環境で違和感無く運用されるための対人親和性の基礎として大変重要となるものと考えられる。そのためには、各種技術が単品での運用ではなく、複雑な技術の積み上げによる総体とした実証実験を取り組んで行く必要がある。本研究で得られた知見から、より高度で安全な自律移動ロボット車両の研究・開発へ発展させていく考えである。

謝辞

本研究は、防衛大学校・情報工学科・ロボット工学研究室 滝田好宏教授のご指導の下で行われました。先生には、小官が本科51期第3学年時より先生の研究室で学ばせていただいたことを皮切りに、延べ7年にわたり実験に用いるロボット車両設計・開発等多岐の熱心な御指導御助言を賜りました。本論文が完成したのは、ひとえに先生のご尽力あってのことです。誠に僭越ではありますが、紙上にて心からの感謝を申し上げます。

筑波大学・システム情報系・知能機能工学域 伊達央准教授におかれましては、先生の本校在籍中、小官の稚拙な文章構成の細部指導にはじまり多岐にわたる御指導を頂きましたことに厚く御礼申し上げます。

前期課程49期学生ブイ・クワン・ズンベトナム陸軍中尉，前期課程51期学生山岡香苗2等海尉および菊地惇2等陸尉，前期課程52期学生小林和弘2等海尉ならびに滝田研究室に所属した学生諸官には、多忙中にも関わらず力添えを頂きましたことに御礼を申し上げます。

そして、本研究における実証実験の場を提供していただきましたつくばチャレンジに関わる全ての方、本学在学中に様々な支援を頂きました防衛大学校の職員皆様に感謝申し上げます。

また、2011年に発生した東日本大震災の大規模震災災害派遣の多忙を極める中にもかかわらず、同年4月の理工学研究科課程への入校を支援していただきました第十四戦車中隊中隊長黒木崇3等陸佐，中隊諸官ならびに陸幕，第十四旅団ならびに日本原駐屯地関係諸部署の方々に御礼を申し上げます。

平成27年10月14日

防衛大学校 理工学研究科後期課程13期

電気情報工学系専攻 情報知能メディア学 ロボット工学研究室

1等陸尉 大川 真弥

研究業績

論文誌

1. 伊達央, 大川真弥, 滝田好宏, 菊地惇, ” 地表面の反射輝度を活用した自律移動ロボットの高精度自己位置推定 ”, 機械学会論文集 C 編, Vol. 79 (2013), No. 806, pp.3389-3398
2. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, ” アーティキュレート式操舵車両による自動刈払いロボットの開発 ”, 機械学会論文集, Vol. 80 (2014), No. 812, [DOI: 10.1299/transjsme.2014trans0076]
3. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, ” 刈払ロボットのための LIDAR の受光強度情報を用いた植生に含まれる障害物検出手法 ”, 機械学会論文集, Vol. 80 (2014), No. 819, [DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0330]
4. 大川真弥, 伊達央, 滝田好宏, ” LIDAR の地表面反射輝度を活用した路面標示の検出手法の提案 ”, 自動車技術会論文集, Vol.45(2014), No.6, pp.1165-1170
5. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, 小林和弘, ” Development of autonomous mobile robot using articulated steering vehicle and lateral guiding method ”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.27(2015), No.4, pp.337-345
6. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, ” LIDAR 受光強度情報のクラスタリングによる植生内に混在する石質障害物の判定 ”, 機械学会論文集, Vol. 81(2015), No. 828, [DOI: 10.1299/transjsme.14-00563]

国際会議

1. 滝田好宏, 伊達央, 大川真弥, ” Dynamical Characteristic of a Lateral Guided Robotic Vehicle with a Rear Wheel Steering Mechanism Controlled by SSM ”, The world congress on Engineering and Computer Science 2011, UC Berkeley (アメリカ, サンフランシスコ), 2011.10
2. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, ” High Stability Lateral Guided Method for Articulated Vehicle Based on Sensor Steering Mechanism, The world congress on Engineering and Computer Science 2011, UC Berkeley (アメリカ, サンフランシスコ), 2012.10
3. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, ” Development of the Autonomous Brush-cutting Robot using Articulated Steering Vehicle ”, ISR2014, Messe Munchen(ドイツ, ミュンヘン), 2014.6

国内会議

1. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, ” 4ロータ型 UAV のホバリング制御に関する研究 “, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2011, 高知工科大学 (香美市), 2011.9
2. 伊達 央, 滝田 好宏, 大川 真弥, ” 自律ロボットのセンサーフュージョンにおける簡便なエラー検出アルゴリズムの提案と考察 ”, 第 29 回ロボット学会学術講演会, 芝浦工科大学 (江東区), 2011.11

3. 伊達 央, 滝田 好宏, 大川 真弥, “市街地の自律走行における輝度情報付3次元スキャンデータの活用”, 第12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, “京都大学(京都市), 2011.12
4. 大川真弥, 伊達央, 滝田好宏, “揺動式三次元レーザスキャナによる正規化輝度を活用した三次元地図生成と自己位置推定”, RSJ,SICE,JSME 第17回ロボティクスシンポジウム, 萩本陣(萩市), 2012.3
5. 伊達央, 滝田好宏, 大川真弥, “自律移動ロボットの歩行者の流れに合わせたナビゲーション”, 第30回ロボット学会学術講演会, 札幌コンベンションセンター(札幌市), 2012.9
6. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, 菊地惇, “揺動式三次元レーザスキャナとHDL-32Eを搭載した自律移動ロボット Smart Dumpによる制御特性の比較”, 第30回ロボット学会学術講演会, 札幌コンベンションセンター(札幌市), 2013.9
7. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, “プロファイルセンサを用いた4ロータ型UAVのホバリングに関する研究”, Dynamics & Design Conference 2012, 慶應義塾大学(横浜市), 2012.9
8. 大川真弥, 伊達央, 滝田好宏, 菊地惇, “三次元地図作成による自律移動ロボットの高精度自己位置推定” TLANSLOG2012, 東京大学(渋谷区), 2012.12
9. 大川真弥, 滝田好宏, 山岡香苗, 伊達央, “刈払ロボットにおける刃物周辺の3次元環境情報取得と認識”, RoboMEC2013, つくば国際会議場(つくば市), 2013.5
10. 滝田好宏, 大川真弥, 伊達央, “カメラ固定によるアーシキュレート式車両の軌道誘導SSMの実現と高速化”, MOVIC2013, 九州産業大学(福岡市), 2013.8
11. 滝田 好宏, 大川 真弥, 松尾 大樹, 伊達 央, “一モータ駆動同軸二重反転機構を用いた六ロータ型ヘリコプタによるホバリング”, MOVIC2013, 九州産業大学(福岡市) 2013.8
12. 滝田 好宏, 大川 真弥, 伊達 央, “アーティキュレート式車両による自律刈払ロボットの開発”, MOVIC2013, 九州産業大学(福岡市), 2013.8
13. 滝田好宏, 小林和弘, 大川真弥, 伊達央, “一モータ駆動同軸二重反転機構を用いたTrirotor型UAVの開発”, 第31回ロボット学会学術講演会, 首都大学東京(八王子市), 2013.9
14. 菊地惇, 伊達央, 大川真弥, 滝田好宏, 小林和弘, “三次元LIDARを用いた着座状態にある人物の検出”, 第31回ロボット学会学術講演会, 首都大学東京(八王子市), 2013.9
15. 滝田好宏, 大川真弥, 伊達央, “刈払ロボットの開発”, 第31回ロボット学会学術講演会, 首都大学東京(八王子市), 2013.9
16. 大川真弥, 伊達央, 滝田好宏, “Laser range finderの受光強度を活用した路面標示の検出”, 第31回ロボット学会学術講演会, 首都大学東京(八王子市), 2013.9
17. 伊達央, 大川真弥, 滝田好宏, 菊地惇, “自律移動ロボット制御技術に基づいたロボットカー”, 第31回ロボット学会学術講演会, 首都大学東京(八王子市), 2013.9
18. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, “アーティキュレート式車両による自動刈払ロボットの草刈り作業伴う走行実験と検証”, TLANSLOG2013, 東京大学(渋谷区), 2013.12

19. 大川真弥, 伊達央, 滝田好宏, ” LRF の地表面反射輝度を活用した道路標示の検出手法の提案 “, TLANSLOG2013, 東京大学 (渋谷区), 2013.12
20. 大川真弥, 伊達央, 滝田好宏, ” LIDAR の地表面反射輝度を活用した路面標示の検出手法の提案 “, 自動車技術会 2014 春季大会, パシフィコ横浜 (横浜市), 2014.5
21. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, “ 刈払ロボットのための LIDAR 受光強度情報を用いた障害物検出手法の屋外作業における検証 ”, Dynamics & Design Conference 2014, 上智大学 (東京都千代田), 2014.8
22. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, “ LIDAR 受光強度情報を用いた植生内に混在する障害物検出手法 ”, 第 32 回ロボット学会学術講演会, 九州産業大学 (福岡市), 2014.9
23. 滝田好宏, 大川真弥, 伊達央, 小林和弘, “ 階段昇降機能を有するアーティキュレート式 8 輪車による自律移動ロボットの開発 ”, TLANSLOG2014, 東京大学 (渋谷区), 2014.11
24. 滝田好宏, 大川真弥, 伊達央, 小林和弘, “ アーティキュレート式 8 輪車による階段昇降ロボットの自律移動 ”, SI2014, 東京大学 (江東区), 2014.12
25. 滝田好宏, 大川真弥, 伊達央, ” アーティキュレート式 8 輪車ロボットによる階段昇降を含む自律移動 “, RSJ,SICE,JSME 第 20 回ロボティクスシンポジウム, 軽井沢プリンスホテルウエスト (軽井沢), 2015.2
26. 大川真弥, 滝田好宏, “ LIDAR の地表面反射輝度を活用した道路標示検出の精度向上に関する研究 ”, 自動車技術会 2014 春季大会, パシフィコ横浜 (横浜市), 2015.5
27. 大川真弥, 滝田好宏, ” 逆相四輪操舵車両による自律移動ロボットの開発 “, MOVIC2015, (宇都宮市) 2015.6

研究会等

1. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, ” Smart Dump 5 による課題達成 “, つくばチャレンジ 2011 開催記念シンポジウム, 芝浦工科大学 (江東区), 2012.1
2. 大川真弥, 滝田好宏, 伊達央, 小林和弘, “ アーティキュレート式自律移動ロボット AR Chair による つくばチャレンジ 2014 の完走 ”, つくばチャレンジ 2014 開催記念シンポジウム, 筑波大学 (つくば市), 2015.1
3. 大川真弥, Yves Bergeon, “ Interface Matlab/ROS for controlling a 2 wheels robot “, Japan and France Academy internship program, Centre de recherche des écoles de Saint-Cyr Coetquidan, (フランス, レンヌ), 2014.9
4. 大川真弥, “ LIDAR の地表面反射輝度を活用した道路標示検出の精度向上に関する研究 ”, 第 8 回アクティブセイフティ部門委員会, 化学会館 (千代田区), 2015.7

付録 A 拡張軌道誘導 SSM 適用のための パラメータ決定過程

本付録は、第 2 章で提案した拡張軌道誘導 SSM を実際のロボット車両に適用するための検証過程を示す。今回は、アッカーマン機構を有する前輪操舵方式のロボット車両に適用し、各種操舵方式のロボット車両へ拡張軌道誘導 SSM を適用する場合の資とする。

A.1 自律移動ロボット車両 Smart Dump 9 の概要

図 A.1 は、本実験に用いる自律移動ロボット車両 Smart Dump 9 の外観を示している。Smart Dump 9 は、アッカーマン機構による前輪操舵方式で各車輪にモータを配した四輪駆動の自律移動ロボットである。歩道段差等の走行時の安定性向上のため、第 4 章の実験に使用した Smart Dump 5 のホイールベースを 54mm 延長した。実験走行時の Smart Dump 9 の最大操舵角は ± 27.5 度とした。このため、Smart Dump 9 の最小旋回半径は 0.75m となる。

図 A.2 は、Smart Dump 9 の外形（側面図）である。周辺環境計測用センサとして、2 種類 4 基の LIDAR を搭載している。車体上部に搭載された三次元 LIDAR (Velodyne 製 HDL-32e) は、約 70m の視程を有し、自己位置推定及び物体認識のためのメインセンサである。車両の左右には、二次元 LIDAR (北陽電機製 UTM-30LX) を地面に対して水平に配置し、三次元 LIDAR の死角を補うように 360 度の視界を得ている。また、進行形路上の凹凸部検出のため、車体前面の操舵機構の真上に二次元 LIDAR (北陽電機製 UTM-30LX-EW) を約 45 度傾斜させて設置した。後輪外側の軸上延長線上の左右に従輪式オドメトリホイールを配置し、移動量と姿勢角を求めている。

図 A.3 は、Smart Dump 9 の制御システム図である。Linux3.10.27-rt25 リアルタイム OS を搭載したノート PC (マウスコンピュータ製, CPU: Intel Core i7-3632QM) を用いて、各種センサから収集したデータを用いて経路追従、自己位置推定及び物体検出などを行ない、Slave Controller に対して操舵角と走行速度の指示を行っている。Slave Controller は、H8SX/1582 (Renesas 製) CPU により構成され、走行用モータ 4 個、操舵用モータ 1 個を制御すると共に、ロータリーエンコーダによる操舵角とオドメトリホイール回転数を計測して Host Controller に送信している。Host Controller と各種センサ等を接続するインターフェースは、UTM-30LX, C920 及び Slave Controller が USB2.0 (Full Speed) で、HDL-32e と UTM-30LX-EW が Ethernet (100 Mbps) を用いている。



図 A.1: Smart Dump 9 の外観

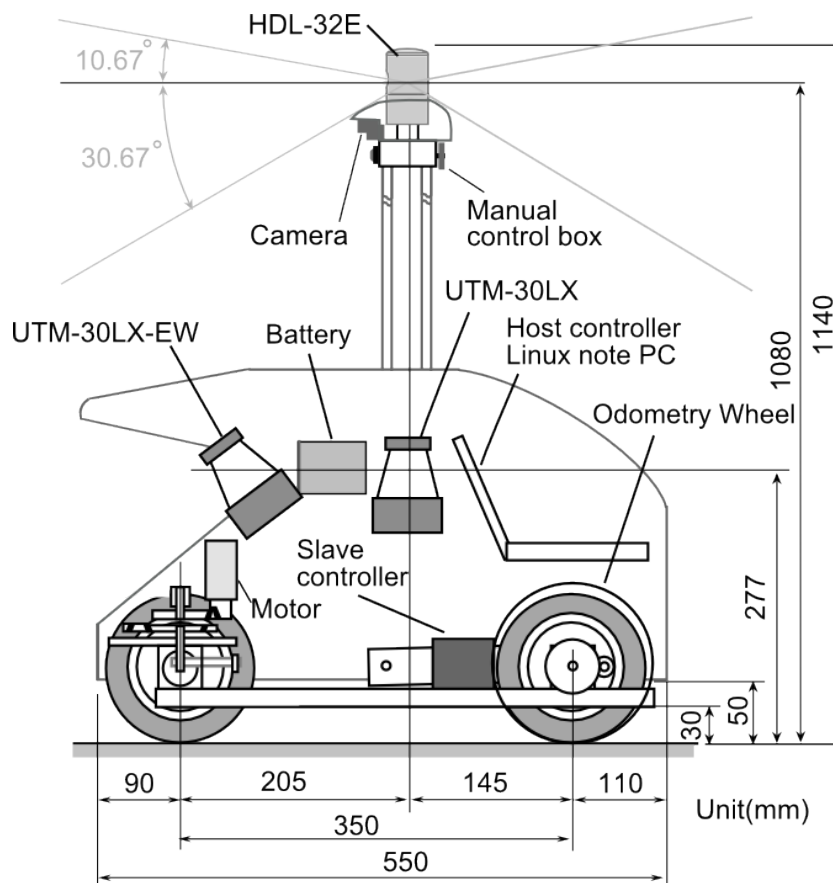


図 A.2: Smart Dump 9 の外形（側面図）

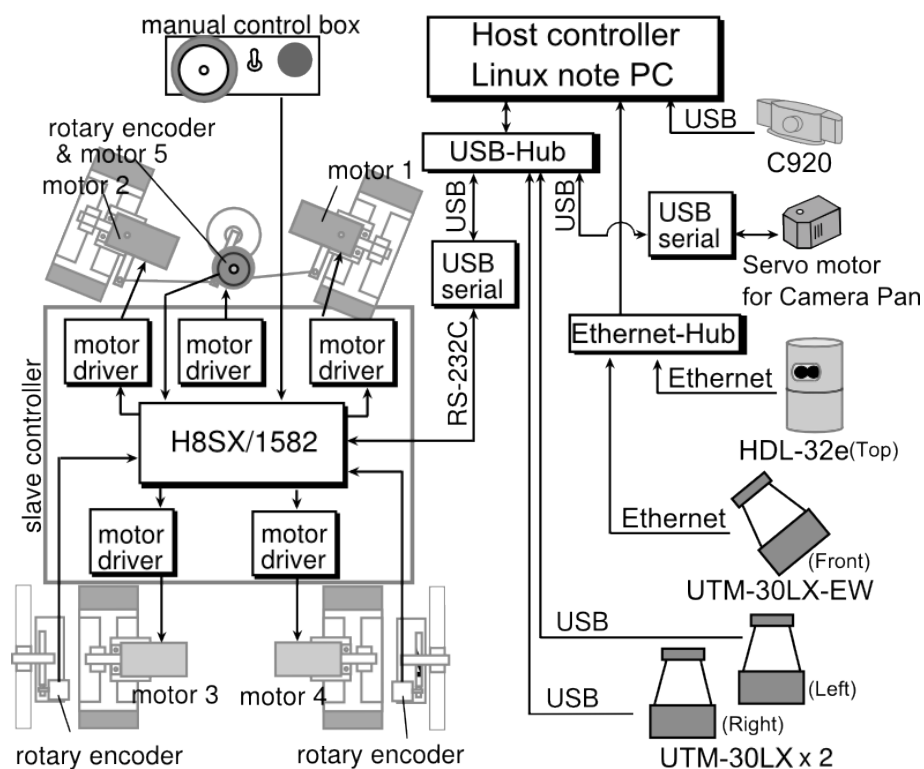


図 A.3: Smart Dump 9 の制御システム

A.2 シミュレーションによる評価

A.2.1 シミュレーション条件

図 A.4 と図 A.5 は、Smart Dump 9 の直線経路及び直角経路への追従性を評価するために用いるシミュレーションの WP 設定を示している。直線経路追従における車両の初期 X-Y 座標位置は (0,1)，初期姿勢角及び初期操舵角は 0 deg とする。直角経路追従における車両の初期 X-Y 座標位置は (0,0)，初期姿勢角 90deg，初期操舵角は 0 deg とする。WP に対して、各操舵方式により L_p の値をホイールベース 2~4 倍で評価する。

表 A.1 は、シミュレーションに用いるパラメータを示している。

シミュレーションの間隔は、10ms ステップで行い、その際の車両の走行速度は 0.2m/s とする。

表 A.1: 前輪操舵式車両シミュレーションパラメータ

Name	Value
Wheel Base	0.35m
Sensor Arm Length	0.35m
MAX Steering Angle	$\pm 27.5\text{deg}$

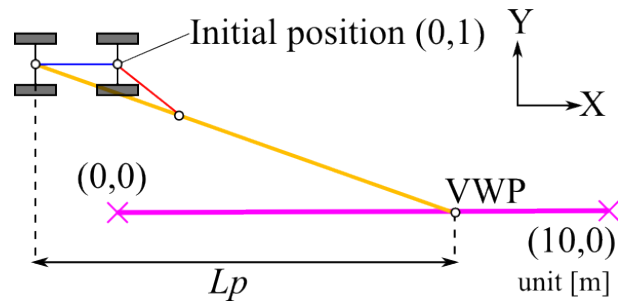


図 A.4: 直線追従シミュレーションでの想定

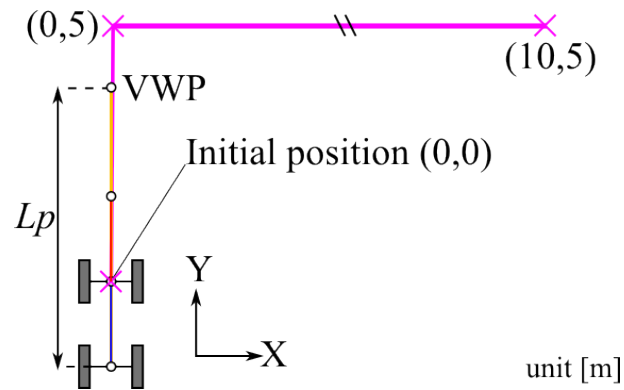


図 A.5: 直角追従シミュレーションでの想定

A.2.2 シミュレーション結果

図 A.6～A.9 は、直線追従における前輪操舵車両の走行軌跡、 L_p 値がホイールベース長の 2 倍の際のスティックダイアグラム、姿勢角及び操舵角のシミュレーション結果を示している。図 A.10～A.13 は、直線追従における前輪操舵車両の走行軌跡、 L_p 値がホイールベース長の 2 倍の際のスティックダイアグラム、姿勢角及び操舵角のシミュレーション結果を示している。それぞれのシミュレーションからは、第 2 章で示した前輪操舵車両と同様の結果が得られた。特に直角経路追従それぞれにおいてホイールベース長の 2 倍の L_p 値を設定した場合、直角経路外側に対してオーバーシュートする結果となった。このような状況においてよりオーバーシュート量を抑えた拡張軌道誘導 SSM を適用するには、 L_p 値をホイールベース長の 3 倍程度にするのが適当と考えられる。

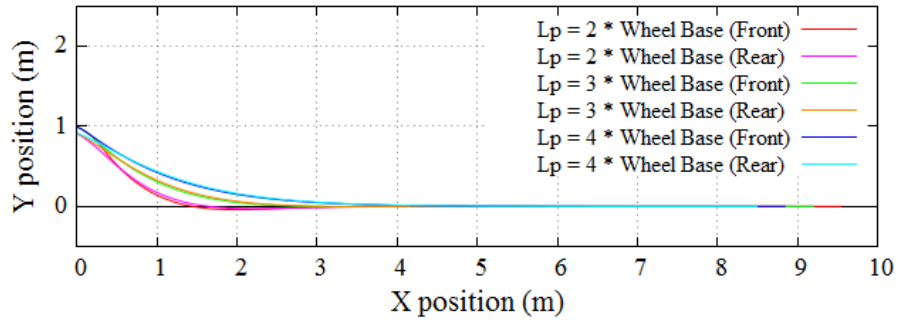


図 A.6: 走行軌跡 [Smart Dump 9 シミュレーション・直線追従]

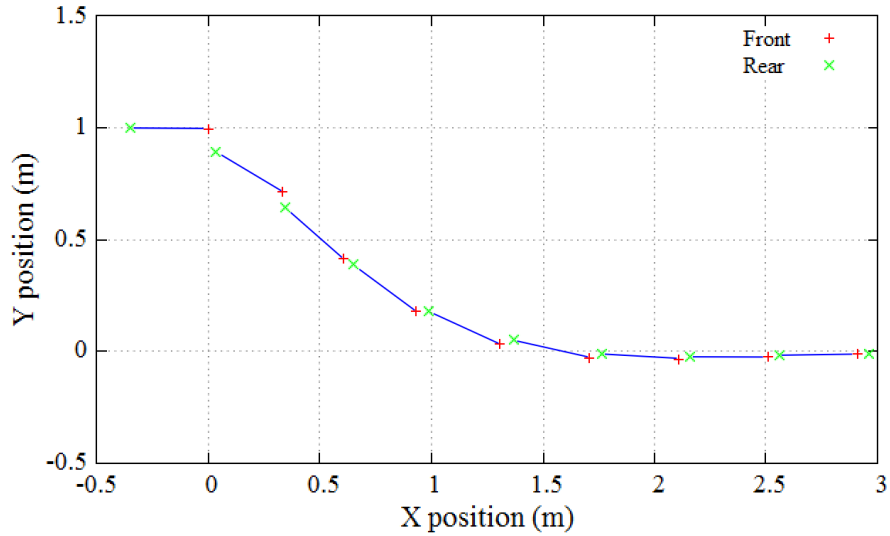


図 A.7: $L_p = 2 \times$ Wheel base ステックダイアグラム [Smart Dump 9 シミュレーション・直線追従]

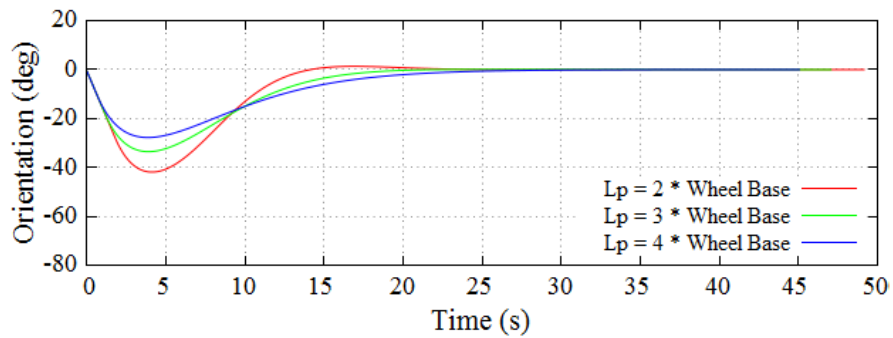


図 A.8: 姿勢角 [Smart Dump 9 シミュレーション・直線追従]

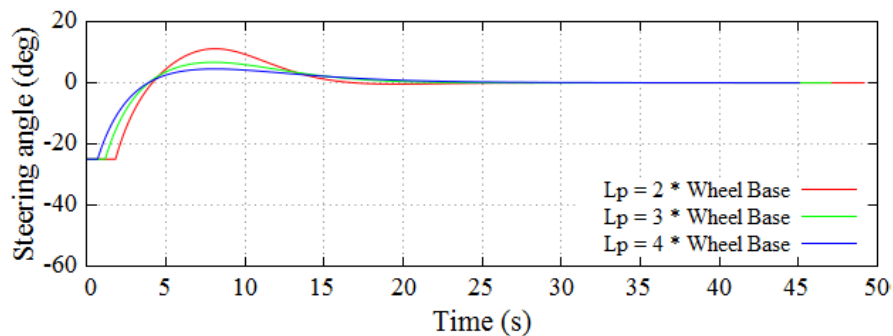


図 A.9: 操舵角 [Smart Dump 9 シミュレーション・直線追従]

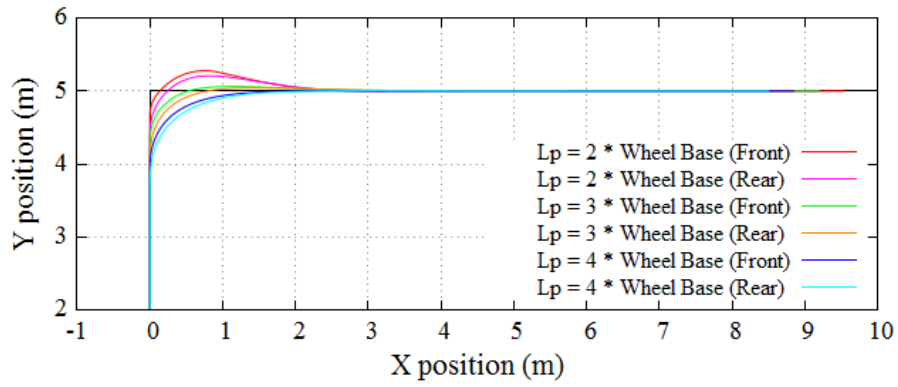


図 A.10: 走行軌跡 [Smart Dump 9 シミュレーション・直角追従]

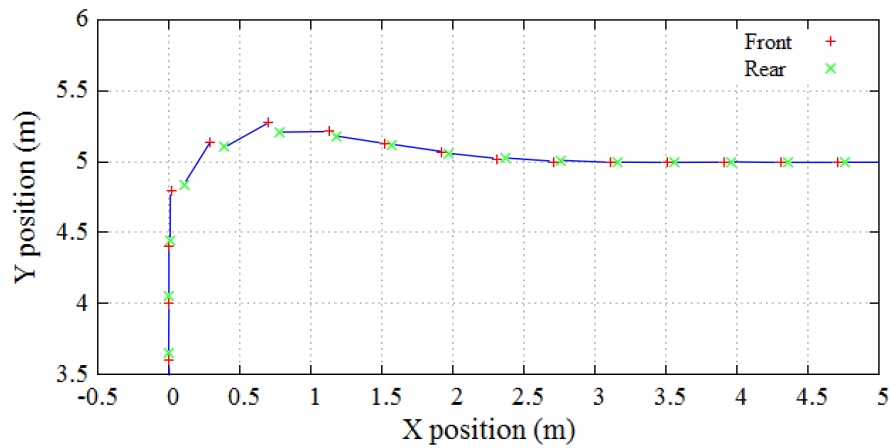


図 A.11: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [Smart Dump 9 シミュレーション・直角追従]

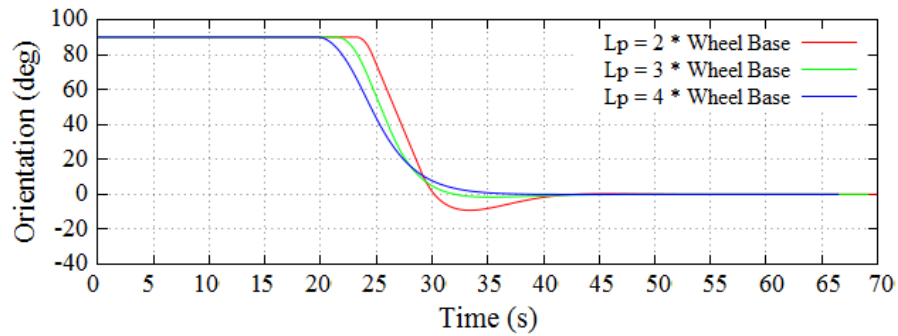


図 A.12: 姿勢角 [Smart Dump 9 シミュレーション・直角追従]

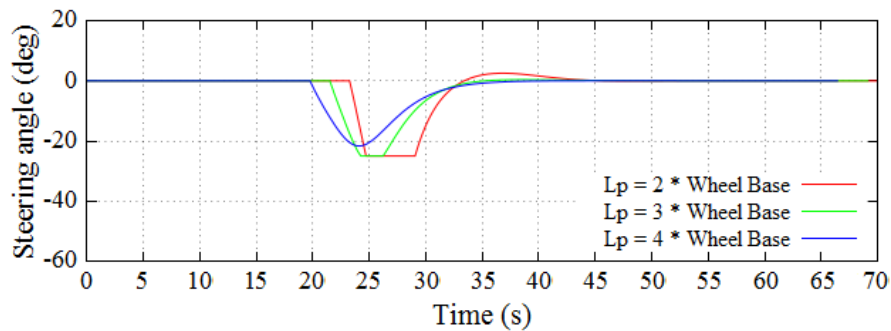


図 A.13: 操舵角 [Smart Dump 9 シミュレーション・直角追従]

A.3 実験走行による検証

A.3.1 実験走行条件

図 A.14 と図 A.15 は、拡張軌道誘導 SSM を適用した Smart Dump 9 を用いて屋外環境において直線経路及び直角経路への追従性を評価するために用いる環境地図と WP 設定を示している。直線経路追従における Smart Dump 9 の初期 X-Y 座標位置は (0,1)，初期姿勢角及び初期操舵角は 0 deg とする。直角経路追従における Smart Dump 9 の初期 X-Y 座標位置は (0,0)，初期姿勢角 90deg，初期操舵角は 0 deg とする。WP に対して，各操舵方式により L_p の値をホイールベース 2~4 倍で評価する。

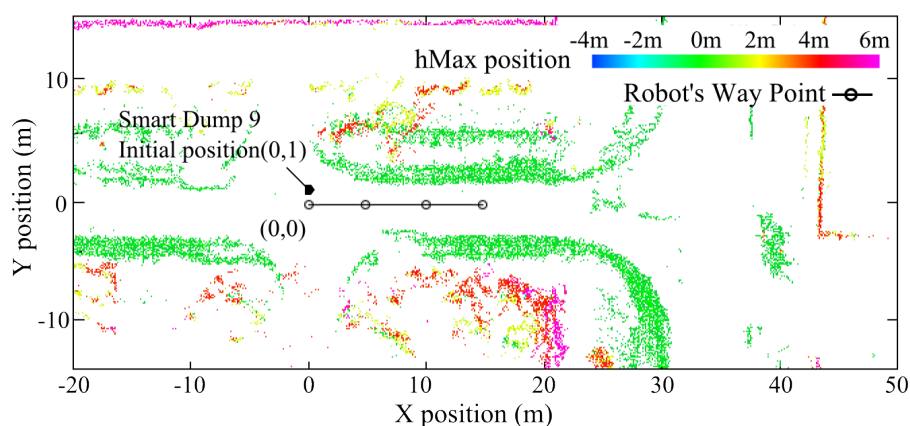


図 A.14: 直線追従実験走行の設定

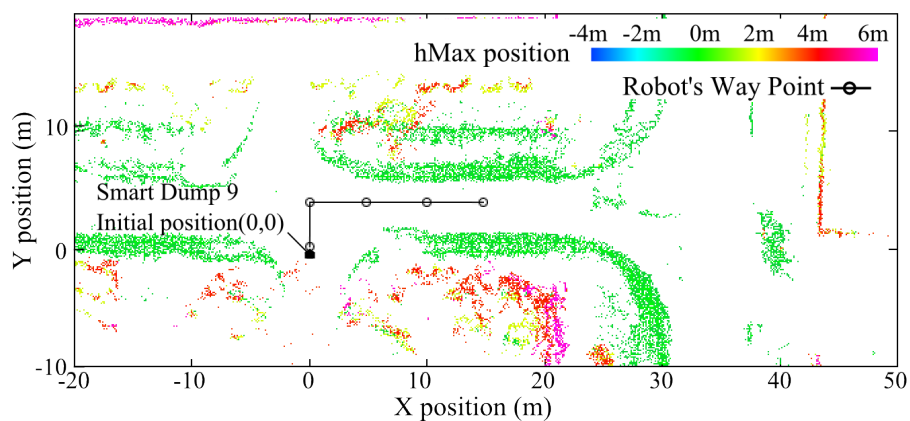


図 A.15: 直角追従実験走行の設定

A.3.2 実験走行結果結果

図 A.16～A.19 は、直線追従における Smart Dump 9 の走行軌跡、 L_p 値がホイールベース長の 2 倍の際のスティックダイアグラム、姿勢角及び操舵角（STR:SmartDump9 の実際の操舵角，CMD:拡張軌道誘導 SSM の指示操舵角）の記録を示している．図 A.10～A.13 は、直線追従における Smart Dump 9 の走行軌跡、 L_p 値がホイールベース長の 2 倍の際のスティックダイアグラム、姿勢角及び操舵角の記録を示している．Smart Dump 9 による実験走行結果からは、シミュレーションに比べて若干の追従性の低下が見られた．この原因は、拡張軌道誘導 SSM が示す操舵角に対して Smart Dump 9 の操舵制御の遅れがあるためである．この遅れは、特に直角経路追従においてオーバーシュート量の増加として現れている．また、図 A.13 に示す拡張軌道誘導 SSM の指示操舵角は、SmartDump9 の実際の操舵角の遅れとその間の移動によって最大操舵角まで短時間で飽和している状況が確認された．

A.4 L_p 値決定のための考察

拡張軌道誘導 SSM を実装する車両のパラメータを用いたシミュレーションと、ロボット車両による拡張軌道誘導 SSM を用いた検証実験を比較した．実験結果からは、実際のロボット車両の制御系の応答遅れなどの影響によりシミュレーション結果よりも設定経路への追従性が低下する結果が得られた．しかし、この誤差は実車両に拡張軌道誘導 SSM を適用する場合の調整の範囲に含まれると考えられる．よって、拡張軌道誘導 SSM を幾何関係により考察したシミュレーションにより事前に評価することにより、実車両への適用の際の指標として活用しうることがわかった．

シミュレーションとロボット車両による走行実験による走行軌跡の結果から、直線経路への追従性を保ちつつ直角経路におけるオーバーシュート量を抑えるために、Smart Dump 9 に拡張軌道誘導 SSM を適用する場合の L_p 値はホイールベース長の約 3 倍が適当であると考えられる．一方、拡張軌道誘導 SSM の追従性を決定するパラメータ L_p 値は、実装する車両の最小旋回半径、タイヤ摩擦、操舵特性、および走行速度などに応じた設定が必要である．将来的には、ロボット車両の走行状態や追従経路に応じて L_p 値を動的に変化させることにより追従性の改善が図れるものとする．このため、最終的な L_p 値の決定のためには適用するロボット車両に要求される．

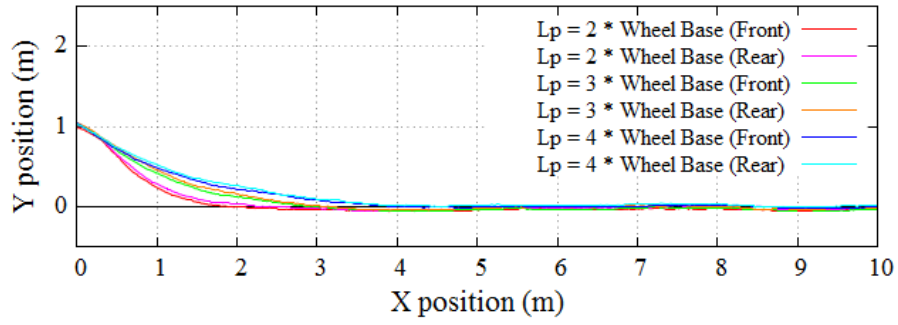


図 A.16: 走行軌跡 [Smart Dump 9 実車による走行・直線追従]

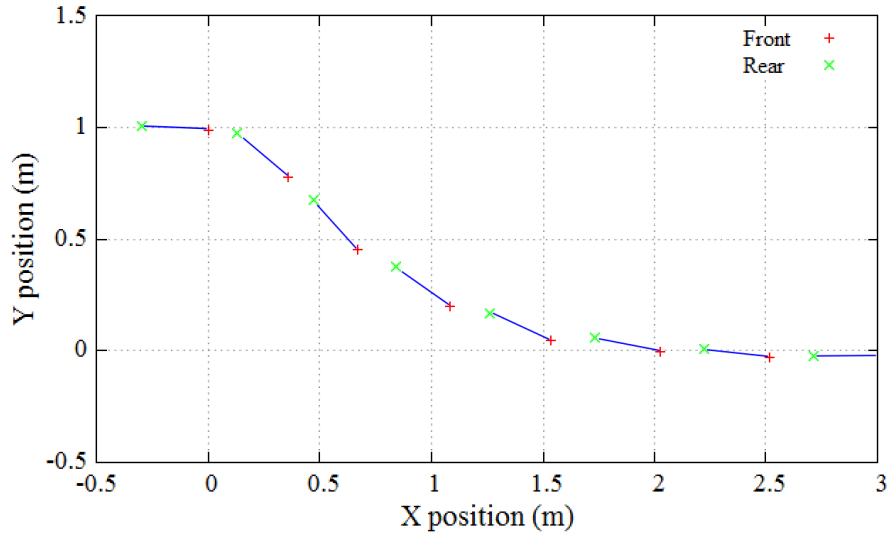


図 A.17: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [Smart Dump 9 実車による走行・直線追従]

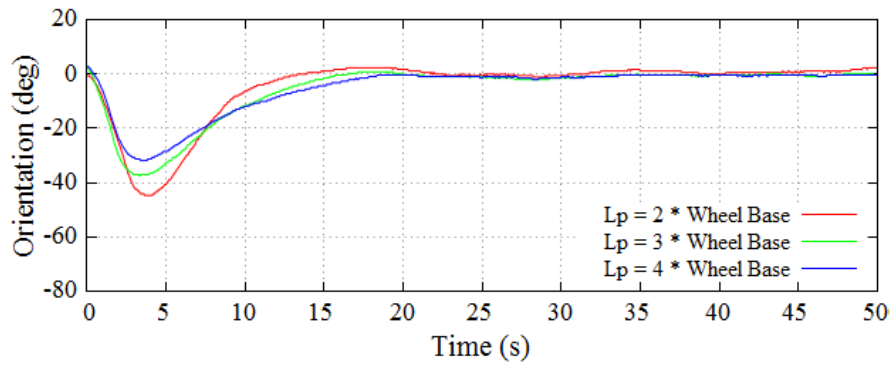


図 A.18: 姿勢角 [Smart Dump 9 実車による走行・直線追従]

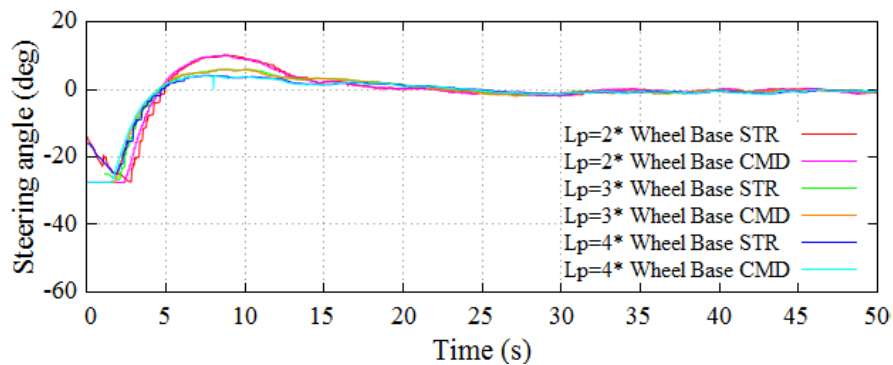


図 A.19: 操舵角 [Smart Dump 9 実車による走行・直線追従]

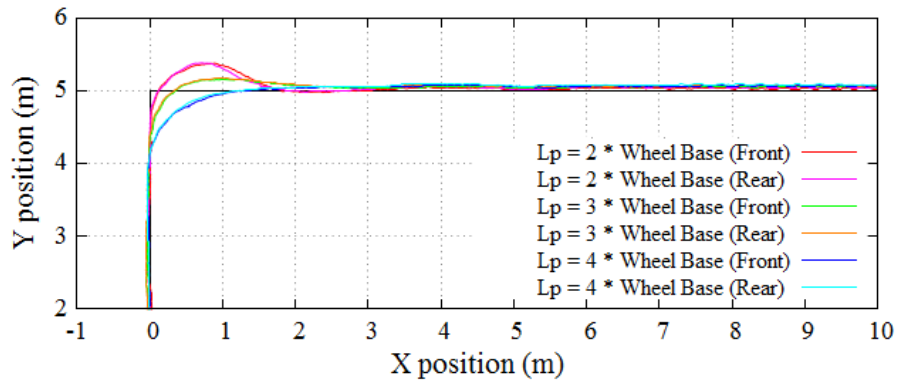


図 A.20: 走行軌跡 [Smart Dump 9 実車による走行・直角追従]

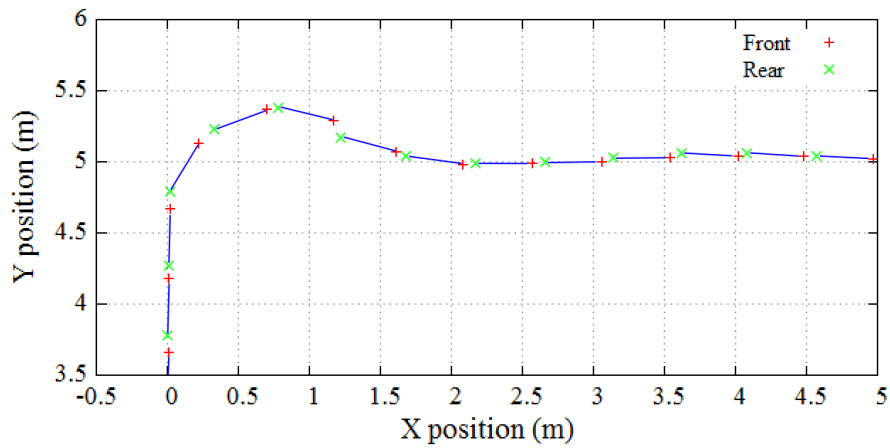


図 A.21: $L_p = 2 \times$ Wheel base スティックダイアグラム [Smart Dump 9 実車による走行・直角追従]

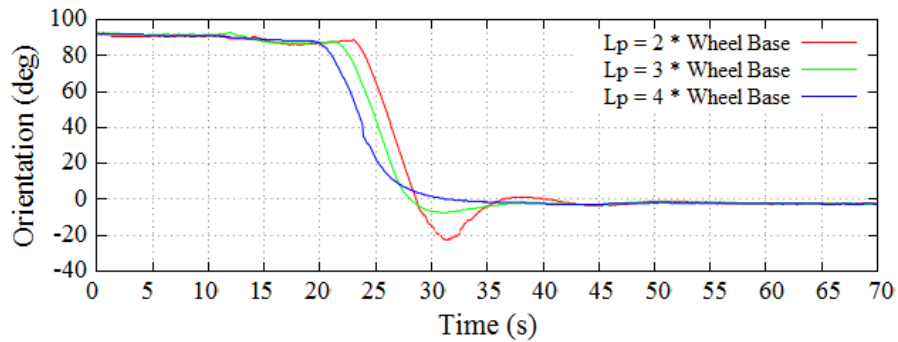


図 A.22: 姿勢角 [Smart Dump 9 実車による走行・直角追従]

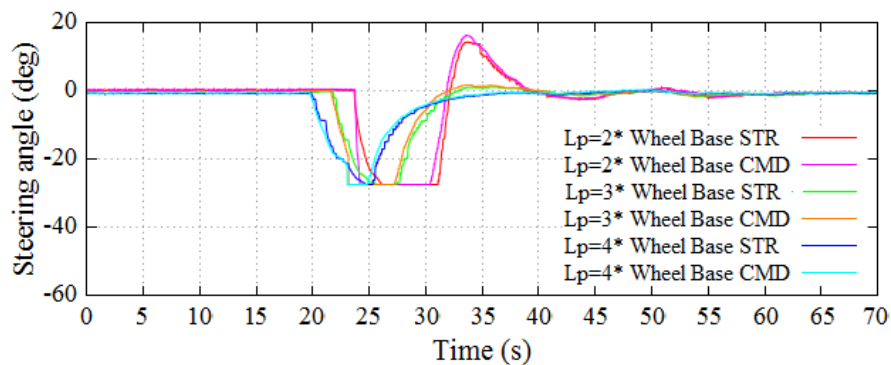


図 A.23: 操舵角 [Smart Dump 9 実車による走行・直角追従]

付 録 B 回 転 揺 動 式 三 次 元 L I D A R

一般的に，三次元 LIDAR は二次元 LIDAR と比較し大型で高価格のセンサであり，小型の移動ロボット車両に搭載することが難しい．このため，より小型で安価に三次元環境情報を収集するセンサシステムが望まれる．これまでに，二次元 LIDAR と各種揺動機構を用いて，三次元環境情報を収集するためのシステムが考案 [1] され，一部は商品化されている．

B.1 回 転 揺 動 式 三 次 元 L I D A R の 構 成

防衛大学校ロボット工学研究室では，二次元 LIDAR と回 転 揺 動 機 構 を 用 いた 三 次 元 LIDAR の 開 発 が 行 わ れ て き た ． 図 B.1 は ， 回 転 揺 動 式 三 次 元 LIDAR の 構 造 に つ い て 示 して いる ． 表 B.1 に 諸 元 を 示 す ． 回 転 揺 動 式 三 次 元 LIDAR では ， 二 次 元 LIDAR を テーブルの回 転 に 併 せ て 一 定 の 取 り 付 け 角 度 を 維 持 し た ま ま 回 転 を 行 う こ と が 可 能 な ターンテーブルに設置してある．図 B.2 は ， 回 転 揺 動 式 三 次 元 LIDAR の 一 回 転 す る 間 の 姿 勢 変 化 の 様 子 を 示 して いる ． ターンテーブル上で一定の傾斜を保って回 転 す る 機 構 は ， 遊 星 歯 車 機 構 を 応 用 し センサを揺動させている．

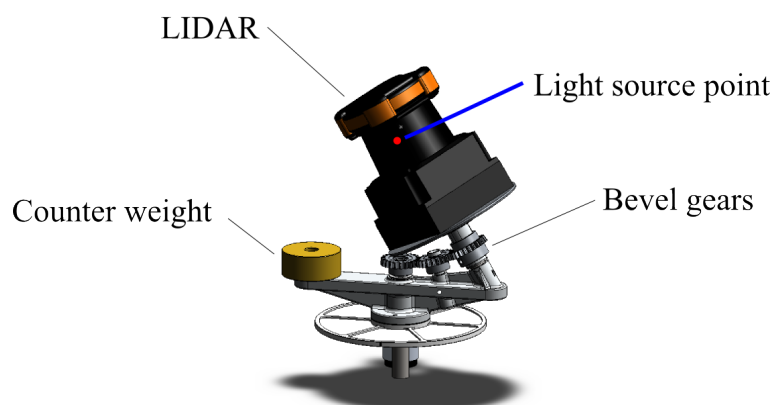


図 B.1: 回 転 揺 動 式 三 次 元 L I D A R の 構 造

表 B.1: 回転揺動式三次元 LIDAR の諸元

Using LIDAR	UTM-30LX
Laser	Class 1 - eye safety $\lambda = 905 \text{ nm}$
Measurement range	0.1m to typically 30-60m
Vertical view	30 to -30 degrees field of view
Horizontal view	270 ° field of view
Accuracy	<1 cm (one sigma at 10 m)
Angular resolution	0.25 ° (horizontal)
Power	12V @ 2.7 Amps
Weight	1250g
Output	21,640 points/sec

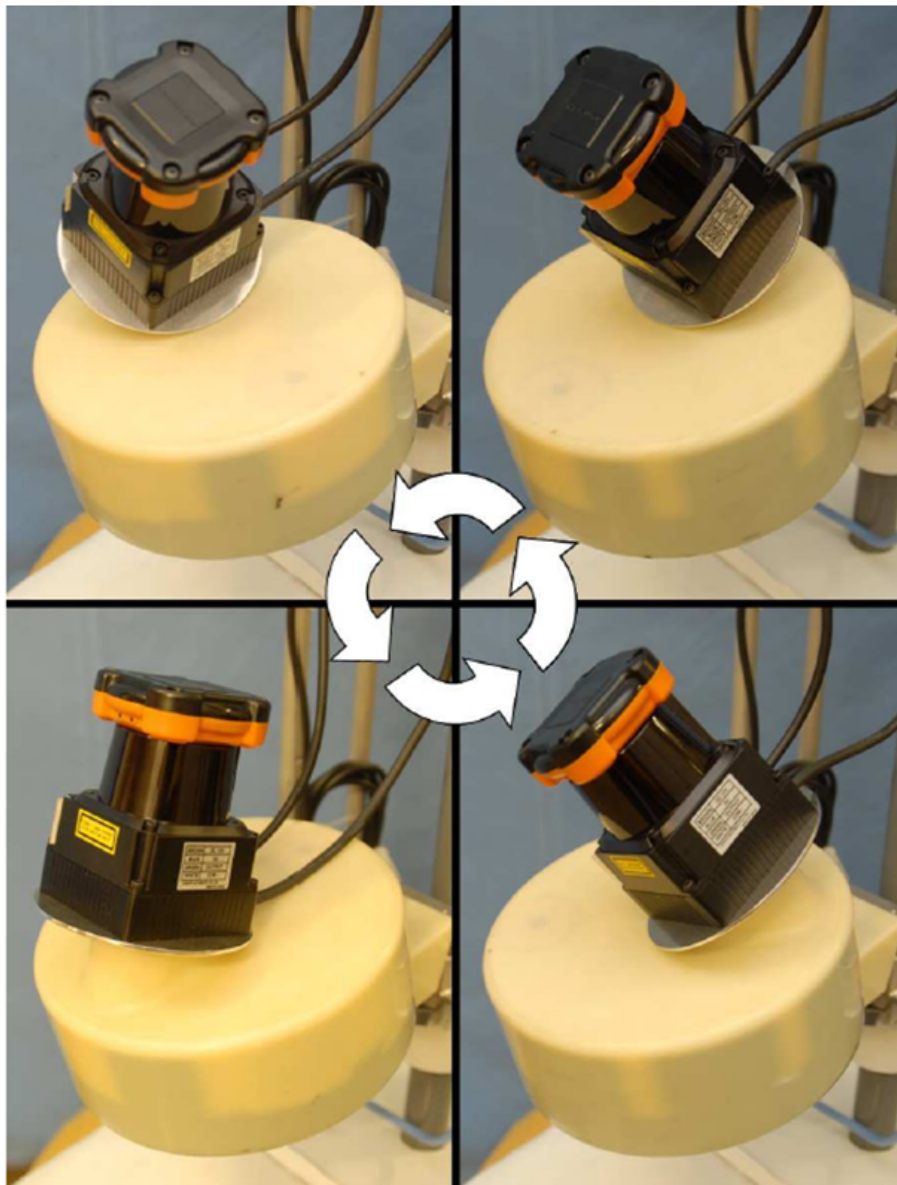


図 B.2: 回転揺動式三次元 LIDAR の姿勢変化

図 B.3 は、回転揺動式三次元 LIDAR の制御システム構成について示している。センサには、UTM-30LX（北陽電機製）を用いた。SH7124 Tiny（Renesas 製）で構成したマイコンボードによりターンテーブルを回転させるモータの制御，ターンテーブル回転角の検出及び LIDAR から出力される 1 周期ごとの同期信号を受信している。また，LIDAR から同期信号にあわせてターンテーブルの回転角度データを LIDAR のスキャンデータを受信するコンピュータ側へ送信し，三次元スキャンデータを計測している。LIDAR を設置したターンテーブルは，およそ 1Hz よりわずかに遅い速さで回転させ，LIDAR の動作周波数 40Hz とは同期していない。これにより，同一地点に留まって揺動式三次元レーザスキャナにより走査を継続した場合，一周前と異なった点の計測ができる。

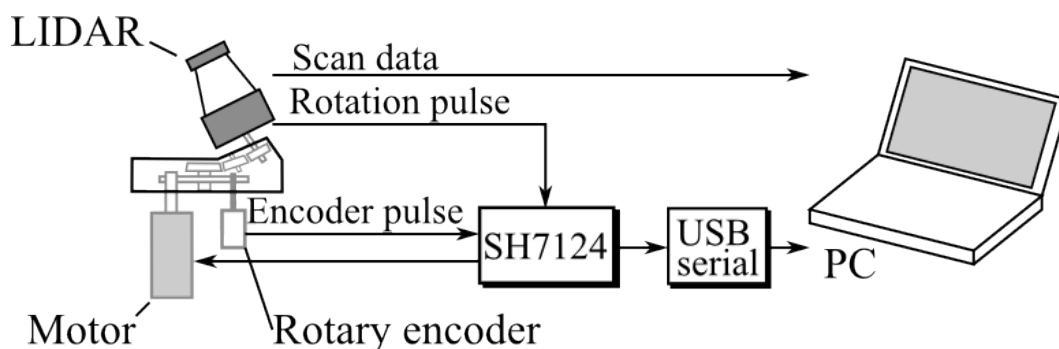


図 B.3: 回転揺動式三次元 LIDAR の制御システム構成

B.2 回転揺動式三次元 LIDAR の座標変換

遊星歯車機構による揺動機構は，二自由度ジンバルを用いた回転式揺動機構 [2] と類似の動きを実現し三次元化を行なっている。二自由度ジンバル機構を用いた三次元化は，ジンバル機構の形状の影響を受けセンサの光源位置を回転中心に置いた場合，センサの視界が制限を受けてしまう。このため，図 B.4 の青丸で示す位置にセンサが配置されることになる。一方，回転揺動式三次元 LIDAR は，遊星歯車機構を用いたターンテーブル上に LIDAR を配置することで，任意の位置にレーザ光源位置を置くことが可能となる。よって，図 B.4 の赤丸の位置に示すように，LIDAR レーザ光源を回転中心に置くことも可能である。この場合，チルト式 3D-LIDAR と異なり，計測点の位置を回転行列のみで表すことが可能である。なお，本揺動機構は LIDAR の光源の中心になるよう設計することで，座標変換を簡単化することができる。

回転揺動式三次元 LIDAR のセンサに用いた UTM-30LX は，水平面 270 度の範囲で，実用上 30m 以下の距離計測が可能である。二次元 LIDAR のスキャン回転角 θ ，計測距離を r とすると，センサを基準とした X_s - Y_s - Z_s 座標系における計測点の位置は，

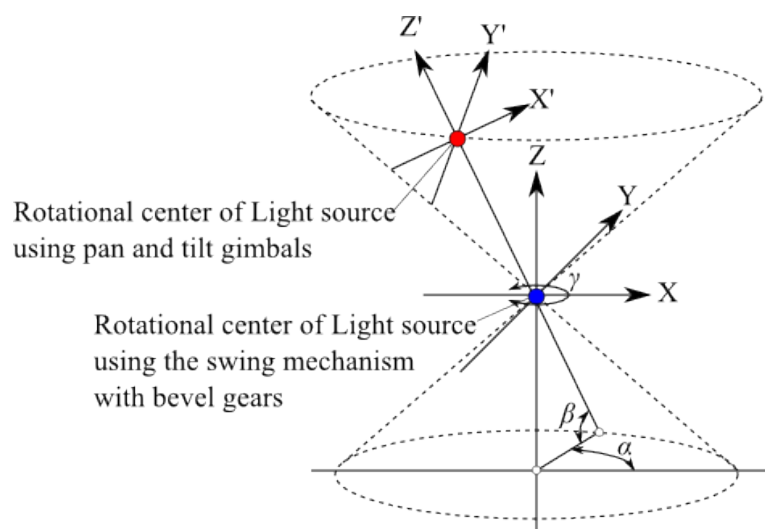


図 B.4: 回転揺動機構と二自由度ジンバルによる LIDAR 光源位置の比較

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \theta \\ r \sin \theta \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

で与えられる。

テーブルの回転角を α とし、LIDAR 取り付け角度を β 、センサ回転軸の傾斜角度を γ とするとそれぞれの同次変換行列は、

$$\text{Rot}(Z, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

$$\text{Rot}(Y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$$\text{Rot}(Z, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

このとき、センサ回転軸の傾斜角度はテーブルの回転角度と同期するため、 $\alpha = -\gamma$ となる。また、LIDAR 取り付け角度 β は、使用するかさ歯車により定数で与えられる。本研究で作成した回転揺動機構では、LIDAR 取り付け角度が 30 度であった。よって、回転揺

動式三次元 LIDAR の計測点の位置は,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = Rot(Z, \alpha) Rot(Y, 30^\circ) Rot(Z, -\alpha) \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

で与えられる.

参考文献

- [1] 松本光広, 吉田智章, 森利宏, 油田信一, 回転式揺動機構と SCIP-3D コマンドシステムを用いた三次元測域センサモジュール, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.75, No.760(2009), pp.3314-3323.
- [2] 大野和則, 桜田健, 竹内栄二郎, 小山順二, 田所論, 高速で密な形状計測を行う小型 3 次元スキャナーの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2009, (2009), 1A1-E04.

付録C LIDAR 受光強度情報を 活用した道路標示検出手法

C.1 緒言

近年、自動車の運転アシストや自律的な走行を目的とした研究 [1]-[4] が盛んに行われている。その中でも、自動車交通の円滑で安全な運用のために設置されている道路標識や道路標示を正確に検出・識別する技術は、自動車の運転を交通法規に則って運転アシストや自律的な走行を行う上で必要不可欠な技術である。

既存の道路標示の検出を対象とした研究に用いられてきたデバイスは、光学式のカメラを用いたものが主であった。8mm ビデオカメラ画像によって、速度制限表示や横断歩道等の符号類の路面標示の識別手法 [5]、車載モノクロカメラを用いた進行方向を指示する矢印などの路面標示の識別手法 [6] が提案されている。また、道路中の車両通行帯を示す中央線や路側帯等の区画線の検出 [7] に関する研究が行われている。これらの研究は、高速フレームレートのカメラの開発や画像処理技術の向上により高い精度で行われ、デバイスの低価格化により一部の市販車両には衝突防止装置等の装備として搭載されるようになってきた。

しかしながら、光学式カメラを用いたこれらの手法は、取得画像が周辺環境光の光量や照射方向が変化することにより見え方や色合いに大きな影響をうけ、状況によっては適切な画像が取得できないという特徴がある。例えば、外部の光が無い夜間での撮影、被写体が極端に明るいまたは暗い場合の白飛びや黒つぶれの発生などである。このため、識別が十分に行えないことが予期される。解決のための一般的な技法としては、露光時間の調整やより幅の広いダイナミックレンジを持つセンサを用いることが挙げられる。しかし、露光時間の延長やワイドダイナミックレンジ化による読み出し時間の延長は処理時間に影響を与え一般道を走行する自動車のセンサとして用いるには問題となる可能性がある。

一方、レーザ光の飛行時間を計測して距離を求める LIDAR は、センサの用いる赤外線レーザ光が外部環境光の影響を受けにくく、能動的に発信するため夜間や暗所においても使用できるという特徴を有している。第4章で示したように、LIDAR には計測距離と同時に発信したレーザ光が計測対象で反射した強さを受光強度情報として取得可能な製品があり、これを物体の識別に用いることが可能である。これらの機能を応用して、Montemerloらは車両の自己位置推定に LIDAR で道路面をスキャンした際に得られた受光強度情報で中央線と路側帯を検出し、車両の車線上の位置を推定 [8] している。また、独立行政法

人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のエネルギー ITS 推進事業 [9] のなかで、LIDAR による区画白線認識技術について研究 [10] が行われている。これらの研究は、LIDAR の受光強度情報を活用して、自己位置推定や車両の走行位置保持などの実現を目指した技術であった。

本研究では、LIDAR の受光強度情報で地表面に塗装させた標示と路面を識別して道路標示を検出する手法について提案する。本手法は、道路面全体の LIDAR から取得した受光強度情報の分布を地表面テクスチャとして画像ファイルを作成する。この地表面テクスチャ画像をテンプレートマッチングの被探索画像として用い道路標示を検出する。この際、用いるテンプレート画像は、日本国における道路標示の規格が道路法及び道路交通法により寸法基準が示され厳格に規定されている標示を基準に準備される。よって、提案手法を用いれば、未知の場所に設置された道路標示を検出可能である。このため、本手法の有効性を実際の一般公道を走行して LIDAR 受光強度データを取得し提案したシステムの検出性能を評価すると共に、カメラでは外部環境光の影響を受け道路標示の検出が難しいと考えられる場所で検出が行えるかを検証する。

第 C.2 節では、本研究で用いる計測機材及び簡便なテンプレートマッチングを用いた検出アルゴリズムのについて述べる。

第 C.3 節では、LIDAR 受光強度情報から作成した地表面テクスチャ画像を用いて、テンプレートマッチングを行う際の適切な類似度尺度を検証する。

第 C.4 節では、一般に供されている公道を用いて、LIDAR 受光強度情報を用いた道路標示の検出実験を行い、有効性を確認する。

第 C.5 節では、本章の結言が述べられている。

C.2 地表面テクスチャを用いた路面標示検出手法

C.2.1 地表面受光強度による地表面テクスチャ画像の作成

図 C.1 は，三次元 LIDAR の HDL-32e[11] を計測車両に搭載した際の座標系について示している．計測車両は，初期の前進方向を Y 軸方向とする X-Y 平面上を走行している．計測車両の姿勢角に関し，ロール角 ϕ ，ピッチ角 θ 及びヨー角 ψ で与えられるので，それぞれの軸周りに回転させたときの回転行列は，

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

となる．HDL-32e のセンサ受光部は，計測車両の鉛直方向に対して反時計回りに回転しており，測定距離 r と共にセンサの回転角度 α 及び反射強度情報を出力する．また内部の 32 個のレーザ発光素子は，それぞれ異なる角度 $\beta_i (i = 1, \dots, 32)$ をもって取り付けられている．このため，その回転行列は，

$$\mathbf{R}_\alpha = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

$$\mathbf{R}_\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (\text{C.5})$$

となる．よって，LIDAR が高さ h に取り付けられ，計測車両の X-Y 平面上の現在位置を X_p, Y_p とすると，測定された点 P の三次元座標は，

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x \mathbf{R}_{\beta_i} \mathbf{R}_\alpha + \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ h \end{bmatrix} \quad (\text{C.6})$$

で与えられる。この際、地面の凹凸やサスペンションの伸縮による取り付け位置の変化を考慮し、路面高さ $\pm 10\text{cm}$ の範囲の測定点を二次元平面上に射影する。本実験では、LIDARの光源を約 2m の高さに設置し、LIDARの位置より前進方向 18m 、幅 5m の範囲の投影された受光強度情報を抽出した。これは、アスファルトに照射するレーザ光の入射角が浅すぎる場合、LIDARの計測に必要な反射波が得られない可能性があるため、入射角を 6 度以上と設定したためである。

抽出した範囲の画像を地表面反射輝度テクスチャ画像と呼称し、テンプレートマッチングを行うための被探索画像とする。地表面反射輝度テクスチャ画像は、LIDARの発光するレーザ光の間隔及びフレームレートから、解像度を 40pixel/m と定め、レーザ光が強く反射した道路上の白色塗装部分を白く、アスファルト路面で反射した際にレーザ光の受光強度が低かった部分を黒く表現してbmp形式で保存する。

図C.2は、LIDAR受光強度情報を用いて地表面テクスチャ画像を作成するために使用した防衛大学校校内に描かれた道路標示を示している。図C.3は、図C.2の画像を真上から見たように射影変換した画像である。撮影点から遠方になるほど射影変換の影響を受け画像が荒く輪郭がぼやけてしまう様子が確認できる。図C.4は、地表面の受光強度情報と車両に取り付けたオドメトリデータから再現した地表面テクスチャ画像である。カメラ画像の射影変換と異なり、LIDARの計測点はLIDARの計測距離と角度情報から三次元の絶対座標が取得できる。このため、計測点情報を俯瞰画像として出力した場合、撮影距離に比例して輪郭がぼやけたり解像度が低下したりという現象は発生しない。よって、本手法は図C.4の様に再現した地表面テクスチャ画像データを用いて道路標示の検出を試みる。

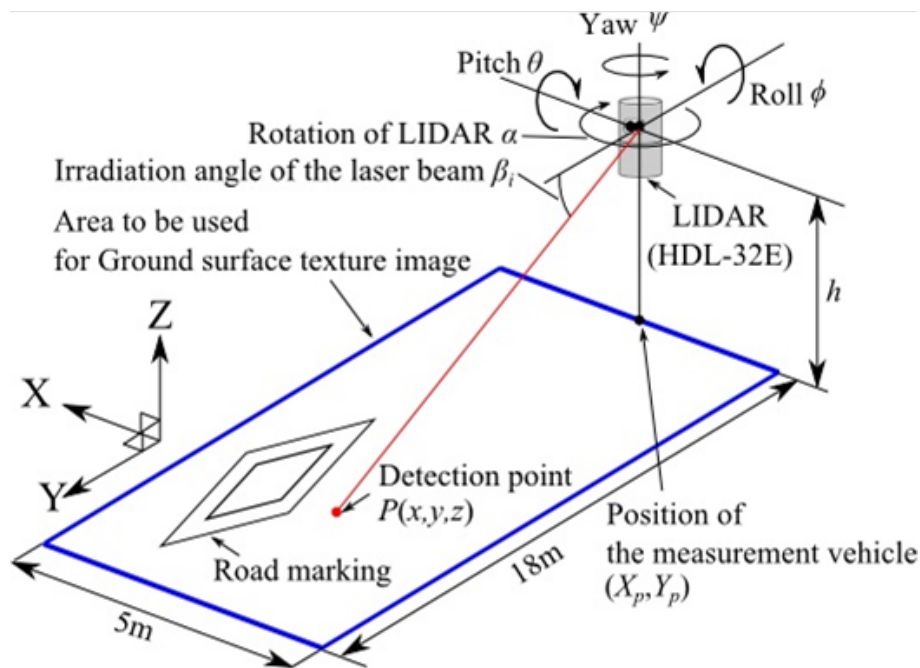


図 C.1: 路面の受光強度情報収集時の機材構成



図 C.2: 実験に用いた校内の道路標示

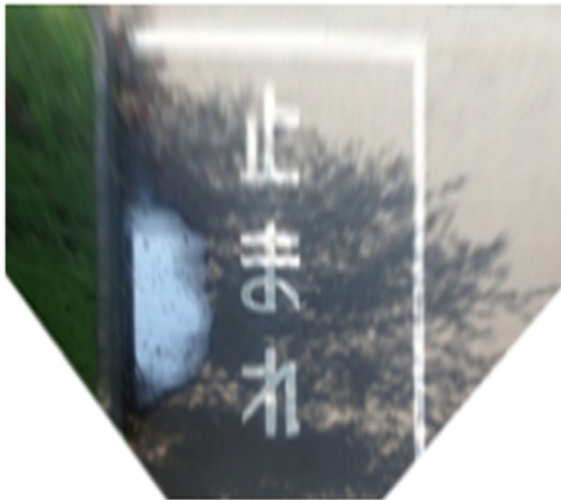


図 C.3: 射影変換後の道路標示



図 C.4: 地表面テクスチャ画像

C.2.2 テンプレート画像の作成要領

本研究で検出対象とする路面標示は，日本国の道路法第四十五条第二項及び道路交通法第九条第三項の規定に基づき「道路標識、区画線及び道路標示に関する命令」[12]及び一般的に道路に用いられている法定外表示の「法定外表示等の設置指針について」[13]として定められた様式とした。

図 C.5 は，法定規則に準じた道路標示の寸法の一列を示している。図 C.6 は，図 C.5 の法定規則の寸法に基づいて作成したテンプレート画像である。テンプレート画像は塗装部分を白色，それ以外を黒色として二値化した。解像度は，地表面テクスチャ画像と同解像度 40pixel/m とし，bmp 形式で作成した。テンプレート画像の縦方向の長さは路面表示と同じ長さとし，横方向の長さは自動車の最大幅 2.5m として設定した。

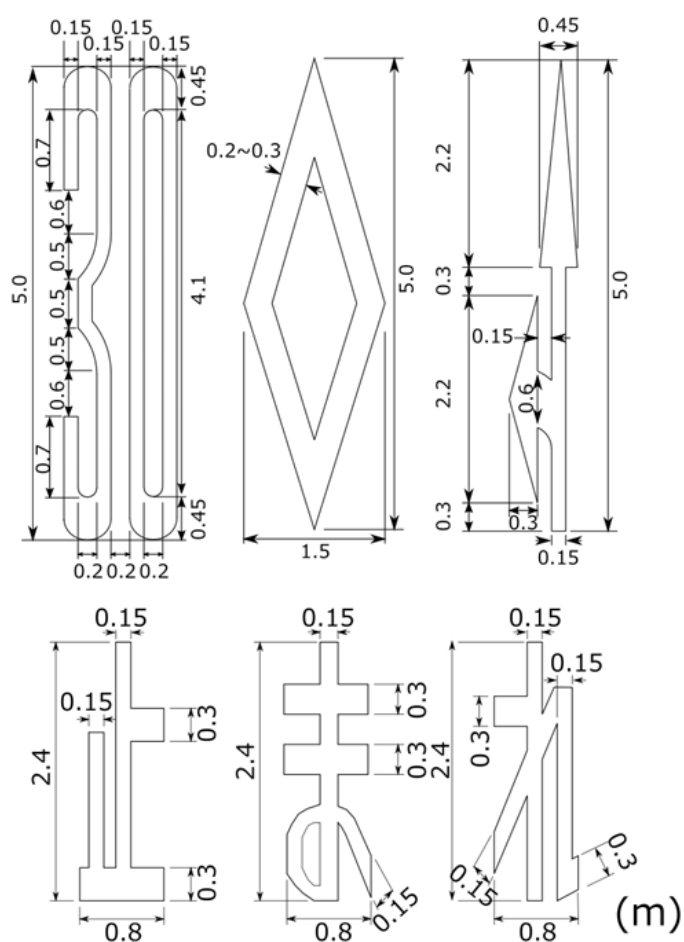


図 C.5: 道路標示の寸法例

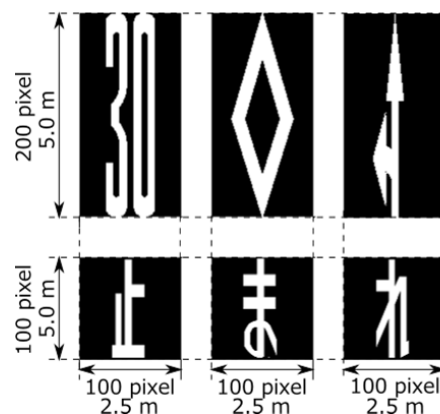


図 C.6: テンプレート画像例

C.2.3 検出処理アルゴリズム

図 C.7 は、提案手法に用いた路面標示判定処理の流れを示している。LIDAR から測距点と受光強度情報を取得すると共に、計測車両に取り付けられたオドメトリ及びジャイロセンサから取得した移動量と姿勢角の情報を統合して地表面テクスチャ画像を作成する。次に、探索対象となるテンプレート画像を用いてテンプレートマッチング [14][15] により画像中の類似度を求める。

この際、「止まれ」と横断歩道又は自転車横断帯あり (STOP), 進行方向別通行区分 (Arrow) そして最高速度標示 (Max speed) をそれぞれで探索する識別器を並列に動作させ高速化を図る。各識別機が出力した結果のうち、探索された類似度が一定閾値以上を示し、そのうち最大の類似度を示す位置を、該当する路面標示が設置されている箇所として出力する。

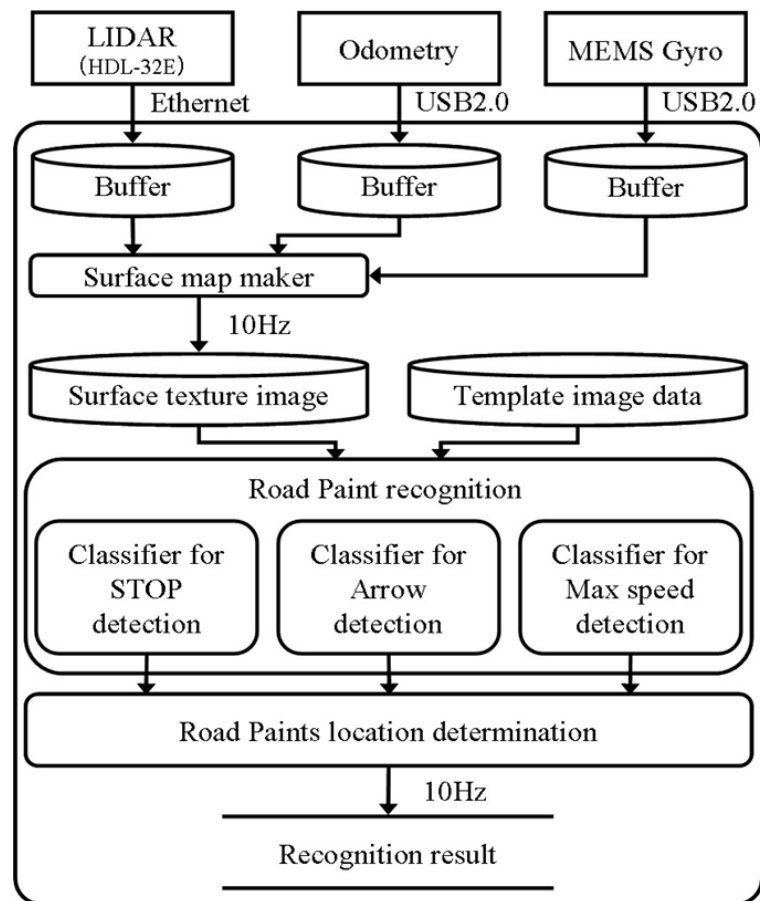


図 C.7: 路面標示判定処理の構成

C.3 道路標示検出に用いる適切な類似度尺度の検討

C.3.1 実験条件

当初、地表面テクスチャ画像を用いてテンプレートマッチングを行うにあたり、最も適当な類似度尺度を選定するための予備実験を行う。テンプレートマッチングの類似度尺度には様々な手法が提案 [16]-[19] されているが、本実験では検証を容易にするため、画像処理分野で広く用いられている OpenCV ライブラリ [20] に標準で利用可能な、正規化相互相関 (Normalized Cross-Correlation : NCC)、相互相関係数 (Zeromeans Normalized Cross-Correlation : ZNCC) 及び差の 2 乗和 (Sum of Squared Difference : SSD) を用いる。この三者を用いて、提案手法アルゴリズムにおける検出率と処理時間の違いを確認した。実装に当たっては GCC コンパイラ 4.6.3 最適化オプション-O3 及び OpenCV2.4.1 のライブラリを用いた。検証には、防衛大学校内の図 7.2.8 に示す「止まれ」が標示されている場所を用いた。使用した地表面テクスチャ画像は、図 7.2.8 の道路標示に向かい前進しながら取得した 1018 枚を用いる。これらの画像は、車両が直進経路を前進している状況を想定しており、路面標示が実験車両に正対し極端な回転が発生していないものとする。検出の正誤判定の閾値は、各類似尺度においてポジティブサンプル群とネガティブサンプル群を識別した際の類似度の中間値を用いる。

C.3.2 実験機材構成

図 C.8 に本研究に使用した計測車両の外観を、図 C.9 に外形寸法を示す。実験車両は、トヨタ社製 NHW20 型プリウスをベース車両として使用している。計測車両上部には、HDL-32e を配置して車両全周の視界を得ている。また、計測車両後輪両側には、車輪一回転当り 360 パルスのロータリーエンコーダを配置している。オドメトリのデータは、ワンチップマイコンで構成した受信装置により 100Hz で移動量を計測し、移動距離と車両の姿勢角の計測に使用する。一連の検出処理には、CPU Intel COREi5 M520 2.4GHz, RAM 8GB, OS Ubuntu12.04 の PC を使用した。図 C.10 に図 C.7 の検出処理を実装した検出ソフトウェアの確認画面を示す。図 7.3.3 中左上の検出結果 Window が、図 C.7 に示す Road Paint recognition が出力した結果を標示する。図 C.10 中の赤色、緑色及び青色円はそれぞれ「止」、「ま」、「れ」の検出座標を中心に描かれている。実験結果は、これらの確認画面を目視で確認しながら集計した。



図 C.8: 地表面受光強度情報収集に用いた計測車両外観

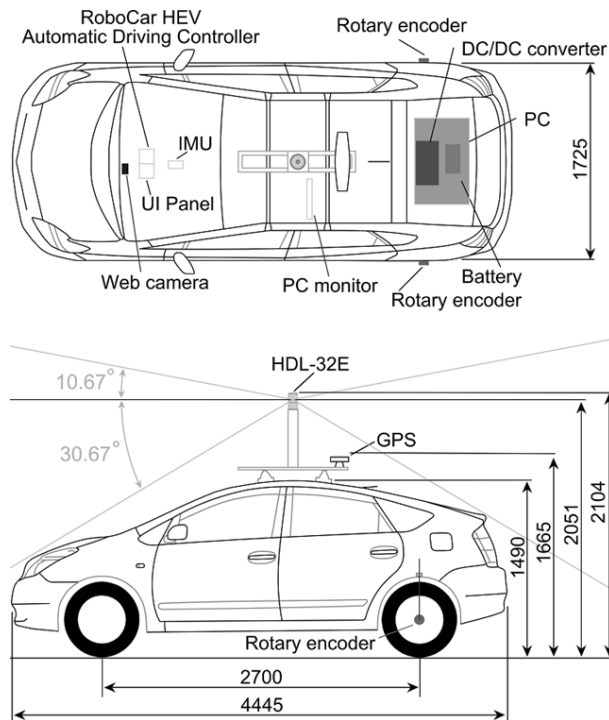


図 C.9: 計測車両外形

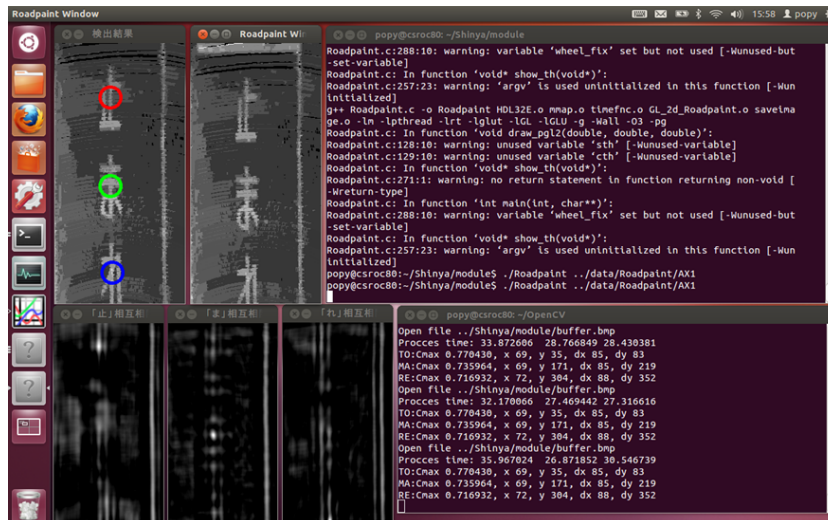


図 C.10: 検出ソフトウェアの確認画面

C.3.3 校内予備実験結果

「止まれ」道路標示の文字ごとの検出率を表 C.1 に示す。実験結果からは、「ま」と「れ」の文字に対し「止」の検出率が約 2.5~3.5%低いことがわかった。検出の不良は、文字の縦方向に最大類似度位置がずれる場合であった。これは、「止」の形状が他の二つの文字と比較して直線のみで構成されているため、形状としての特長が少ないためと考えられる。一方、文字毎にそれぞれの検出率は、類似度尺度が同じであれば大きな変化がないことが判った。

表 C.2 は、類似度尺度ごとの検出率と平均処理時間を示している。平均処理時間は、地表面テクスチャ画像 1 枚に対する図 C.7 に示す Road Paint recognition が処理を完了するのにかかった時間である。これらの結果からは、他の類似度尺度に比べ NCC による検出率が高く処理時間も短いことがわかった。

表 C.1: 文字毎の検出率 (正解枚数/全体の枚数)

Method	” 止 ”	” ま ”	” れ ”
NCC	97.50% (273/280)	100% (280/280)	100% (280/280)
ZNCC	97.50% (273/280)	99.29% (278/280)	94.29% (264/280)
SSD	84.29% (236/280)	87.86% (246/280)	89.29% (250/280)

表 C.2: 類似度尺度の違いによる検出率と処理時間

Method	Detection rate	Average time
NCC	99.17%	14.16 ms
ZNCC	97.02%	14.46 ms
SSD	87.14%	14.61 ms

C.4 一般公道における道路標示を用いた検出実験

C.4.1 道路標示計測実験条件

実験は、2013年5月23日16時から17時の間に図 C.11 に示す茨城県つくば市街の一般道であるゆりのき通り~かえで通りの経路 (約 6.5 km) を用いて行った。実験計測時の天候は晴れ、路面は乾燥状態であった。当該経路には進行方向別通行区分 (●), 止まれ (○), 横断歩道又は自転車横断帯あり (◇) 及び最高速度 30km/h (□) の道路標示が存在する。本実験では、これらに着目して評価を行う。計測車両は、走行経路の法定速度に準じて最高速度を 30 km/h として計測させる。また、本実験では、計測車両が道路標示に

対して正対し直進して進入する状況を想定しており、路面標示の回転を考慮していない。

公道における道路標示の検出は、図 C.7 で示した検出処理に従った検出ソフトを用いる。防衛大学校内において行った前節の校内予備実験結果から、プレートマッチング用いる類似尺度は、NCC が適当であるという結果が得られている。本実験では、マッチングの評価尺度として NCC を用いた。検出の正誤判定の閾値は、道路表示ごとにポジティブサンプル群とネガティブサンプル群を事前に準備し、識別した際の類似度の中間値を用いた。この中間値を越えた箇所を道路標示の重心位置として確認する。

実験結果の正誤評価は、車載カメラの画像と図 C.10 に示す様な検出結果を目視で確認し評価する。検出率の評価対象は、一つの道路標示を通過する際に取得できる約 10 から 12 枚の地表面テクスチャ画像を使用し、検出率は、

$$\text{検出率} = \frac{\text{正しく道路標示が検出された画像数}}{\text{地表面テクスチャ画像の総数}} \quad (\text{C.7})$$

とした。

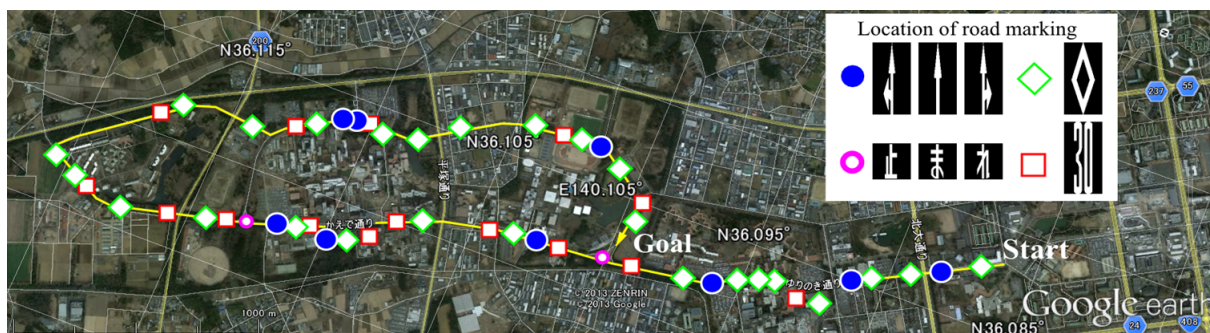


図 C.11: 公道実験走行経路実験走行に使用した経路
(茨城県つくば市、ゆりのき通り～かえで通り約 6.5km)

C.4.2 実験機材構成

図 C.12 は、本章実験で道路表面の計測に用いた計測車両の外観を、図 C.13 は計測車両の外形を示している。計測車両は、後輪上部に LIDAR を搭載し、レーザ受光部が地上高 1.95 m の位置から地表面の反射輝度を収集する。計測車両後輪軸には、1 回転当たり 300 パルスのロータリーエンコーダを配置し、ワンチップマイコンで構成した受信装置により 100Hz で移動量を計測する。また、計測車両後部に MEMS ジャイロを搭載して車両のロール角、ピッチ角及びヨー角の計測を行った。また、Webcam C920 (Logicool 製) を搭載して、計測走行時の映像を記録した。タンデムシート上には、計測データを記録するための PC、DC / AC コンバータ等をボックス内に収納した。一連の検出処理には、CPU Intel COREi5 M520 2.4GHz, RAM 8GB, OS Ubuntu12.04 の PC を使用した

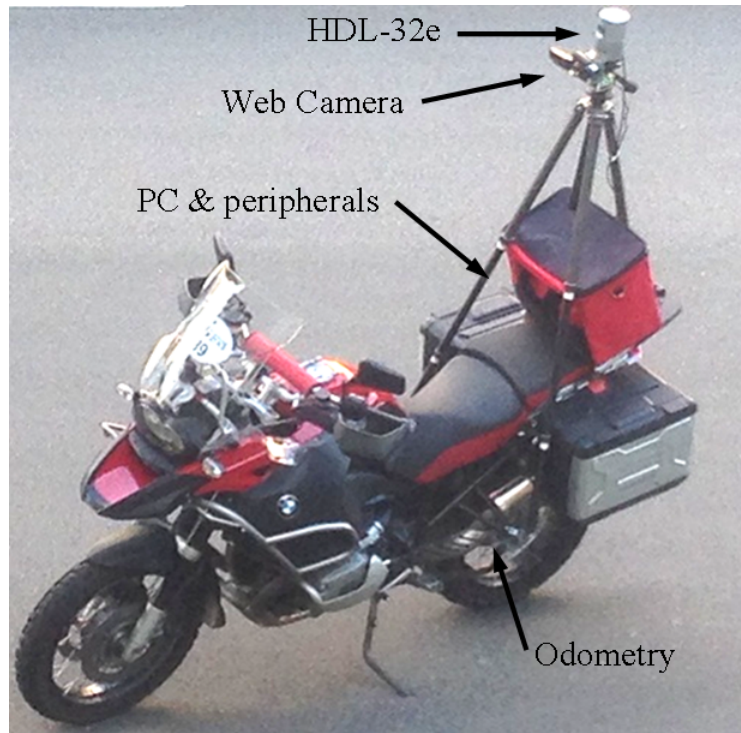


図 C.12: 公道実験計測車両外観

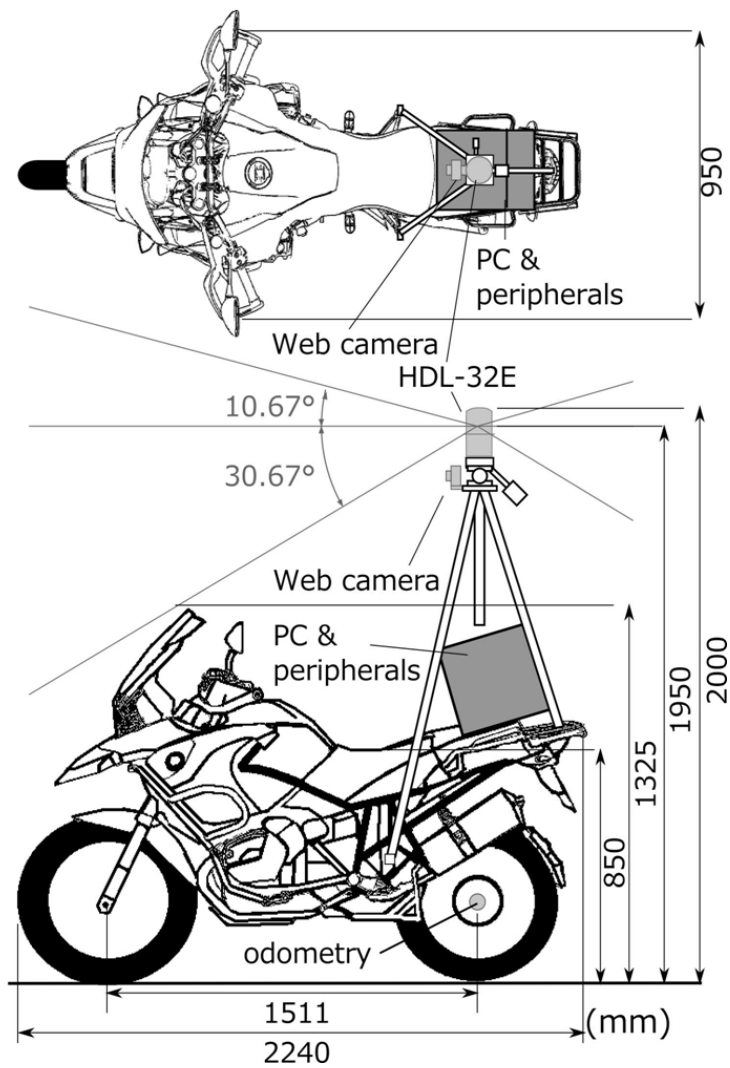


図 C.13: 公道実験計測車両外形

C.4.3 公道実験結果

図 C.14 は、それぞれ公道実験走行中に車載カメラで撮影した道路標示の画像を示している。図 C.15 は、図 C.14 それぞれの示す付近において、提案手法を用いて作成された地表面テクスチャ画像である。

図 C.14(a) 及び (b) の横断歩道又は自転車横断帯あり標示と進行方向別通行区分標示は、図 C.15(a) 及び (b) の取得された地表面テクスチャ画像の外形が概ね再現されている様子が確認できる。一方、最高速度 30km/h の標示の地表面テクスチャ画像は、他の標示に比べ濃淡の差が明確になっていない。これは、白色塗料と橙色塗料の性質の差が原因だと考えられる。

図 C.14(c) は、木漏れ日が差し込んでいる道路面上の横断歩道又は自転車横断帯ありの標示を車載カメラで撮影した様子である。光学式カメラの取得画像では、白とびの発生により木漏れ日部分と標示の白色部分が溶け込み、色区分の境界が曖昧となっている。LIDAR の受光輝度情報から再現した図 C.15(c) の地表面テクスチャ画像では、外部の環境光が標示に対して一様に当たっている図 C.15(a) 及び (b) の検出結果と同様の標示が再現されている。これは、LIDAR の特性を用いた本提案手法が外部環境光の影響を受けにくく、カメラ画像に影響が出やすい場所でも検出が可能であることを確認した。



(a) Combined through and left-turn arrow in this lane.



(b) Speed limit 30km/h and Pedestrian crossing warning sign.



(c) Sunshine filtering through foliage hits PED Xing warning sign.

図 C.14: 公道実験走行中の車載カメラ画像

実験走行経路全体における道路標示検出の結果を表 C.3 に示す。最高速度 30 km は約 92%，横断歩道については約 87% の確率で検出を行なえることが確認できた。それぞれの道路標示が未検出であったのは，地表面テクスチャ画像内に含まれる道路標示の縦方向位置が 12m から 18m の間に表示されている場合であった。これは，地表面受光強度データの分解能とノイズによる類似度の低下が原因であったと考えられる。一方，方向指示標示の検出において，直進の標示の検出精度が他の標示に比べ低下した。この原因は直進の標示が，最高速度，横断歩道ありそして他の方向指示標示に比べ特徴が少なく，中央線や区分線といった標示が持つ前後に細長い図形という共通の特徴を有していたため，別の標示を誤認識した結果であると考えられる。誤認識への対応として，直進の方向指示標示の様な特徴が少ない標示を識別する際に，矢印部分等の特徴点に着目した識別器を準備し，より詳細な判定を行なう必要があると考えられる。

提案手法の検出処理は，各識別器の処理時間は約 15ms で実行され，検出処理全体では LIDAR のフレームレートに合わせた 10Hz で実行された。

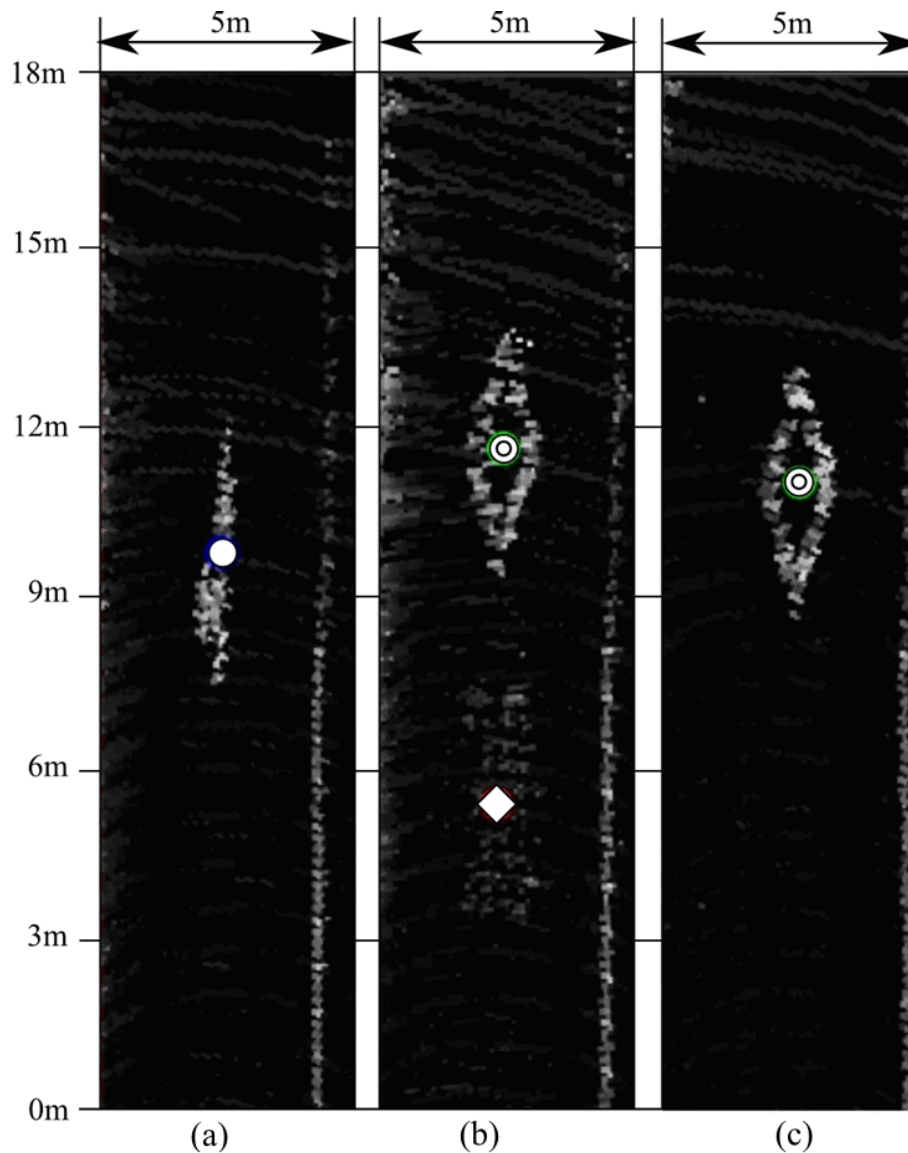


図 C.15: 公道実験走行における道路標示検出結果

表 C.3: 公道における道路標示検出結果

Detection target	Detection rate (Number of correct / total)
Speed limit 30km/h	92.5% (111/120)
Pedestrian crossing warning sign	87.7% (313/357)
Combined through and left-turn arrow	92.0% (104/113)
Ahead only in this lane	77.2% (102/132)
Combined through and right-turn arrow	92.0% (35/37)

C.5 結 言

本研究では，LIDAR の受光強度情報の特性を応用し，道路地表面の受光強度情報を用いた路面標示検出アプリケーションを作成し，受光強度情報の有効性を確認した．特に簡便なテンプレートマッチングを用いて検出を実現した手法を公道実験において確認し，以下の知見を得た．

- 外部環境光の影響により光学式カメラで撮影した画像に白つぶれが発生している状況においても，提案手法による地表面テクスチャ画像の見え方に変化は無く，道路標示の識別も速度 30km/h において可能であることを確認した．
- 一般道公道に表示されている道路標示に対して，提案手法による検出を試みた結果，最高速度 30km/h 標示は約 92%，横断歩道あり標示は約 87% の検出率であった．特徴の少ない方向指示標示は，中央線等の区画線を誤認識する傾向が見られ，検出精度向上が求められる．
- 提案手法による一連の検出処理を PC 上で 10Hz の速度で実行できるプログラムとなった．現状のシステム構成においては，時速 30km 程度の走行において使用することが可能である．将来的には LIDAR の情報取得周期の向上と検出アルゴリズムの効率化により時速 60km 程度の一般道走行に応用が可能であると考えられる．

今後の課題として，検出率の低かった方向指示標示の検出率の改善を試みると共に，車両の高速走行時に LIDAR のフレームレートの不足に対応するための安定した検出手法の作成を目指す．また，実際の一般公道に表示されている道路標示には，経年変化による老朽化による塗装の剥がれなどがあり，全ての道路標示が最適な状況を維持しているとは言えない．このため，この様な一定の割合で表示が見えない場合においても検出が可能な手法を模索していく．

参考文献

- [1] Noda, Masafumi, et al. "Recognition of road markings from in-vehicle camera images by a generative learning method." Proceedings of the 11th IAPR Conference on Machine Vision Applications. No. 15-5. (2009).
- [2] 高木雅成, 藤吉弘亘, "SIFT 特徴量を用いた交通道路標識認識", 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 129 (2009) No. 5, pp 824-831
- [3] 須田義大, 青木啓二, "自動運転技術の開発動向と技術課題", 情報管理, Vol.57, No.11(2015), pp 809-817
- [4] 特許庁, 平成 25 年度 特許出願技術動向調査報告書 (概要) 自動運転自動車, http://www.jpo.go.jp/shiryuu/pdf/gidou-houkoku/25_automatic_driving.pdf
- [5] 三宅 智彌, 三矢 武法, 船橋 典克, 長坂 保典, 鈴木 宣夫: 車載カメラによる道路上の標示認識, 中部大学工学部紀要, 第 34 卷 (1998), pp.41-48
- [6] Yunchong Li, Kezhong He, and Peifa Jia : " Road Markers Recognition Based on Shape Information ", Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2007, pp.117-122, Istanbul, Turkey, June 13-15, 2007.
- [7] Joel C. McCall, Mohan M. Trivedi : " Video-based lane estimation and tracking for driver assistance: survey, system, and evaluation ", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2006 (2006), pp.20-37.
- [8] M.Montemerlo, et al., Junior: The Stanford Entry in the Urban Challenge, Springer Tracts in Advanced Robotics Volume 56, pp.91-123 (2008)
- [9] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, エネルギー ITS 推進事業, http://www.nedo.go.jp/activities/FK_00023.html
- [10] 松浦 充保, 高須賀 直一, 磯貝 俊樹, 吉田 大輝: 隊列走行におけるレーザレーダ白線検知技術, デンソーテクニカルレビュー, Vol. 17 (2012), pp.71-77
- [11] Velodyne, HDL-32E, <http://velodynelidar.com/lidar/hdlproducts/hdl32e.aspx>
- [12] 道路標識、区画線及び道路標示に関する命令, <http://www.mlit.go.jp/road/sign/kijyun/kukaku/ss-kukaku-index.html>,
- [13] 法定外表示等の設置指針について, <http://www.npa.go.jp/pdc/notification/koutuu/kisei/kisei20140128.pdf>,
- [14] 井上誠喜, 八木伸行, 林正樹, 中須英輔, 三谷公二, 奥井誠人, " C 言語で学ぶ実践画像処理 ", オーム社 (1999)
- [15] 山田宏尚, " デジタル画像処理 ", ナツメ社 (2001)
- [16] N.Dalal, and B.Triggs, "Histograms of Oriented Gradients for Human Detection", Proceeding of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, (2005), pp.886-893

- [17] K.Sumii, M.Hashimoto, H.Okuda, S.Kuroda, "Three-Level Broad-Edge Matching and its application to Real-time Vision System", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E78-D, No.12 (1995) pp.1526-1532
- [18] 村瀬一朗, 金子俊一, 五十嵐悟, "増分符号相関によるロバスト画像照合", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J83?D?II, No.5 (2000), pp.1323?1331
- [19] F.Ullah, S.Kaneko, and S.Igarashi, "Orientation Code Matching for Robust Object Search", IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E84-D, No.8 (2001), pp.999-1006
- [20] OpenCV.org, <http://opencv.org/>