

卒業論文

Navigation2 における
パラメータがロボットの挙動に与える影響の調査

An Investigation of the Effects of

Parameter in Navigation2 on Robot Behavior

2026 年 1 月 19 日 提出

指導教員 林原 靖男 教授

千葉工業大学 先進工学部 未来ロボティクス学科

22C1085 坪内優輝

概要

Navigation2 におけるパラメータ調整が ロボットの挙動に与える影響の調査

本論文では、ROS 2 における Navigation2 を用いた自律移動ロボットのパラメータ調整が、ロボットの挙動に与える影響について調査する。本研究室では、屋外自律移動ロボットの研究を行っており、津田沼チャレンジやつくばチャレンジといった実環境での自律走行競技に参加している。

Navigation2 を用いた自律移動では、自己位置推定、経路計画、障害物回避などを実現するために多数のパラメータを適切に設定する必要がある。しかし、これらのパラメータがロボットの挙動にどのような影響を与えるかについては十分に整理されておらず、ロボットを調整する際に、具体的にどのパラメータを変更すればいいかわからないことがある。

そこで本研究では、Navigation2 における各種パラメータを変化させた際のロボットの挙動の変化を明らかにすることを目的とする。ロボットの挙動に影響を与えると考えられるパラメータを対象として走行実験を行い、それぞれの設定値における走行挙動を比較・分析した。

実験の結果、調査対象とした 28 のパラメータの中から、ロボットの走行安定性や経路追従性能に大きな影響を与えるものを確認することができた。これらの結果から、Navigation2 におけるパラメータ調整の指針を得ることができ、今後のロボット調整作業の効率化や、問題の挙動の原因究明に繋がることが示された。

キーワード: 屋外自律移動ロボット、ナビゲーション、パラメータ

abstract

Investigation of robot behavior when adjusting parameters in Navigation2

In this thesis, we investigate the effects of parameter tuning on the behavior of an autonomous mobile robot using Navigation2 in ROS 2. Our laboratory conducts research on outdoor autonomous mobile robots and has participated in real-world autonomous navigation competitions such as the Tsudanuma Challenge and the Tsukuba Challenge.

Autonomous navigation using Navigation2 requires the appropriate configuration of a large number of parameters to achieve functions such as self-localization, path planning, and obstacle avoidance. However, the influence of these parameters on robot behavior has not been sufficiently organized, and during robot tuning, it is often unclear which parameters should be adjusted to address specific behavioral issues.

Therefore, the objective of this study is to clarify the changes in robot behavior caused by varying individual parameters in Navigation2. Driving experiments were conducted by modifying parameters that are considered to affect robot behavior, and the resulting motion characteristics under different parameter settings were compared and analyzed.

As a result of the experiments, among the 28 parameters investigated, we identified several parameters that have a significant impact on the robot's driving stability and path-following performance. These findings provide practical guidelines for parameter tuning in Navigation2 and demonstrate the potential to improve the efficiency of robot tuning and facilitate the identification of causes of undesirable behaviors in future autonomous navigation systems.

keywords: outdoor autonomous mobile robot,navigation,parameters

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	論文の構成	2
第 2 章	要素技術	3
2.1	ROS2	3
2.2	Navigation2	3
2.3	emcl2	4
第 3 章	パラメータ概要	6
3.1	調査するパラメータ	6
3.2	パラメータの詳細	9
3.2.1	emcl2	9
3.2.2	Navigation2	10
第 4 章	実験	14
4.1	実験概要	14
4.1.1	実験目的	14
4.1.2	実験装置	15
4.1.3	実験環境及び走行ルート	16
4.1.4	実験方法	16
4.1.5	実験条件及びパラメータ設定	17

4.2 実験結果	21
4.2.1 実験結果 (emcl2)	21
4.2.2 実験結果 (Nav2_Controller)	43
4.2.3 実験結果 (Nav2_Costmap)	65
4.2.4 実験結果 (Nav2_Velocity Smoother)	81
4.2.5 実験結果 (Nav2_planner goal)	93
第 5 章 結論	105
参考文献	107
付録	108
謝辞	109

図目次

2.1	Structure of Navigation2	4
4.1	ORNE-box3(source: [4])	15
4.2	Overview of ORNE-box3 and its onboard sensors	15
4.3	Course map of the Tsudanuma Challenge 2025(source: [5])	16
4.4	Base orientation	22
4.5	Base orientation version map	23
4.6	Base position	23
4.7	Base position version map	24
4.8	Robot orientation with fw_dev_per_fw = 0.01	24
4.9	Robot position with fw_dev_per_fw = 0.01	25
4.10	Robot orientation with fw_dev_per_fw = 0.05	25
4.11	Robot position with fw_dev_per_fw = 0.05	25
4.12	Robot orientation with fw_dev_per_fw = 0.1	26
4.13	Robot position with fw_dev_per_fw = 0.1	26
4.14	Robot orientation with fw_dev_per_fw = 0.3	26
4.15	Robot position with fw_dev_per_fw = 0.3	27
4.16	Robot orientation with fw_dev_per_fw = 0.4	27
4.17	Robot position with fw_dev_per_fw = 0.4	27
4.18	Robot orientation with fw_dev_per_fw = 0.5	28
4.19	Robot position with fw_dev_per_fw = 0.5	28
4.20	Robot orientation with fw_dev_per_rot = 0.001	29

4.21	Robot position with fw_dev_per_rot = 0.001	29
4.22	Robot orientation with fw_dev_per_rot = 0.01	29
4.23	Robot position with fw_dev_per_rot = 0.01	30
4.24	Robot orientation with fw_dev_per_rot = 0.1	30
4.25	Robot position with fw_dev_per_rot = 0.1	30
4.26	Robot orientation with fw_dev_per_rot = 0.5	31
4.27	Robot position with fw_dev_per_rot = 0.5	31
4.28	Robot orientation with rot_dev_per_fw = 0.01	32
4.29	Robot position with rot_dev_per_fw = 0.01	32
4.30	Robot orientation with rot_dev_per_fw = 0.2	32
4.31	Robot position with rot_dev_per_fw = 0.2	33
4.32	Robot orientation with rot_dev_per_fw = 0.3	33
4.33	Robot position with rot_dev_per_fw = 0.3	33
4.34	Robot orientation with rot_dev_per_fw = 0.4	34
4.35	Robot position with rot_dev_per_fw = 0.4	34
4.36	Robot orientation with rot_dev_per_fw = 0.5	34
4.37	Robot position with rot_dev_per_fw = 0.5	35
4.38	Robot orientation with rot_dev_per_rot = 0.1	36
4.39	Robot position with rot_dev_per_rot = 0.1	36
4.40	Robot orientation with rot_dev_per_rot = 0.3	36
4.41	Robot position with rot_dev_per_rot = 0.3	37
4.42	Robot orientation with rot_dev_per_rot = 0.4	37
4.43	Robot position with rot_dev_per_rot = 0.4	37
4.44	Robot orientation with rot_dev_per_rot = 0.5	38
4.45	Robot position with rot_dev_per_rot = 0.5	38
4.46	Robot orientation with laser_likelihood_max_dist = 0.5	39
4.47	Robot position with laser_likelihood_max_dist = 0.5	39
4.48	Robot orientation with laser_likelihood_max_dist = 1.0	40
4.49	Robot position with laser_likelihood_max_dist = 1.0	40

4.50	Robot orientation with range_threshold = 0.5	41
4.51	Robot position with range_threshold = 0.5	41
4.52	Robot orientation with range_threshold = 0.9	41
4.53	Robot position with range_threshold = 0.9	42
4.54	Robot orientation with max_vel_x = 0.2	43
4.55	Robot position with max_vel_x = 0.2	43
4.56	Robot orientation with max_vel_x = 1.0	44
4.57	Robot position with max_vel_x = 1.0	44
4.58	Robot orientation with max_vel_theta = 0.4	45
4.59	Robot position with max_vel_theta = 0.4	45
4.60	Robot orientation with max_vel_theta = 1.0	46
4.61	Robot position with max_vel_theta = 1.0	46
4.62	Robot orientation with max_speed_xy = 0.1	47
4.63	Robot position with max_speed_xy = 0.1	47
4.64	Robot orientation with max_speed_xy = 0.5	48
4.65	Robot position with max_speed_xy = 0.5	48
4.66	Robot orientation with max_speed_xy = 1.5	48
4.67	Robot position with max_speed_xy = 1.5	49
4.68	Robot orientation with min_theta_velocity_threshold = 0.01	50
4.69	Robot position with min_theta_velocity_threshold = 0.01	50
4.70	Robot orientation with min_theta_velocity_threshold = 0.1	50
4.71	Robot position with min_theta_velocity_threshold = 0.1	51
4.72	Robot orientation with min_theta_velocity_threshold = 1.0	51
4.73	Robot position with min_theta_velocity_threshold = 1.0	51
4.74	Robot orientation with acc_lim_x = 0.1	52
4.75	Robot position with acc_lim_x = 0.1	52
4.76	Robot orientation with acc_lim_x = 0.5	53
4.77	Robot position with acc_lim_x = 0.5	53
4.78	Robot orientation with acc_lim_x = 1.5	53

4.79	Robot position with acc_lim_x = 1.5	54
4.80	Robot orientation with acc_lim_theta = 0.1	54
4.81	Robot position with acc_lim_theta = 0.1	55
4.82	Robot orientation with acc_lim_theta = 1.0	55
4.83	Robot position with acc_lim_theta = 1.0	55
4.84	Robot orientation with acc_lim_theta = 4.0	56
4.85	Robot position with acc_lim_theta = 4.0	56
4.86	Robot orientation with linear_granularity = 0.01	57
4.87	Robot position with linear_granularity = 0.01	57
4.88	Robot orientation with linear_granularity = 0.1	58
4.89	Robot position with linear_granularity = 0.1	58
4.90	Robot orientation with linear_granularity = 0.5	58
4.91	Robot position with linear_granularity = 0.5	59
4.92	Robot orientation with angular_granularity = 0.001	60
4.93	Robot position with angular_granularity = 0.001	60
4.94	Robot orientation with angular_granularity = 0.01	60
4.95	Robot position with angular_granularity = 0.01	61
4.96	Robot orientation with angular_granularity = 0.04	61
4.97	Robot position with angular_granularity = 0.04	61
4.98	Robot orientation with xy_goal_tolerance = 0.01	62
4.99	Robot position with xy_goal_tolerance = 0.01	63
4.100	Robot orientation with xy_goal_tolerance = 0.1	63
4.101	Robot position with xy_goal_tolerance = 0.1	63
4.102	Robot orientation with xy_goal_tolerance = 0.4	64
4.103	Robot position with xy_goal_tolerance = 0.4	64
4.104	Robot orientation with global_resolution = 0.05	65
4.105	Robot position with global_resolution = 0.05	65
4.106	Robot orientation with global_resolution = 0.5	66
4.107	Robot position with global_resolution = 0.5	66

4.108	Robot orientation with global_resolution = 1.0	66
4.109	Robot position with global_resolution = 1.0	67
4.110	Robot orientation with global_cost_scaling_factor = 1.0	67
4.111	Robot position with global_cost_scaling_factor = 1.0	68
4.112	Robot orientation with global_cost_scaling_factor = 5.0	68
4.113	Robot position with global_cost_scaling_factor = 5.0	68
4.114	Robot orientation with global_cost_scaling_factor = 10	69
4.115	Robot position with global_cost_scaling_factor = 10	69
4.116	Robot orientation with global_inflation_radius = 0.1	70
4.117	Robot position with global_inflation_radius = 0.1	70
4.118	Robot orientation with global_inflation_radius = 1.0	71
4.119	Robot position with global_inflation_radius = 1.0	71
4.120	Robot orientation with global_inflation_radius = 2.0	71
4.121	Robot position with global_inflation_radius = 2.0	72
4.122	Robot orientation with local_resolution = 0.05	73
4.123	Robot position with local_resolution = 0.05	73
4.124	Robot orientation with local_resolution = 0.5	73
4.125	Robot position with local_resolution = 0.5	74
4.126	Robot orientation with local_resolution = 1.0	74
4.127	Robot position with local_resolution = 1.0	74
4.128	Robot orientation with local_cost_scaling_factor = 1.0	75
4.129	Robot position with local_cost_scaling_factor = 1.0	76
4.130	Robot orientation with local_cost_scaling_factor = 5.0	76
4.131	Robot position with local_cost_scaling_factor = 5.0	76
4.132	Robot orientation with local_cost_scaling_factor = 10	77
4.133	Robot position with local_cost_scaling_factor = 10	77
4.134	Robot orientation with local_inflation_radius = 0.1	78
4.135	Robot position with local_inflation_radius = 0.1	78
4.136	Robot orientation with local_inflation_radius = 0.5	78

4.137	Robot position with local_inflation_radius = 0.5	79
4.138	Robot orientation with local_inflation_radius = 1.0	79
4.139	Robot position with local_inflation_radius = 1.0	79
4.140	Robot orientation with local_inflation_radius = 2.0	80
4.141	Robot position with local_inflation_radius = 2.0	80
4.142	Robot orientation with smoothing_frequency = 5	81
4.143	Robot position with smoothing_frequency = 5	82
4.144	Robot orientation with smoothing_frequency = 10	82
4.145	Robot position with smoothing_frequency = 10	82
4.146	Robot orientation with smoothing_frequency = 40	83
4.147	Robot position with smoothing_frequency = 40	83
4.148	Robot orientation with smoothing_frequency = 60	83
4.149	Robot position with smoothing_frequency = 60	84
4.150	Robot orientation with max_velocity_x = 0.3	85
4.151	Robot position with max_velocity_x = 0.3	85
4.152	Robot orientation with max_velocity_x = 0.9	85
4.153	Robot position with max_velocity_x = 0.9	86
4.154	Robot orientation with max_velocity_x = 1.2	86
4.155	Robot position with max_velocity_x = 1.2	86
4.156	Robot orientation with max_velocity_theta = 0.6	87
4.157	Robot position with max_velocity_theta = 0.6	88
4.158	Robot orientation with max_velocity_theta = 2.5	88
4.159	Robot position with max_velocity_theta = 2.5	88
4.160	Robot orientation with max_accel_x = 0.2	89
4.161	Robot position with max_accel_x = 0.2	90
4.162	Robot orientation with max_accel_x = 1.0	90
4.163	Robot position with max_accel_x = 1.0	90
4.164	Robot orientation with max_accel_theta = 0.5	91
4.165	Robot position with max_accel_theta = 0.5	92

4.166	Robot orientation with max_accel_theta = 2.0	92
4.167	Robot position with max_accel_theta = 2.0	92
4.168	Robot orientation with trans_stopped_velocity = 0.01	94
4.169	Robot position with trans_stopped_velocity = 0.01	94
4.170	Robot orientation with trans_stopped_velocity = 0.1	94
4.171	Robot position with trans_stopped_velocity = 0.1	95
4.172	Robot orientation with trans_stopped_velocity = 0.4	95
4.173	Robot position with trans_stopped_velocity = 0.4	95
4.174	Robot orientation with planner_tolerance = 0.1	96
4.175	Robot position with planner_tolerance = 0.1	97
4.176	Robot orientation with planner_tolerance = 1.0	97
4.177	Robot position with planner_tolerance = 1.0	97
4.178	Robot speed with max_vel_x = 1.0	98
4.179	Robot speed with max_speed_xy = 1.5	99
4.180	Robot speed with max_velocity_x = 1.2	99
4.181	Robot speed with max_speed_xy = 1.5	100
4.182	Robot speed with max_velocity_x = 1.5	100
4.183	Robot speed with max_velocity_x = 1.5 and max_speed_xy = 1.5	101
4.184	Robot orientation with max_speed_xy = 1.5	101
4.185	Robot position with max_speed_xy = 1.5	101
4.186	Robot orientation with max_velocity_x = 1.5	102
4.187	Robot position with max_velocity_x = 1.5	102
4.188	Robot orientation with max_velocity_x = 1.5 and max_speed_xy = 1.5	102
4.189	Robot position with max_velocity_x = 1.5 and max_speed_xy = 1.5	103

表目次

3.1	Parameter List in emcl2	7
3.2	Parameter List of the Nav2 Controller	7
3.3	Parameters of the Nav2 Costmap	7
3.4	Parameters of the Nav2 Velocity Smoother	8
3.5	Parameters of the Nav2 Planner and Goal Checker	8
4.1	Baseline Parameter Settings in emcl2	17
4.2	Baseline Parameter Settings for the Nav2 Controller	18
4.3	Baseline Parameter Settings for the Nav2 Costmap	18
4.4	Baseline Parameter Settings for the Nav2 Velocity Smoother	18
4.5	Baseline Parameter Settings for the Nav2 Planner and Goal Evaluation .	19
4.6	Experiments on emcl2 parameters	19
4.7	Experiments on Nav2 controller parameters	19
4.8	Experiments on Nav2 costmap parameters	20
4.9	Experiments on Nav2 velocity smoother parameters	20
4.10	Experiments on Nav2 planner and goal checker parameters	20
4.11	Goal Achievement under Different Particle Counts	21
4.12	Goal Achievement Rate for Different Numbers of Particles	21

第1章

序論

1.1 背景

近年，屋外自律移動ロボットの研究が盛んに行われてあり，ROS 2 を用いた自律移動システムの実環境への適用が進んでいる。本研究室では，屋外環境における自律移動ロボットの研究を行っており，津田沼チャレンジやつくばチャレンジといった実環境での自律走行実験に参加している。

これらの実験の場では，ロボットが屋外環境を安定して走行するために，高いナビゲーション性能が求められる。Navigation2 を用いた自律移動では，自己位置推定，経路計画，障害物回避などを実現するために，多数のパラメータを適切に調整する必要がある。しかし，私が津田沼チャレンジでロボットの調整作業を行う過程において，パラメータ設定によって意図しない挙動や走行性能の低下が生じることが確認された。これらの問題は，パラメータの数が多く，それがロボットの挙動に与える影響が分かりにくいことに起因していると考えられる。その結果，問題が発生した際に，どのパラメータが原因であるかを特定することが難しく，調整作業の効率が低下するという課題が生じている。そこで本研究では，Navigation2 に含まれる各種パラメータを体系的に変化させ，その際のロボットの走行挙動を実験的に評価・比較する。これにより，パラメータ設定とロボットの挙動との関係を整理し，走行性能低下の要因を明確にするとともに，今後のパラメータ調整における指針を示すことを目的とする。

1.2 目的

本研究の目的は、Navigation2 における各種パラメータを変化させた際に、自律移動ロボットの走行挙動がどのように変化するかを実験的に評価し、パラメータ設定がロボットの挙動に与える影響を明らかにすることである。

1.3 論文の構成

本論文の構成を述べる。第1章では、本研究の背景と目的について述べた。第2章では本研究で使用される要素技術について述べる。第3章では調査するパラメータの概要について述べる。第4章では実験と考察について述べる。第5章では本論文の結論を述べる。

第2章

要素技術

2.1 ROS2

ROS 2 (Robot Operating System 2) [1] は、自律移動ロボットをはじめとするロボットシステムを構築するためのソフトウェアフレームワークである。本研究では、ロボットの自律移動機能を実現する基盤として ROS 2 を用い、その上で動作する Navigation2 を使用して走行実験を行った。

ROS 2 では、各機能がノードとして独立して構成されており、自己位置推定、経路計画、移動制御といった機能がパラメータ設定を通じて個別に調整可能である。本研究におけるパラメータ調整は、ROS 2 におけるこのパラメータ設定機構を用いて実施した。

2.2 Navigation2

Navigation2 (Nav2) [2] は、自動運転車向けに開発されたナビゲーション技術を、移動ロボットおよび地上ロボット向けに導入・最適化・再構築した、ROS におけるナビゲーションスタックの後継フレームワークである。Nav2 を用いることで、移動ロボットは複雑な環境内を自律的に移動し、さまざまな運動学モデルを持つロボットに対してユーザー定義のタスクを実行することが可能となる。

Nav2 は、単にロボットを地点 A から地点 B へ移動させるだけでなく、中間地点を含む経路の実行や、物体追跡、領域全体を網羅するカバレッジナビゲーションなど、多様なナビゲーションタスクを表現・実行できる。また、知覚、経路計画、制御、自己位置推定、可視化といっ

た，自律移動に必要な機能を統合的に提供することで，高い信頼性を持つ自律移動システムの構築を可能にしている。

Nav2 では，センサ情報や環境モデルを基に動的な経路計画を行い，障害物を回避しながらモータの速度指令を生成することで，状況に応じた柔軟な移動を実現する。さらに，複数の独立したモジュラー構成のサーバをビヘイビアツリー（Behavior Tree）によって統合・制御することで，経路計算や動作制御などの各機能を組み合わせた柔軟なナビゲーション動作を実現している。この構成により，ロボットは複雑かつ多様な自律移動タスクを実行することが可能となる。Fig. 2.1 に Navigation2 の構造を示す

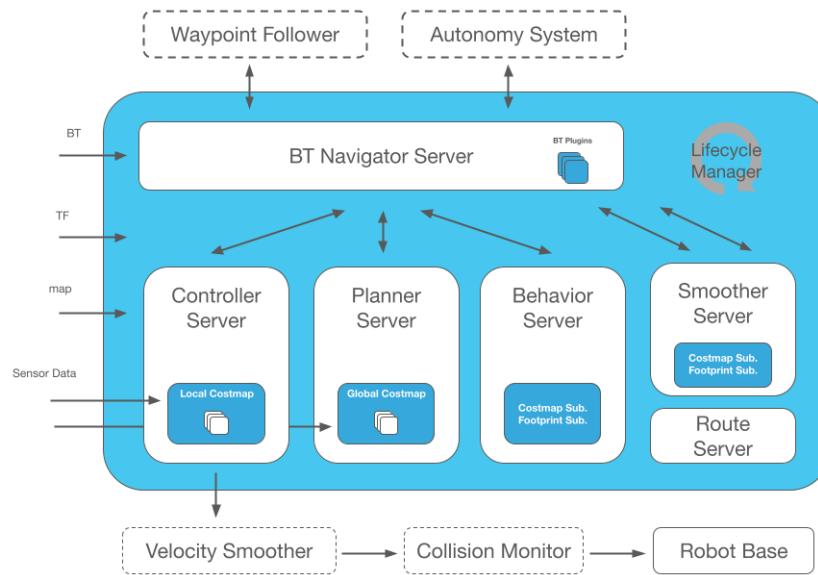


Fig. 2.1 Structure of Navigation2

2.3 emcl2

emcl2 (Extended Monte Carlo Localization 2) [3] は，上田隆一らによって提案された自己位置推定手法である Extended Monte Carlo Localization (emcl) を，ROS 2 環境で利用可能としたソフトウェアである。

emcl は，パーティクルフィルタに基づく Monte Carlo Localization (MCL) を拡張した手法であり，事前に与えられた地図とセンサ情報を用いてロボットの自己位置を推定する。特に，外乱や自己位置推定の破綻に対するロバスト性を高めるための拡張リセット機構を備えて

いる点に特徴がある。

emcl2 は、この emcl のアルゴリズムを ROS 2 向けに実装したものであり、AMCL と同様に、オドメトリ情報による状態遷移モデルと、LiDAR などの距離センサに基づく観測モデルを用いて、各パーティクルの尤度評価と再サンプリングを行うことで、ロボットの自己位置を逐次的に推定する。

本研究では、ROS 2 Navigation2 環境における自己位置推定手法として emcl2 を用い、パラメータ設定の違いがロボットの挙動およびナビゲーション性能に与える影響を評価する。

第3章

パラメータ概要

3.1 調査するパラメータ

本研究では，ROS 2 Navigation2 における各種パラメータの設定が，自律移動中のロボットの挙動に与える影響を明らかにすることを目的とする。

Navigation2 は，自己位置推定，経路計画，障害物回避，移動制御といった複数の機能から構成されており，それぞれに多数のパラメータが存在する。これらのパラメータは相互に影響し合うため，設定値の違いによって走行速度や軌道の安定性，さらにはゴール到達可否といった挙動に差が生じる。

本章では，実験において調査対象としたパラメータの概要を示し，次節以降で各パラメータの役割および設定内容について詳しく説明する。

Table 3.1 Parameter List in emcl2

Parameter Name
num_particles
odom_fw_dev_per_fw
odom_fw_dev_per_rot
odom_rot_dev_per_fw
odom_rot_dev_per_rot
laser_likelihood_max_dist
range_threshold

Table 3.2 Parameter List of the Nav2 Controller

Parameter Name
max_vel_x
max_vel_theta
max_speed_xy
min_theta_velocity_threshold
acc_lim_x
acc_lim_theta
linear_granularity
angular_granularity
xy_goal_tolerance

Table 3.3 Parameters of the Nav2 Costmap

Parameter Name
global_resolution
global_cost_scaling_factor
global_inflation_radius
local_resolution
local_cost_scaling_factor
local_inflation_radius

Table 3.4 Parameters of the Nav2 Velocity Smoother

Parameter Name
smoothing_frequency
max_velocity
max_accel_x
max_accel_theta

Table 3.5 Parameters of the Nav2 Planner and Goal Checker

Parameter Name
trans_stopped_velocity
planner_tolerance

3.2 パラメータの詳細

3.2.1 emcl2

num_particles

本パラメータは、自己位置推定に用いるパーティクルの数を設定するものである。パーティクル数を増加させることで、自己位置分布をより詳細に表現でき、推定精度やロバスト性の向上が期待できる。一方で、計算負荷が増加するため、リアルタイム性とのトレードオフが存在する。

odom_fw_dev_per_fw

前進移動時における前進方向のオドメトリ誤差を表すパラメータである。値を大きくするとオドメトリを信頼しにくくなり、パーティクルの分散が大きくなる。

odom_fw_dev_per_rot

回転動作時における前進方向のオドメトリ誤差を表すパラメータである。値を大きくすると、回転時の前進誤差を大きく見積もるため、自己位置推定の不確実性が増加する。回転動作の多い環境では、推定安定性に影響を与える。

odom_rot_dev_per_fw

前進移動量に対する回転方向のオドメトリ誤差を表すパラメータである。値を大きく設定すると、直進時の姿勢角誤差を大きく考慮するようになる。これにより、直進走行中の姿勢推定のばらつきが増加する。

odom_rot_dev_per_rot

回転動作時における回転方向のオドメトリ誤差を表す。値を大きくすると回転量の信頼度が低下し、姿勢角の推定誤差が大きくなる。旋回動作の安定性に影響を与える重要なパラメータである。

laser_likelihood_max_dist

レーザスキャンを用いた尤度計算において考慮する最大距離を設定するパラメータである。値を大きくすると遠方の障害物まで尤度計算に含まれるが、計算誤差の影響を受けやすくなる。屋外環境では環境特性に応じた調整が必要である。

range_threshold

レーザスキャンデータの有効距離の上限を設定するパラメータである。この値を超える測距データは無効として扱われる。外乱やノイズの多い環境では、自己位置推定の安定化に寄与する。

3.2.2 Navigation2

controller**max_vel_x**

ロボットの前進方向の最大速度を設定するパラメータである。値を大きくすると高速移動が可能となるが、制御の不安定化や振動が生じやすくなる。安全性と走行性能のバランスが重要なとなる。

max_vel_theta

ロボットの最大回転速度を設定するパラメータである。値を大きくすると旋回が速くなるが、急激な姿勢変化が発生する可能性がある。狭い環境では慎重な調整が必要である。

max_speed_xy

平面移動における最大速度を制限するパラメータである。前進速度と横方向速度を含めた総合的な移動速度の上限を定める。移動の滑らかさに影響を与える。

min_theta_velocity_threshold

回転速度が停止と判定される最小閾値を表すパラメータである。値を大きくすると微小な回転が無視されやすくなり、姿勢制御が粗くなる。ゴール付近での姿勢安定性に影響を与える。

acc_lim_x

前進方向の加速度制限を設定するパラメータである。値を小さくすると加減速が緩やかになり、安定した走行が可能となる。一方で応答性は低下する。

acc_lim_theta

回転方向の加速度制限を設定するパラメータである。急激な旋回動作を抑制し、滑らかな姿勢制御を実現するために用いられる。

linear_granularity

経路生成時の直線方向の分割間隔を設定するパラメータである。値を小さくすると経路が滑らかになるが、計算量が増加する。

angular_granularity

経路生成時の角度方向の分割間隔を設定する。旋回精度に影響を与える。

xy_goal_tolerance

ロボットがゴールに到達したと判定される位置誤差の許容範囲を表す。値を大きくするとゴール判定が緩くなる。

costmap**global_resolution**

Global Costmap の解像度を設定するパラメータである。値を小さくすると詳細な地図表現が可能となるが、計算負荷が増加する。

global_cost_scaling_factor

障害物からの距離に応じたコストの減衰率を設定するパラメータである。値を大きくすると障害物付近のコストが急激に低下する。

global_inflation_radius

障害物の周囲をどの程度膨張させるかを設定するパラメータである。安全距離の確保に直接影響する。

local_resolution

Local Costmap の解像度を設定するパラメータである。局所的な障害物回避性能に影響を与える。

local_cost_scaling_factor

Local Costmap における障害物コストの減衰率を設定する。回避挙動の敏感さに影響する。

local_inflation_radius

Local Costmap における障害物の膨張半径を設定する。障害物回避時の安全性を左右する。

Velocity Smoother**smoothing_frequency**

速度平滑化処理の更新周波数を設定するパラメータである。値を大きくすると滑らかな速度制御が可能となる。

max_velocity_x

max_velocity の第 1 要素は、ロボットの 前後方向 (x 方向) の最大並進速度を表す。この値を超える速度指令は制限されるため、ロボットの最高走行速度が規定される。値を大きくすると移動速度は向上するが、停止距離や制御安定性への影響が大きくなる。

max_velocity_theta

max_velocity の第 3 要素は、ロボットの 回転方向 (θ 方向) の最大角速度を表す。旋回時の最大回転速度を制限し、急激な回転動作を防ぐ役割を持つ。値を大きくすると旋回応答は向上するが、姿勢の安定性が低下する可能性がある。

max_accel_x

max_accel の第 1 要素は、並進方向の最大加速度を制限するパラメータである。走行時の急発進を抑制する。

max_accel_theta

max_accel の第 3 要素は、回転方向の最大加速度を制限するパラメータである。旋回動作の安定性向上に寄与する。

planner/ゴール判定**trans_stopped_velocity**

並進速度が停止と判定される閾値を設定するパラメータである。ゴール付近での停止判定に影響を与える。

planner_tolerance

経路計画時に許容されるゴール周辺の誤差範囲を設定するパラメータである。局所的な計画失敗を防ぐ役割を持つ。

第4章

実験

4.1 実験概要

本章では、Navigation2における各種パラメータ設定が、自律移動ロボットの走行挙動に与える影響を調査するために実施した走行実験について述べる。

以下では、まず実験の目的を示し、次に実験装置および実験環境について説明する。その後、実験方法とパラメータ設定条件を示すことで、本研究における実験の全体像を明らかにする。

4.1.1 実験目的

本実験の目的は、ROS 2 Navigation2における各種パラメータを個別に変化させた際に、自律移動中のロボットの挙動がどのように変化するかを明らかにすることである。

特に、走行速度、軌道の安定性、旋回挙動、およびゴール到達可否といった観点から、パラメータ設定がロボットの走行性能に与える影響を評価することを目的とする。

4.1.2 実験装置



Fig. 4.1 ORNE-box3(source: [4])

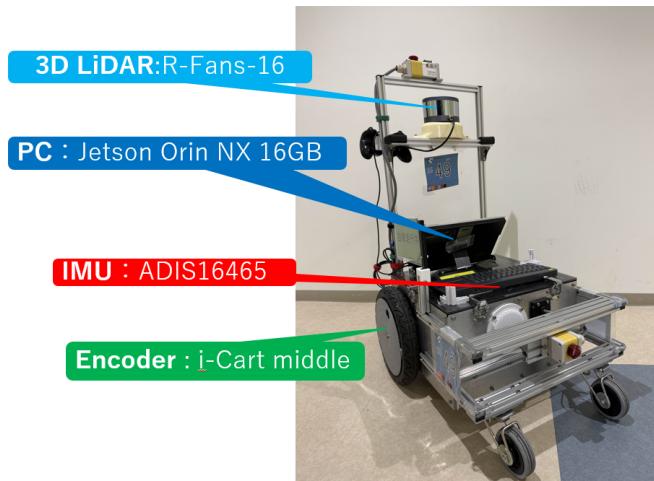


Fig. 4.2 Overview of ORNE-box3 and its onboard sensors

実験には、本研究室で開発されている自律移動ロボット ORNE-box3[4] を使用した。ORNE-box3 の外観を Fig. 4.1 に示す。

本ロボットは、計算機として Jetson Orin NX 16GB を搭載しており、自己位置推定およびナビゲーション処理を行う。また、周辺環境の認識および状態推定のために、3D LiDAR (R-Fans-16), IMU (ADIS16465), エンコーダ (i-Cart middle) を備えている。

3D LiDAR は自己位置推定および障害物検知に使用され、IMU とエンコーダから得られる情報は emcl2 に入力され、ロボットの自己位置推定に利用される。

4.1.3 実験環境及び走行ルート



Fig. 4.3 Course map of the Tsudanuma Challenge 2025(source: [5])

走行実験は Fig. 4.3 に示すように、津田沼校舎 2 号館前から食堂前に設置されたコーンまでの区間で実施した。本ルートは、本研究室が参加している「津田沼チャレンジ」において使用されるコースの一部である。

津田沼チャレンジは、大学キャンパス内の実環境を対象として、自律移動ロボットの走行性能を検証する取り組みであり、歩行者や段差などが存在する屋外環境を想定している。本実験では、この実環境を模擬した走行ルートを用いることで、実運用に近い条件下での挙動評価を行った。

4.1.4 実験方法

実験では、Navigation2 における各種パラメータを個別に変化させた場合のロボットの走行挙動を観察した。

各走行実験においては、対象とするパラメータのみを変更し、それ以外のパラメータはすべて同一の設定とした。これにより、特定のパラメータ変更がロボットの挙動に与える影響を明確にすることを試みた。

また、各実験は同一の走行ルートおよび初期条件のもとで実施した。

パーティクル数は、パーティクルフィルタに基づく自己位置推定において、仮説の多様性を

決定する重要なパラメータである。粒子数が不足した場合、自己位置推定が定性的に破綻し、ロボットがナビゲーションを継続できなくなる。そのため、`num_particles` に関する実験では、軌道の比較ではなく、ゴール到達の可否を評価指標として用いた。こちらの実験回数は 10 回である。

他のパラメータについては、自己位置推定が成立した状態での挙動の違いを評価することを目的とし、`rosbag` に記録されたロボットの位置および向きの時間変化を用いて解析を行った。こちらの実験回数は一回である。

4.1.5 実験条件及びパラメータ設定

本研究において基準とした `Navigation2` および `emcl2` のパラメータを Table4.1 ~ Table4.5 に示す。

また、実験番号と変更したパラメータの対応を Table4.6 ~ Table4.10 に示す。各実験では、表に示したパラメータのみを基準値から変更し、その他の設定はすべて基準値と同一とした。

Table 4.1 Baseline Parameter Settings in `emcl2`

Parameter	Baseline Value
<code>num_particles</code>	500
<code>odom_fw_dev_per_fw</code>	0.19
<code>odom_fw_dev_per_rot</code>	0.0001
<code>odom_rot_dev_per_fw</code>	0.13
<code>odom_rot_dev_per_rot</code>	0.2
<code>laser_likelihood_max_dist</code>	0.2
<code>range_threshold</code>	0.3

Table 4.2 Baseline Parameter Settings for the Nav2 Controller

Parameter	Baseline Value
max_vel_x	0.6
max_vel_theta	0.7
max_speed_xy	0.9
min_theta_velocity_threshold	0.001
acc_lim_x	1.0
acc_lim_theta	3.2
linear_granularity	0.05
angular_granularity	0.025
xy_goal_tolerance	0.25

Table 4.3 Baseline Parameter Settings for the Nav2 Costmap

Target	Parameter	Baseline Value
Global	global_resolution	0.1
Global	global_cost_scaling_factor	3.0
Global	global_inflation_radius	0.5
Local	local_resolution	0.1
Local	local_cost_scaling_factor	3.0
Local	local_inflation_radius	0.3

Table 4.4 Baseline Parameter Settings for the Nav2 Velocity Smoother

Parameter	Baseline Value
smoothing_frequency	20
max_velocity_x	0.6
max_velocity_theta	1.7
max_accel_x	0.5
max_accel_theta	1.0

Table 4.5 Baseline Parameter Settings for the Nav2 Planner and Goal Evaluation

Parameter	Baseline Value
trans_stopped_velocity	0.25
planner_tolerance	0.5

Table 4.6 Experiments on emcl2 parameters

Experiment ID	Parameter	Tested Values
E1	Number of particles	200, 1000
E2	odom_fw_dev_per_fw	0.01, 0.05, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5
E3	odom_fw_dev_per_rot	0.001, 0.01, 0.1, 0.5
E4	odom_rot_dev_per_fw	0.01, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
E5	odom_rot_dev_per_rot	0.1, 0.3, 0.4, 0.5
E6	laser_likelihood_max_dist	0.5, 1.0
E7	range_threshold	0.5, 0.9

Table 4.7 Experiments on Nav2 controller parameters

Experiment ID	Parameter	Tested Values
E8	max_vel_x	0.2, 1.0
E9	max_vel_theta	0.4, 1.0
E10	max_speed_xy	0.1, 0.5, 1.5
E11	min_theta_velocity_threshold	0.01, 0.1, 1.0
E12	acc_lim_x	0.1, 0.5, 1.5
E13	acc_lim_theta	0.1, 1.0, 4.0
E14	linear_granularity	0.01, 0.1, 0.5
E15	angular_granularity	0.001, 0.01, 0.04
E16	xy_goal_tolerance	0.01, 0.1, 0.4

Table 4.8 Experiments on Nav2 costmap parameters

Experiment ID	Scope	Parameter	Tested Values
E17	Global	global_resolution	0.05, 0.5, 1.0
E18	Global	global_cost_scaling_factor	1.0, 5.0, 10.0
E19	Global	global_inflation_radius	0.1, 1.0, 2.0
E20	Local	local_resolution	0.05, 0.5, 1.0
E21	Local	local_cost_scaling_factor	1.0, 5.0, 10.0
E22	Local	local_inflation_radius	0.1, 0.5, 1.0, 2.0

Table 4.9 Experiments on Nav2 velocity smoother parameters

Experiment ID	Parameter	Tested Values
E23	smoothing_frequency	5, 10, 40, 60
E24	max_velocity_x	0.3, 0.9, 1.2
E25	max_velocity_theta	0.6, 2.5
E26	max_accel_x	0.2, 1.0
E27	max_accel_theta	0.5, 2.0

Table 4.10 Experiments on Nav2 planner and goal checker parameters

Experiment ID	Parameter	Tested Values
E28	trans_stopped_velocity	0.01, 0.1, 0.4
E29	planner_tolerance	0.1, 1.0

4.2 実験結果

4.2.1 実験結果 (emcl2)

実験結果 (num_particles)

基準となるパーティクル数は 500 である.

Table 4.11 Goal Achievement under Different Particle Counts

Number of times	Number of particles		
	200	500 (base)	1000
1	×		
2			×
3	×	×	×
4			
5			×
6	×	×	×
7			
8			
9			
10			

Table4.11 に、パーティクル数の違いによるゴール到達の可否を示す.

Table 4.12 Goal Achievement Rate for Different Numbers of Particles

Number of Particles	Success Rate [%]
200	70
500 (base)	80
1000	60

Table4.12 に、パーティクル数を変化させた際のゴール到達成功率を示す .

Table4.11, Table4.12 が示すように、パーティクル数を 200 , 500 , 1000 と変化させて自己

位置推定の安定性を評価した。その結果、パーティクル数 500 の場合に最も高いゴール到達率が得られた。一方で、200 および 1000 の場合は、到達率がやや低下する傾向が確認された。パーティクル数が少ないと自己位置推定が破綻しやすく、成功率が低下した。また、パーティクル数が多すぎても計算量の増加によって、遅延が発生して安定性が低下した。以上より、パーティクル数は多ければ良いわけではなく、自己位置推定の精度と計算負荷のバランスを考慮した適切な設定が重要であることが分かる。本実験環境においては、パーティクル数 500 が最も安定した性能を示した。

次からの実験では、ロボットの位置と向きを比較する。Fig. 4.4, Fig. 4.6 のグラフが基準の値の時のロボットの挙動である。Fig. 4.4 はロボットの向き、Fig. 4.5 は、コース上での矢印の時のロボットの向き、Fig. 4.6 はロボットの位置のグラフ、Fig. 4.7 地図とロボットの位置を合わせたものである。このロボットの位置のグラフにおけるゴールは、x 座標 -275 ~ -270, y 座標 -380 ~ -370 である。

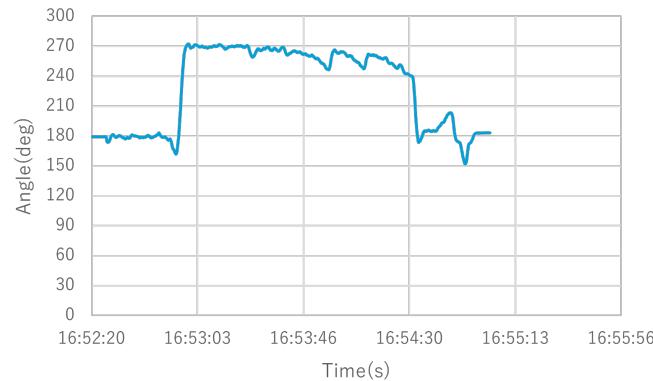


Fig. 4.4 Base orientation



Fig. 4.5 Base orientation version map

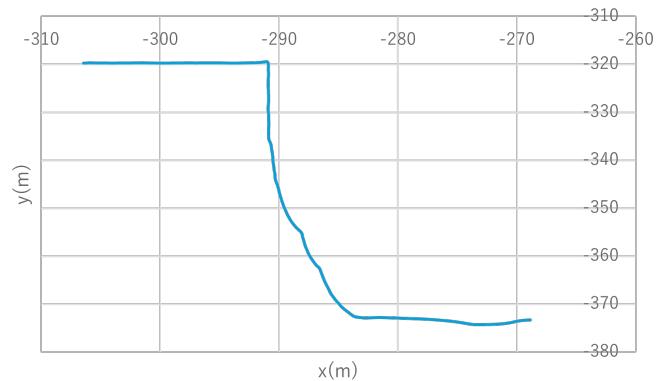


Fig. 4.6 Base position

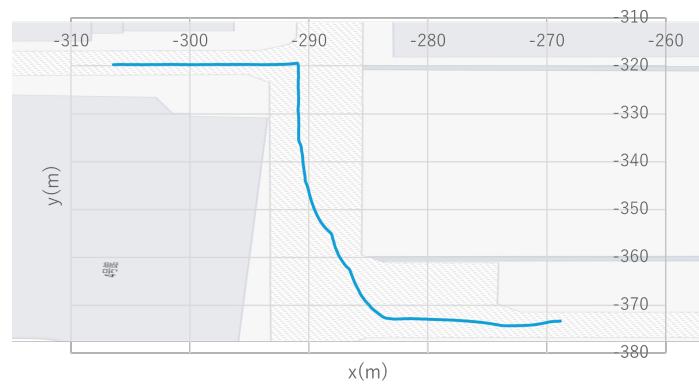


Fig. 4.7 Base position version map

実験結果 (odom_fw_dev_per_fw)

Table4.1 が示すように基準の値は、0.19. ロボットの位置と向きは、Fig. 4.4, Fig. 4.7 で示す



Fig. 4.8 Robot orientation with fw_dev_per_fw = 0.01

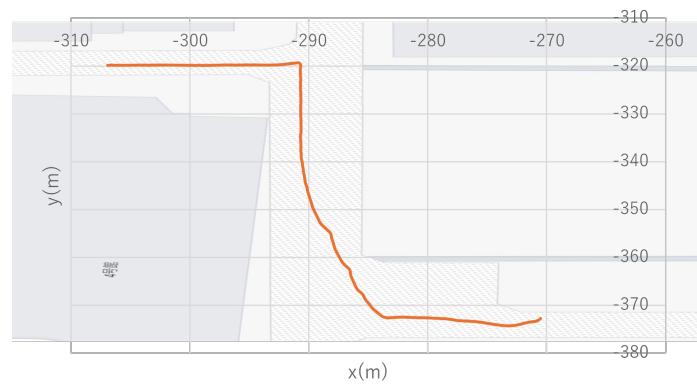


Fig. 4.9 Robot position with $fw_dev_per_fw = 0.01$



Fig. 4.10 Robot orientation with $fw_dev_per_fw = 0.05$

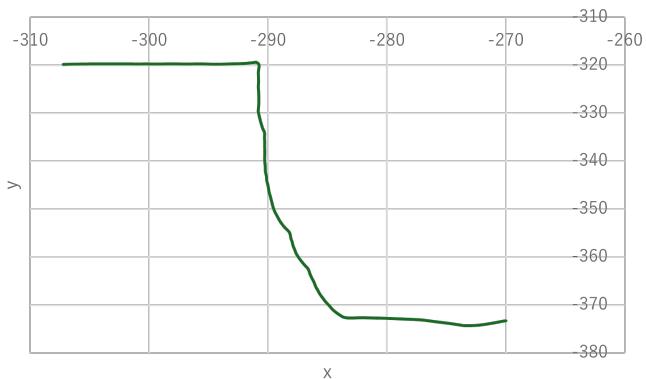


Fig. 4.11 Robot position with $fw_dev_per_fw = 0.05$



Fig. 4.12 Robot orientation with fw_dev_per_fw = 0.1

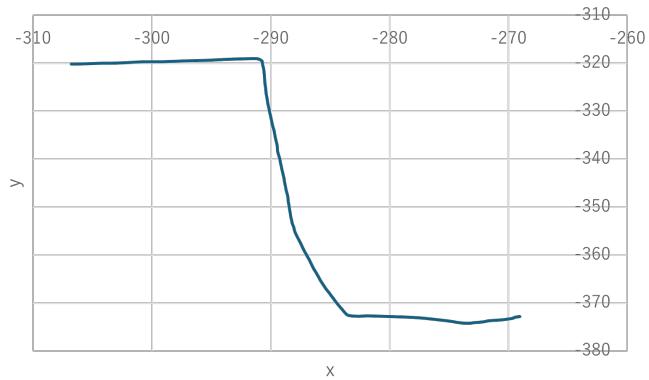


Fig. 4.13 Robot position with fw_dev_per_fw = 0.1



Fig. 4.14 Robot orientation with fw_dev_per_fw = 0.3

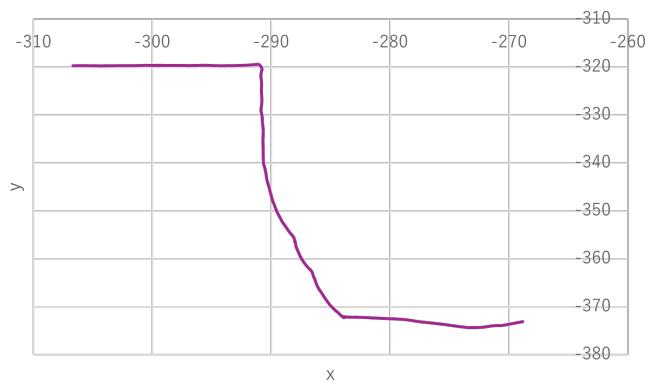
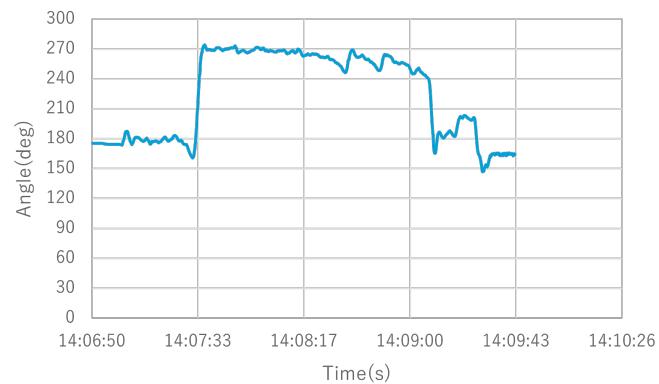
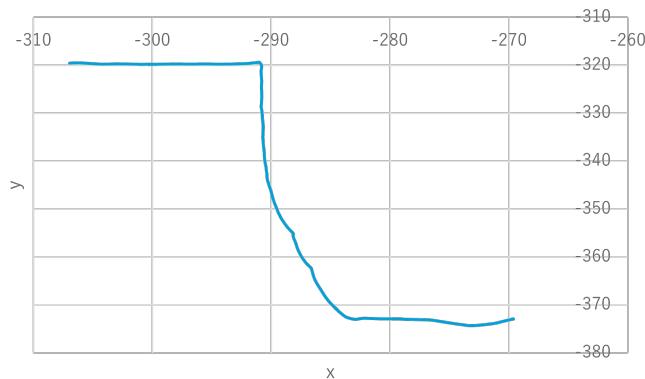
Fig. 4.15 Robot position with $\text{fw_dev_per_fw} = 0.3$ Fig. 4.16 Robot orientation with $\text{fw_dev_per_fw} = 0.4$ Fig. 4.17 Robot position with $\text{fw_dev_per_fw} = 0.4$

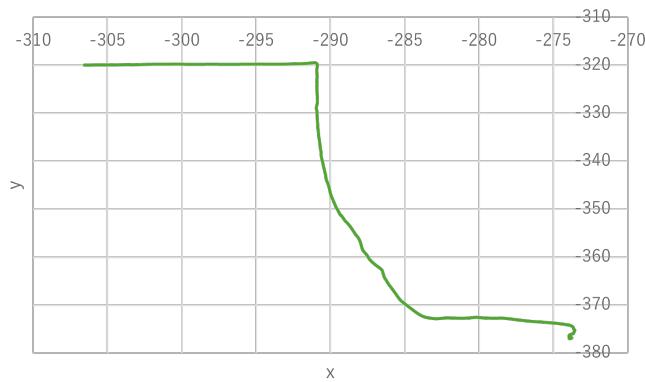
Fig. 4.18 Robot orientation with $\text{fw_dev_per_fw} = 0.5$ Fig. 4.19 Robot position with $\text{fw_dev_per_fw} = 0.5$

Fig. 4.18 で示すように、`odom_fw_dev_per_fw` を 0.5 に設定した場合、ロボットは走行を続けるにつれて自己位置推定の誤差が累積し、最終的にゴールに到達することができなかった。一方で、0.4 以下の値に設定した場合には、ロボットはゴールまで到達することができた。また、直線走行時の挙動を基準条件と比較すると、`odom_fw_dev_per_fw` を大きく設定した場合には、推定されたロボットの位置が徐々にずれていく様子が確認された。このことから、`odom_fw_dev_per_fw` の値を過度に大きくすると、前進移動に対するオドメトリ誤差が強調され、自己位置推定の精度が低下することが示唆される。

実験結果 (`odom_fw_dev_per_rot`)

Fig. ??, Fig. ??で示すように、基準の値は、0.0001



Fig. 4.20 Robot orientation with fw_dev_per_rot = 0.001

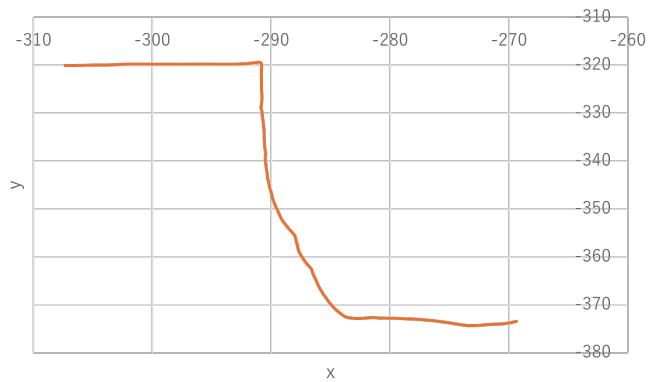


Fig. 4.21 Robot position with fw_dev_per_rot = 0.001



Fig. 4.22 Robot orientation with fw_dev_per_rot = 0.01

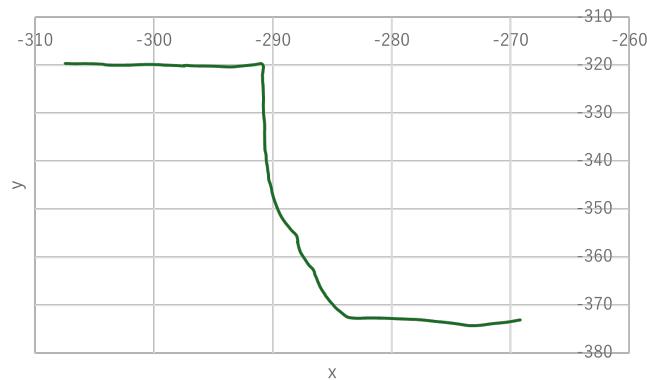


Fig. 4.23 Robot position with $fw_dev_per_rot = 0.01$



Fig. 4.24 Robot orientation with $fw_dev_per_rot = 0.1$

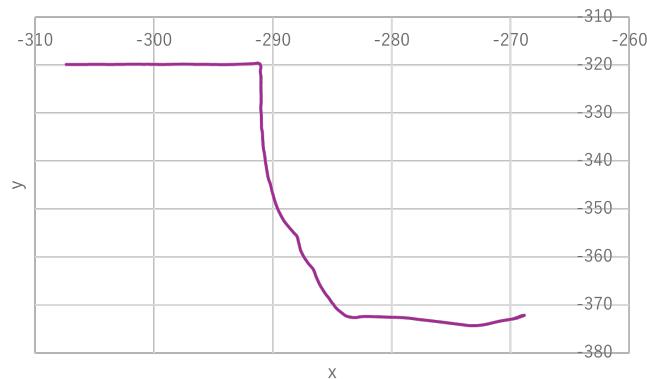


Fig. 4.25 Robot position with $fw_dev_per_rot = 0.1$



Fig. 4.26 Robot orientation with fw_dev_per_rot = 0.5

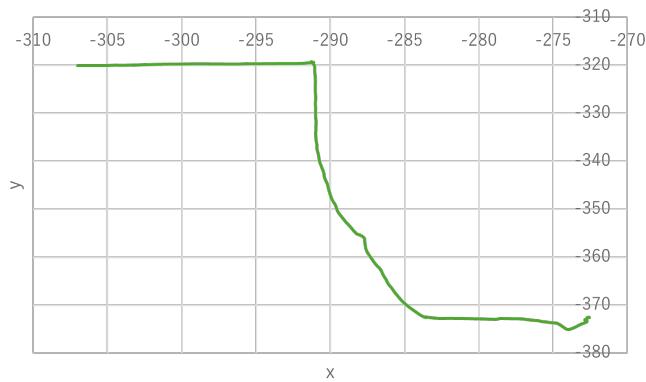


Fig. 4.27 Robot position with fw_dev_per_rot = 0.5

`odom_fw_dev_per_rot` を変化させた実験では、すべての設定値においてロボットはゴールに到達することができた。特に、`odom_fw_dev_per_rot` を 0.5 に設定した場合には、走行中に自己位置推定のずれが一部確認されたものの、走行不能となるような大きな影響は見られず、最終的にゴールまで到達することが確認された。

この結果から、`odom_fw_dev_per_rot` は自己位置推定に一定の影響を与えるものの、fw 方向の移動誤差を表す `odom_fw_dev_per_fw` と比較すると、ゴール到達性に与える影響は相対的に小さいと考えられる。

実験結果 (`odom_rot_dev_per_fw`)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.13



Fig. 4.28 Robot orientation with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.01$

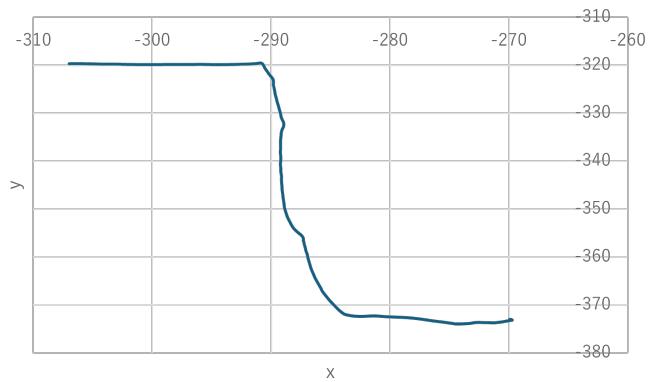


Fig. 4.29 Robot position with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.01$

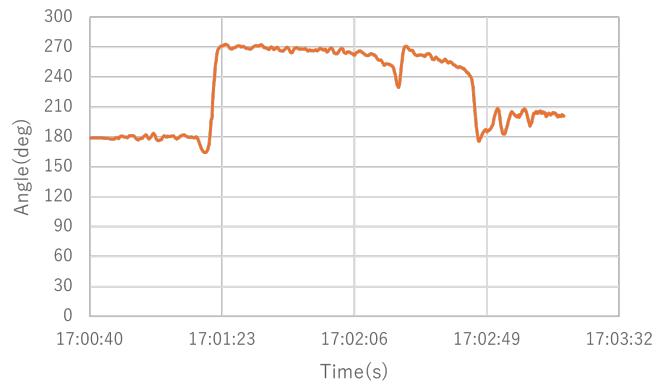


Fig. 4.30 Robot orientation with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.2$

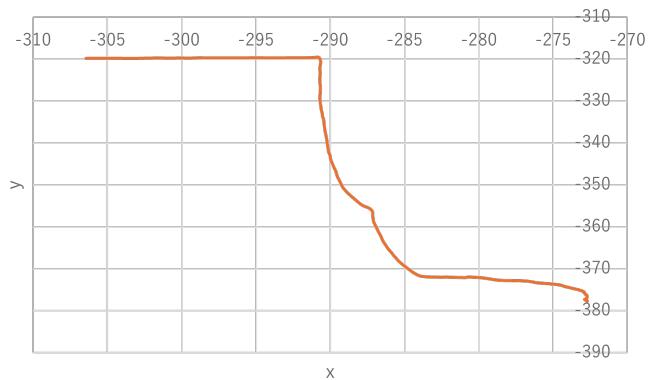


Fig. 4.31 Robot position with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.2$



Fig. 4.32 Robot orientation with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.3$

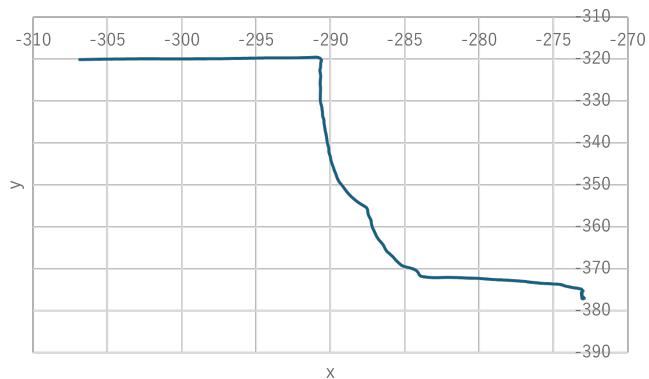


Fig. 4.33 Robot position with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.3$



Fig. 4.34 Robot orientation with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.4$

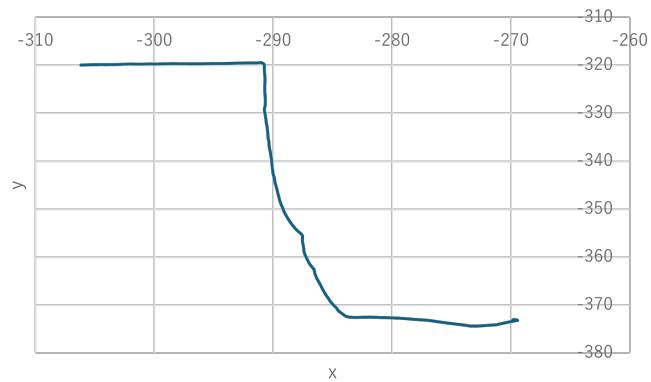


Fig. 4.35 Robot position with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.4$



Fig. 4.36 Robot orientation with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.5$

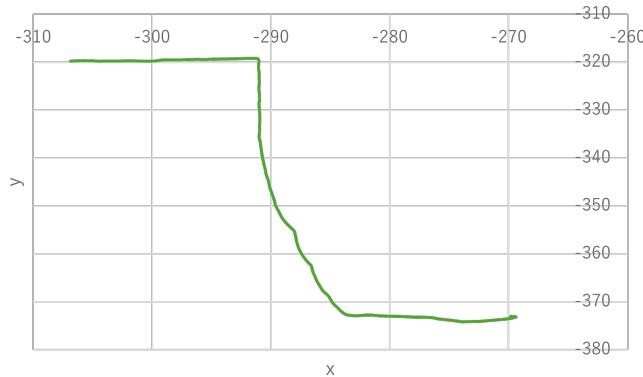


Fig. 4.37 Robot position with $\text{rot_dev_per_fw} = 0.5$

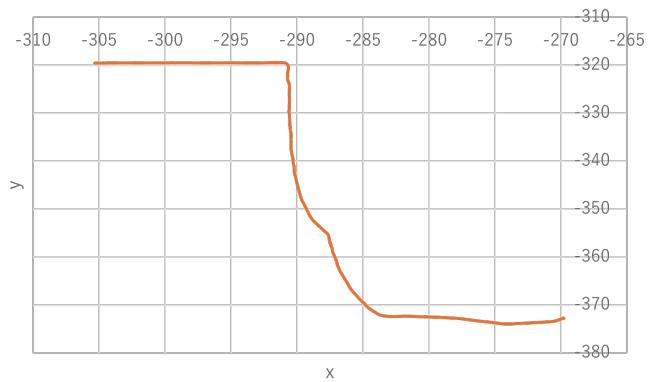
rot_dev_per_fw での実験では、 rot_dev_per_fw の値を大きくした場合においても、ロボットは直進走行中に自己位置および姿勢のわずかなずれが生じるのみであり、走行不能となることはなく、最終的にゴールまで問題なく到達することが確認された。

直線走行区間（目標方位 270° ）でのロボットの向きに着目すると、 rot_dev_per_fw を 0.01 に設定した Fig. 4.28 の場合には、ロボットは目標方位をほぼ維持したまま高い精度で直進していることが確認できた。一方で、 rot_dev_per_fw を 0.4 以上に設定した Fig. 4.34, Fig. 4.36 で示した場合には、走行中のロボットの方位が 270° を下回る傾向が見られ、進行に伴って姿勢が徐々にずれていく様子が確認された。

しかしながら、この方位のずれはナビゲーション全体に致命的な影響を与えるほどではなく、ゴール到達性に大きな影響は見られなかった。

実験結果 ($\text{odom_rot_dev_per_rot}$)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.2

Fig. 4.38 Robot orientation with $\text{rot_dev_per_rot} = 0.1$ Fig. 4.39 Robot position with $\text{rot_dev_per_rot} = 0.1$ Fig. 4.40 Robot orientation with $\text{rot_dev_per_rot} = 0.3$

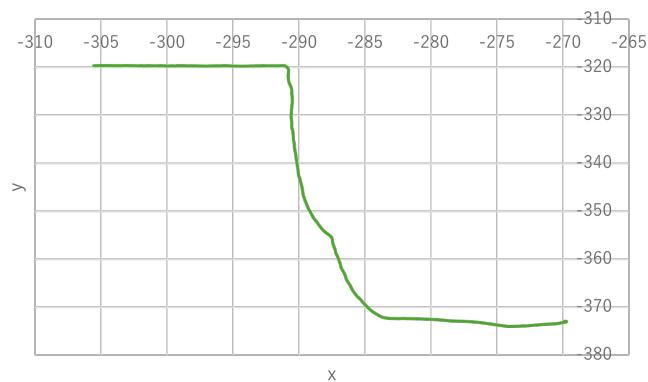


Fig. 4.41 Robot position with $\text{rot_dev_per_rot} = 0.3$



Fig. 4.42 Robot orientation with $\text{rot_dev_per_rot} = 0.4$

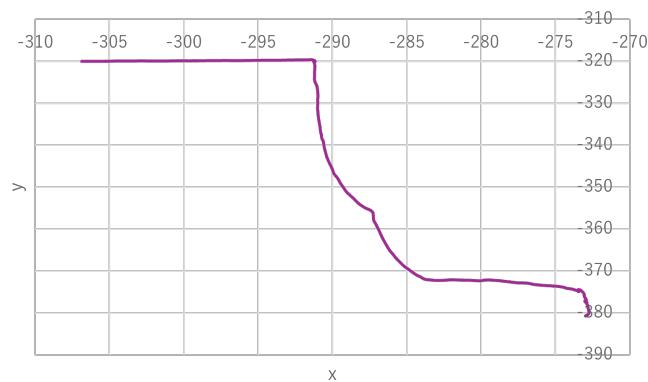
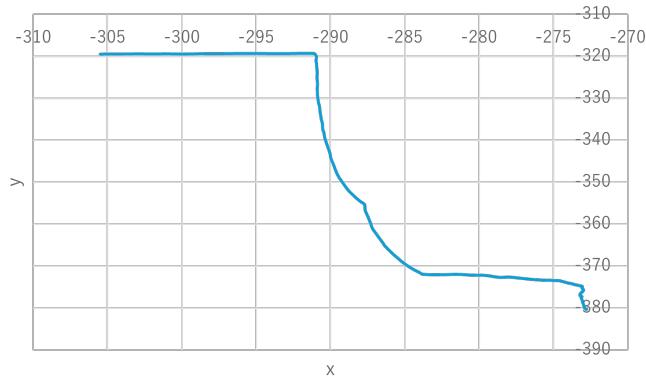


Fig. 4.43 Robot position with $\text{rot_dev_per_rot} = 0.4$

Fig. 4.44 Robot orientation with $\text{rot_dev_per_rot} = 0.5$ Fig. 4.45 Robot position with $\text{rot_dev_per_rot} = 0.5$

rot_dev_per_rot は、emcl において回転量に比例して付加される回転誤差を表すパラメータであり、値が大きいほどセンサ情報を重視し、値が小さいほどオドメトリ情報を重視する設定となる。

本実験の結果、 rot_dev_per_rot の値を大きく設定した場合、自己位置推定においてセンサの影響が強くなり、ロボットの姿勢推定が不安定となることで、走行中の挙動がふらつく傾向が確認された。

特に旋回動作時においてセンサ重視の設定とした場合、ゴール付近で自己位置推定が不安定となり、 rot_dev_per_rot を 0.5 および 0.4 に設定した条件では、ロボットがゴール端付近で停止し、正常にゴールへ到達できない事例が確認された。

以上より、 rot_dev_per_rot を過度に大きく設定すると、回転時の姿勢推定においてセンサノイズの影響を受けやすくなり、ナビゲーション性能が低下する可能性があることが示唆さ

れる。

実験結果 (laser_likelihood_max_dist)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.2



Fig. 4.46 Robot orientation with $\text{laser_likelihood_max_dist} = 0.5$

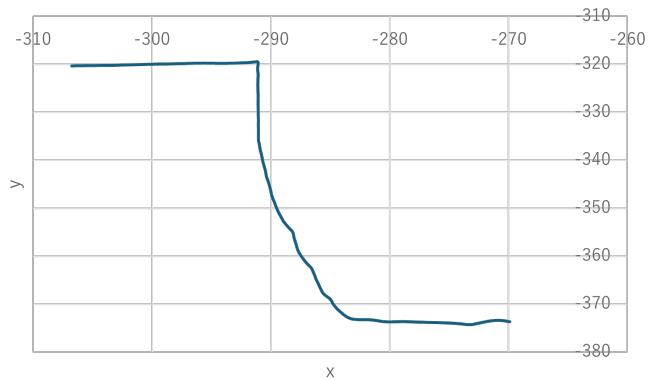


Fig. 4.47 Robot position with $\text{laser_likelihood_max_dist} = 0.5$



Fig. 4.48 Robot orientation with `laser_likelihood_max_dist = 1.0`

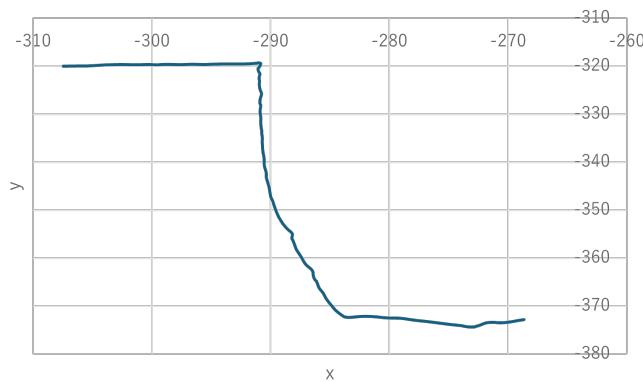


Fig. 4.49 Robot position with `laser_likelihood_max_dist = 1.0`

本実験では、基準値から `laser_likelihood_max_dist` の値を増加させた場合、レーザによって評価される情報量が増加し、特に障害物や構造物が多く存在する環境において、自己位置推定の更新が頻繁に行われることが確認された。

その結果、レーザスキャンによる評価負荷が高い箇所では、ロボットが一時的に停止する挙動が観測された。これは、自己位置推定の更新に伴い、ナビゲーションが安全側に制御されたためであると考えられる。

一方で、`laser_likelihood_max_dist` を約 0.5 程度まで増加させた場合でも、ロボットは全体として安定した走行が可能であり、大きなナビゲーション性能の低下は確認されなかった。

実験結果 (range_threshold)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.3



Fig. 4.50 Robot orientation with range_threshold = 0.5

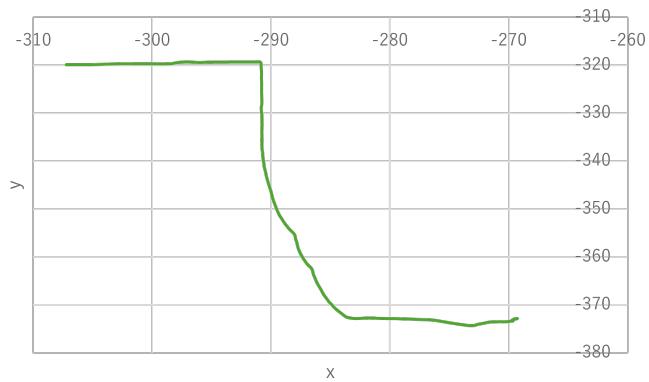


Fig. 4.51 Robot position with range_threshold = 0.5



Fig. 4.52 Robot orientation with range_threshold = 0.9

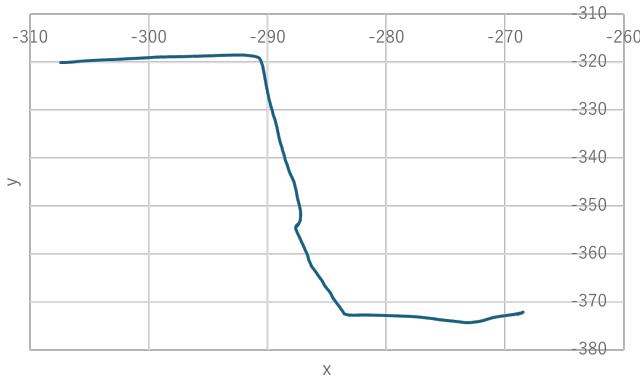


Fig. 4.53 Robot position with range_threshold = 0.9

本実験では、基準値である $\text{range_threshold} = 0.3$ の場合、ロボットは主に比較的近距離のレーザスキャン情報を用いて自己位置推定を行っており、推定された位置および姿勢は安定していた。

一方、 range_threshold を 0.9 に設定した場合、より遠方のレーザスキャン情報も自己位置推定に使用されるため、基準値の場合と比較して、推定されたロボットの位置に明らかなずれが生じることや、姿勢が異なる方向を示す場合が確認された。しかしながら、これらのずれが生じた場合でも、ロボットは最終的にゴール地点へ到達することができた。

また、 range_threshold を 0.5 に設定した場合には、自己位置推定および走行挙動は安定しており、基準値と比較して大きな性能低下は確認されなかった。

以上の結果より、 range_threshold は過度に大きな値を設定すると自己位置推定の精度低下を招く可能性がある一方で、0.5 程度までであれば、安定したナビゲーションを維持したまま設定値を引き上げることが可能であると考えられる。

emcl2 の各パラメータの結果より、emcl2 における各パラメータは、オドメトリ情報とレーザセンサ情報の信頼度のバランスを調整する役割を持ち、設定値によって自己位置推定の特性およびロボットの走行挙動が大きく変化することが明らかとなった。そのため、実環境におけるナビゲーションでは、各パラメータの意味を理解した上で、環境特性に応じた適切な調整が重要であるといえる。

4.2.2 実験結果 (Nav2_Controller)

実験結果 (max_vel_x)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.6



Fig. 4.54 Robot orientation with $\text{max_vel_x} = 0.2$

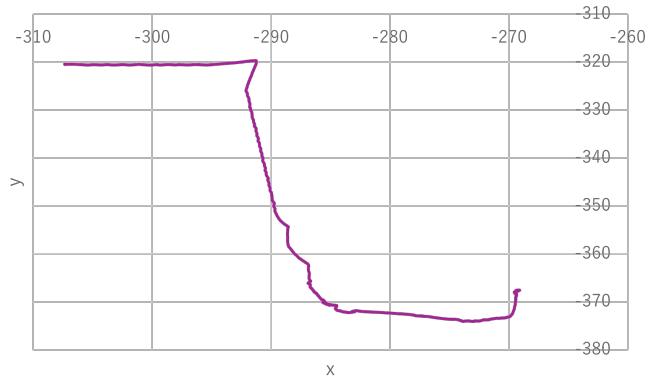
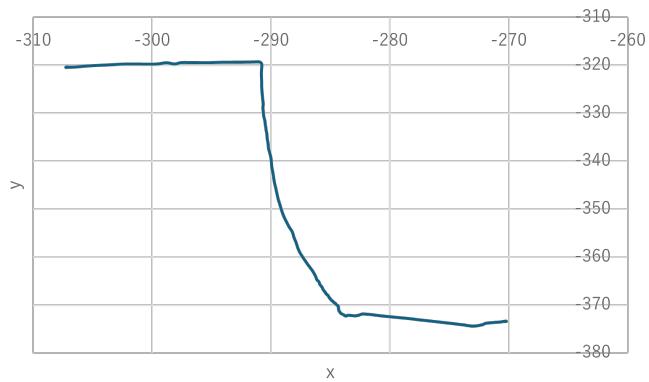


Fig. 4.55 Robot position with $\text{max_vel_x} = 0.2$

Fig. 4.56 Robot orientation with $\text{max_vel_x} = 1.0$ Fig. 4.57 Robot position with $\text{max_vel_x} = 1.0$

まず、 max_vel_x の値を小さく設定した場合、ロボットの走行速度が低下し、走行中の挙動が不安定になる傾向が確認された。しかしながら、速度が低下した状態であっても、ロボットはゴールまで到達することができ、ナビゲーション自体が破綻することはなかった。

一方で、 max_vel_x の値を基準値より大きく設定した場合、走行挙動に大きな変化は見られず、ロボットの実際の走行速度も基準値である 0.6 [m/s] 以上には上昇しなかった。この結果から、 max_vel_x を増加させても、他のパラメータやシステム制約によってロボットの最大速度が制限されている可能性が考えられる。

以上のことから、 max_vel_x は走行速度の上限を設定する重要なパラメータである一方で、ロボットの実際の最高速度は、Controller 以外のパラメータやハードウェア設定の影響も受けることが示唆された。この速度制限の要因については、後述する実験において詳細に検証

する。

実験結果 (max_vel_theta)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.7



Fig. 4.58 Robot orientation with $\text{max_vel_theta} = 0.4$

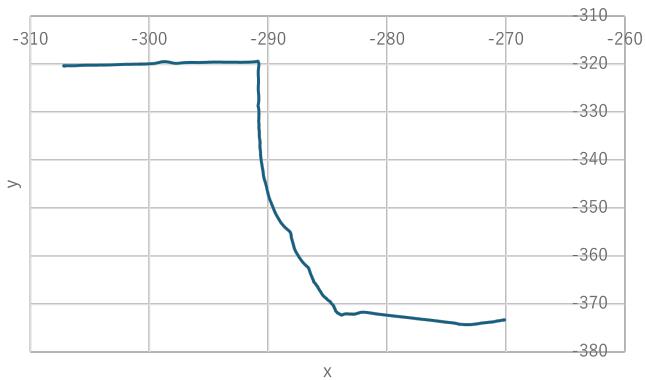


Fig. 4.59 Robot position with $\text{max_vel_theta} = 0.4$



Fig. 4.60 Robot orientation with $\text{max_vel_theta} = 1.0$

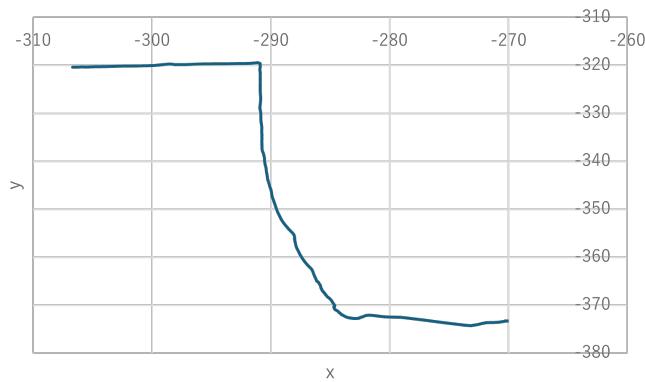


Fig. 4.61 Robot position with $\text{max_vel_theta} = 1.0$

本実験で、 max_vel_theta の値を基準値より大きく設定した場合、ロボットの走行挙動に顕著な変化は見られなかった。この結果から、基準値の時点でロボットの旋回性能は十分に確保されており、それ以上角速度の上限を引き上げても、実際の挙動には大きく反映されないことが示唆される。

一方で、 max_vel_theta の値を基準値より小さく設定した場合、ロボットの挙動が不安定になる様子が確認された。特に、旋回が必要となる箇所において、ロボットが一時的に停止し、旋回完了までに時間を要する場面が多く見られた。さらに、旋回後の直進動作においても、進行方向が安定せず、ふらついた挙動を示す傾向が確認された。

以上の結果より、 max_vel_theta を過度に小さく設定すると、旋回動作およびその後の直進動作に悪影響を及ぼし、ナビゲーション全体の安定性が低下することが明らかとなった。その

ため、本パラメータは、旋回性能を確保できる十分な値に設定することが重要である。

実験結果 (max_speed_xy)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.9

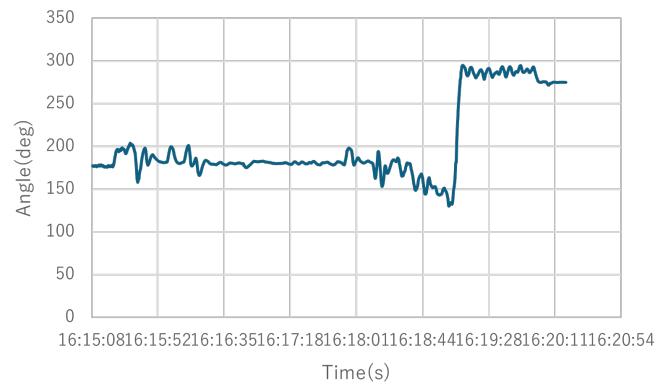


Fig. 4.62 Robot orientation with $\text{max_speed_xy} = 0.1$

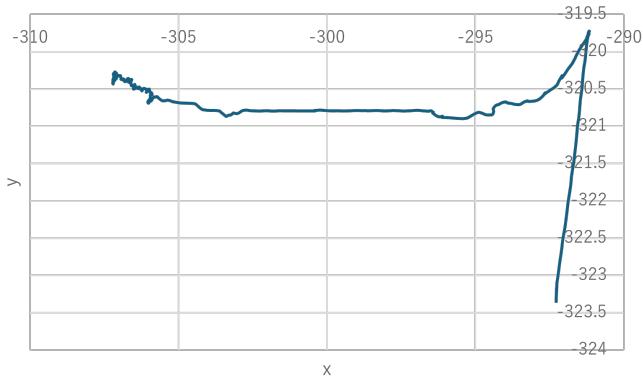
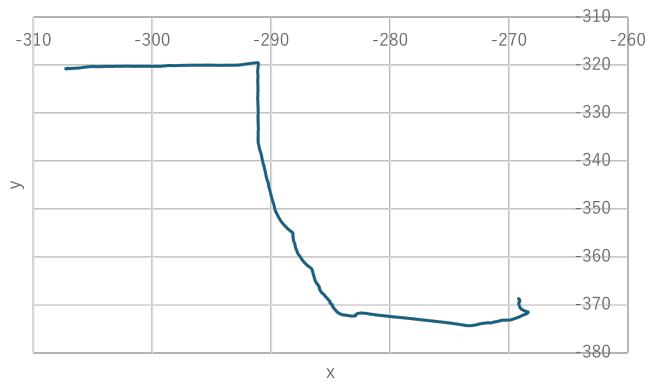


Fig. 4.63 Robot position with $\text{max_speed_xy} = 0.1$

Fig. 4.64 Robot orientation with $\text{max_speed_xy} = 0.5$ Fig. 4.65 Robot position with $\text{max_speed_xy} = 0.5$ Fig. 4.66 Robot orientation with $\text{max_speed_xy} = 1.5$

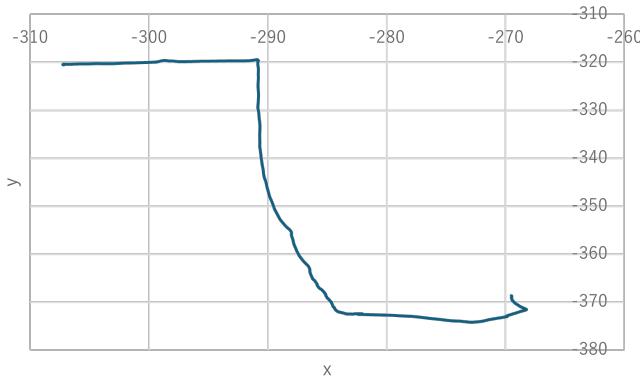


Fig. 4.67 Robot position with $\text{max_speed_xy} = 1.5$

本実験では、 max_speed_xy を 0.5 に設定した場合、ロボットは安定した走行を維持したままゴールへ到達することができた。また、 max_speed_xy を 1.5 に設定した場合においても、ロボットの実際の走行速度に大きな変化は見られなかった。この挙動は、前節で述べた max_vel_x の実験結果と同様であり、他のパラメータやシステム制約によってロボットの最大速度が制限されている可能性が考えられる。この点については、後述する実験において検証を行う。

一方で、 max_speed_xy を 0.1 に設定した場合、ロボットの走行速度が極端に低下し、ゴールまで到達することができなかった。特に、走行開始後の初期段階において、最初の曲がり角付近の段差に接触する挙動が確認された。また、この設定値では、曲がり角に進入する際に左右の車輪を交互に動かすような挙動が見られ、滑らかな旋回動作が行われていなかった。

以上の結果より、 max_speed_xy を過度に小さく設定すると、旋回動作が不安定となり、ナビゲーションの遂行が困難になることが明らかとなった。一方で、本パラメータを大きく設定した場合でも、他の速度制限要因によって実際の走行速度が制約される可能性があるため、他の速度関連パラメータとの関係を考慮した調整が重要である。

実験結果 ($\text{min_theta_velocity_threshold}$)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.001



Fig. 4.68 Robot orientation with $\text{min_theta_velocity_threshold} = 0.01$

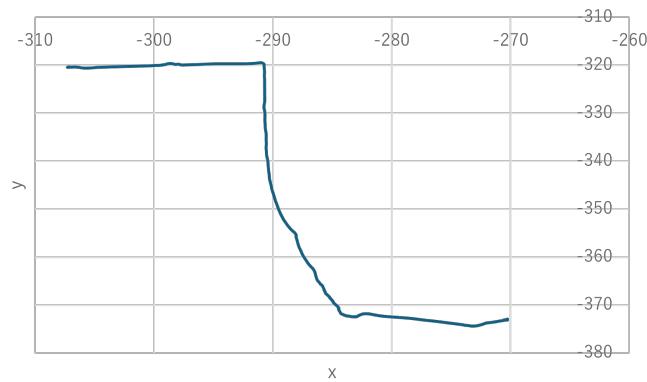


Fig. 4.69 Robot position with $\text{min_theta_velocity_threshold} = 0.01$



Fig. 4.70 Robot orientation with $\text{min_theta_velocity_threshold} = 0.1$

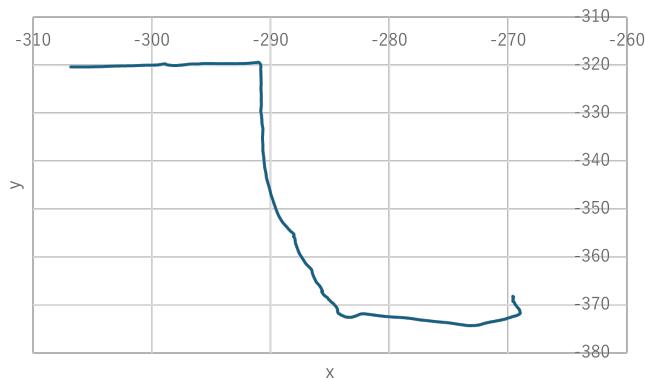


Fig. 4.71 Robot position with `min_theta_velocity_threshold = 0.1`



Fig. 4.72 Robot orientation with `min_theta_velocity_threshold = 1.0`

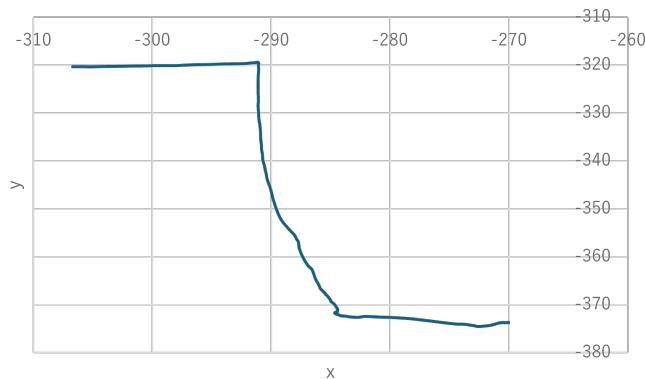


Fig. 4.73 Robot position with `min_theta_velocity_threshold = 1.0`

本実験では、基準値である `min_theta_velocity_threshold = 0.001` に対し、本実験では 0.01，

0.1, 1.0 の各値について走行実験を行った。その結果、基準値から値を段階的に増加させた場合においても、ロボットの走行挙動に大きな変化は確認されなかった。

特に、`min_theta_velocity_threshold` を 1.0 に設定した場合、旋回動作時にロボットが停止する挙動が生じることが予想されたが、実際には旋回および直進動作ともに問題なく行われ、ロボットはゴール地点まで到達することができた。

以上の結果より、`min_theta_velocity_threshold` は、今回の実験環境および走行条件においては、一定範囲内で値を変化させてもロボットの挙動に与える影響が比較的小さいパラメータであることが示唆された。

実験結果 (`acc_lim_x`)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、1.0



Fig. 4.74 Robot orientation with `acc_lim_x` = 0.1

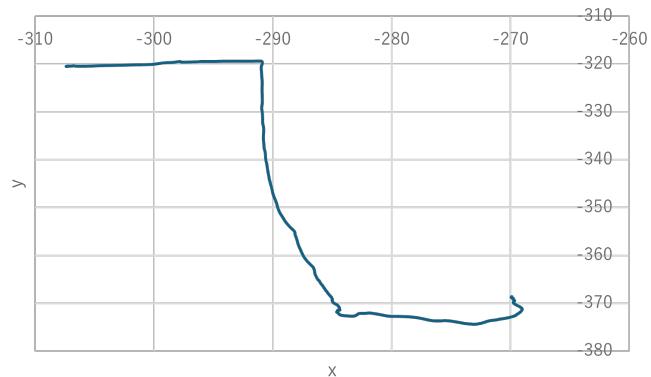
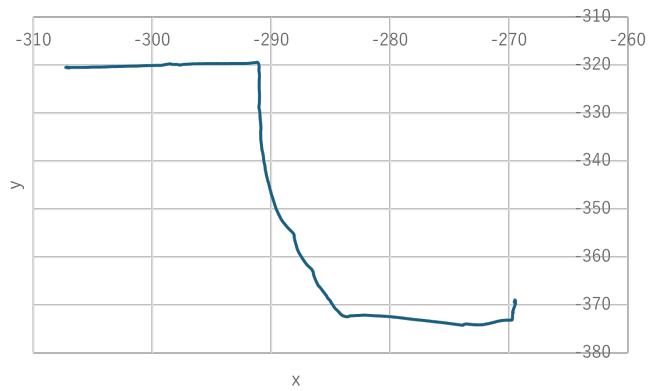
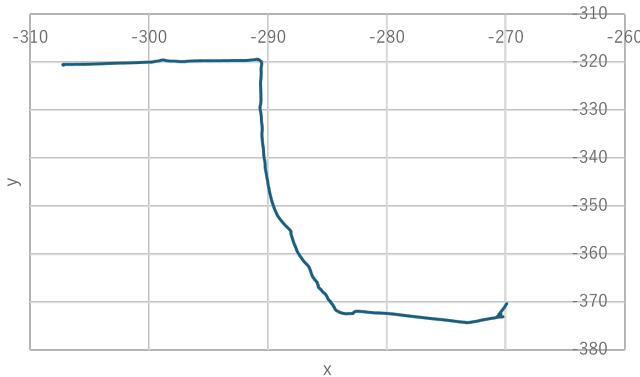


Fig. 4.75 Robot position with `acc_lim_x` = 0.1

Fig. 4.76 Robot orientation with $\text{acc_lim_x} = 0.5$ Fig. 4.77 Robot position with $\text{acc_lim_x} = 0.5$ Fig. 4.78 Robot orientation with $\text{acc_lim_x} = 1.5$

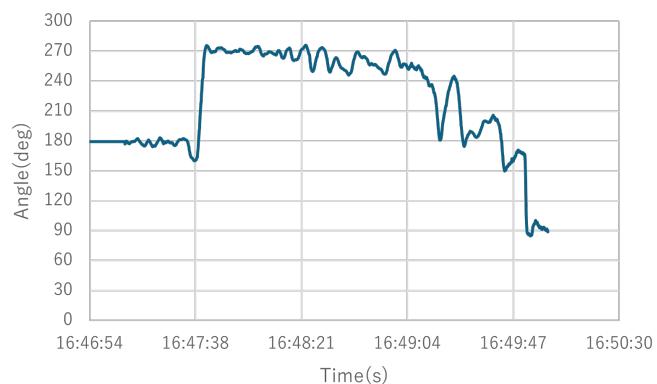
Fig. 4.79 Robot position with $\text{acc_lim_x} = 1.5$

本実験では、 acc_lim_x の値を変化させた場合、曲がり角通過後の直進動作において、ロボットの加速がやや速く感じられる場面が確認された。しかしながら、それ以外の走行挙動においては顕著な変化は見られず、いずれの設定値においてもロボットは安定した走行を維持したままゴール地点へ到達することができた。

以上の結果より、 acc_lim_x はロボットの加速特性を決定する上で必要なパラメータであるものの、本実験条件においては、走行経路の追従性能やナビゲーション全体の安定性に与える影響は比較的小さいことが示唆された。

実験結果 (acc_lim_theta)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、3.2

Fig. 4.80 Robot orientation with $\text{acc_lim_theta} = 0.1$

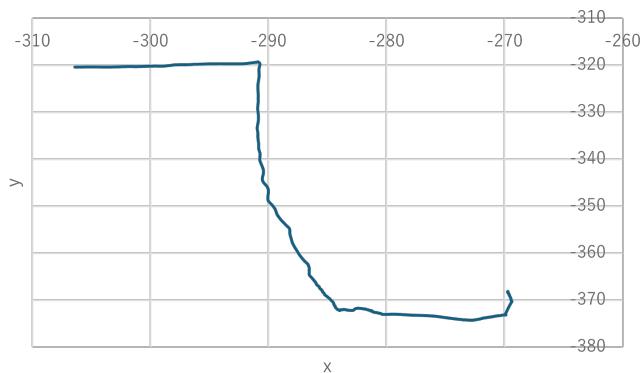


Fig. 4.81 Robot position with $\text{acc_lim_theta} = 0.1$



Fig. 4.82 Robot orientation with $\text{acc_lim_theta} = 1.0$

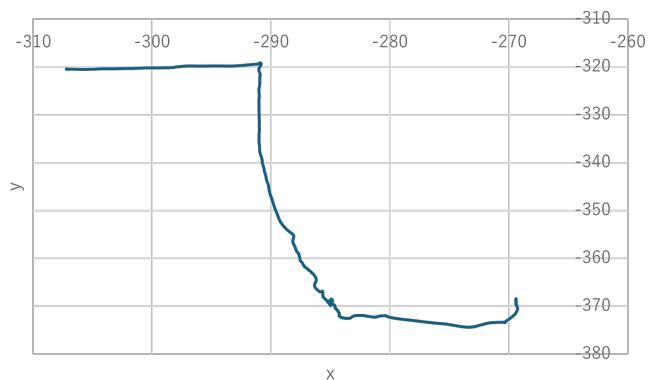
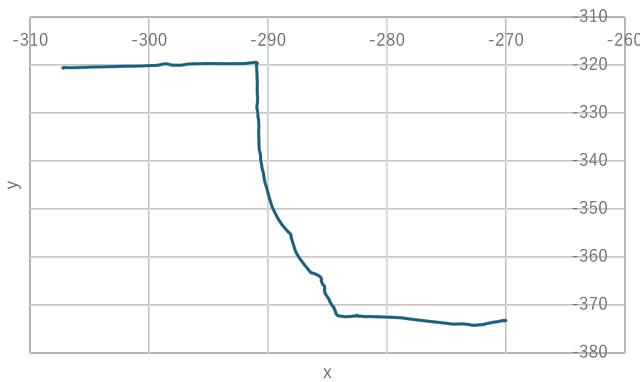


Fig. 4.83 Robot position with $\text{acc_lim_theta} = 1.0$

Fig. 4.84 Robot orientation with $\text{acc_lim_theta} = 4.0$ Fig. 4.85 Robot position with $\text{acc_lim_theta} = 4.0$

本実験では、 acc_lim_theta を 0.1 に設定した場合、最終的な旋回動作後の直進区間において、ロボットの進行方向が細かく変化する、いわゆるくねくねとした挙動が確認された。その後、姿勢が安定し、最終的にはゴール地点へ到達することができた。

また、 acc_lim_theta を 1 に設定した場合においても、走行中の進行方向が細かく変化する挙動が確認され、これは取得したグラフからも明確に観察された。しかしながら、この設定値においても、ナビゲーション自体に支障はなく、ロボットは問題なくゴールへ到達した。

一方で、 acc_lim_theta を 4 に設定した場合、走行挙動に大きな変化は見られず、旋回および直進動作ともに安定した走行が確認された。

以上の結果より、 acc_lim_theta を過度に小さく設定すると、旋回後の姿勢制御が不安定になりやすい一方で、一定以上の値に設定することで、安定した旋回挙動を維持できることが示

峻された。

実験結果 (linear_granularity)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.05



Fig. 4.86 Robot orientation with linear_granularity = 0.01

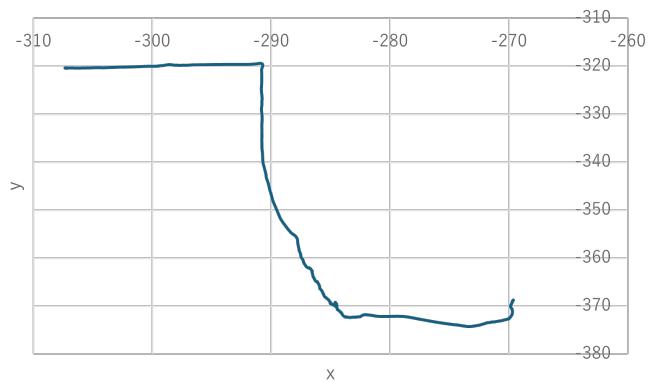


Fig. 4.87 Robot position with linear_granularity = 0.01



Fig. 4.88 Robot orientation with linear_granularity = 0.1

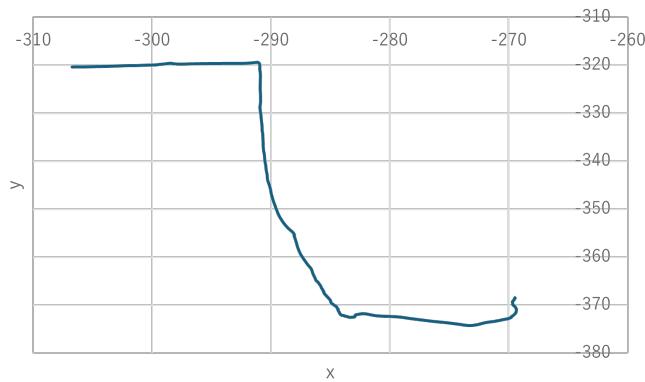


Fig. 4.89 Robot position with linear_granularity = 0.1

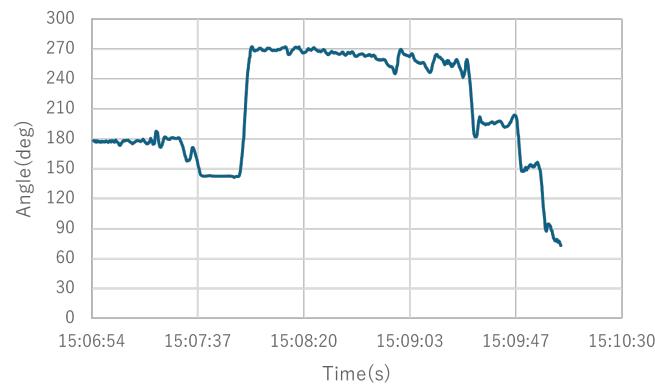


Fig. 4.90 Robot orientation with linear_granularity = 0.5

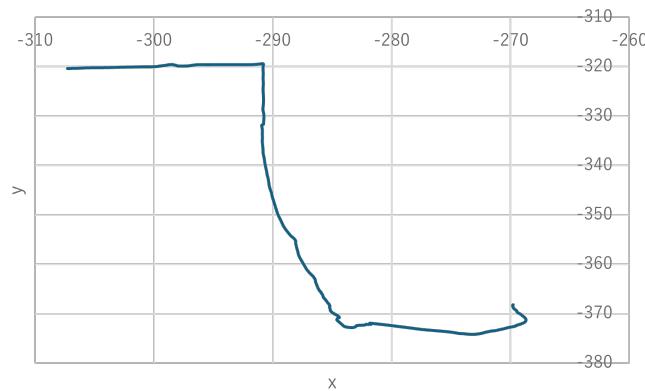


Fig. 4.91 Robot position with linear_granularity = 0.5

本実験では、linear_granularity を 0.5 に設定した場合、走行開始後の最初の旋回箇所においてロボットが一時的に停止する挙動が確認され、その後、再び動き出すまでに時間を要した。この挙動は、経路の分解能が粗くなつたことにより、滑らかな経路生成が困難になつたためであると考えられる。

一方で、linear_granularity を 0.1 に設定した場合、走行挙動は安定しており、旋回動作を含めた経路においてもスムーズな走行が確認された。この結果から、linear_granularity を基準値よりやや大きく設定した場合でも、安定したナビゲーションが可能であることが示唆された。

以上の結果より、linear_granularity を過度に大きく設定すると、経路生成の精度低下により走行挙動が不安定になる可能性がある一方で、0.1 程度の設定値であれば、計算負荷と走行安定性の両立が可能であると考えられる。

実験結果 (angular_granularity)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.025



Fig. 4.92 Robot orientation with angular_granularity = 0.001

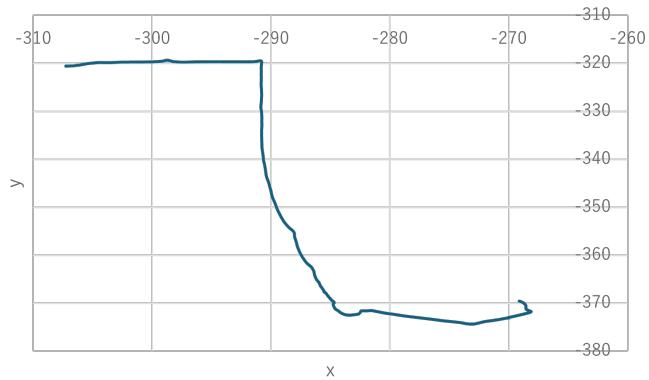


Fig. 4.93 Robot position with angular_granularity = 0.001



Fig. 4.94 Robot orientation with angular_granularity = 0.01

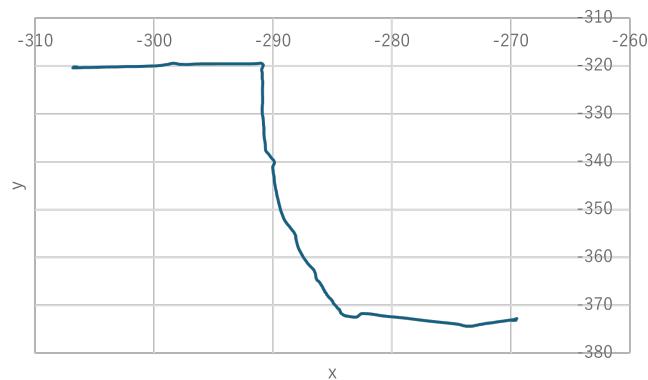


Fig. 4.95 Robot position with $\text{angular_granularity} = 0.01$



Fig. 4.96 Robot orientation with $\text{angular_granularity} = 0.04$

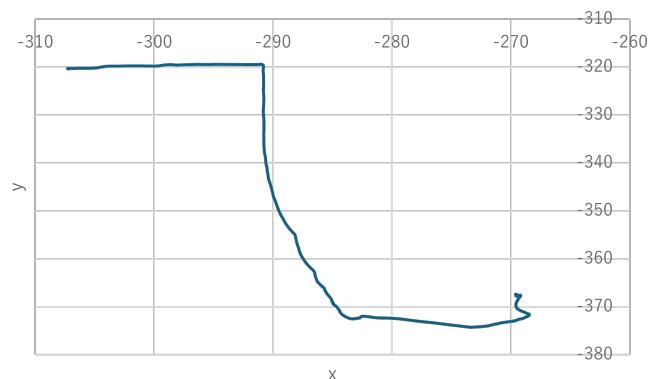


Fig. 4.97 Robot position with $\text{angular_granularity} = 0.04$

本実験では、 $\text{angular_granularity}$ の値を基準値より小さく設定した場合、ロボットの走行

拳動に大きな変化は見られず，旋回および直進動作ともに安定した走行が確認された．この結果から，角度分解能を高めても，本実験環境においては拳動への影響は限定的であることが示唆される．

一方で，angular_granularity を 4.0 に設定した場合，最終的な旋回区間において，ロボットの進行方向にわずかな変化が生じていることが確認された．この拳動は，angular_granularity = 4.0 の設定におけるロボットの姿勢変化を示したグラフからも確認でき，角度分解能が粗くなつたことにより，旋回動作の精度が低下した可能性が考えられる．

以上の結果より，angular_granularity は，一定範囲内で値を小さく設定しても走行拳動に大きな影響を与えない一方で，過度に大きな値を設定した場合には，旋回動作時の姿勢精度に影響を及ぼす可能性があることが示された．

実験結果 (xy_goal_tolerance)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.25



Fig. 4.98 Robot orientation with xy_goal_tolerance = 0.01

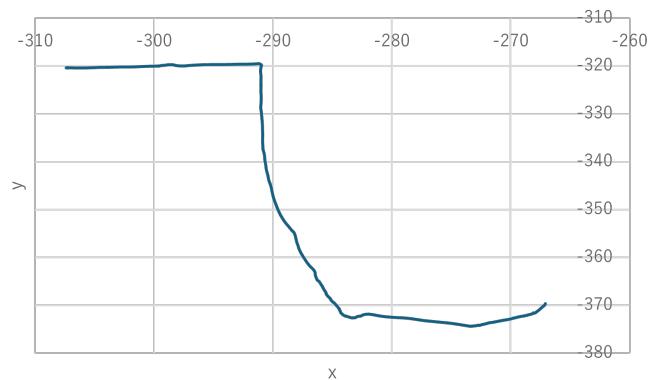


Fig. 4.99 Robot position with $xy_goal_tolerance = 0.01$



Fig. 4.100 Robot orientation with $xy_goal_tolerance = 0.1$

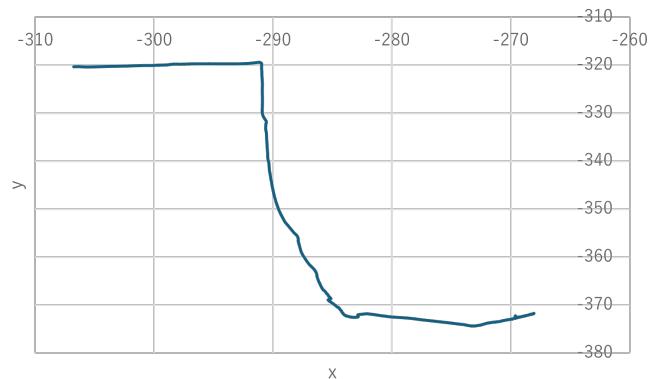


Fig. 4.101 Robot position with $xy_goal_tolerance = 0.1$



Fig. 4.102 Robot orientation with $xy_goal_tolerance = 0.4$

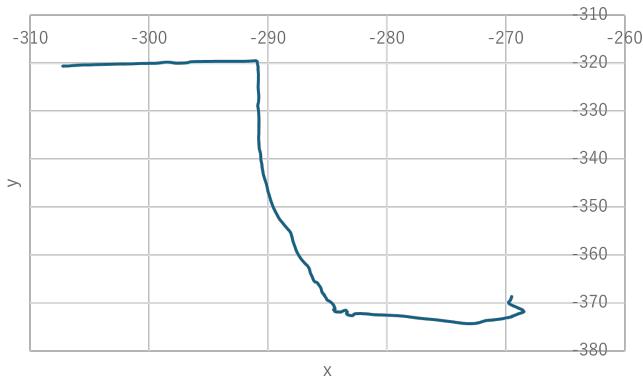


Fig. 4.103 Robot position with $xy_goal_tolerance = 0.4$

本実験では、 $xy_goal_tolerance$ の値を $0.01, 0.1, 0.4$ に設定して実験を行った結果、いずれの値においても、ロボットの走行挙動に顕著な変化は確認されなかった。また、ゴール付近での振動や停止位置の不安定化といった現象も見られず、すべての条件において安定したゴール到達が達成された。

この結果から、本実験環境および使用したロボットモデルにおいては、 $xy_goal_tolerance$ の設定値がロボットの走行挙動に与える影響は小さいことが示唆される。したがって、本パラメータは、厳密な位置精度よりもゴール到達判定の柔軟性を調整する目的で用いられ、挙動そのものへの影響は限定的であると考えられる。

Controller の各パラメータの結果より、Controller に関するパラメータは、ロボットの走行速度や旋回特性といった運動特性を調整する上で重要な役割を果たす一方で、閾値やゴール判

定に関するパラメータは補助的な役割を果たすことが示唆される。また、一部のパラメータについては、他の設定値やシステム制約との相互作用によって挙動への影響が限定されることが分かった。そのため、Controller パラメータの調整においては、単一のパラメータのみを変更するのではなく、関連するパラメータとの関係を考慮しながら総合的に調整を行うことが重要である。

4.2.3 実験結果 (Nav2_Costmap)

実験結果 (global_resolution)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.1

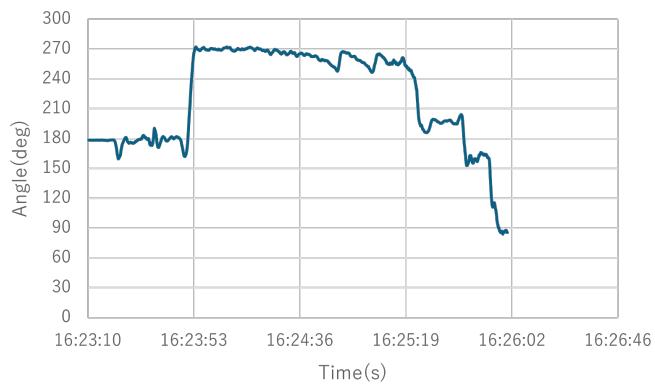


Fig. 4.104 Robot orientation with global_resolution = 0.05

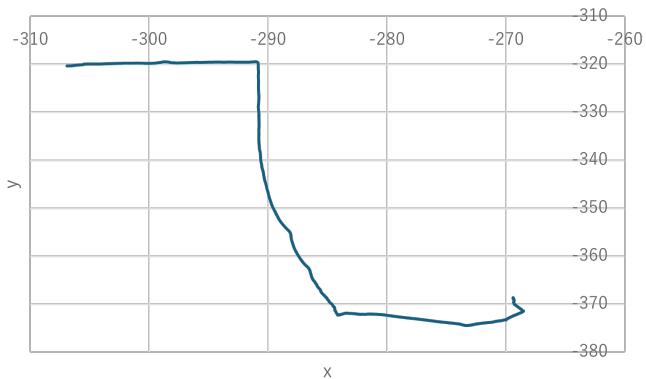


Fig. 4.105 Robot position with global_resolution = 0.05

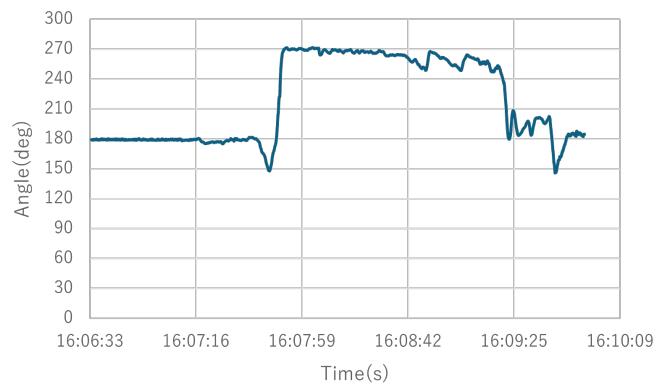


Fig. 4.106 Robot orientation with global_resolution = 0.5

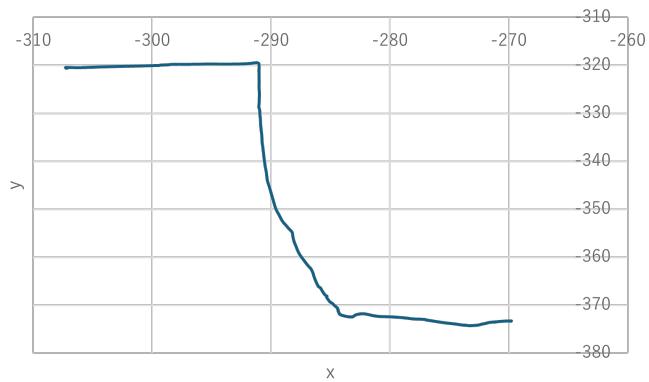


Fig. 4.107 Robot position with global_resolution = 0.5



Fig. 4.108 Robot orientation with global_resolution = 1.0

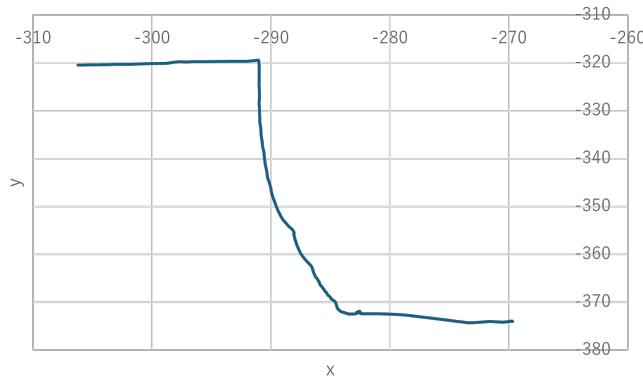


Fig. 4.109 Robot position with global_resolution = 1.0

本実験では、global_resolution の値を 0.05, 0.5, 1.0 に変化させて走行実験を行ったが、いずれの設定においても、ロボットの挙動に大きな変化は見られなかった。また、経路生成や走行中の挙動は安定しており、ゴールまで問題なく到達することが確認された。

この結果から、今回使用した環境およびタスク条件においては、global_resolution を変更しても、経路計画やロボットの走行挙動への影響は小さいと考えられる。そのため、本実験環境では、過度に解像度を高く設定する必要はなく、計算負荷とのバランスを考慮した標準的な値を用いることが有効であるといえる。

実験結果 (global_cost_scaling_factor)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、3.0



Fig. 4.110 Robot orientation with global_cost_scaling_factor = 1.0

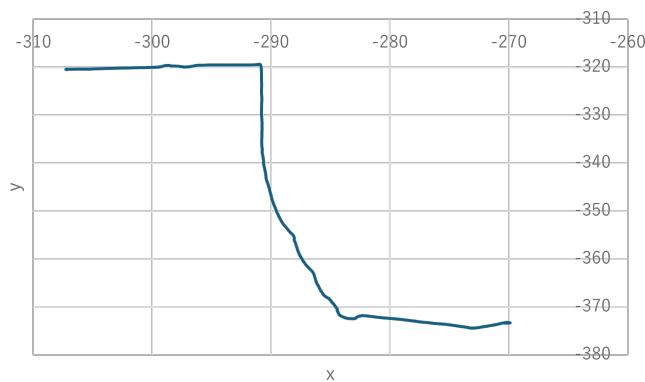


Fig. 4.111 Robot position with `global_cost_scaling_factor = 1.0`



Fig. 4.112 Robot orientation with `global_cost_scaling_factor = 5.0`

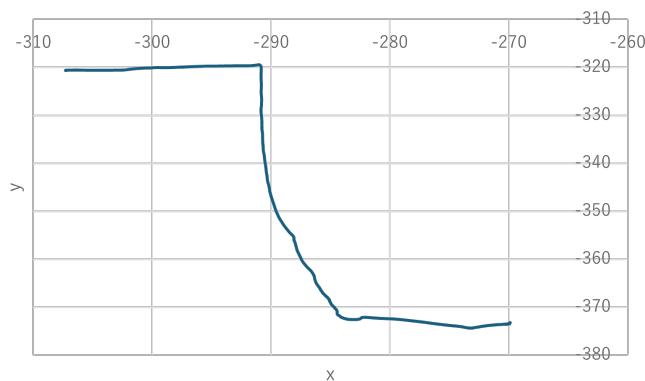


Fig. 4.113 Robot position with `global_cost_scaling_factor = 5.0`



Fig. 4.114 Robot orientation with global_cost_scaling_factor = 10

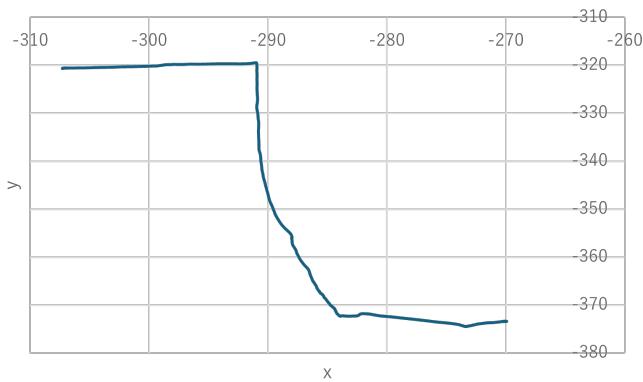


Fig. 4.115 Robot position with global_cost_scaling_factor = 10

本実験では、基準値に対して値を下げた場合(1.0)および、値を上げた場合(5, 10)について走行実験を行った。その結果、いずれの設定においてもロボットは無事にゴールへ到達し、ナビゲーション全体や走行中の基本的な挙動に大きな差異は見られなかった。

一方で、ゴール地点付近に設置されたコーンを回避する際の挙動に違いが確認された。具体的には、global_cost_scaling_factor の値が大きい場合、障害物に対する回避動作の開始が早く、より余裕を持って障害物を避ける挙動が見られた。これに対し、値が小さい場合は、障害物に比較的近づいてから回避動作を行う傾向が確認された。

以上の結果から、global_cost_scaling_factor は、経路生成の成否やゴール到達自体には大きな影響を与えないものの、障害物回避のタイミングや挙動の余裕度に影響を及ぼすパラメータであると考えられる。そのため、環境中の障害物配置や安全マージンの要求に応じて、適切な

値を選択することが重要である。

実験結果 (global_inflation_radius)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.5



Fig. 4.116 Robot orientation with global_inflation_radius = 0.1

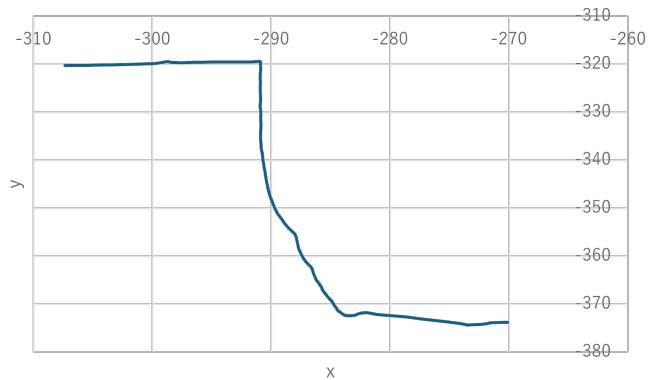


Fig. 4.117 Robot position with global_inflation_radius = 0.1



Fig. 4.118 Robot orientation with global_inflation_radius = 1.0

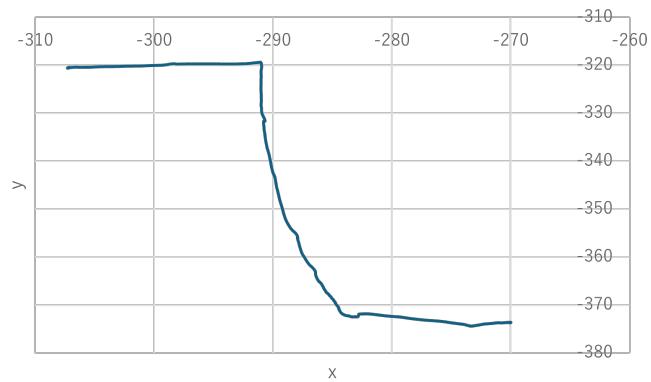


Fig. 4.119 Robot position with global_inflation_radius = 1.0



Fig. 4.120 Robot orientation with global_inflation_radius = 2.0

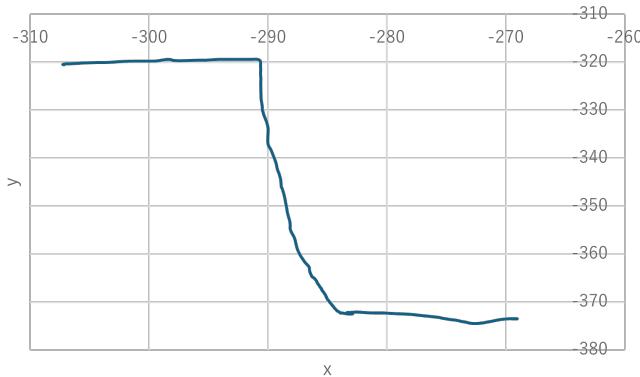


Fig. 4.121 Robot position with global_inflation_radius = 2.0

本実験では、global_inflation_radius の値を基準値から大きくした場合と小さくした場合について走行実験を行った。値を大きく設定した 1.0, 2.0 の場合、建物や障害物の周囲に広い膨張領域が生成され、ロボットがその範囲に進入しないような経路が生成された。その結果、道幅が狭い最初の直線区間において、ロボットが通行可能な領域が制限され、進行開始がやや遅れる挙動が確認された。しかしながら、走行中の挙動は安定しており、最終的には問題なくゴールに到達した。

一方、global_inflation_radius の値を小さく設定した 0.5 の場合においても、ロボットは大きな問題なくゴールへ到達した。障害物との距離は近くなるものの、今回の環境では衝突や著しい不安定挙動は確認されなかった。

以上の結果から、global_inflation_radius は、ゴール到達の可否よりも、狭い通路や細い道を通過する際の経路の取り方やロボットの走行余裕に影響を与えるパラメータであると考えられる。そのため、通路幅が限られた環境や、障害物間を通過する必要がある環境においては、ロボットのサイズや走行特性に応じて適切に調整することが重要である。

実験結果 (local_resolution)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.1



Fig. 4.122 Robot orientation with local_resolution = 0.05

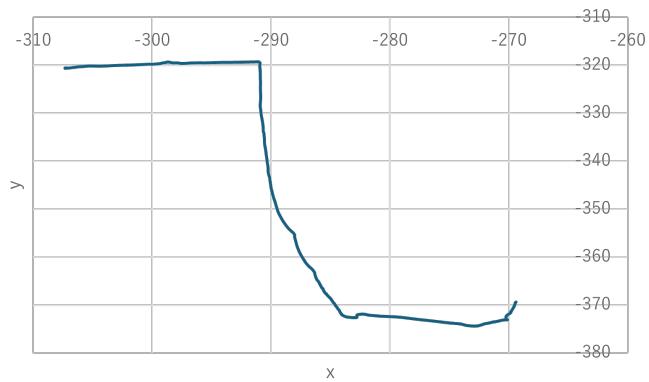


Fig. 4.123 Robot position with local_resolution = 0.05



Fig. 4.124 Robot orientation with local_resolution = 0.5

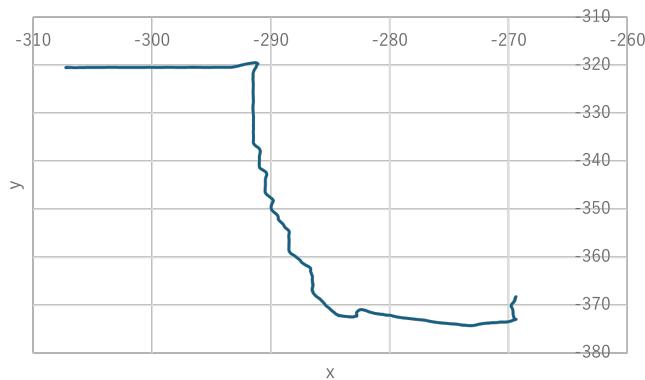


Fig. 4.125 Robot position with local_resolution = 0.5

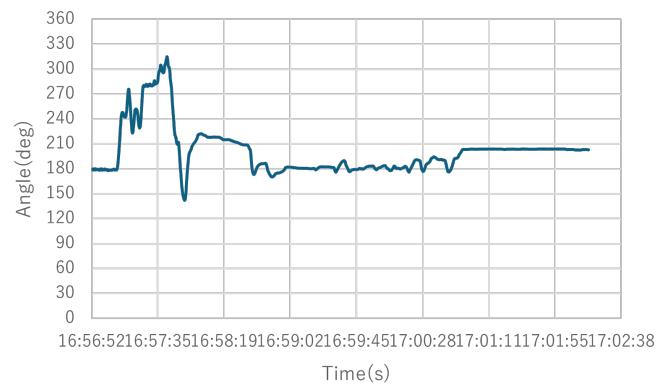


Fig. 4.126 Robot orientation with local_resolution = 1.0

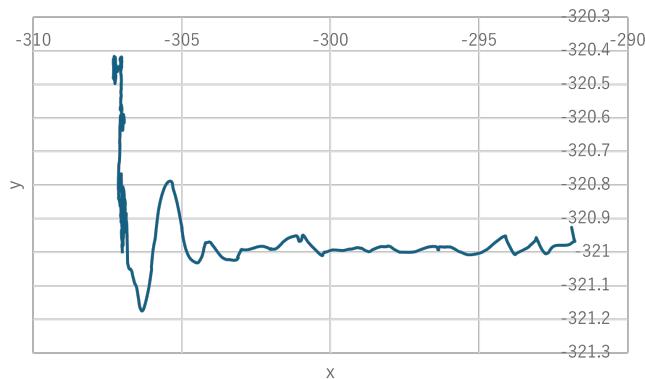


Fig. 4.127 Robot position with local_resolution = 1.0

本実験では、基準値である 0.1 を中心に、値を小さくした場合および大きくした場合の挙動

を比較した。値を 0.05 に設定した場合、ロボットは経路を正確に追従し、全体を通して安定した走行を行い、問題なくゴールに到達した。基準値より高い解像度で環境を認識できていることから、障害物回避や経路追従が適切に行われたと考えられる。

一方、local_resolution を 0.5 に設定した場合、ロボットは長い直進区間において、右側の段差付近を通過する挙動が確認された。走行位置はやや危険な箇所であったものの、最終的にはゴールまで到達することができた。このことから、解像度の低下により環境表現が粗くなり、障害物との距離評価が不十分になっている可能性が考えられる。

さらに、local_resolution を 1.0 に設定した場合、ロボットは走行開始直後にその場でゆっくり回転し、すぐには移動を開始しなかった。その後も、停止とわずかな旋回を繰り返す挙動が見られ、最終的には最初の曲がり角付近で停止し、ゴールに到達することができなかった。これは、解像度が極端に低下したこと、周囲環境を正しく認識できず、適切な経路生成や障害物回避が行えなかつたためであると考えられる。

以上の結果から、local_resolution はロボットの走行安定性や障害物回避性能に大きく影響を与えるパラメータであり、値を大きくしそぎると、ナビゲーションの破綻を引き起こす可能性があることが確認された。本実験環境においては、基準値である 0.1 もしくは、それ以下の値を用いることで、安定した自律走行が実現できると考えられる。

実験結果 (local_cost_scaling_factor)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、3

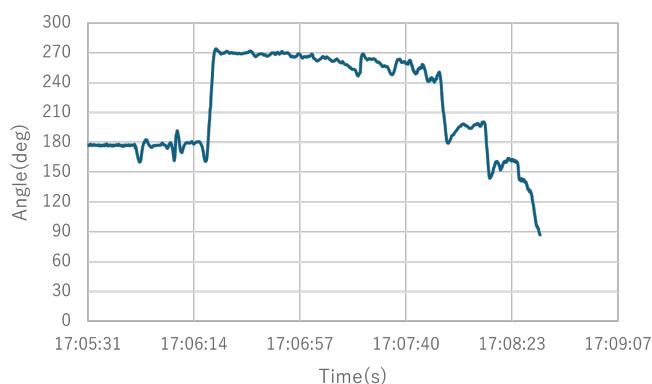


Fig. 4.128 Robot orientation with local_cost_scaling_factor = 1.0

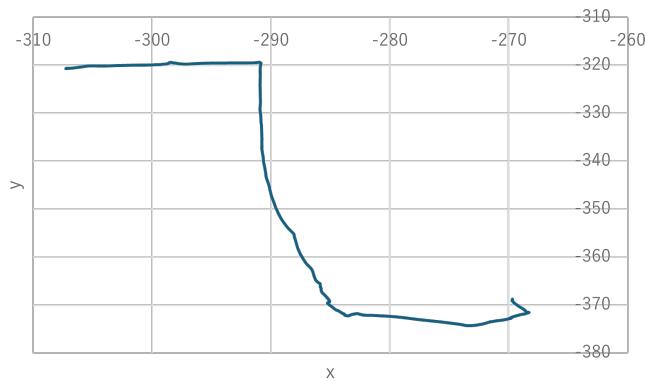


Fig. 4.129 Robot position with `local_cost_scaling_factor = 1.0`



Fig. 4.130 Robot orientation with `local_cost_scaling_factor = 5.0`

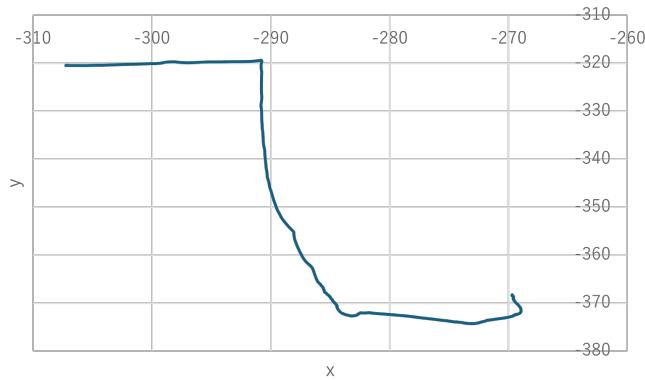


Fig. 4.131 Robot position with `local_cost_scaling_factor = 5.0`



Fig. 4.132 Robot orientation with local_cost_scaling_factor = 10

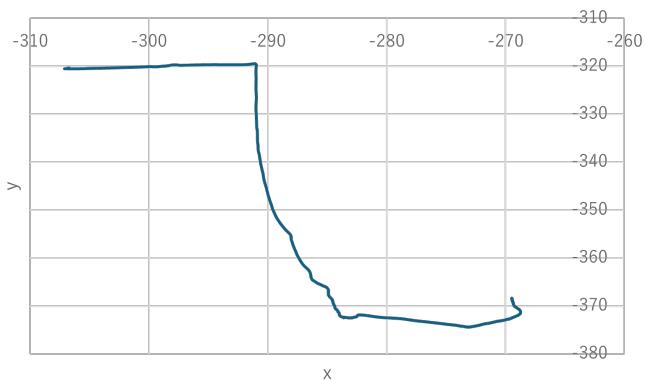


Fig. 4.133 Robot position with local_cost_scaling_factor = 10

本実験では、基準値を 3 とし、値を 1, 5, 10 に変更した場合のロボットの挙動を比較した。その結果、いずれの値においても、ロボットは安定して走行し、大きな挙動の変化は見られず、無事にゴールへ到達することが確認された。走行経路や障害物回避の様子についても、基準値の場合と比較して、顕著な差は認められなかった。

以上の結果から、本実験環境においては、local_cost_scaling_factor の値を基準値から上下に変化させても、ロボットのナビゲーション性能や走行安定性への影響は小さいと考えられる。そのため、本パラメータは、特定の障害物回避挙動を微調整する目的で用いるよりも、他のパラメータと組み合わせて調整することで、効果を発揮する可能性が高いといえる。

実験結果 (local_inflation_radius)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.3



Fig. 4.134 Robot orientation with local_inflation_radius = 0.1

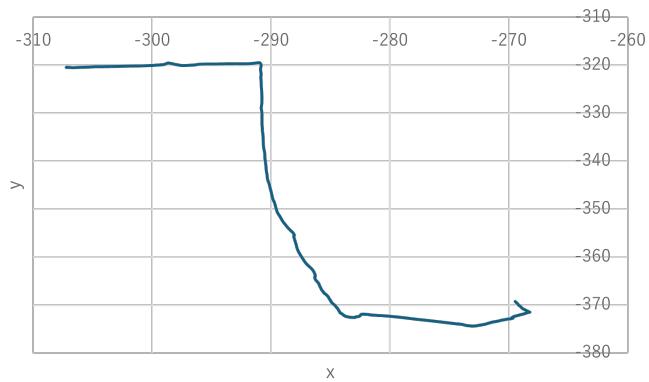


Fig. 4.135 Robot position with local_inflation_radius = 0.1



Fig. 4.136 Robot orientation with local_inflation_radius = 0.5

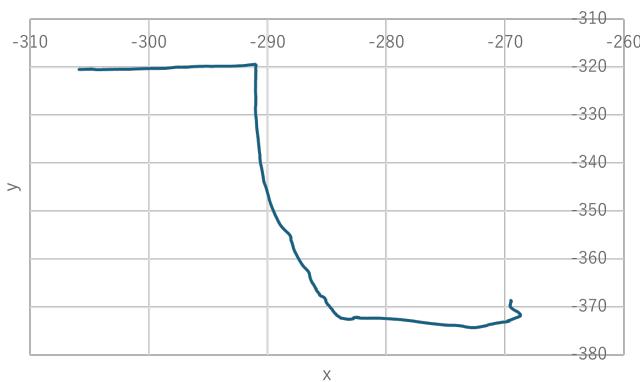


Fig. 4.137 Robot position with `local_inflation_radius = 0.5`



Fig. 4.138 Robot orientation with `local_inflation_radius = 1.0`

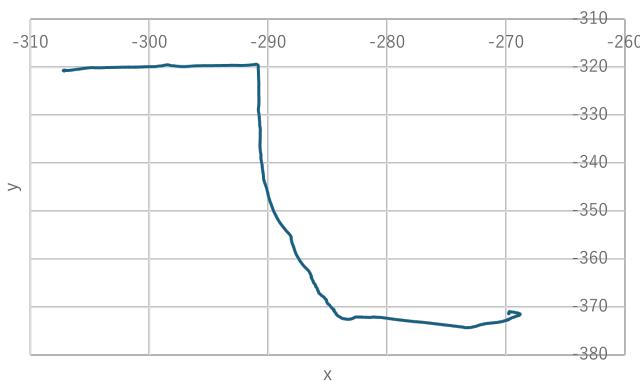


Fig. 4.139 Robot position with `local_inflation_radius = 1.0`



Fig. 4.140 Robot orientation with local_inflation_radius = 2.0

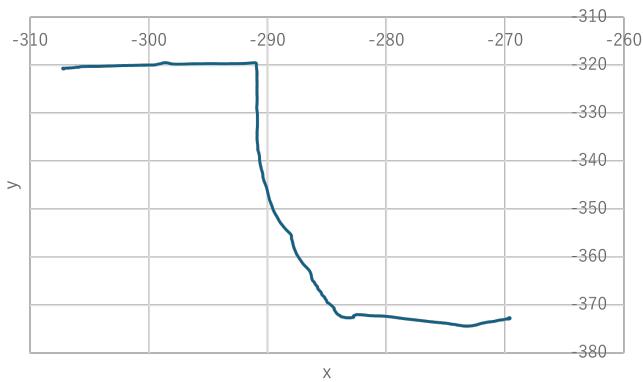


Fig. 4.141 Robot position with local_inflation_radius = 2.0

本実験では、基準値を 0.1 とし、0.5, 1.0, 2.0 に変更した場合のロボットの挙動を比較した。その結果、基準値である 0.1 の場合には、ロボットの挙動に特に大きな変化は見られず、安定した走行が確認された。0.5 の場合には、最初の曲がり角において一時的に停止する挙動が見られたものの、その後は走行を再開し、最終的には問題なくゴールへ到達した。

さらに、1.0 および 2.0 の場合には、ロボットの走行は安定しており、顕著な挙動の変化は見られず、いずれも問題なくゴールに到達した。この結果から、local_inflation_radius の値を 1.0 程度まで増加させても、本実験環境においては、ロボットのナビゲーション性能に悪影響を及ぼさないことが確認された。

ただし、本実験環境では、ロボットの走行経路周辺に障害物が少なかったため、inflation_radius の増加による影響が顕在化しにくかった可能性がある。そのため、障害物が密集

した環境や、狭い通路を走行する場合には、本パラメータの設定がロボットの挙動に与える影響について、さらなる検討が必要であると考えられる。

Costmap の各パラメータの結果から、Global Costmap の各パラメータは、主に経路計画全体の安全性や余裕度に影響を与える一方で、Local Costmap のパラメータは、ロボットの即時的な挙動や走行安定性に強く影響を及ぼすことが確認された。特に、Local Costmap の解像度設定は、屋外環境における安定した自律走行を実現する上で重要であり、環境特性や走行条件に応じた慎重な調整が必要であるといえる。

4.2.4 実験結果 (Nav2_Velocity Smoother)

実験結果 (smoothing_frequency)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、20



Fig. 4.142 Robot orientation with smoothing_frequency = 5

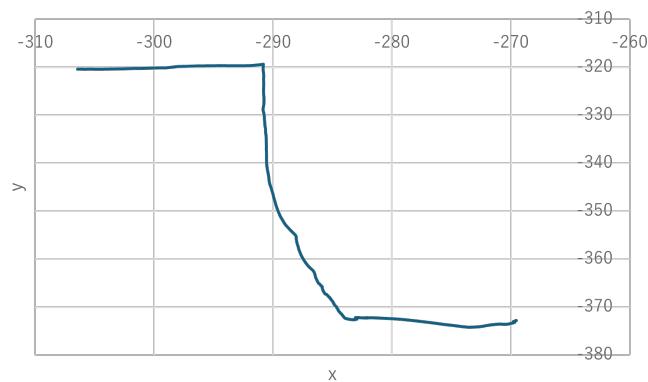


Fig. 4.143 Robot position with smoothing_frequency = 5

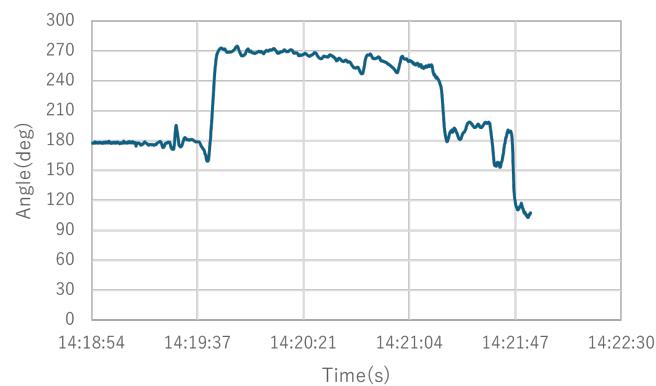


Fig. 4.144 Robot orientation with smoothing_frequency = 10

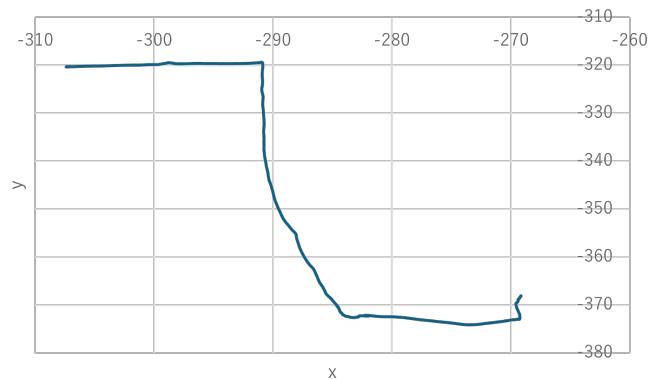


Fig. 4.145 Robot position with smoothing_frequency = 10



Fig. 4.146 Robot orientation with smoothing_frequency = 40

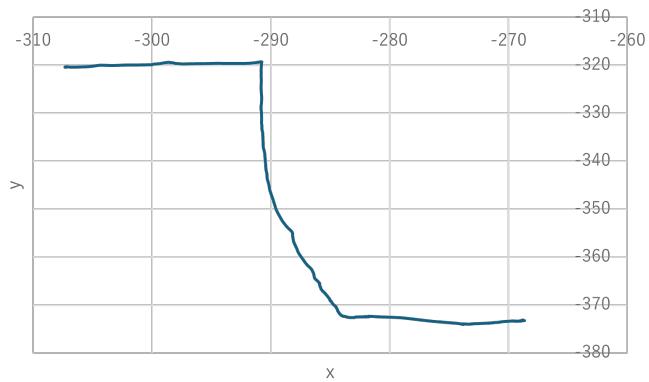


Fig. 4.147 Robot position with smoothing_frequency = 40



Fig. 4.148 Robot orientation with smoothing_frequency = 60

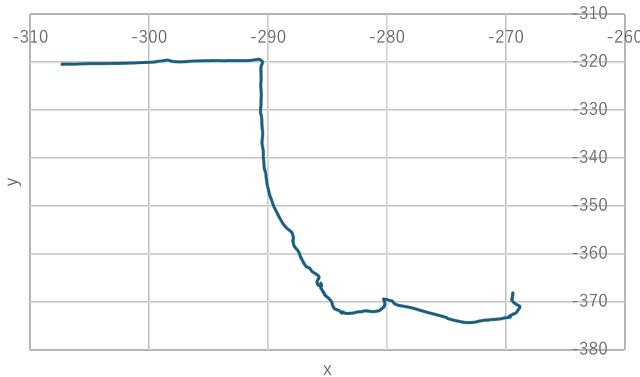


Fig. 4.149 Robot position with smoothing_frequency = 60

本実験では、基準値を 20 とし、5, 10, 40, 60 に変更した場合のロボットの挙動を比較した。その結果、5 および 10 の場合には、基準値である 20 と比較して、ロボットの走行挙動に大きな変化は見られず、いずれの条件においても問題なくゴールに到達した。

一方、40 に設定した場合には、最後の曲がり角において、ロボットが比較的スムーズに旋回している様子が確認された。このことから、smoothing_frequency を適度に高く設定することで、旋回時の挙動が改善される可能性が示唆される。

しかし、60 に設定した場合には、直進区間から最後の曲がり角へ移行する際の旋回開始のタイミングおよび位置が他の条件と異なり、その後、ロボットが進行方向を頻繁に修正しながら走行する挙動が見られた。この結果から、smoothing_frequency を過度に大きく設定すると、速度指令の更新が過剰となり、走行挙動が不安定になる可能性があることが分かった。

以上より、smoothing_frequency は、ロボットの旋回動作の滑らかさに影響を与えるパラメータであり、過度に大きな値を設定することは避け、走行環境やロボット特性に応じた適切な値を選択することが重要である。

実験結果 (max_velocity_x)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.6



Fig. 4.150 Robot orientation with $\text{max_velocity_x} = 0.3$

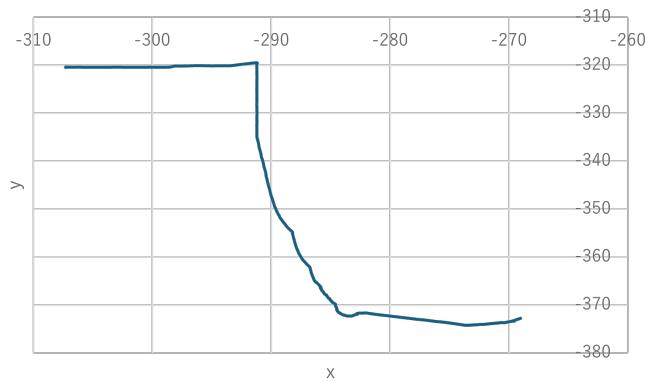
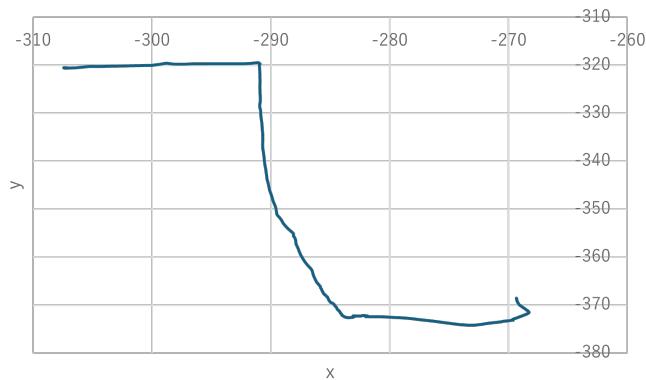
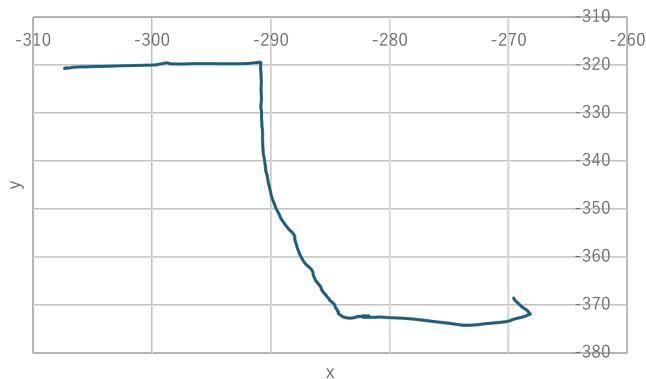


Fig. 4.151 Robot position with $\text{max_velocity_x} = 0.3$



Fig. 4.152 Robot orientation with $\text{max_velocity_x} = 0.9$

Fig. 4.153 Robot position with $\text{max_velocity_x} = 0.9$ Fig. 4.154 Robot orientation with $\text{max_velocity_x} = 1.2$ Fig. 4.155 Robot position with $\text{max_velocity_x} = 1.2$

本実験では、 max_velocity の x 成分の値を変化させ、ロボットの走行挙動への影響を調査

した。その結果、値を基準より小さく設定した 0.3 の場合には、ロボットの走行速度が低下し、全体的に低速な移動となったものの、走行は安定しており、最終的には問題なくゴールに到達した。このことから、本パラメータはロボットの移動速度に直接的な影響を与える一方で、過度に小さな値を設定しない限り、ナビゲーションの成立自体には大きな影響を及ぼさないことが確認された。

一方で、値を基準より大きく設定した 0.9、1.2 の場合には、設定値に関わらず、ロボットの走行速度が明らかに基準値である 0.6 m/s を超えることはなく、実際の挙動に大きな変化は見られなかった。この結果から、ロボットの最大速度は、Velocity Smoother の本パラメータ以外の要因、例えば Controller やロボット固有の制限パラメータによって制約されている可能性が示唆される。本点については、Controller における `max_vel_x` や `max_speed_xy` の実験結果と併せて、後続の実験において検証を行う。

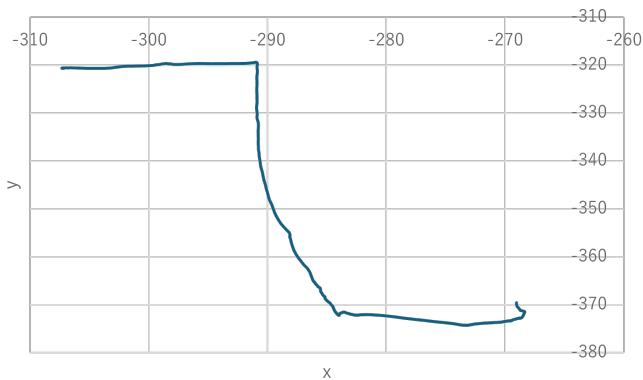
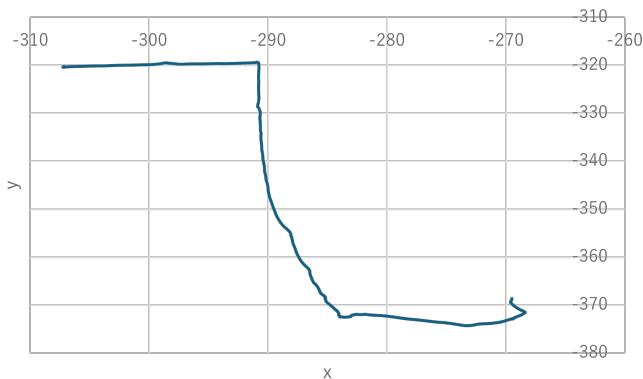
以上より、Velocity Smoother の `max_velocity (x 成分)` は、ロボットの並進速度の上限を調整するためのパラメータであり、低速での安定走行を実現するための調整には有効であるが、高速化を目的とする場合には、他の速度制限パラメータとの関係を考慮した総合的な調整が必要である。

実験結果 (`max_velocity_theta`)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、1.7



Fig. 4.156 Robot orientation with `max_velocity_theta = 0.6`

Fig. 4.157 Robot position with `max_velocity_theta = 0.6`Fig. 4.158 Robot orientation with `max_velocity_theta = 2.5`Fig. 4.159 Robot position with `max_velocity_theta = 2.5`

本実験では、基準値を 1.7 rad/s とし、 0.6 rad/s および 2.5 rad/s に変更した場合のロボット

トの挙動を比較した。その結果、いずれの値においても、ロボットの走行挙動に顕著な変化は見られず、問題なくゴールに到達することが確認された。

基準値より小さい 0.6 rad/s に設定した場合においても、旋回動作が極端に遅くなることはなく、ナビゲーション全体の進行に大きな影響は与えなかった。また、基準値より大きい 2.5 rad/s に設定した場合には、最初の曲がり角において、一時的に左方向へ回転した後に右旋回へ移行する挙動が確認されたが、その影響は限定的であり、最終的なゴール到達には支障をきたさなかった。

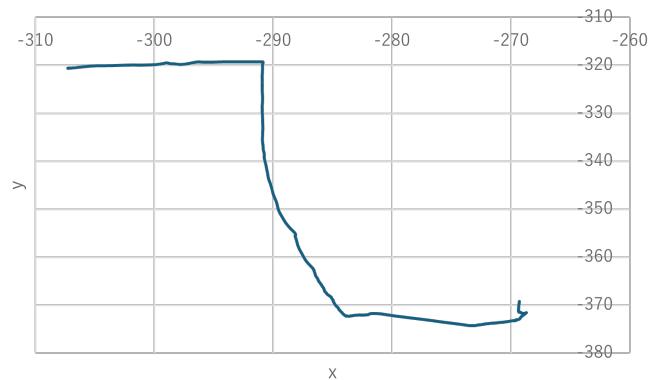
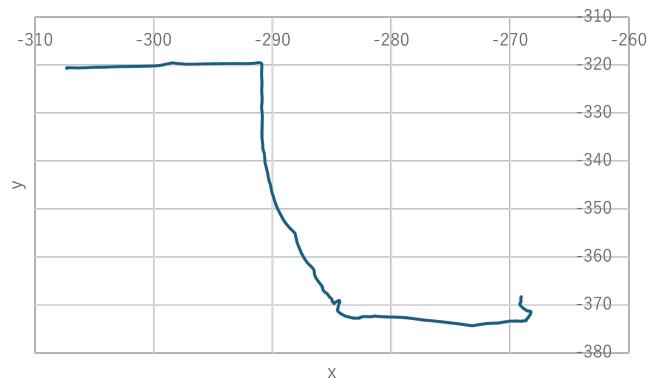
以上の結果から、Velocity Smoother における `max_velocity` (θ 成分) は、本実験環境においては、ロボットの挙動に与える影響が比較的小さいパラメータであることが分かった。このことは、旋回時の角速度が、他の制御パラメータやロボットの物理的制約によって主に制御されている可能性を示唆している。

実験結果 (`max_accel_x`)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.5



Fig. 4.160 Robot orientation with `max_accel_x` = 0.2

Fig. 4.161 Robot position with $\text{max_accel_x} = 0.2$ Fig. 4.162 Robot orientation with $\text{max_accel_x} = 1.0$ Fig. 4.163 Robot position with $\text{max_accel_x} = 1.0$

本実験では、基準値を 0.5 m/s^2 とし、 0.2 m/s^2 および 1.0 m/s^2 に変更した場合のロボット

の挙動を比較した。その結果、基準値より小さい 0.2 m/s^2 に設定した場合には、走行中にロボットが小刻みに左右へ揺れるような挙動が観察された。しかしながら、走行自体は継続可能であり、最終的には問題なくゴールに到達した。このことから、加速度制限を厳しく設定すると、速度変化が緩やかになりすぎ、進行方向の微調整が頻発する可能性があると考えられる。

一方、基準値より大きい 1.0 m/s^2 に設定した場合には、最初の曲がり角において一時的に停止する挙動が確認されたものの、その後は安定した走行を維持し、最終的にはゴールに到達した。この結果から、加速度を大きく設定した場合でも、ナビゲーション全体の成立には大きな影響を及ぼさないことが分かった。

以上より、Velocity Smoother における `max_accel(x成分)` は、ロボットの速度変化の滑らかさや走行安定性に一定の影響を与えるものの、本実験環境においては、適度な範囲での調整であれば、ゴール到達の可否に大きな影響を与えないパラメータであるといえる。

実験結果 (`max_accel_theta`)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、1.0



Fig. 4.164 Robot orientation with `max_accel_theta = 0.5`

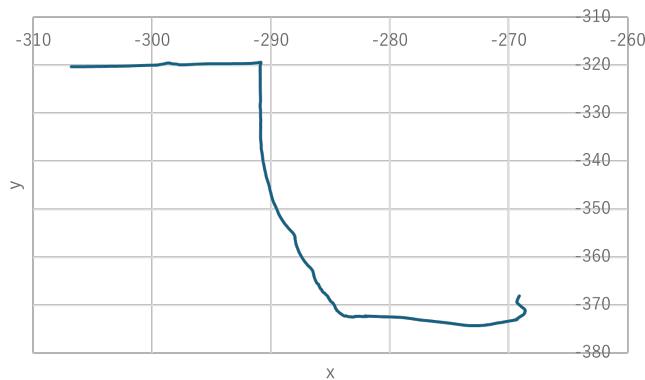


Fig. 4.165 Robot position with $\text{max_accel_theta} = 0.5$



Fig. 4.166 Robot orientation with $\text{max_accel_theta} = 2.0$

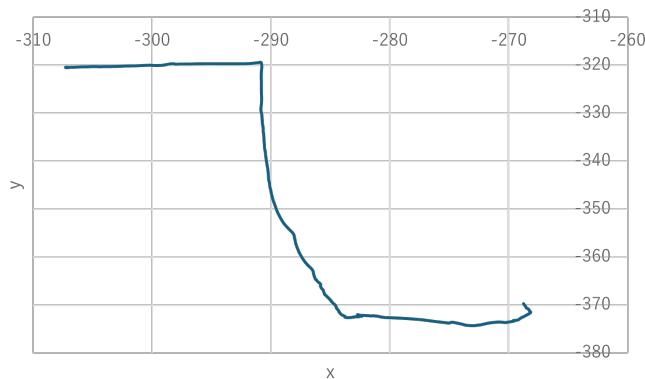


Fig. 4.167 Robot position with $\text{max_accel_theta} = 2.0$

実験の結果、基準値 1.0 に対して、0.5 および 2.0 のいずれの場合においても、走行全体の

挙動に大きな変化は見られなかった。いずれの設定においても、ロボットは安定して経路を追従し、最終的にゴールへ到達することができた。

一方で、角速度加速度を 2.0 に設定した場合、曲がり角を通過した直後の回転後加速が、他の設定と比較してわずかに速く感じられる傾向が確認された。これは、角速度の立ち上がりが速くなることで、回転動作から次の直進動作への移行がより迅速になったためであると考えられる。

以上の結果から、本実験環境においては、角速度方向の最大加速度制限 (`max_accel[θ]`) は、ロボットのゴール到達可否や走行安定性に対して大きな影響を及ぼさないことが示唆される。ただし、回転後の応答性にはわずかな差が見られたことから、より複雑な経路や急旋回を含む環境においては、本パラメータの影響が顕在化する可能性があると考えられる。

Velocity Smoother の各パラメータの実験結果から、Velocity Smoother の各パラメータは、ゴール到達可否に直接的な影響を与えるというよりも、走行の滑らかさ、安定性、および応答性に影響を及ぼすことが分かった。特に、`smoothing_frequency` および並進方向の `max_accel` は、値の設定によって走行挙動の違いが比較的顕著に現れた。

本実験環境では、多少パラメータを変化させてもロボットはゴールに到達可能であったが、障害物が密集した環境や急旋回を多く含む経路では、Velocity Smoother のパラメータ設定が走行の安定性や安全性に大きく影響すると考えられる。そのため、実環境への適用においては、単一パラメータのみを調整するのではなく、複数パラメータの相互関係を考慮した調整が重要である。

4.2.5 実験結果 (Nav2_planner goal)

実験結果 (trans_stopped_velocity)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.25



Fig. 4.168 Robot orientation with trans_stopped_velocity = 0.01

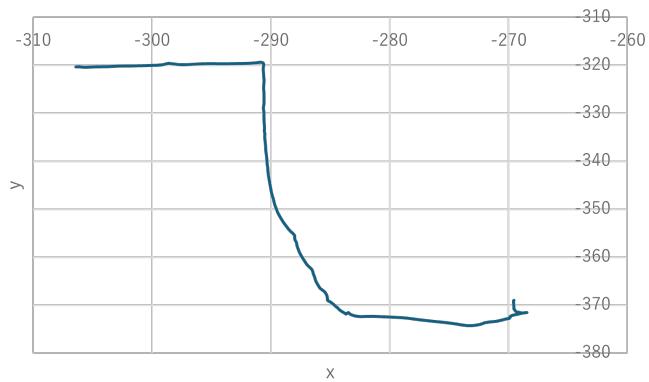


Fig. 4.169 Robot position with trans_stopped_velocity = 0.01



Fig. 4.170 Robot orientation with trans_stopped_velocity = 0.1

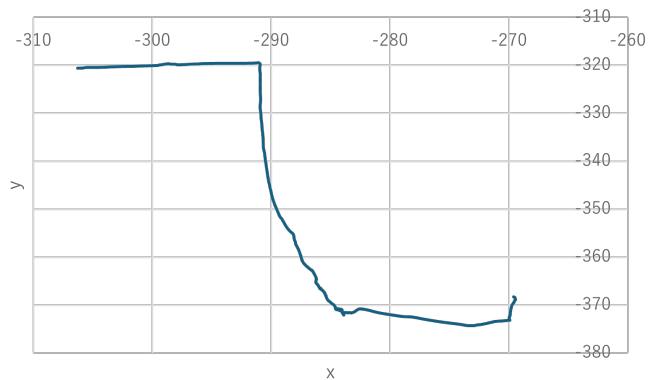


Fig. 4.171 Robot position with `trans_stopped_velocity = 0.1`



Fig. 4.172 Robot orientation with `trans_stopped_velocity = 0.4`

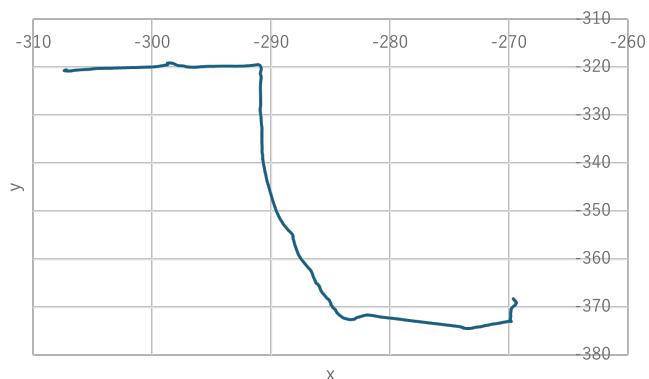


Fig. 4.173 Robot position with `trans_stopped_velocity = 0.4`

実験の結果、`trans_stopped_velocity` の値を大きく設定した場合、ロボットが完全に減速す

る前の段階で停止状態と判定されやすくなり，Waypoint を通過する際のゴール判定位置が Waypoint からやや離れた位置で行われる傾向が確認された。そのため，Waypoint 付近での軌道修正が少なくなり，通過精度が低下する挙動が見られた。

一方で，`trans_stopped_velocity` の値を小さく設定した場合，ロボットはより低速になるまで移動を継続するため，Waypoint 近傍で正確に曲がる，あるいは直進する挙動が観測された。これにより，Waypoint 周辺での軌道精度が向上し，より意図した経路に沿った走行が実現できていた。

なお，いずれの設定値においても，最終的には安定してゴールに到達しており，ゴール失敗や停止不能といった問題は発生しなかった。以上の結果から，`trans_stopped_velocity` はロボットの到達可否そのものに影響を与えるパラメータではなく，Waypoint 通過時の判定精度や挙動の細かさを調整するための補助的なパラメータであると考えられる。

本実験環境においては，より正確な Waypoint 通過を実現するため，`trans_stopped_velocity` の値は現行設定よりもやや小さな値に設定することが有効である可能性が示唆された。

実験結果 (`planner_tolerance`)

Fig. ??, Fig. ??で示すように基準の値は、0.5



Fig. 4.174 Robot orientation with `planner_tolerance` = 0.1

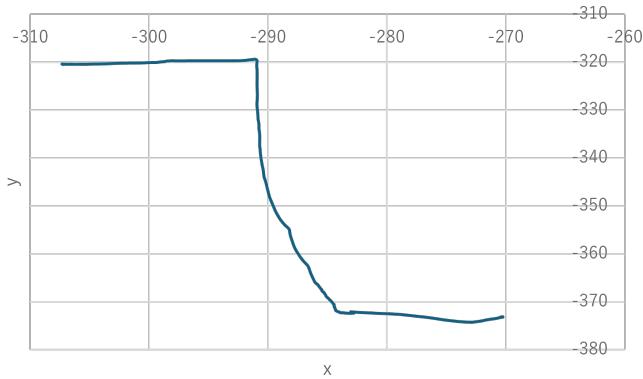


Fig. 4.175 Robot position with `planner_tolerance = 0.1`



Fig. 4.176 Robot orientation with `planner_tolerance = 1.0`

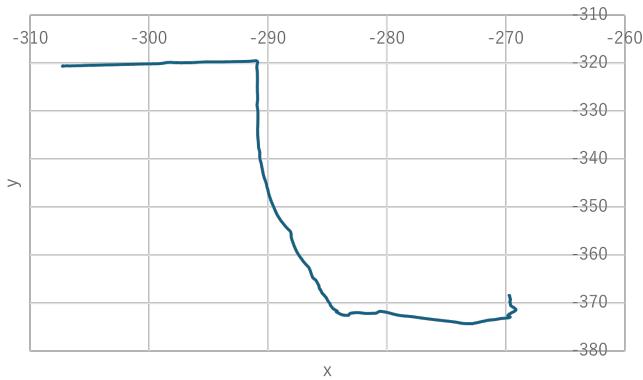


Fig. 4.177 Robot position with `planner_tolerance = 1.0`

実験では、`planner_tolerance` を 0.1 および 1.0 に設定して比較した。その結果、plan-

ner_tolerance を 1.0 とした場合，経路上で曲がり始めるタイミングが 0.1 の場合と比べてやや早くなる傾向が確認された。これは，ゴールに対する許容範囲が広がったことで，より早い段階で経路生成が完了し，経路の形状がわずかに変化したためであると考えられる。

しかしながら，この違いはロボットの走行挙動に大きな影響を与えるものではなく，速度変化や安定性，ゴール到達の可否といった点において，顕著な差は見られなかった。また，その他の区間においても，planner_tolerance の値を変更したことによる明確な挙動の変化は観測されなかった。

以上の結果から，planner_tolerance は経路生成の細かな形状やタイミングに影響を与えるものの，本実験環境においてはロボットの走行安定性や到達性能に対する影響は小さいパラメータであると考えられる。

以上の結果より，Planner に関するパラメータは，ロボットの大域的な走行成否に直接影響するというよりも，waypoint 通過時の精度や経路生成のタイミングといった挙動の細部を調整する役割を持つことが分かった。また，ロボットの実際の運動挙動や安定性に対しては，Controller や Localization に比べて影響が小さいことが明らかとなった。そのため，Planner のパラメータ調整は，走行精度や挙動の滑らかさを調整することを目的で行い，ロボットの走行安定性や挙動の改善については，Controller や自己位置推定に関するパラメータ調整を優先すべきであると考えられる。

実験結果（速度制限パラメータに関する追加実験）

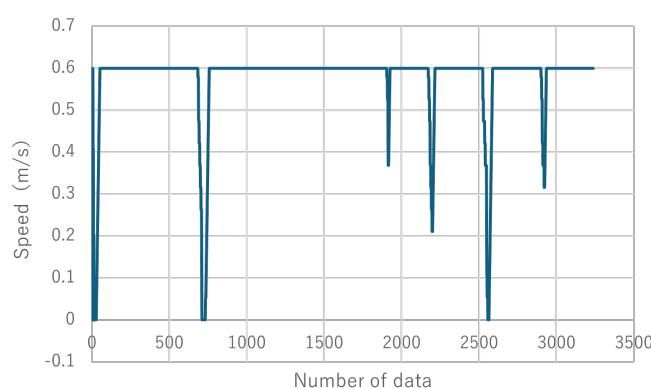
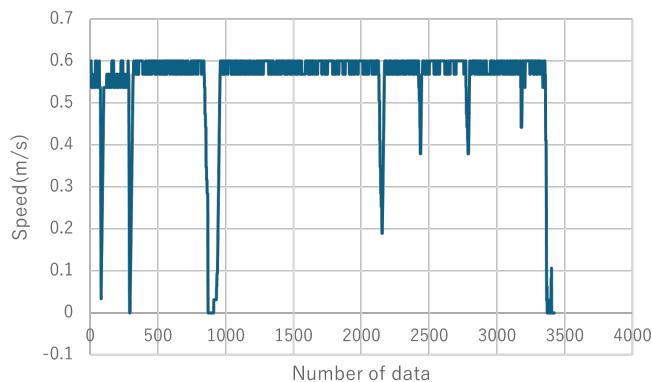
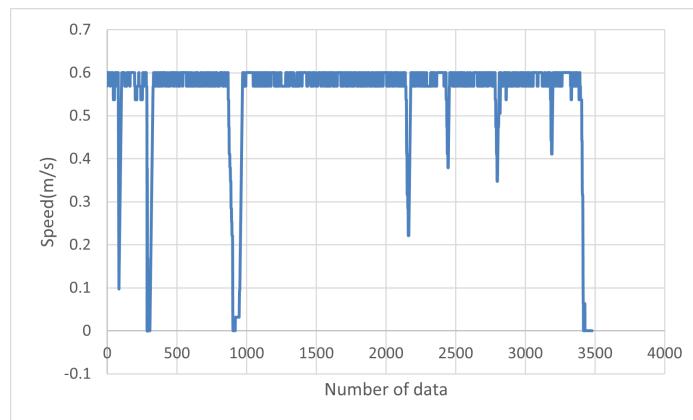


Fig. 4.178 Robot speed with $\text{max_vel_x} = 1.0$

Fig. 4.179 Robot speed with $\text{max_speed_xy} = 1.5$ Fig. 4.180 Robot speed with $\text{max_velocity_x} = 1.2$

これまでの Controller および Velocity Smoother に関する実験において、各パラメータの上限値を増加させた場合でも、ロボットの並進速度が一定値以上に増加しない挙動が確認された。特に、Velocity Smoother における `max_velocity` や、Controller における `max_vel_x`、`max_speed_xy` の値を大きく設定した場合でも、実際の走行速度は基準値付近に制限されていた。

この結果から、Navigation2 におけるロボットの並進速度は、単一のパラメータによって決定されるのではなく、Controller と Velocity Smoother の複数の速度制限パラメータが相互に影響し合うことで制約されている可能性が示唆された。

そこで、速度制限に関するパラメータ間の関係性を明らかにするため、Controller の `max_vel_x` および `max_speed_xy`、ならびに Velocity Smoother の `max_velocity` を対象と

して、それぞれの値を変化させた際のロボットの挙動を比較・評価する追加実験を行った。

本実験では、Controller の `max_vel_x` を 1.5 に固定し、`max_speed_xy` および Velocity Smoother の速度制限パラメータ `max_velocity_x` を段階的に変更することで、実際の走行速度およびロボットの挙動への影響を調査した。

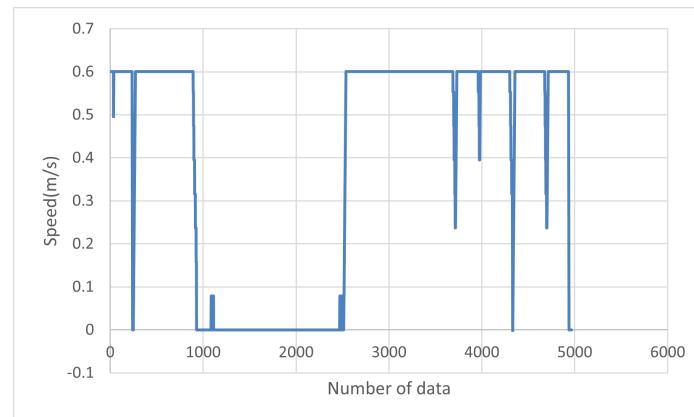


Fig. 4.181 Robot speed with $\text{max_speed_xy} = 1.5$

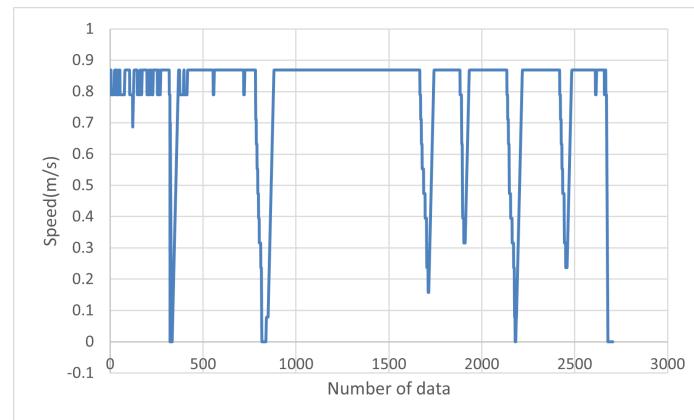


Fig. 4.182 Robot speed with $\text{max_velocity_x} = 1.5$

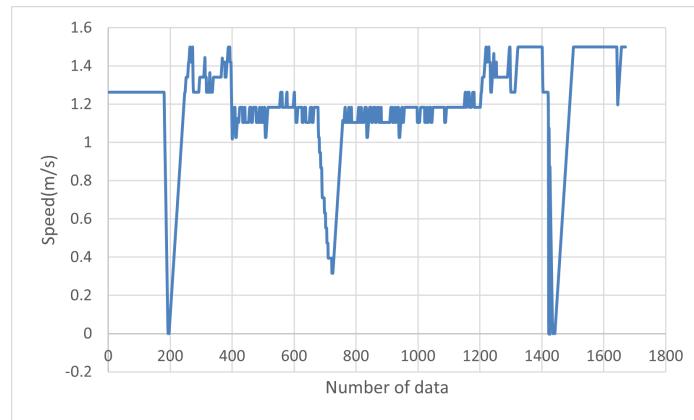


Fig. 4.183 Robot speed with $\text{max_velocity_x} = 1.5$ and $\text{max_speed_xy} = 1.5$

次にロボットの挙動は下のグラフに示す。 max_vel_x の値は 1.5 とする。

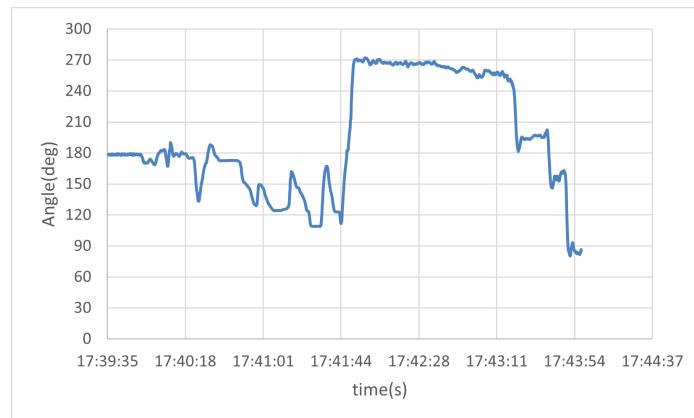


Fig. 4.184 Robot orientation with $\text{max_speed_xy} = 1.5$

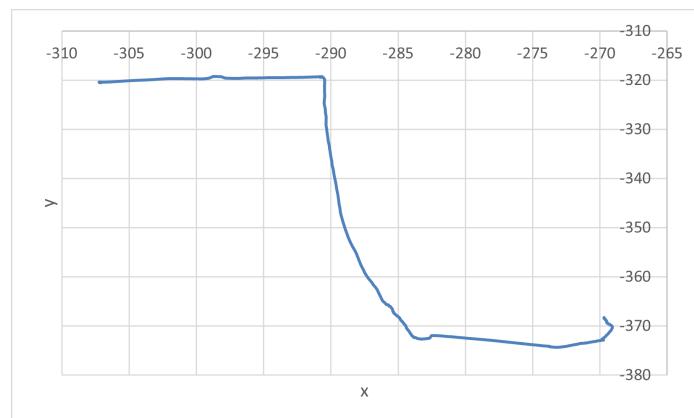


Fig. 4.185 Robot position with $\text{max_speed_xy} = 1.5$



Fig. 4.186 Robot orientation with $\text{max_velocity_x} = 1.5$

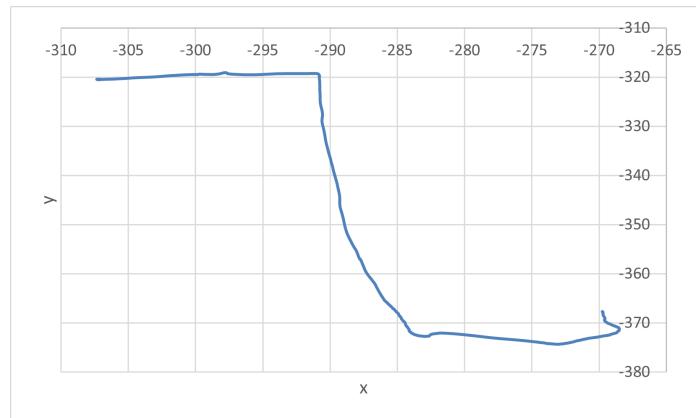


Fig. 4.187 Robot position with $\text{max_velocity_x} = 1.5$

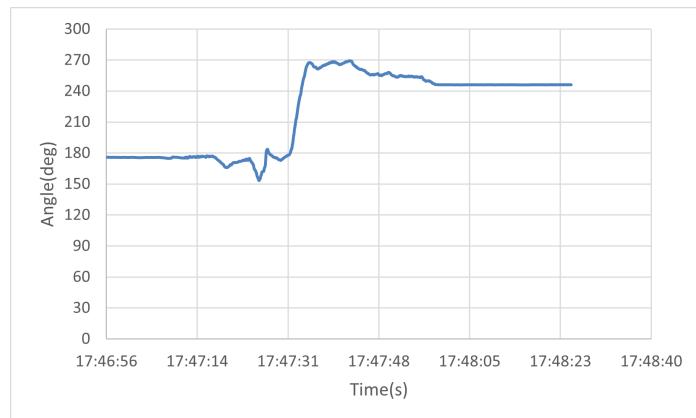


Fig. 4.188 Robot orientation with $\text{max_velocity_x} = 1.5$ and $\text{max_speed_xy} = 1.5$

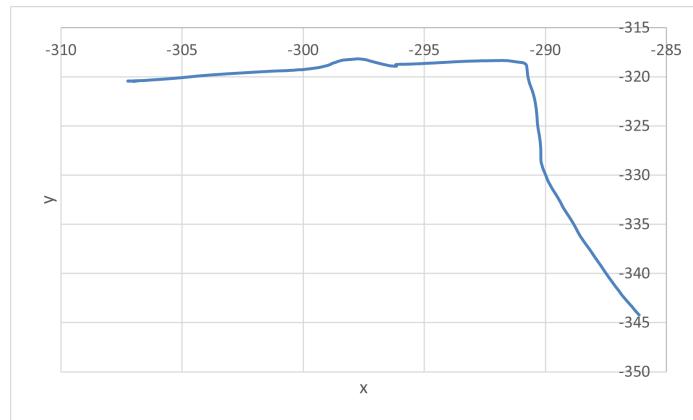


Fig. 4.189 Robot position with $\text{max_velocity_x} = 1.5$ and $\text{max_speed_xy} = 1.5$

Controller および Velocity Smoother における速度制限パラメータの関係性を明らかにするため，Controller の max_vel_x を 1.5 に固定し， max_speed_xy および Velocity Smoother の $\text{max_velocity(x 成分)}$ をそれぞれ 1.5 に設定した組み合わせ実験を行った。本実験では，以下の 3 通りの組み合わせについて評価を行った。

- $\text{max_vel_x} = 1.5$ と $\text{max_speed_xy} = 1.5$
- $\text{max_vel_x} = 1.5$ と $\text{max_velocity_x} = 1.5$
- $\text{max_vel_x} = 1.5$ ， $\text{max_velocity_x} = 1.5$ ， $\text{max_speed_xy} = 1.5$

その結果，3 つすべてのパラメータを 1.5 に設定した場合，最も高い並進速度が確認されたが，走行中に経路から外れ，コース脇の段差方向へ進行したため，ゴールに到達することはできなかった。このことから，速度制限を同時に緩和しすぎると，経路追従性や安定性が低下することが確認された。

一方， $\text{max_vel_x} = 1.5$ と $\text{max_velocity_x} = 1.5$ の組み合わせでは，速度が基準値である 0.6 を超えて明確に上昇したにもかかわらず，ロボットは安定した挙動を保ち，ゴールまで到達することができた。この結果は，Controller と Velocity Smoother の速度上限を適切に一致させることで，速度向上とナビゲーションの安定性を両立できる可能性を示している。

また， $\text{max_vel_x} = 1.5$ と $\text{max_speed_xy} = 1.5$ の組み合わせでは，走行中の速度は基準値である 0.6 以上には増加せず，他のパラメータによる制限が依然として有効であることが確認された。この条件では，最初の曲がり角付近で一時的に停止する挙動が見られたものの，最終的にはゴールに到達しており，ナビゲーション自体は安定していた。

以上の結果から，Navigation2 における実際の走行速度は，単一の速度制限パラメータではなく，Controller と Velocity Smoother にまたがる複数の制約条件の組み合わせによって決定されることが明らかとなった。特に，すべての制限を同時に緩和すると速度は向上するが，経路追従性能が低下する一方で，一部の制限のみを調整することで，安定性を保ったまま速度向上が可能であることが示唆された。

第5章

結論

本研究では、屋外自律移動ロボットにおける安定したナビゲーションの実現を目的として、Navigation2 を構成する主要なモジュールである自己位置推定(emcl2), Controller, Planner, Costmap, および Velocity Smoother の各種パラメータが、ロボットの走行挙動に与える影響について体系的な実験を行った。

まず、emcl2 に関する実験結果から、自己位置推定におけるオドメトリ情報とレーザセンサ情報の信頼度のバランスが、ロボットの走行安定性に大きく影響することが明らかとなった。オドメトリ誤差を過度に大きく設定した場合には、推定誤差が累積しゴール到達が困難となる一方で、レーザセンサを過度に重視した設定では、走行中の挙動が不安定になる傾向が確認された。このことから、自己位置推定においては、環境特性に応じた適切なパラメータ調整が不可欠であることが示された。

Controller に関する実験では、最大速度や加速度に関するパラメータが、ロボットの走行速度や旋回時の安定性に影響を与えることが確認された。一方で、一部のパラメータについては、単独で値を変更しても走行挙動に大きな変化が現れず、他のパラメータやシステム全体の制約との相互作用によって、実際の挙動が決定されていることが示唆された。この結果は、Controller パラメータの調整において、単一パラメータの変更ではなく、複数パラメータを総合的に考慮する必要性を示している。

Planner に関する実験では、各パラメータがロボットの直接的な運動挙動よりも、経路の形状や生成タイミングといった大域的な経路計画に影響を与えることが確認された。Planner のパラメータ調整は、走行の安定性を左右するというよりも、経路生成の柔軟性や滑らかさを整

える目的で行うべきであると考えられる。

Costmap に関する実験結果からは、Global Costmap のパラメータが経路計画全体の安全性や余裕度に影響を与える一方で、Local Costmap のパラメータ、特に解像度設定が、ロボットの即時的な挙動や走行安定性に強く影響することが明らかとなった。このことから、屋外環境における自律走行では、Local Costmap の設定が極めて重要であるといえる。

Velocity Smoother に関する実験では、各パラメータがゴール到達の可否そのものよりも、走行の滑らかさや応答性に影響を与えることが確認された。特に、速度指令の更新頻度や加速度制限の設定は、走行の安定性と快適性の両立において重要な役割を果たすことが示された。

さらに、Controller と Velocity Smoother における速度制限パラメータの組み合わせ実験から、ロボットの実際の走行速度は、単一のパラメータによって決定されるのではなく、複数の速度制約条件の相互関係によって決定されることが明らかとなった。すべての速度制限を同時に緩和した場合には、速度は向上するものの経路追従性が低下し、一方で、一部の制限のみを適切に調整することで、安定性を保ったまま速度向上が可能であることが確認された。

以上の結果から、Navigation2 におけるパラメータ調整は、各モジュールを独立に考えるのではなく、Localization, Planning, Control の相互関係を理解した上で総合的に行うことが重要であると結論づけられる。本研究で得られた知見は、屋外自律移動ロボットのナビゲーション性能向上に向けた実践的なパラメータ調整指針として有用であり、今後の実環境への適用やさらなる性能改善に寄与するものと考えられる。

参考文献

- [1] Ros 2 documentation — ros2 documentation:rolling. <https://docs.ros.org/en/rolling/index.html>. (Accessed on 12/18/2025).
- [2] Nav2 — nav2 1.0.0 documentation. <https://docs.nav2.org/>. (Accessed on 11/27/2025).
- [3] emcl2/ryuichiueda — 拡張リセット付きの mcl(バージョン 2). <https://github.com/ryuichiueda/emcl2>. (Accessed on 12/18/2025).
- [4] 井口颯人, 橋高聖人, 野村駿斗, 村林孝太郎, 上田隆一, 林原靖男. 屋外自律移動ロボットプラットフォーム orne-box の開発 orne-box の検証・改良 . ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2023, pp. 1P1–I06. 一般社団法人 日本機械学会, 2023.
- [5] Tsudanuma challenge. <https://sites.google.com/p.chibakoudai.jp/rdc-lab/development/tsudanuma-challenge>. (Accessed on 12/22/2025).

付録

謝辞

本研究を進めるにあたり，2年に渡り，熱心にご指導を頂いた林原靖男教授に深く感謝いたします。