

博士論文

長期水上環境観測を目指した小型水上自律
移動センシングデバイスの移動戦略評価

(Assessing the Effectiveness of Mobility
Strategies for Active Aquatic Surface Sensing
Devices in Long-Term Water Environment
Monitoring)

2023年3月

立命館大学大学院情報理工学研究科

情報理工学専攻博士課程後期課程

藤井 康之

立命館大学審査博士論文

長期水上環境観測を目指した小型水上自律
移動センシングデバイスの移動戦略評価

(Assessing the Effectiveness of Mobility
Strategies for Active Aquatic Surface Sensing
Devices in Long-Term Water Environment
Monitoring)

2023年3月

March 2023

立命館大学大学院情報理工学研究科

情報理工学専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in
Advanced Information Science and Engineering
Graduate School of Information Science and Engineering
Ritsumeikan University

藤井 康之
FUJII Yasuyuki

研究指導教員: 李 周浩 教授
Supervisor: Professor LEE Joo-Ho

概要

近年、水圏環境では、急速な水質（水温、溶存酸素量など）や生態系の変化に注目が集まっている。水質や生態系の変化を観測するために、従来は人間が現場に訪れ、水をサンプリングしたり、目視で生物を観測したりする手法がとられていた。しかし、長期的に人間が水上環境で活動することには水難事故にあうリスクが伴うことや時間的、金銭的なコストが高いという問題点があった。そこで本研究では、自律移動センシングデバイスが人間の代替として水上環境を観測することで、長期的かつ連続的な水上環境観測を実現することを目指した。

本研究では上述した従来手法の問題点を克服するために、自律移動機能に加え、「定点維持が可能な機構」、「小型で管理・運用が容易であること」、「低コストで製造可能であること」を要件としてセンシングデバイスを開発した。この開発コンセプトをもとに定点維持を考慮した全方向移動可能な形状、最大長 0.80m、重量 4.8kg と一人で持ち運べる寸法、製造コスト約 15 万円と安価な構成の従来手法の問題を克服するセンシングデバイスを完成させた。

また、長期的かつ連続的に稼働させるため、センシングデバイスの消費電力に着目し、消費電力を抑制する移動戦略について研究した。センシングデバイスには水上環境観測のための機能として、定点維持移動と巡回移動が用意されている。本論文ではそれぞれの移動に対して、必要なパラメータを定義し、パラメータを変更した複数の移動戦略についてシミュレーションと実環境で比較実験し、それぞれの消費電力や位置精度について比較した。定点維持戦略については、自己位置推定誤差が消費電力に大きく影響するため、自己位置推定誤差を考慮し、許容誤差範囲を決定したり、できるだけ許容誤差範囲の中心に配置したりすることが消費電力を抑えるために有効であることが明らかになった。効率的な戦略は非効率な戦略と比較して、消費電力を約 30% 抑えることができることが確認された。

巡回移動戦略は巡回時間間隔と巡回地点間距離によって構成し、シミュレーション実験によってそれぞれの戦略の性能を検証した。実験の結果、定点維持時の消費電力と比較して、移動時の消費電力が大きいため、最適な巡回時間間隔は巡回地点間距離の長さに影響

を受けることが明らかになった巡回地点間隔が長い場合、移動距離が長くなるため、消費電力を抑制するためには合計巡回回数を減らす必要があることが確認された。一方、巡回地点間隔が短い場合は1回の巡回に必要な消費電力が小さくなるため、巡回時間間隔の影響を受けづらく、観測解像度を上げるために巡回時間間隔を短くすることも可能であることが確認された。

最後に本論文で提案した小型水上自律移動センシングデバイスを用いた水圏環境観測をさらに実現に近づけるために必要な今後の課題について列挙し、複数台のセンシングデバイスを用いた広域の水圏環境観測やセンシングデバイスが観測したデータをリアルタイムで閲覧できるシステムが必要であることを述べた。

目次

第1章	緒言	1
1.1	本章の概要	1
1.2	研究背景	1
1.2.1	水圏環境観測の必要性	1
1.2.2	ICT を活用した従来の水圏観測手法	2
1.3	研究目的	3
1.4	論文構成	4
第2章	小型水上自律移動センシングデバイス	5
2.1	本章の概要	5
2.2	開発コンセプト	5
2.3	ハードウェア構成	6
2.4	センシングデバイスの移動に関する数理モデル	9
2.4.1	センシングデバイスの移動可能方向	10
2.4.2	力学モデル	11
2.4.3	運動学モデル	11
2.4.4	駆動モデル	11
2.4.5	抗力モデル	12
2.5	自律移動方法	13
2.5.1	自己位置推定	14
2.5.2	スラスト制御	14
2.6	本章のまとめ	15
第3章	効率的な定点維持戦略の構築と評価	16
3.1	本章の概要	16
3.2	定点維持戦略	16
3.2.1	戦略構成パラメータ	17

	3.2.2 戦略パターン	22
3.3	消費電力計測実験	24
	3.3.1 シミュレーション実験	24
	3.3.2 実環境実験	28
	3.3.3 考察	30
3.4	本章のまとめ	31
第4章	外乱を考慮した定点維持戦略の構築と評価	39
4.1	本章の概要	39
4.2	外乱を考慮した定点維持戦略	39
	4.2.1 戦略構成パラメータ	40
	4.2.2 一時目標位置計算	42
	4.2.3 数理モデルによる最適一時目標位置計算	42
4.3	実環境実験	44
	4.3.1 長期稼働実験	44
	4.3.2 同一環境実験	45
4.4	シミュレーション実験	47
	4.4.1 消費電力モデル	47
	4.4.2 実験条件	49
	4.4.3 実験結果	50
4.5	考察	50
4.6	本章のまとめ	51
第5章	複数地点の水上環境観測を目的とした複数地点巡回戦略の構築と評価	67
5.1	本章の概要	67
5.2	巡回移動戦略	68
	5.2.1 巡回時間間隔	68
	5.2.2 巡回地点間距離	69
5.3	シミュレーション実験	71
	5.3.1 実験条件	71
	5.3.2 実験結果	73
5.4	本章のまとめ	73
第6章	結言	96
6.1	本論文のまとめ	96
6.2	今後の展望	97

6.2.1	複数台のセンシングデバイスによる広域水圏環境観測	97
6.2.2	観測データリアルタイム閲覧アプリケーション	98
6.2.3	給電システムとの連携による長期的かつ連続的な稼働	98

参考文献		103
------	--	-----

目次

1.1	小型水上自律移動センシングデバイスを用いた水圏環境観測概念図	2
2.1	小型水上自律移動センシングデバイス	7
2.2	各モジュールの接続とデータ通信	8
2.3	世界座標系とセンシングデバイス座標系の定義	9
2.4	センシングデバイスの移動方向, 各スラスタが出力する推力方向	10
2.5	センシングデバイスが移動するに影響を与える抗力方向. (a) : D_1, D_3, D_5, D_7 方向へセンシングデバイスが移動する場合. (b) : D_2, D_4, D_6, D_8 方向へセンシングデバイスが移動する場合.	13
2.6	センシングデバイスの断面積に関する変数定義	14
3.1	定点維持戦略におけるパラメータ定義	17
3.2	移動方向決定のための変数定義	19
3.3	各アプローチポリシーを適用した場合のセンシングデバイスの移動方向	19
3.4	シミュレータ環境の外観	25
3.5	それぞれのシミュレーションパターンにおける消費電力	33
3.6	外乱が穏やかな実環境の様子	33
3.7	外乱が激しい実環境の様子	34
3.8	実環境実験におけるそれぞれの戦略の時系列累積消費電力データと瞬間的な消費電力データ	37
3.9	実環境実験におけるそれぞれの戦略の累積消費電力グラフ	37
3.10	センシングデバイスにそれぞれの定点維持戦略を与えたときの位置データ	38
4.1	一時目標位置を決定するための変数定義	41
4.2	外乱を考慮した最適な一時目標位置は位置計算	43
4.3	長期稼働実験における消費電力	53
4.4	長期稼働実験における平均誤差距離とその分散	54

4.5	同一環境実験における消費電力	55
4.6	$d_{TA-TP} = 3.0$ の場合の平均誤差距離とその分散	56
4.7	$d_{TA-TP} = 5.0$ の場合の平均誤差距離とその分散	56
4.8	同一環境実験における平均誤差距離とその分散	56
4.9	センシングデバイスが 15 分間の実験継続時間内に描いた軌跡の例 ($d_{TA-TP} = 3.0$ m)	57
4.10	スラストが回転し始めるときに得られる消費電流の波形	57
4.11	スラストの回転強度に対する消費電流計測実験結果と消費電流計算のた めの近似関数	58
4.12	シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の消費電力	62
4.13	シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の平均誤差距離とその分散	66
5.1	2003 年 1 月から 2021 年 12 月の水温データ	68
5.2	1 か月間の水温データ変化の例 (2021 年 9 月)	69
5.3	2017 年～2021 年の各年における 2 月の水温データ	76
5.4	2017 年～2021 年の各年における 5 月の水温データ	79
5.5	巡回移動戦略を評価するシミュレーション環境	79
5.6	巡回地点間距離 30 m, シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の 消費電力グラフ例 (自己位置推定誤差なし)	83
5.7	巡回地点間距離 30 m, シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の 消費電力グラフ例 (自己位置推定誤差あり)	87
5.8	巡回地点間距離 100 m, シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略 の消費電力グラフ例 (自己位置推定誤差なし)	91
5.9	巡回地点間距離 100 m, シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略 の消費電力グラフ例 (自己位置推定誤差あり)	95

表目次

2.1	構成モジュール一覧	8
2.2	センシングデバイスの移動方向とスラストの回転方向の関係	10
3.1	FBLR が与えられた場合の移動方向	20
3.2	Diagonal が与えられた場合の移動方向	20
3.3	Oct-directional が与えられた場合の移動方向	21
3.4	比較する定点維持戦略	23
3.5	シミュレーションパターン	27
4.1	2 台のスラストのみを用いる場合のセンシングデバイスの移動方向とス ラストの回転方向の関係	40
4.2	長期稼働実験で評価する定点維持戦略パラメータ	44
4.3	シミュレーション実験で評価する定点維持戦略パラメータ	46
4.4	消費電流関数に使用する係数	48
4.5	シミュレーションパターン	49
4.6	シミュレーション実験で評価する定点維持戦略パラメータ	49
5.1	シミュレーションパターン	70
5.2	巡回移動戦略パラメータ	70
5.3	巡回地点間隔 30 m, 自己位置推定誤差がない場合のシミュレーション実 験結果	70
5.4	巡回地点間隔 30 m, 自己位置推定誤差がある場合のシミュレーション実 験結果	70
5.5	巡回地点間隔 100 m, 自己位置推定誤差がない場合のシミュレーション 実験結果	71
5.6	巡回地点間隔 100 m, 自己位置推定誤差がある場合のシミュレーション 実験結果	71

第1章

緒言

1.1 本章の概要

本章では本研究の研究背景と研究目的について述べる。長期的かつ連続的な屋外環境の観測には、さまざまな観点から関心が寄せられている。農業や水産業などの第一次産業の側面では、毎年、毎時変化する周辺環境が対象物の生育に影響を与え、変化する環境変化に対して、適切な対処・戦略が求められているため、短期的・長期的な環境データ観測に関心が寄せられている [1, 2]。一方、地球規模の環境変化に関心が寄せられる場合には、ミクロな視点からマクロな変化を推定されており、対象環境の環境データ、対象生物の生態変化などの観測が求められる。近年は ICT の発展により、さまざまな環境においてそれぞれに適した方法で長期的かつ連続的な環境データが観測されている [3, 4]。本研究では、特に水圏環境の環境観測に着目し、本章で水圏環境観測の必要性、従来の観測方法とそれらの問題点、研究目的を述べ、本研究の立ち位置を明確にする。

1.2 研究背景

1.2.1 水圏環境観測の必要性

近年、気候変動や生態系の変化が世界的に大きな問題となっている。地球規模の気候変動は水圏環境にもおよび、さまざまな水域における水質（水温、溶存酸素濃度、濁度、栄養塩など）や水生生物の個体数や生息環境の変化を定期的に観測する必要がある。そのため、水質や水生生物に関するデータの収集や継続的な観測に対する要求が高まっている [5]。水質や水生生物のデータを観測するためには、さまざまな観測方法がある。しかし、多くの場合、調査者が手作業で水試料を採取し、観測水域の各観測地点で生物の観測をしたりしているのが現状である。しかし、このような調査者による水上での作業には限界があり、長時間継続して作業することは困難である。また、船やボートで水上の観

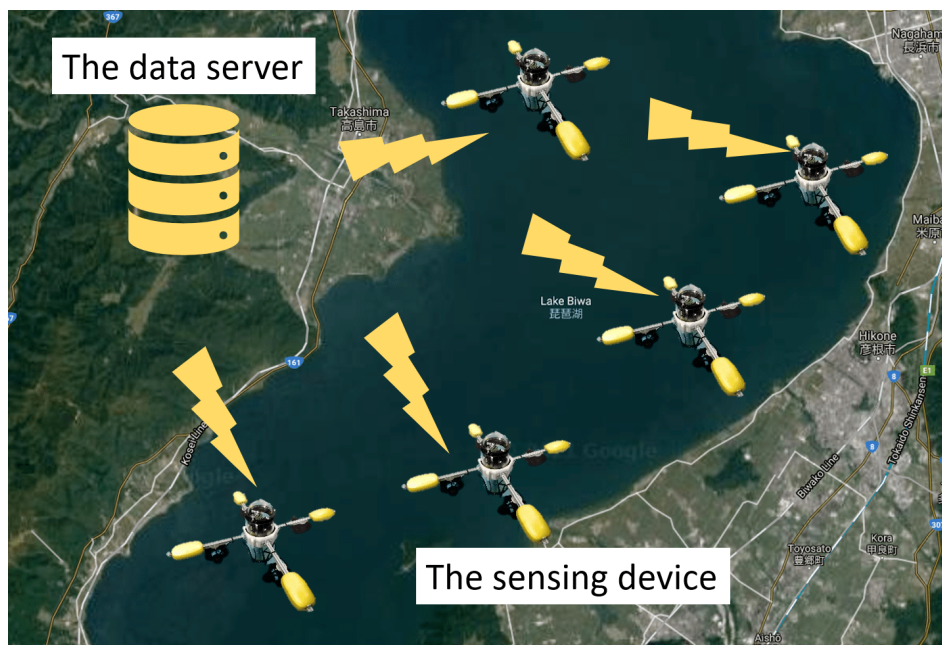


図 1.1: 小型水上自律移動センシングデバイスを用いた水圏環境観測概念図

測地点に到達するためには、さまざまなリスクがあり、金銭的・時間的なコストも高くなる。一方、近年は水上や水中におけるさまざまなタスクに対してロボットが用いられている [6–18]。水圏環境観測のタスクに対しては、従来の人間の身体を介した水圏環境観測手法の代替となるセンシングデバイスや自律移動型ロボットを含む、ICT を活用した観測手法について研究され、活用され始めている [19–23]。次節でこれまで研究されてきた人間の代替となる水圏環境観測方法とそれらの問題点について言及し、本研究の立ち位置を明確にする。

1.2.2 ICT を活用した従来の水圏観測手法

水圏環境観測は観測対象によって、現場で観測するもの、採水しサンプルを研究室に持ち帰って分析するもの、目視で観測するものなどさまざまであるが、一般的には調査者が観測水域に船やボートで向かい観測活動を行う。しかし、近年は本研究と同様に人間の代替として水圏環境観測を実現するシステムが研究され始めている。本節では、人間の代替として活用されている水圏環境観測手法について紹介する。

衛星を用いたリモートセンシング

人間の代替として水圏環境を観測する手法の一つとして、衛星写真や衛星に搭載した熱赤外線センサを活用したリモートセンシングが挙げられる [24, 25]。衛星写真や熱赤外線

センサを活用することで一度に広範囲の環境データを観測することができる。しかし、環境データを直接計ることはできないため、環境データの精度では直接計測する手法に劣る。また、空間的な分解能もおおよそ数 m から数百 m のものが一般的で局所的な観測はできない。さらに、衛星写真は天候に恵まれ、雨や雲などが空を覆っていない場合にしか観測できないため、時間的な解像度も直接計測する手法と比較して劣る。

浮遊型センシングブイ

浮遊型センシングブイは水圏環境加速センサを搭載したブイを固定せずに波風などの外乱や水流から受ける力のみによって自由に移動するセンシングブイである [26,27]。移動機能がなく計算機能や通信、センシングに必要な電力しか消費しないため、総合的な消費電力を低く抑えることができる。一方、移動機能をもたないため、ユーザが観測したい所望の観測場所を指定し環境観測することはできないという問題がある。

固定ブイ型センシングデバイス

固定ブイ型のセンシングデバイスはアンカーなどの固定具に係留することで、さまざまなセンサが搭載されたブイ型のセンシングデバイスを表層に浮かべることができる [28–30]。固定具でセンシングブイを定点維持させるため、定点維持するために必要なエネルギーを必要としない。一方、深度が深い水域では固定することが困難であるという問題や一度配置すると再利用が困難であるという問題がある。

大型自律移動ボート

自律移動機能をもち、少々の外力では移動に影響を受けない大きさのセンシングボートによる水圏環境観測手法も研究されている [9,31]。ボートが大型であるため、積載可能容量が大きく安定的に動作可能である。また、積載可能容量が大型であるため、大型のバッテリーやさまざまなセンサ、デバイスを搭載することができる。しかし、筐体や駆動部の製造が容易でなく、時間的、金銭的な製造コストが膨大であることや管理・運用にもコストがかかることが問題点として挙げられる。

1.3 研究目的

本研究では、これまで研究されてきた水圏環境観測手法の問題点を克服する小型水上自律移動センシングデバイスを用いた水圏環境観測を提案する。本研究では、小型水上自律移動センシングデバイスを用いることで、これまで開発された水圏環境観測手法を改良した新しい水圏環境観測システムの実現を目指している [32–35]。提案する水環境モニタリングシステムの概念図を図 1.1 に示す。対象水域にセンシングデバイスを複数台展開する

ことで、広域の水圏環境観測を実現することができる。センシングデバイスは、任意の位置に移動し、その位置で回転することができる。そのため、センシングデバイスは実環境において定点観測をしたり、複数の観測地点を巡回したりしながら観測位置に制限のない、自由な水圏環境観測ができる。

1.4 論文構成

本論文は全6章で構成される。2章では本研究で扱う小型水上自律移動センシングデバイスの構成、水上における移動に関する数理モデルについて述べる。3章ではセンシングデバイスの定点観測を想定した消費電力的に効率的な定点維持戦略について提案し、実環境、シミュレーション環境における検証実験評価について述べる。4章では外乱方向を考慮したセンシングデバイスの最適な位置取りについて検討し、実環境、シミュレーション環境における検証実験評価について述べる。5章では複数地点の巡回観測を想定した巡回移動戦略について提案し、巡回移動戦略の実環境、シミュレーション環境における検証実験評価について述べる。6章で本論文内容をまとめ、さらに今後の展望について述べる。

第 2 章

小型水上自律移動センシングデバイス

2.1 本章の概要

本章では、本論文で提案する小型水上自律移動センシングデバイスについて説明する。小型水上自律移動センシングデバイスは「定点維持が容易な機構」、「小型で管理・運用が容易であること」、「低コストで製造可能であること」、「長期的に稼働可能であること」を開発コンセプトとして設計、構成パーツ選定、実装した。前述のコンセプトをもとに開発したセンシングデバイスは、定点維持移動を考慮した全方向移動可能な形状、最大長 0.80m、重量 4.8kg で一人でも持ち運べる寸法、製造コスト約 15 万円の安価な構成を実現し、従来手法の問題を克服するセンシングデバイスを完成させた。

また、本章では小型水上自律移動センシングデバイスの自律移動方法についても述べる。小型水上自律移動センシングデバイスは水上で複数のセンサから得られたデータをもとに自己位置推定し、現在の自己位置と目標位置から移動方向、移動距離を計算しスラスタを制御することで所望の位置まで移動する。全方向移動機構と自律移動機能を組み合わせることによって、定点維持や巡回移動を実現することができる。

本章では、小型水上自律移動センシングデバイスのハードウェア構成、力学的なモデル、ソフトウェア構成からセンシングデバイスが全方向に自律移動できることを明らかにする。

2.2 開発コンセプト

先行研究の問題点や水質観測に必要な機能から以下の 4 つの開発コンセプトをもとに小型水上自律移動センシングデバイス開発した。

1. 定点維持が容易な機構

水圏環境観測には、長期的かつ連続的に定点観測する観測と複数の地点のデータを収集する観測がある。関連研究では、直進性が高いボート型のセンシングロボットが多く見られる [9,31]。一方、定点維持移動を考慮すると、時々刻々と環境が変化する実環境において、ボート型の形状とスラスト配置は外乱に流されたときに即座に定点に戻ることは向いていない [36]。そこで、本研究では定点維持観測も考慮した定点維持移動可能かつ巡回移動可能な機構のセンシングデバイスを開発する。

2. 小型で管理・運用が容易であること

広域の水圏環境を観測するためには、本研究で開発するようなセンシングデバイスを複数用いる必要がある。一台当たりの寸法が十分に小さくなければ、運搬や管理が困難となり複数のセンシングデバイスを分散させて広域の観測をすることができなくなる [10]。本研究では広域の観測を考慮して、一人の人間でも持ち運べる寸法、重量のセンシングデバイスを開発する。

3. 低コストで製造が可能であること

船やボートを使って人間が水圏環境観測することの問題点として、船やボートの購入費用、維持管理費用が高いことが挙げられる。また、本研究では複数台のセンシングデバイスを観測水域において同時に展開することで広い水域の環境観測を想定している。そのため、本研究で開発するセンシングデバイスは一台当たりの製造費用を抑え、誰でも自由に興味のある水域を観測できるようにする。

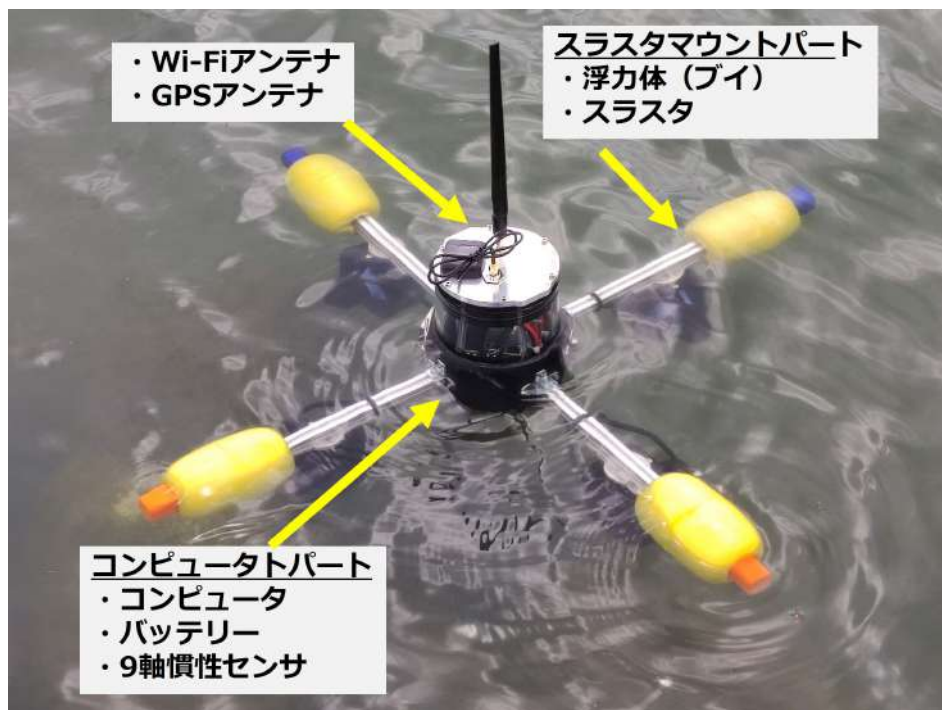
4. 長期的に稼働可能であること

水圏環境観測のために人間の代替となるセンシングデバイスを用いる理由の1つとして、人間が長期的に水上で活動することが困難であることが挙げられる。一方、センシングデバイスを水圏環境観測手段に用いる利点として、長期的かつ連続的に稼働させることができることが挙げられ、提案するセンシングデバイスは長期間安定的に稼働することが求められる。本論文で提案するセンシングデバイスは長期的かつ連続的な水圏環境観測を達成するために、低消費電力なモジュール構成、低消費電力な移動戦略で所望の動きを実現する。

以下に続く節・項で開発コンセプトに沿った構成について詳細に述べる。

2.3 ハードウェア構成

本節では小型水上自律移動センシングデバイスの構成について説明する。開発したセンシングデバイスは2.2節で述べたコンセプトに従って、構成モジュールを選定し、設計・開発した。図2.1aは開発したセンシングデバイスの外観を表している。センシングデバ



(a) センシングデバイスの全体図



(b) 各パート分離状態

図 2.1: 小型水上自律移動センシングデバイス

表 2.1: 構成モジュール一覧

コンピュータパート	コンピュータ	Raspberry Pi 3 Model B+
	フライトコントローラ	Navio2
	バッテリー	リチウムポリマーバッテリー (3S, 6000mAh)
	ESC	BLHeli32 仕様, 60A, 4 in 1 タイプ
	PWM コントローラ	Arduino nano
スラストマウントパート	スラスト	BlueRobotics, T200
	浮力体	H110mm × φ65mm

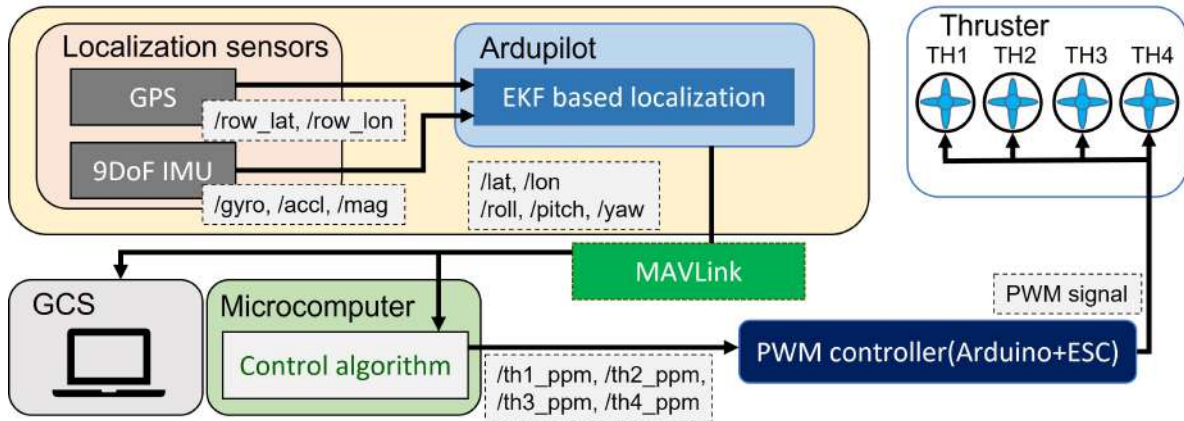


図 2.2: 各モジュールの接続とデータ通信

イスはコンピュータパートとスラストマウントパートに大別され、収納や運搬を容易にするためにそれぞれは分離可能となっている。図 2.1b はコンピュータパートとスラストマウントパートが分離された時の様子を表している。コンピュータパートにはコンピュータ、バッテリーなどが密閉可能なチャンバーに納められており、スラストマウントパートには4台のスラストと4つの浮力体が搭載されている。また、水面付近は通信電波が反射されやすく、通信の品質が低下してしまうため、Ground Control System (GCS) との通信を可能とする Wi-Fi アンテナと自己位置推定用センサである GNSS 受信アンテナは筐体上部に取り付けられている。表 2.1 はコンピュータパート、スラストパートそれぞれの詳細な構成要素を表している。

表 2.1 で示されている構成要素とその他筐体に関する構成要素である密閉チャンバー、スラスト取付用アルミフレーム、3D プリンタで生成可能な補助パーツなどの合計金額はおよそ 15 万円と製造・維持・管理に数百万円～数千万円必要な船やボートと比較して低コストで開発している。

図 2.2 はそれぞれの構成要素の接続と通信内容を表している。メインコンピュータには Raspberry Pi 3 Model B+ を使用し、各種モジュールからデータを集約したり、他のモジュールへ命令を与えたりする。水上で自己位置推定するために必要なセンサとして

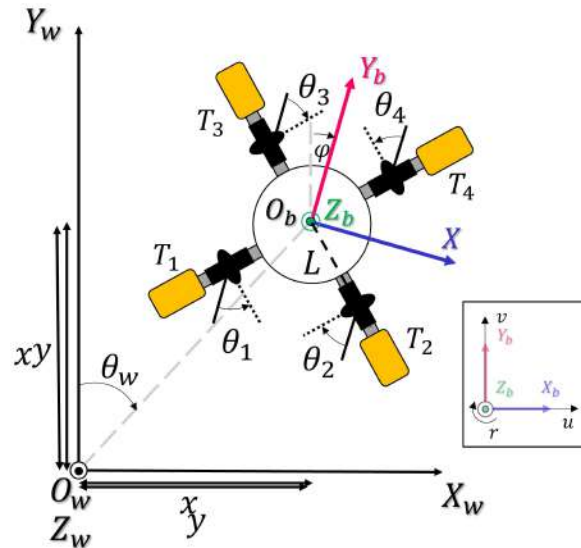


図 2.3: 世界座標系とセンシングデバイス座標系の定義

GNSS 受信機と 9 軸慣性センサを使用しており，それらのモジュールはフライトコントローラに搭載されている．フライトコントローラはコンピュータと接続されており，フライトコントローラが取得した自己位置推定用のデータである緯度・経度データ，加速度データ，角速度データ，地磁気データは MAVLink を通してコンピュータへ送られる．MAVLink は Unmanned Aerial Vehicle (UAV) や Autonomous Underwater Vehicle (AUV) などの無人機に用いられる通信プロトコルで無人機の状態や位置姿勢データを送受信することができる通信プロトコルである [37]．また，センシングデバイスの状態は MAVLink を通して GCS にも送信され，ユーザは常にセンシングデバイスの状態を確認することができる．メインコンピュータは目的のタスクに応じた移動アルゴリズムに従って，スラストコントローラである Arduino へ回転方向，出力強度の命令を与え，Arduino から PWM 信号が Electronic Speed Controller (ESC) へ送られスラストの回転方向と出力強度を制御する．

2.4 センシングデバイスの移動に関する数理モデル

本節ではセンシングデバイスの力学モデル，運動学モデル，駆動モデル，抗力モデルについて述べる．図 2.3 は本章で説明する移動に関する数理モデルで用いる座標系について説明している．図 2.3 で X_w, Y_w, Z_w, O_w はそれぞれ世界座標系の X 軸， Y 軸， Z 軸，原点を表しており， X_b, Y_b, Z_b, O_b はそれぞれセンシングデバイス座標系の X 軸， Y 軸， Z 軸，原点を表している．

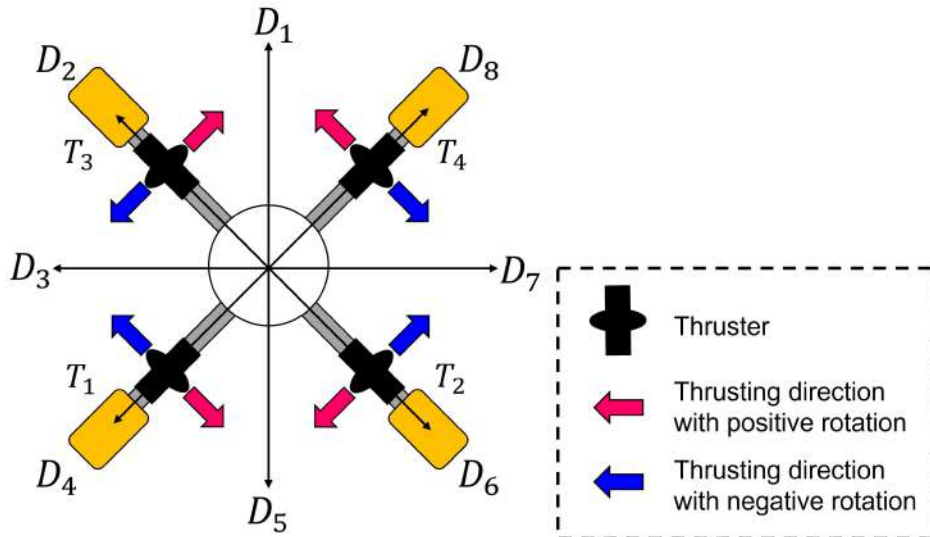


図 2.4: センシングデバイスの移動方向, 各スラスタが出力する推力方向

表 2.2: センシングデバイスの移動方向とスラスタの回転方向の関係

direction	T_1	T_2	T_3	T_4
D_1	P	P	N	N
D_2	P	-	-	N
D_3	P	N	P	N
D_4	-	N	P	-
D_5	N	N	P	P
D_6	N	-	-	P
D_7	N	P	N	P
D_8	-	P	N	-
CW	N	P	P	N
CCW	P	N	N	P

2.4.1 センシングデバイスの移動可能方向

センシングデバイスにはチャンバーの中心から放射線状に"X"の形状をなすように4本のスラスタマウント用のアルミフレームが取り付けられており, 各マウントにスラスタが搭載されている. このスラスタ配置は他のスラスタと比較して, 定点維持するのに応答性, 移動精度の面で優位であり, スラスタが1台壊れたとしても移動可能であるという耐故障性の面でも優れている [36]. 図 2.4 は各スラスタの配置関係を示しており, 図 2.4 の中で T_1, \dots, T_4 はそれぞれのスラスタ番号を表している. また, D_1, \dots, D_8 はセンシングデバイスの移動可能方向を表している. センシングデバイスは搭載された4台のスラスタの回転方向を組み合わせることによって全方向への移動と回転動作ができるようになった

ている．表 2.2 はセンシングデバイスの移動可能方向および回転方向とスラスタの出力の関係について示している．表 2.2 の中で P と N はそれぞれスラスタの正回転と逆回転を表している．

2.4.2 力学モデル

速度ベクトル \mathbf{v} は $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} u & v & r \end{bmatrix}^T$ のように記述される．式 (2.1) で u と v はそれぞれサージ方向とスウェイ方向の速度を表し， r はヨー角の角速度を表している．センシングデバイス座標 X_b 軸方向， Y_b 軸方向への力と Z_b 軸周りのトルクはそれぞれ X ， Y ， N と表し，力ベクトル $\boldsymbol{\tau}$ は $\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} X & Y & N \end{bmatrix}^T$ のように記述される [38]．さらに力学モデルは質量行列 \mathbf{M} と抗力行列 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ を用いて，

$$\mathbf{M}\mathbf{v} = -\mathbf{D}(\mathbf{v})\boldsymbol{\tau} \quad (2.1)$$

と記述できる．ただし，センシングデバイスの形状が点対称であるため， \mathbf{M} と $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ はそれぞれ $\mathbf{M} = \text{diag}(\alpha_u, \alpha_v, \alpha_r)$ ， $\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \text{diag}(\beta(u), \beta(v), \beta_r(r))$ と表現される．

2.4.3 運動学モデル

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\varphi) & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

センシングデバイスの X_w - Y_w 平面移動におけるサージ方向およびスウェイ方向，ヨー角周りの回転は式 (2.2) のように記述される．ただし，式 (2.2) において x ， y はサージ方向，スウェイ方向に関するセンシングデバイスの位置を表し， φ はセンシングデバイスのヨー角を表す． $\mathbf{R}(\varphi)$ は回転行列を表し，式 (2.3) のように記述される．

$$\mathbf{R}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.4.4 駆動モデル

図 2.3 内で示されている $T_1, \dots, T_4, L, \theta_1, \dots, \theta_4$ はそれぞれスラスタ番号，センシングデバイスの中心からそれぞれのスラスタの中心までの距離，各スラスタの取り付け角度を表している．各スラスタから出力される力ベクトルは $\boldsymbol{\tau}_{thrust} = \begin{bmatrix} \tau_1 & \tau_2 & \tau_3 & \tau_4 \end{bmatrix}^T$ と表される．ここで τ_1, \dots, τ_4 はそれぞれのスラスタが出力する力を表している．センシングデバイスに取り付けられたスラスタの取り付け角は $\frac{\pi}{2}$ であるため，スラスタがセン

シングデバイスに与える力ベクトル τ は式 (2.4) のように計算される。

$$\tau = \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{2} & \cos \frac{\pi}{2} & -\cos \frac{\pi}{2} & -\cos \frac{\pi}{2} \\ \sin \frac{\pi}{2} & -\sin \frac{\pi}{2} & \sin \frac{\pi}{2} & -\sin \frac{\pi}{2} \\ L & L & L & L \end{bmatrix} \tau_{thrust} \quad (2.4)$$

2.4.5 抗力モデル

センシングデバイスが水上を移動するとき抗力 D がセンシングデバイスの移動方向の逆方向に発生し、式 (2.5) のように計算される。

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C \quad (2.5)$$

ここで ρ , V , S , C はそれぞれ流体密度, 移動物体と流体の相対速度, 移動物体の代表面積, 抗力係数を表している。図 2.5 と図 2.6 はセンシングデバイスが水上を移動したときの抗力による影響を表している。図 2.4 で示されている通り, センシングデバイスは D_1, \dots, D_8 の方向に移動する。センシングデバイスの移動方向に垂直な面の断面積と断面形状は移動方向によって異なるため, センシングデバイスが移動するときに発生する抗力はセンシングデバイスの移動方向によって変化する。

図 2.6 が示す通り, 代表面積 S は $S = S_x + S_C$ となる。ここで S_x , S_C はそれぞれ水中に浸かっているスラストマウント部分の断面積と密閉チャンバーの断面積を表している。 S_x はセンシングデバイスの移動方向に垂直なスラストマウント部分の幅 w と高さ h を用いて, $S_x = wh$ と計算できる。図 2.5 の (a) においてスラストマウント部分の断面積 S_x とスラストマウントの幅 w は $S_x = S_V$ と $w = w_V$ 表し, $S_V = w_V h$ となる。同様に (b) のときスラストマウント部分の断面積 S_x とスラストマウントの幅 w は $S_x = S_D$ と $w = w_D$ 表し, $S_D = w_D h$ となる w_V は $\frac{\sqrt{2}}{2} w_D$ と計算され w_V は必ず w_D よりも小さくなる。そのため抗力 D_V と D_D の関係は $D_V < D_D$ となり D_1, D_3, D_5, D_7 方向へ移動する方が D_2, D_4, D_6, D_8 方向へ移動するよりも抗力が小さくなる。

一方, 抗力係数 C は移動方向に垂直な面の形状によって決定される [39]。センシングデバイスの移動方向に垂直な面の形状は移動方向により異なる。そのため, 図 2.5 の (a) では移動方向に垂直な面の形状は"V"の形状をしており, その抗力係数は 2.20 と定義されている。一方, 図 2.5 の (b) において移動方向に垂直な面の形状は"⊥"の形状をしており, その形状に対する抗力係数は 1.65 と定義されている。そのため, 抗力係数の観点ではセンシングデバイスは D_2, D_4, D_6, D_8 方向に移動する方が D_1, D_3, D_5, D_7 方向へ移動するよりも効率的であるといえる。

図 2.5 において F_V と F_D は (a), (b) それぞれの場合におけるスラストが出力する力を表している。力 F_T は $F_T = F_{thrust} - D$ のように計算される。ここで, F_{thrust} と D は

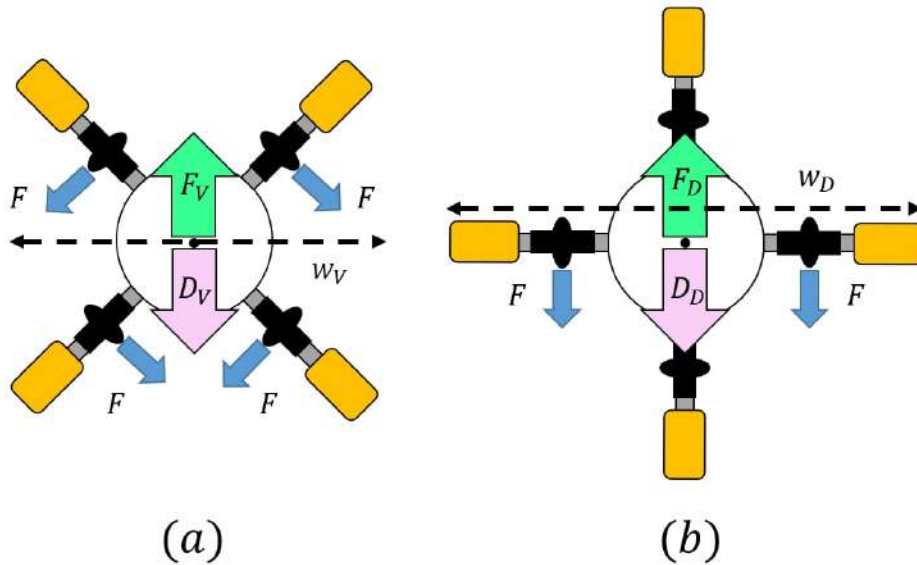
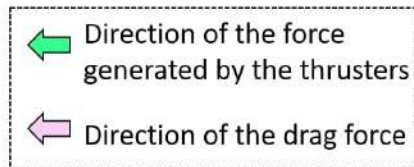


図 2.5: センシングデバイスが移動するに影響を与える抗力方向. (a) : D_1, D_3, D_5, D_7 方向へセンシングデバイスが移動する場合. (b) : D_2, D_4, D_6, D_8 方向へセンシングデバイスが移動する場合.

それぞれスラスタから出力される力と抗力を表す. ここで, 図 2.5 において, F_V と F_D は式 (2.4) で計算される. 図 2.5 の (a) において, 力 F_V は 4 台のスラスタから生成される. 4 台のスラスタそれぞれが F を生成すると仮定すると F_V は $F_V = 2\sqrt{2}F$ のように計算される. 同様にして図 2.5 の (b) において, 2 台のスラスタそれぞれが力 F を生成すると仮定すると, 力の合計 F_D は $F_D = 2F$ のように計算される.

2.5 自律移動方法

センシングデバイスは複数の搭載されたセンサで自己位置推定し, 位置姿勢と目標位置までの距離と方位から移動方向, スラスタの出力強度を計算しスラスタを制御することで目標位置まで移動する.

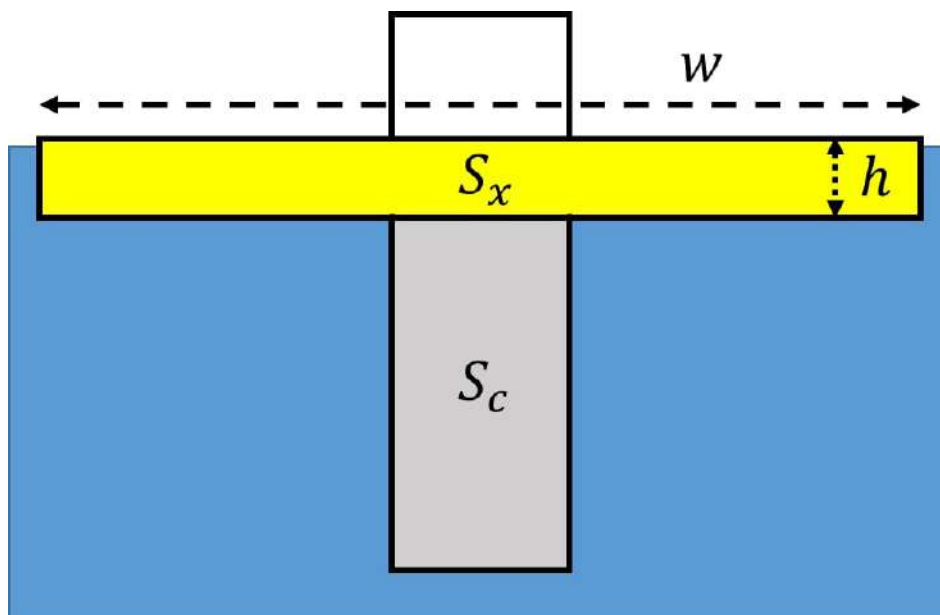


図 2.6: センシングデバイスの断面積に関する変数定義

2.5.1 自己位置推定

図 2.2 で説明されているように、センシングデバイスは搭載された GNSS 受信機から得られる緯度・経度データ、9 軸慣性センサから得られる加速度データ、角速度データ、地磁気データを Extended Kalman Filter (EKF) で統合することで、自己位置推定する。EKF はフライトコントローラに搭載された Ardupilot が提供する。Ardupilot とは UAV や AUV などの自律移動ロボット向けに開発されたオープンソースのフレームワークである [40]。センシングデバイスは推定した位置・姿勢をもとに適切な挙動を決定する。

2.5.2 スラスト制御

スラストの出力強度は PD 制御によって制御され、式 (2.6) と式 (2.7) によって計算される。

$$d = \text{Haversine}(P_c, P_t) \quad (2.6)$$

$$u_f = K_p d + K_d \dot{d}. \quad (2.7)$$

Haversine 式は緯度・経度で表現される 2 地点の距離を計算する計算式であり、式 (2.6) において d は Haversine 式によって計算されるセンシングデバイスの位置と目標位置までの距離を表している [41]。式 (2.6) において P_c と P_t は緯度・経度の組み合わせで表現されるセンシングデバイスの位置と目標位置を表す。式 (2.7) において u_f , K_p , K_d はそれ

ぞれ，スラスタの操作量，PD 制御における比例ゲイン，微分ゲインを表す．そのため，式 (2.6) と式 (2.7) からスラスタの出力強度はセンシングデバイスの位置と目標位置までの距離とセンシングデバイスの速度から計算されることを表している．

2.6 本章のまとめ

本章では，本研究で用いる小型水上自律移動センシングデバイスの構成要素と移動方法について説明した．先行研究の問題点や水質観測に必要な機能からセンシングデバイスの開発コンセプトを設定した．また，設定した開発コンセプトに合うように小型水上自律移動センシングデバイスを開発し，その構成要素と移動方法について説明した．以下に続く章では，本章で説明した小型水上自律移動センシングデバイスの構成，移動方法を用いることを前提に水圏環境観測のアプリケーションを想定した定点維持移動や巡回移動戦略について説明する．

第3章

効率的な定点維持戦略の構築と評価

3.1 本章の概要

本章では、波や風などの外乱が存在する実環境において、センシングデバイスが定点を保つための定点維持戦略について述べる。センシングデバイスが自律移動する際、外部から継続的に電力を供給することが困難であるため、センシングデバイスに搭載されているバッテリーを効率的に利用することが求められる。本章ではセンシングデバイスが定点観測のミッションが与えられた際に、外乱が存在する環境でどのような戦略で定点維持すれば消費電力的に効率的であるかを検証する。定点維持戦略は許容誤差範囲、アプローチポリシー、移動ポリシーの3つのパラメータによって構成される。

本章では、基準戦略と基準戦略からパラメータを変更した戦略を合計5種類定義し、それぞれの戦略を適用したときの消費電路についてシミュレーション実験と実環境実験によって検証した。

3.2 定点維持戦略

本章では、センシングデバイスが定点維持のタスクに対して効率的に移動するための戦略を構築する。屋外ロボットが実環境で連続的に稼働する際には、電力が継続的に供給できない問題があり、さまざまな側面から稼働時間を延長する方法が研究されている。主な解決方法として、1) 消費電力を削減する方法 [42,43] と 2) 補助装置や自然エネルギーから電力を供給する方法 [44,45] が挙げられる。また、3) 環境から得られるエネルギーを利用して移動するロボットに関する研究も存在する [43,44,46]。1) の方法では、ロボット自体の構成を変更せず、ソフトウェアの工夫のみでロボットの稼働に必要な消費電力を抑えることができる。一方、2) や 3) の方法では稼働させるロボットに新たなパーツを加えたり、別のロボットや設備が必要となる。本論文では、センシングデバイスの他に新たな

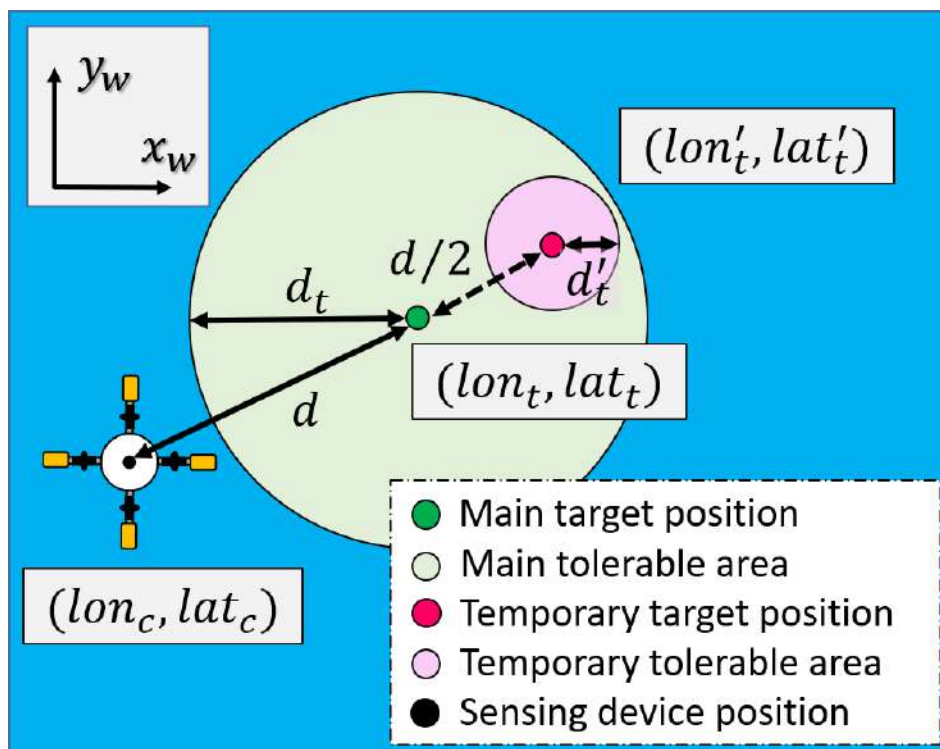


図 3.1: 定点維持戦略におけるパラメータ定義

パーツや設備を必要としない，移動戦略によって消費電力を削減することを目指す．本章では，定点維持のタスクに対して消費電力を削減しながら効率的に目標を達成するための戦略について述べる．

3.2.1 戦略構成パラメータ

本章で構築する定点維持戦略は許容誤差範囲，アプローチポリシー，移動ポリシーの3つのパラメータによって構成される．本節ではそれぞれのパラメータの定義について述べる．

許容誤差範囲

センシングデバイスに定点維持すべき目標位置が与えられたとき，常に変化し続ける実環境で厳密にその地点を維持し続けることは困難である．また，水質観測のミッションにおける定点観測では，観測地点から数メートル離れた位置でも水質の違いはないため，厳密な位置における水質観測は求められておらず，ある程度の位置誤差は許されている．

この2点から，本論文ではセンシングデバイスに定点維持のミッションを与える際は，許容誤差範囲を認め，定点維持戦略パラメータの1つとして与える．許容誤差範囲は目標

位置を中心とする半径が許容誤差距離の円内範囲を示す。図 3.1 は定点維持戦略を構成するパラメータを示している。図 3.1 において、 d_t は許容誤差距離を表している。自己位置推定誤差や外乱から与えられる力の影響を考慮すると、許容誤差距離が短い場合、許容誤差範囲内に存在できる確率が低くなり、連続的に移動しなければならず、電力を消費することが想定される。一方、許容誤差距離が長い場合、許容誤差範囲内に存在できる確率が高くなり無駄な移動を抑制することができるが、目標位置から離れた位置に存在する場合でも定点を維持していると認識するようになり、センシングデバイスの位置が許容誤差範囲内で分散することが仮定される。そのため、許容誤差距離はセンシングデバイスの使用場面によって柔軟に変化させるべきである。例えば、センシングデバイスが定点維持しながら水上からの映像を撮影し続けるような場面では、センシングデバイスの位置をできるだけ厳密に維持させることが重要である。一方、センシングデバイスを水質観測に使用する場合は、定点位置を厳密に維持し続けるよりも長期的に稼働させることが重要視されるため、許容誤差範囲を大きくとり消費電力抑制が優先されるべきである。

アプローチポリシー

2.4.1 節で説明した通り、センシングデバイスは D_1, \dots, D_8 の 8 方向への移動と Z_b 軸周りの回転が可能である。表 2.2 が表すように、センシングデバイスは同時に複数のスラストを制御することで移動し、目標位置に到達する。一般的に水上ロボットの電力は移動タスクで最も消費し、移動に使用するスラストの数と強度に依存する [47]。本論文で提案しているセンシングデバイスも同様に、消費電力は目標位置に移動するために使用するスラストの数と強度の影響を受ける。

そこで、センシングデバイスに搭載されている 4 台のスラストを用いた 3 種類のアプローチポリシーを定義し、定点維持移動に用いるスラストの数による消費電力の違いについて評価する。アプローチポリシーはセンシングデバイスが移動できる方向を拘束するパラメータであり、アプローチポリシーを変更することでセンシングデバイスがどの方向に移動することが効率的であるかを検証することが可能となる。

本章ではセンシングデバイスが所望の方向へ移動するための 3 種類のアプローチポリシー「FBLR」、「Diagonal」、「Oct-directional」を定義する。以下、それぞれのアプローチポリシーの定義である。

- FBLR
センシングデバイスは図 2.4 で示されている D_1, D_3, D_5, D_7 方向のみに移動する。
- Diagonal
センシングデバイスは図 2.4 で示されている D_2, D_4, D_6, D_8 方向のみに移動する。
- Oct-directional

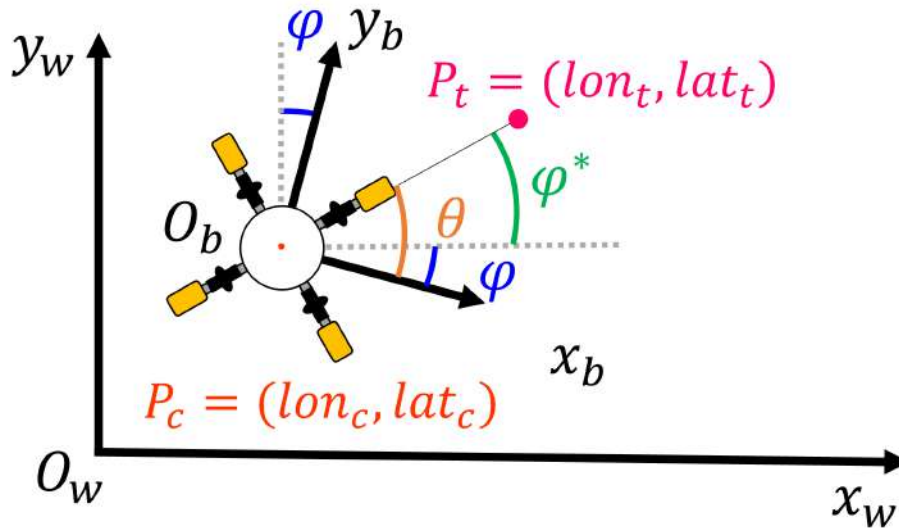


図 3.2: 移動方向決定のための変数定義

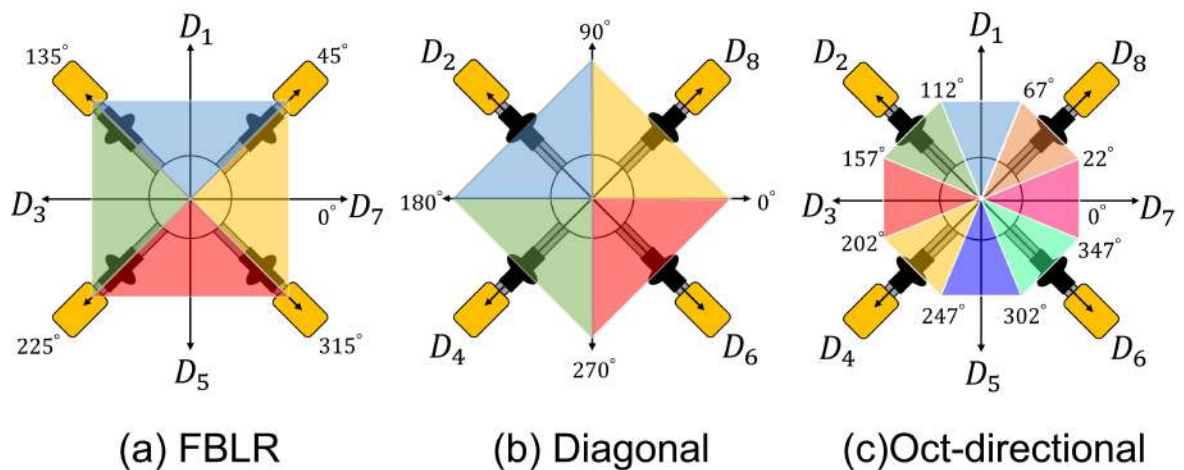


図 3.3: 各アプローチポリシーを適用した場合のセンシングデバイスの移動方向

センシングデバイスは図 2.4 で示されている D_1, \dots, D_8 方向全てに移動することができる。

センシングデバイスが D_1, D_3, D_5, D_7 方向へ移動するとき、移動のために 4 台のスラスタを回転させる。一方、 D_2, D_4, D_6, D_8 方向へ移動する際は 2 台のスラスタを回転させる。そのため、実環境での稼働する場面では、アプローチポリシーの違いが消費電力に影響を与えることが想定される。

センシングデバイスの移動方向はセンシングデバイスの位置、目標位置、センシングデ

表 3.1: FBLR が与えられた場合の移動方向

bearing	direction
$\frac{\pi}{4} \leq \theta < \frac{3}{4}\pi$	D_1
$\frac{3}{4}\pi \leq \theta < \frac{5}{4}\pi$	D_3
$\frac{5}{4}\pi \leq \theta < \frac{7}{4}\pi$	D_5
$\frac{7}{4}\pi \leq \theta < 2\pi, 0 \leq \theta < \frac{\pi}{4}$	D_7

表 3.2: Diagonal が与えられた場合の移動方向

bearing	direction
$0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$	D_2
$\frac{\pi}{2} \leq \theta < \pi$	D_4
$\pi \leq \theta < \frac{3}{2}\pi$	D_6
$\frac{3}{2}\pi \leq \theta < 2\pi$	D_8

バイスの姿勢によって決定される．図 3.2 はセンシングデバイスが移動方向を決定するために必要な変数が示されている．図 3.2 において P_c , P_t はそれぞれ世界座標系におけるセンシングデバイスの位置，目標位置を表している．また， lon_c , lat_c , lon_t , lat_t はそれぞれセンシングデバイスと目標位置の経度と緯度を表している． θ , φ , φ^* はそれぞれ相対方位角，センシングデバイスの方位角，目標方位角を表している．

$$\varphi^* = \frac{(90 - \text{atan2}(\sin(\Delta lon), \cos(lat_t) \tan(lat_c) - \sin(lat_t) \cos(\Delta lon))) \pi}{180} \quad (3.1)$$

式 (3.1) は目標方位角を導く計算式であり，センシングデバイスの位置と目標位置から導き出される．式 (3.1) において Δlon はセンシングデバイスの位置と目標位置の経度の差を表しており， $\Delta lon = lon_c - lon_t$ と計算される．また，センシングデバイスの移動方向を決定する相対方位角 θ は式 (3.2) のように計算される．

$$\theta = \varphi^* - \varphi \quad (3.2)$$

センシングデバイスは単位時間ごとに計算され導かれる θ の値によって，移動方向を決定する．それぞれのアプローチポリシーに対応する θ と移動方向の関係は表 3.1, 表 3.2, 表 3.3 が示す通りである．

移動ポリシー

移動ポリシーはセンシングデバイスが許容誤差範囲から押し出された際の振舞いを決定するパラメータであり，本章では Simple ポリシーと Flexible ポリシーの 2 種類の移動ポ

表 3.3: Oct-directional が与えられた場合の移動方向

bearing	direction
$\frac{3}{8}\pi \leq \theta < \frac{5}{8}\pi$	D_1
$\frac{5}{8}\pi \leq \theta < \frac{7}{8}\pi$	D_2
$\frac{7}{8}\pi \leq \theta < \frac{9}{8}\pi$	D_3
$\frac{9}{8}\pi \leq \theta < \frac{11}{8}\pi$	D_4
$\frac{11}{8}\pi \leq \theta < \frac{13}{8}\pi$	D_5
$\frac{13}{8}\pi \leq \theta < \frac{15}{8}\pi$	D_6
$\frac{15}{8}\pi \leq \theta < 2\pi, 0 \leq \theta < \frac{\pi}{8}$	D_7
$\frac{\pi}{8} \leq \theta < \frac{3}{8}\pi$	D_8

Algorithm 1: Simple policy

```

 $P_t = (lon_t, lat_t);$ 
while True do
     $P_c = (lon_c, lat_c);$ 
     $d = \text{Haversine}(P_c, P_t);$ 
    if  $d \leq d_t$  then
        stay();
    else
        move to( $P_t$ );
    end
end

```

リシーを定義し、以下にそれぞれの振舞いについて説明する。

- Simple ポリシー

移動ポリシーが Simple ポリシーである時、自己位置推定誤差や外乱による影響によって、センシングデバイスが許容誤差範囲外に存在していると認識した際にセンシングデバイスは目標位置方向に許容誤差範囲内に存在していると認識されるまで移動し続ける。そのため、センシングデバイスは許容誤差範囲内外の境界線付近を往来する。Algorithm 1 は Simple ポリシーが与えられたときのセンシングデバイスの振舞いに関する擬似コードである。Algorithm 1 において、 lon_t と lat_t はそれぞれ目標位置の経度、緯度を意味し、 lon_c と lat_c はそれぞれセンシングデバイ

ス位置の経度，緯度を意味している．

- Flexible ポリシー

移動ポリシーが Flexible ポリシーの場合，センシングデバイスが許容誤差範囲外に出たとき，センシングデバイス位置と目標位置の関係から，外乱方向を推定し，一時目標位置を定義する．そして，一時目標位置を中心とし，一時目標位置許容誤差距離を半径とする一時目標位置許容誤差範囲の円内に存在していると認識されるまで，位置目標位置方向に移動する．図 3.1 において， lon'_t と lat'_t はそれぞれ一時目標位置の経度，緯度を表しており， d'_t は一時目標位置許容誤差距離を表している．一時目標位置はセンシングデバイス位置と目標位置を結ぶ直線上の逆方向に目標位置と一時目標位置の距離が $\frac{d}{2}$ となるように定義され，式 (3.3) によって一時目標位置を算出する．

$$\begin{aligned}lon'_t &= lon_t + \frac{lon_t - lon_c}{2}. \\lat'_t &= lat_t + \frac{lat_t - lat_c}{2}.\end{aligned}\tag{3.3}$$

実環境において外乱方向が一定であれば，センシングデバイスは常に一定の方向に押し出される．そのため，移動ポリシーとして Flexible ポリシーを与えた場合，Simple ポリシーを与えた場合と比較してセンシングデバイスはより長時間許容誤差範囲内に滞在できることが予想される．Algorithm 2 は Flexible ポリシーの擬似コードを表している．

3.2.2 戦略パターン

3.2.1 節で定義したパラメータを組み合わせ定点維持戦略を構成し，シミュレータ実験と実環境実験によって，どの戦略が効率的であるかについて検証する．本節では，実験で比較する戦略を構成する．本章では 5 つの定点維持戦略を構成し，それぞれの効率を比較する．表 3.4 は比較する 5 つの定点維持戦略とそれぞれの構成パラメータを示している．Simple strategy は基準の戦略として定義されており，他の戦略は Simple strategy からパラメータを 1 つのみ変更し構成する．

Strict strategy は許容誤差範囲が狭い戦略である．Simple strategy と比較して許容誤差距離が短いため，許容誤差範囲の長さの影響について検証することができる．Flexible strategy は Flexible ポリシーを適用した戦略であり，Simple strategy と比較して移動ポリシーの違いによる効率性について比較することができる．Diagonal strategy と Oct-directional strategy はそれぞれアプローチポリシーとして Diagonal と Oct-directional を適用した戦略である．この 2 つの戦略と Simple policy の消費電力を比較することでアプ

Algorithm 2: Flexible policy

```
 $P_t = (lon_t, lat_t);$   
while True do  
   $P_c = (lon_c, lat_c);$   
   $d = \text{Haversine}(P_c, P_t);$   
  if  $d \leq d_t$  then  
    stay();  
  else  
     $(x'_t, y'_t) = \text{calc temp target}(P_c, P_t);$   
    target position =  $(lon'_t, lat'_t);$   
    while  $d > d'_t$  do  
      move to(target position);  
       $P_c = (lon_c, lat_c);$   
       $d = \text{Haversine}(P_c, P_t);$   
    end  
     $P_t = (lon_t, lat_t);$   
  end  
end
```

表 3.4: 比較する定点維持戦略

戦略名	アプローチポリシー	移動ポリシー	許容誤差距離 [m]
Simple	FBLR	Simple	3.0
Strict	FBLR	Simple	1.5
Flexible	FBLR	Flexible	3.0
Diagonal	Diagonal	Simple	3.0
Oct-directional	Oct-directional	Simple	3.0

ローチポリシーの違いによる消費電力への影響を検証することができる。

以下に続く定点維持実験ではこれらの戦略の消費電力について比較し、効率性について検証する。

3.3 消費電力計測実験

3.2 節で述べた通り，シミュレーション環境と実環境で構成した定点維持戦略の効率性について検証する．実環境における実験では，外乱条件が時々刻々と変化するため，すべての戦略をまったく同じ条件で比較することは困難である．そのため，シミュレーション環境において実験条件を整えた環境においてもそれぞれの戦略の消費電力について比較する．

3.3.1 シミュレーション実験

シミュレーション環境では環境パラメータを設定することでさまざまなシナリオを想定して実験することができる．本シミュレーション実験では，実環境に近い環境に加え，外乱状況を変化させたシナリオにおける戦略の効率性についても検証する．

実験条件

シミュレーション環境には，流体パラメータを含むさまざまな物理的特性をシミュレートできる Webots シミュレータを使用する [48]．Webots シミュレータは物理特性（スラスタ出力，外乱，自己位置推定誤差分散など）をシミュレーションで定義できるため，さまざまな条件下でのセンシングデバイスの性能を検証することができる．図 3.4 はシミュレーション環境の外観を示している．実環境における動作を模倣して，外乱強度と自己位置推定誤差をパラメータとして設定できるようになっている．

- 自己位置推定誤差

センシングデバイスが実環境で稼働するとき，推定される自己位置には誤差が加わる．そのため，自己位置推定誤差をモデル化し，シミュレーション上に反映させる必要がある．シミュレーション環境では自己位置推定誤差 d_{LE} は平均 μ ，分散 σ^2 の正規分布に従うように式 (3.4) で計算される．

$$d_{LE} = \text{Gaussian}(\mu, \sigma^2) \quad (3.4)$$

- 外乱パターン

実環境ではセンシングデバイスの位置・姿勢は風，水流，波などの外乱の影響を受けるため，シミュレーション上でこれらの外乱から与えられる力の影響を再現する．シミュレーション上で再現する外乱は外乱の方向と強度のパラメータによって表現される．本実験では，2 種類の外乱パターンを定義した．1 つは外乱を発生させない「外乱なし」のパターンである．このシミュレーション環境にこの外乱パ

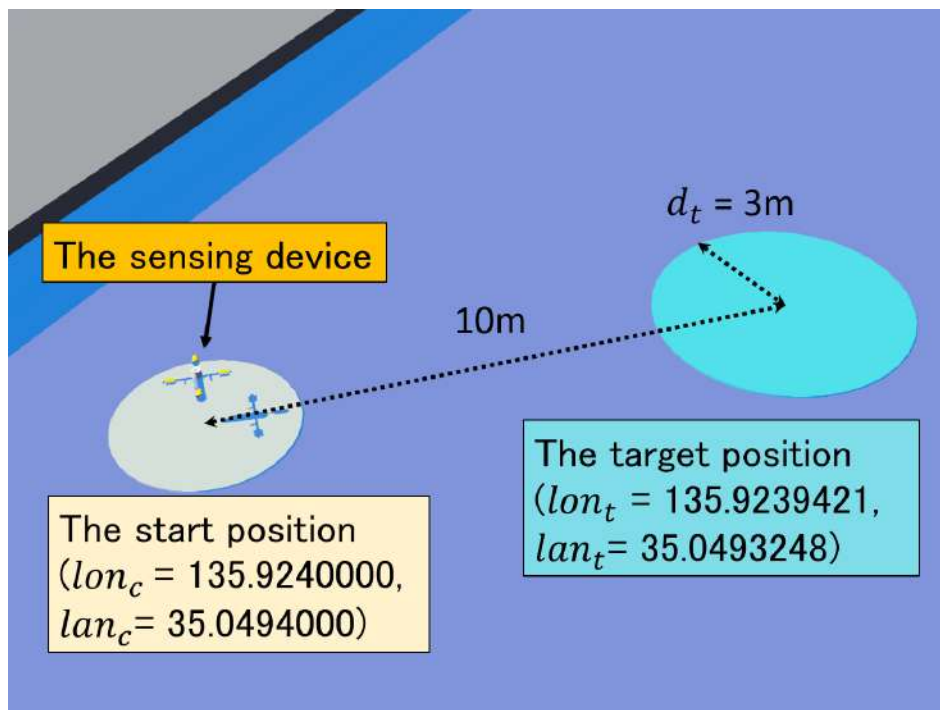


図 3.4: シミュレータ環境の外観

ターンが適用するとき、センシングデバイスの位置は外乱の影響を受けない。「外乱なし」のパターンを適用することで、外乱がほとんどないような環境を再現し、それぞれの定点維持戦略が外乱の影響を受けない場合の消費電力について検証することができる。

もう 1 つの外乱パターンは「STEP」パターンである。シミュレーション環境上に外乱パターンとして「STEP」が適用されるとき、外乱の強度が段階的に上昇する。この外乱パターンを適用することで、外乱強度の変化がそれぞれの戦略の消費電力にどのような影響を与えるかを検証することができる。「STEP」パターンの外乱強度はシミュレーション開始時にセンシングデバイスを 0.05m/sec で移動させる力を与え、シミュレーション継続時間の $\frac{1}{5}$ 時間が経つにつれて 0.05m/sec ずつ強度を上昇させる。

消費電力モデル

シミュレーション環境においても電力量を計算することでそれぞれの定点維持戦略の電力効率を比較する。電力量は瞬間的な消費電力を合計することで得られ、式 (3.5) のように計算できる。

$$W = P\Delta t \quad (3.5)$$

ここで W , P , dt はそれぞれ電力量, 瞬間的な消費電力, 微小単位時間を表す. シミュレーションでは電力量は消費電力モデルを用いて計算される. 瞬間的な消費電力は定常的に消費される電力とスラストが消費する電力に分別される. 定常的に消費される電力は連続的に稼働するコンピュータが消費する電力や電力損失が含まれる. 予備実験ではスラストを稼働させていないときにセンシングデバイスが定常的に消費する電力は 2.5W であることが確認された. スラストが消費する電力は全体の消費電力量のおよそ 90% である. スラストの消費電力モデルは使用するスラストのデータシートに基づいて構築し, 消費する電流量を式 (3.6) で計算した [49]. 式 (3.6) で A と p はそれぞれ瞬間的に消費される電流とスラストの強度を表している. 搭載されているスラストは出力強度が 5% 以下の時, 水上でセンシングデバイスを移動させるだけの十分な力を発生させることができない. そのため, 式 (2.7) による計算結果がスラストの出力強度の 5% 以下となった場合はスラストを稼働させないように設定し, スラストによって電力が消費されないようにした. また, 厳密には各スラストは非対称な特性を持っているので, 逆回転のスラストは正回転のスラストと同じ推力を出力するために, より多くの電力を必要とする. しかし, 消費電力の差は十分小さいため, シミュレータ上では逆回転時の消費電力は正回転時と同じと仮定している. センシングデバイスに搭載されているバッテリーの公称電圧は 12.6V であり, この電圧はセンシングデバイスの消費電力に応じて低下する. しかし, 電池のモデルを正確に定義することは困難である. そこで, 予備実験ではシミュレーション環境の電圧の平均値が約 12.0V であったことから, シミュレーションでは静的な値として 12.0V に設定した. それゆえ, スラストが消費する電力は式 (3.7) のように計算される.

$$A = \begin{cases} 0 & 0 \leq p \leq 0.05 \\ 4.30p^2 - 1.08p & 0.05 < p \leq 1.0. \end{cases} \quad (3.6)$$

$$P_{thrust} = 12A. \quad (3.7)$$

ここで P_{thrust} はスラストが消費する電力を表す. 瞬間的な消費電力と合計の電力量は式 (3.8), 式 (3.9) のように計算される.

$$P_{total} = P_{thrust} + P_{static}. \quad (3.8)$$

$$W_{sim} = P_{total} \Delta t. \quad (3.9)$$

P_{total} , P_{static} , W_{sim} はそれぞれ瞬間的な消費電力, 瞬間的な定常消費電力, シミュレーション実験中の合計消費電力を表す. Δt 消費電力センサのサンプリング時間を表し, 本シミュレーション実験では Δt を 0.1 [sec] と設定した.

表 3.5: シミュレーションパターン

パターン	平均 [m]	分散 [m]	実験継続時間 [min]	外乱パターン
A	1.0	0.5	180	外乱なし
B	1.0	0.5	180	STEP
C	0.0	0.0	180	STEP

シミュレーションパターン

本章で実験するシミュレーション実験では、上述したシミュレーションパラメータを組み合わせた表 3.5 に記載された 3 種類のシミュレーション条件でそれぞれの定点維持戦略を検証する。

シミュレーションパターン A は穏やかな実環境を想定したシミュレーションパターンである。自己位置推定誤差は平均 1.0 m，分散 0.5 m と設定し，実環境におけるセンシングデバイスの自己位置推定誤差を反映している。外乱パターンは「外乱なし」とし，外乱がほとんどないようなケースを反映させ，自己位置推定誤差の影響のみを受けようとしている。シミュレーションパターン B は外乱の影響を受ける実環境を想定したシミュレーションパターンである。自己位置推定誤差の条件はシミュレーションパターン A と同様に設定し，外乱パターンを「STEP」に設定することで外乱の変化をどのように受けるかを検証することができる。シミュレーションパターン C は自己位置推定誤差を全く受けないという，理想的な環境下においてそれぞれの戦略を評価する。シミュレーションパターン C でそれぞれの戦略を評価することで，ランダムに発生するパラメータの影響を受けない戦略そのものの性能を評価することができる。これらの 3 種類のシミュレーションパターンでそれぞれの戦略を消費電力と位置誤差の観点から評価する。また，それぞれのシミュレーション継続時間は実環境における 180 分とし，それぞれのデータは 10 Hz の周波数で記録される。

実験結果

図 3.5 はそれぞれシミュレーションパターン下におけるそれぞれの定点維持戦略の消費電力の時系列データを表している。なお、それぞれのグラフにおいて、緑色、赤色、青色、黄色、黒色のグラフは Simple strategy, Strict strategy, Flexible strategy, Diagonal strategy, Oct-directional strategy を表している。また、図 3.5b, 図 3.5c においてピンク色の縦軸に平行な破線は外乱強度が段階的に上昇するタイミングを表している。

シミュレーションパターン A と B の環境下では、Diagonal strategy が最も効率的な定点維持戦略であると証明された。スラストの回転による消費電力が消費電力の大半を占めるため、スラストを 2 台のみ使用する Diagonal strategy がスラストを 4 台使用する戦略と比較して効率的であったと考えられる。Flexible strategy は最も非効率な戦略であった。Flexible strategy は許容誤差範囲外に出てしまったときに目標位置を越えて一時目標位置まで移動しなければならない。そのため、他の戦略と比較して、一回の移動距離が長くなり、それに伴って多くの電力を消費していることが明らかになった。シミュレーションパターン C では Strict strategy が最も効率的な定点維持戦略がであることが証明された。許容誤差距離が他の戦略と比較して短く設定されている場合、センシングデバイスが許容誤差範囲外に出たときのセンシングデバイスの位置と目標位置までの距離が他の戦略よりも短くなる。そのため、スラストの出力はセンシングデバイスの位置と目標距離までの距離によって決定されるため、一回の移動に必要な電力が他の戦略と比較して小さくなる。

シミュレーションパターン B と C の実験結果から、外乱強度の影響を考察することができる。図 3.5a, 図 3.5b, 図 3.5c によると外乱強度が上昇するにつれて、消費電力が段階的に上昇していることが分かる、外乱による影響をなくしたシミュレーションパターン A では直線的に消費電力が累積されているのに対して、外乱強度を段階的に上昇させたシミュレーションパターン B, C では放物線を描くように消費電力が累積されており、外乱強度が上昇するにつれて電力の消費が激しくなることが確認された。

これらの結果から、実環境を想定したシミュレーションパターンではスラストによる消費電力を減らすことができる Diagonal strategy が効率的であり、理想的な環境を想定したシミュレーションパターンでは Strict strategy が有効であることが実証された。

3.3.2 実環境実験

実験条件

表 3.4 で定義した 5 種類の定点維持戦略について実環境を実施してそれぞれの性能を比較評価した。図 3.6 と 3.7 は実験を実施した実環境の外乱状況が穏やかなときと激しいときの様子を示している。実験環境の外乱状況は時々刻々と変化しており、実験実施日時によって外乱状況は異なっていた。それぞれの戦略の検証実験を異なる日時に実施したため、実環境実験を実施したときの外乱状況は戦略間で異なっていた。

実験結果

図 3.8, 図 3.9, 図 3.10 はそれぞれ実環境実験時の各戦略を与えたときの時系列累積消費電力と瞬間的な消費電力データ, それぞれの時系列累積消費電力データの比較グラフ, センシングデバイスの位置データに関する実験結果を表している。図 3.8a - 3.8e はセンシングデバイスにそれぞれの定点維持戦略を与えたときの時系列消費電力データと瞬間的な消費電力に関するグラフである。図 3.8 からどの戦略においても許容誤差範囲外に出たときに目標位置まで戻る際の移動に必要な消費電力が十分に大きいことと移動回数と移動距離が累積消費電力に影響を与えていることが確認できる。図 3.9 から戦略間の累積消費電力を比較することができる。図 3.9 は実環境実験において, Diagonal strategy が最も効率的であり, 次いで Strict strategy が効率的であることが示しており, センシングデバイスを実環境で長時間稼働させると徐々に戦略間で累積消費電力に開きが生じることがわかる。シミュレーション実験と同様に一回の移動に必要な消費電力が小さい, Diagonal strategy と Strict strategy の消費電力が小さくなることが明らかになった。Diagonal strategy を適用した場合はその他の戦略と比較して使用するスラストの台数が少ないことが省消費電力に寄与している。Strict strategy を適用した場合はセンシングデバイスが許容誤差範囲を出た時の位置と目標位置が短くなりやすいため, 移動地点間の距離で操作量が決まる制御環境下では, 省消費電力になる傾向がある。一方でシミュレーション実験の結果と同様に Flexible strategy が非効率な戦略であることも明らかになった。シンプル戦略をアプローチポリシーとして適用した場合, センシングデバイスは許容誤差範囲外に出た位置から目標位置方向に移動し, 境界線付近まで移動する。しかし, Flexible 戦略を適用した場合, センシングデバイスは許容誤差範囲内の反対側に設定された一時的目標位置まで移動しなければならない。そのため, 他の戦略と比較するとセンシングデバイスの移動距離が長くなり, 消費電力が大きくなる。図 3.10 はそれぞれの定点維持戦略がセンシングデバイスに与えられた時のセンシングデバイスの位置のデータを表している。図 3.10 において, 赤色の点, 黄色の線, 橙色の線はそれぞれ目標位置, 目標位置から 1.5m の地点, 目標位置から 3.0m の地点を表している。図 3.10b から Strict strategy が与えられた場合, センシングデバイスは厳密に定点を維持することができている。また, 図 3.10c から Flexible strategy に従ってセンシングデバイスが定点維持した場合はセンシングデバイスの位置は許容誤差範囲内で分散していることが確認された。

3.3.3 考察

構築した定点維持戦略についてシミュレーション実験と実環境実験で検証した。実環境実験では、それぞれの戦略を実験した日時によって外乱状況は異なっていた。しかし、シミュレーション実験の結果と実環境実験の結果は Diagonal strategy と Strict strategy が効率的であることが検証され、図 3.8 が示す通り、平均的に瞬間的な消費電力が小さい定点維持戦略が効率的であることが検証された。また、移動ポリシーについては Flexible ポリシーよりも Simple ポリシーの方が効率的であることが明らかになった。しかし、シミュレーション実験において、自己位置推定誤差がないという理想的な環境を想定したシミュレーションパターン C では、センシングデバイスは Flexible strategy に従って定点維持した時に Strict strategy を除く他の戦略よりも最も効率的であった。このことから、自己位置推定誤差が小さい場合では実環境においても功利的であるということが考えられる。さらに、Flexible ポリシーの効率性は許容誤差範囲、一時目標位置の設定方法、一時目標位置の許容誤差範囲にも依存することが考えられる。実環境実験では、センシングデバイスが Flexible strategy に従って定点維持した際に自己位置推定誤差によって許容誤差範囲外に存在すると誤って認識し、無駄な移動を繰り返す場面が見られた。そのため、電力を多く消費したと考えられる。本実験では、これらのパラメータの値を経験的に設定したため Flexible strategy の性能を十分に発揮できなかった可能性がある。そのため次章で Flexible strategy についてより詳細にパラメータを設定し、外乱を考慮した定点維持戦略について実験・考察する。

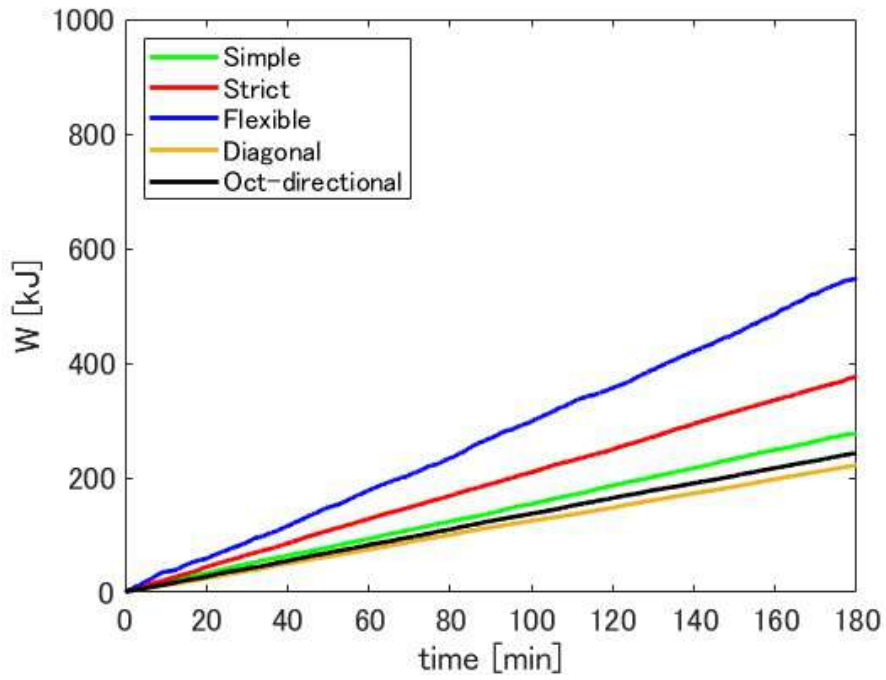
実環境実験では Simple strategy を適用した場合の消費電力は 393.9 kJ で Diagonal strategy を適用した場合は 193.1 kJ であった。この結果から、効率的な定点維持戦略を与えた場合、およそ 50% 消費電力を削減できることが示された。

また、環境変化や用途に応じて柔軟に戦略を変化させることでより効率的に定点維持できる可能性があることが示唆された。例えば、天候が悪いときにセンシングデバイスが移動すると、測位誤差が大きくなる傾向がある。天候データを取得できれば、位置保持の戦略を柔軟に変化させることができ、より効率的な性能を発揮することができる。さらに、センシングデバイスは、アプリケーションに応じて適切な戦略を適用する必要がある。例えば、生物や浮遊ゴミのモニタリングなど、その場でのモニタリングに使用される場合、センシングデバイスはあまり頻繁に移動してはならない。そのため、省エネルギーの観点からは効率的であっても、状況に応じて適切な位置保持戦略を適用する必要がある。

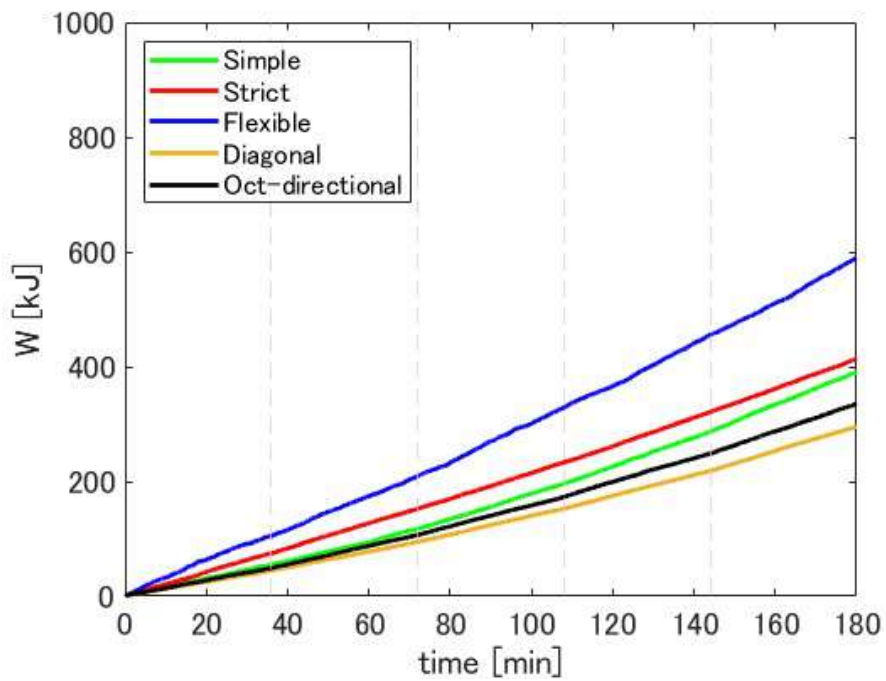
3.4 本章のまとめ

本章では、外乱が存在する環境における長期的かつ連続的な定点維持観測のシナリオを想定した、定点維持戦略を構築し、シミュレーション実験と実環境実験で評価した。定点維持戦略は許容誤差範囲、アプローチポリシー、移動ポリシーの3種類のパラメータで構築した。それぞれのパラメータを組み合わせ5種類の定点維持戦略を構築し、シミュレーション実験と実環境実験で評価した。実験の結果、平均的に瞬間の消費電力が小さい *Diagonal strategy* と *Strict strategy* が効率的であることが明らかになった。さらに、実環境実験では最も効率的であった *Diagonal strategy* の消費電力は基準となる *Simple strategy* の消費電力の50%程度で効率的な定点維持戦略は消費電力を抑えられることがあいらかになった。一方、*Flexible strategy* は多くの状況下で非効率であったが、自己位置推定誤差のないような理想的な環境では効率的であることが確認された。また、本実験では *Flexible strategy* を構成するパラメータの値は経験的に決定されたものであり、より厳密に設定することで効率性が上がる可能性がある。

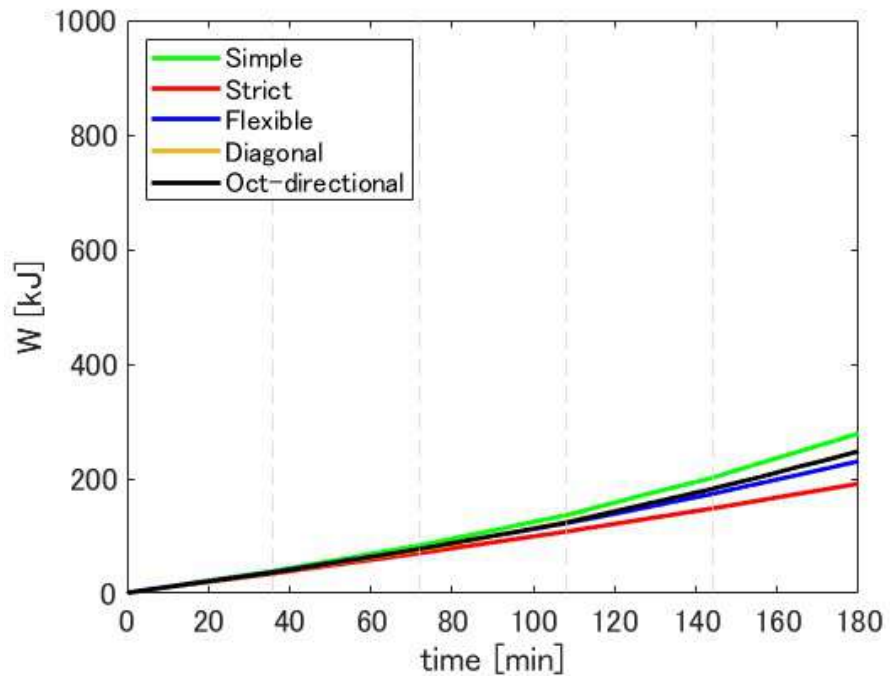
定点維持時の位置の分散についても戦略間で特徴があることが確認された。定点維持観測のアプリケーションの観点からはカメラによるモニタリングなどの厳密に位置を維持する必要のあるアプリケーションと水質観測のような定点維持に厳密さを求められないアプリケーションで戦略を使い分けられると考えられる。



(a) シミュレーションパターン A



(b) シミュレーションパターン B



(c) シミュレーションパターン C

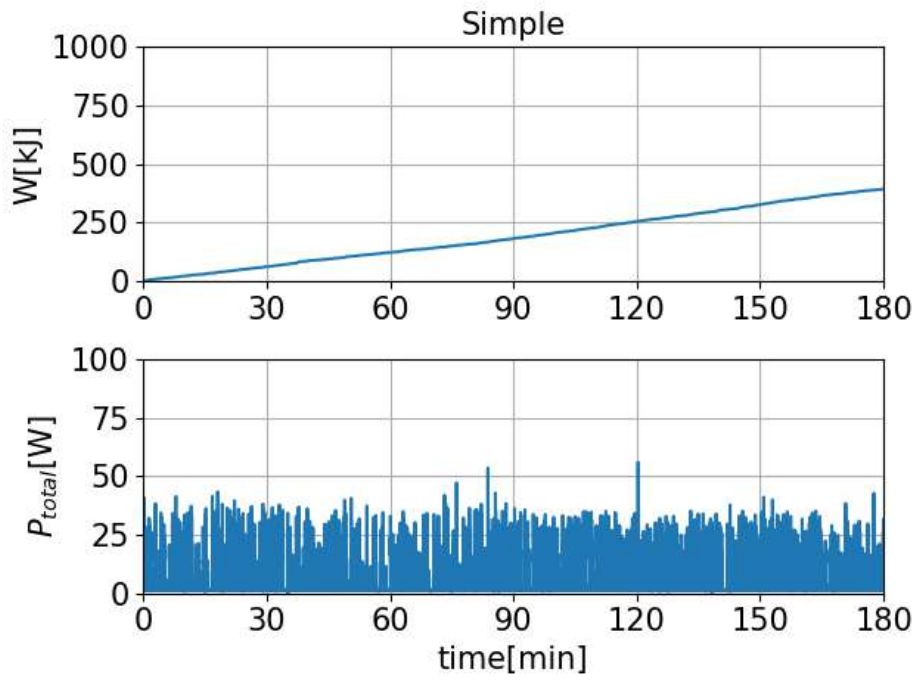
図 3.5: それぞれのシミュレーションパターンにおける消費電力



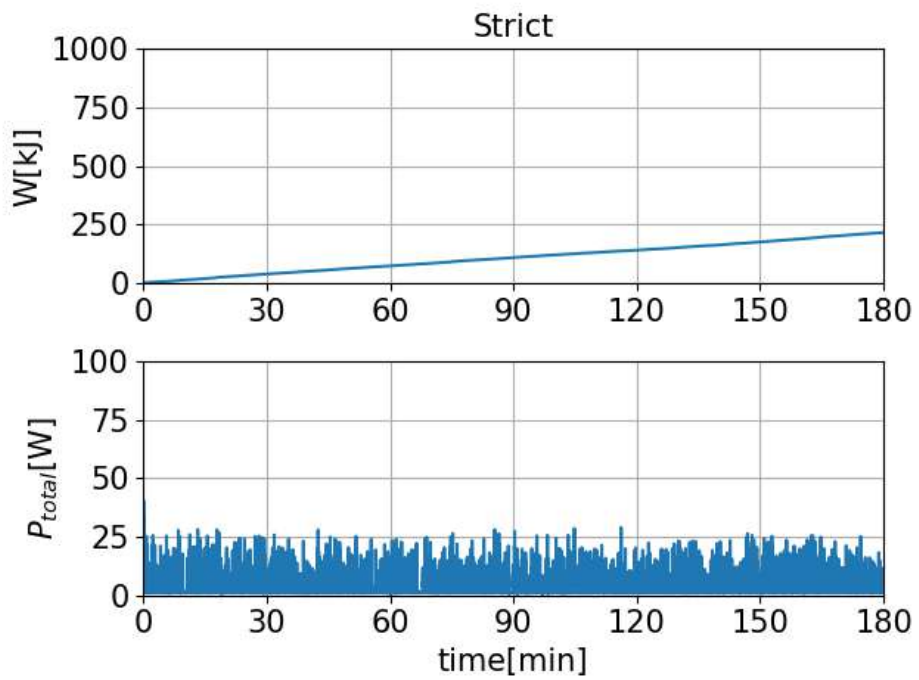
図 3.6: 外乱が穏やかな実環境の様子



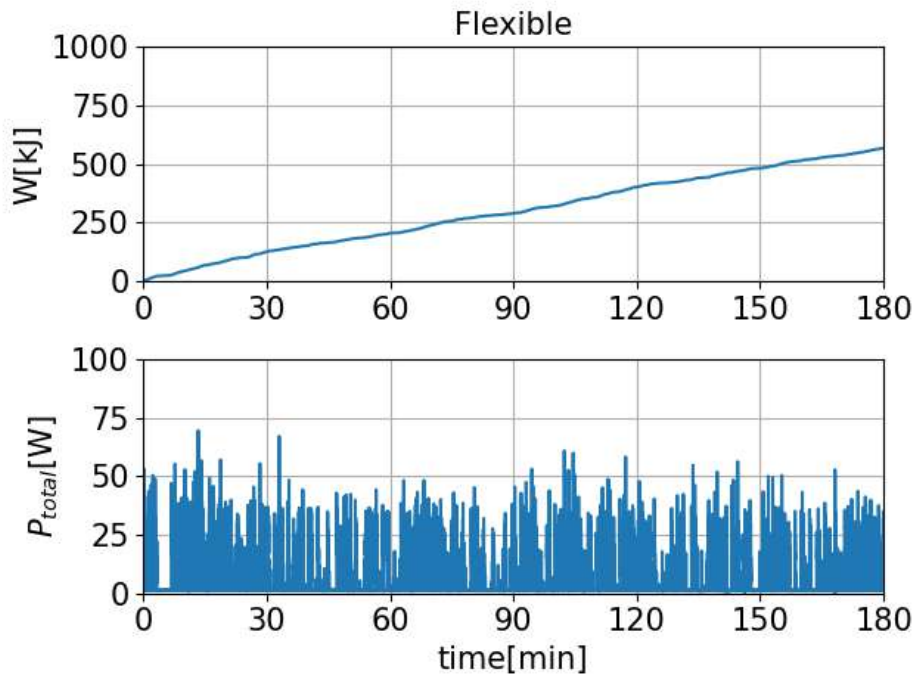
図 3.7: 外乱が激しい実環境の様子



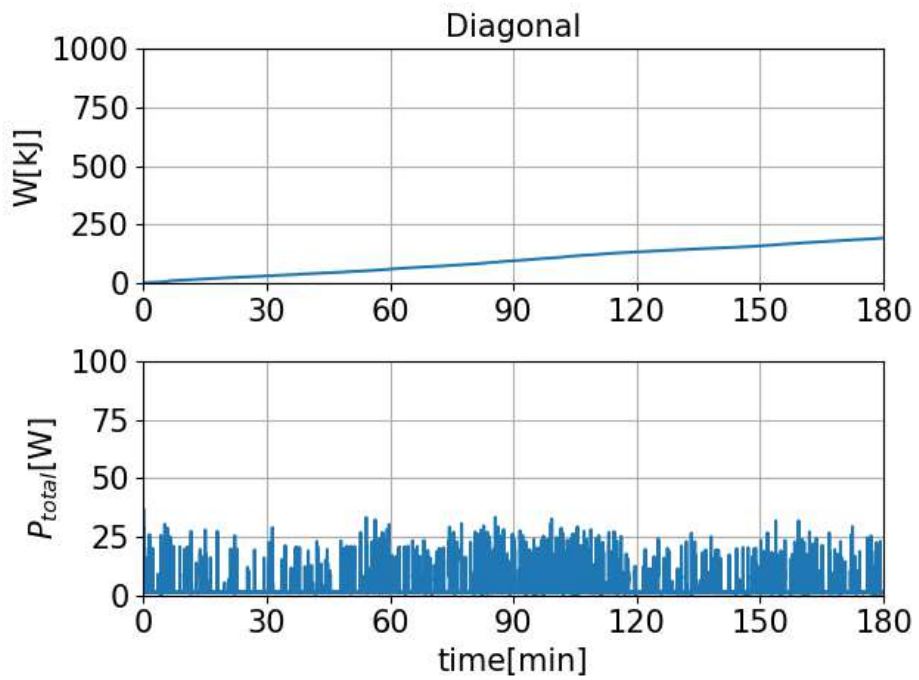
(a) Simple strategy



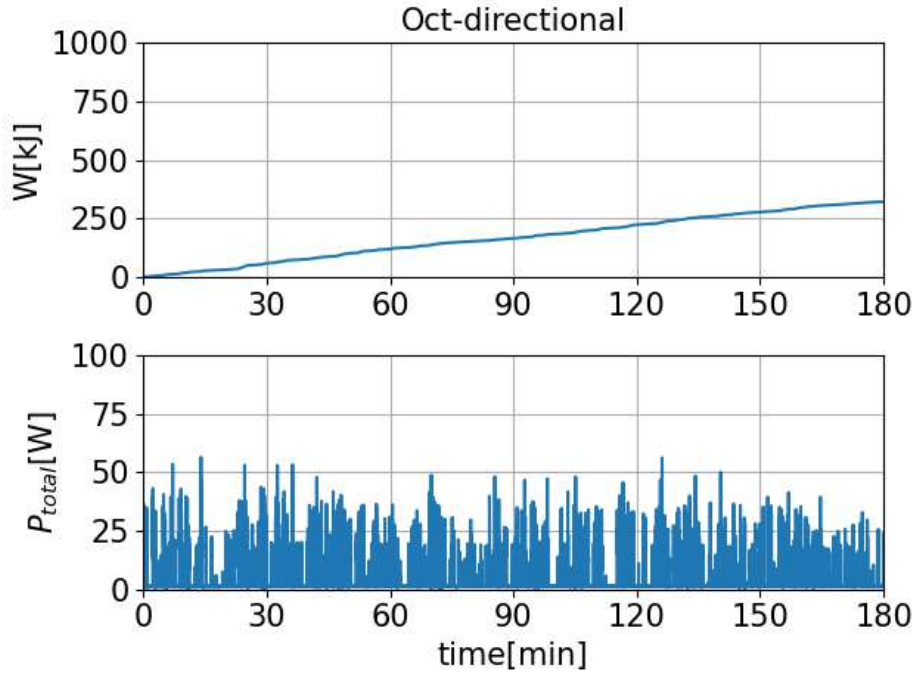
(b) Strict strategy



(c) Flexible strategy



(d) Diagonal strategy



(e) Oct-directional strategy

図 3.8: 実環境実験におけるそれぞれの戦略の時系列累積消費電力データと瞬間的な消費電力データ

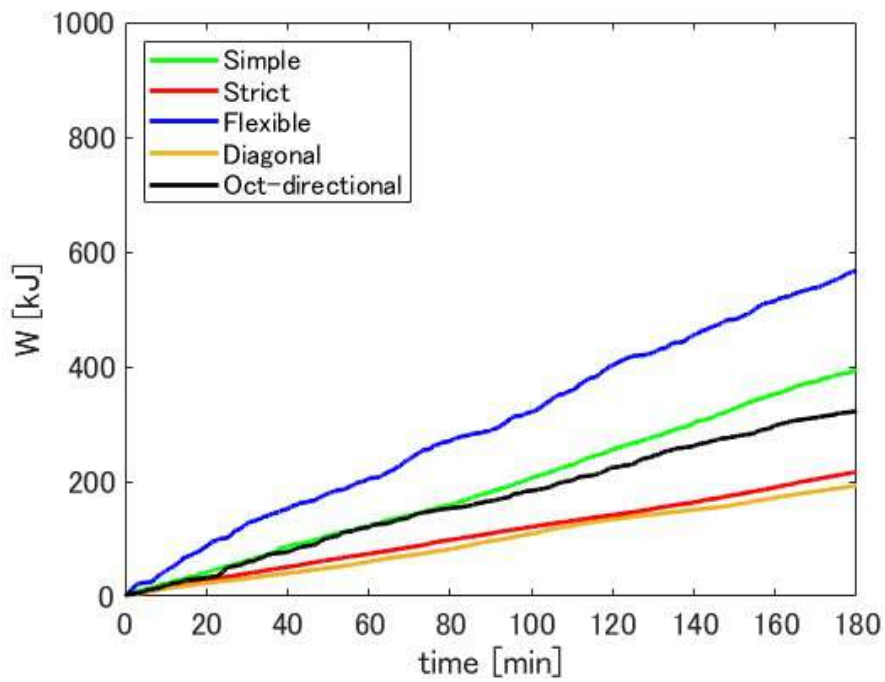
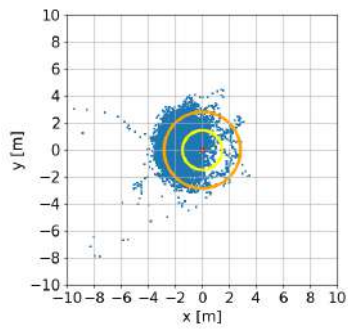
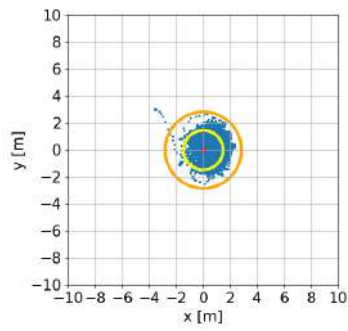


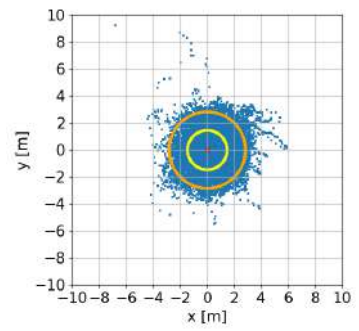
図 3.9: 実環境実験におけるそれぞれの戦略の累積消費電力グラフ



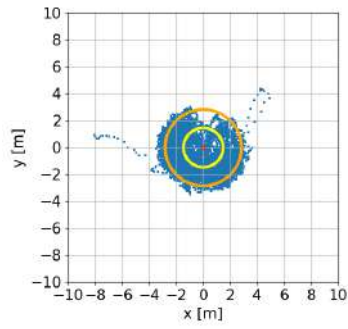
(a) Simple strategy



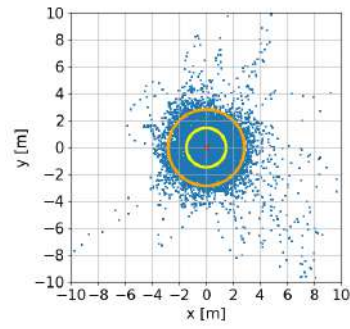
(b) Strict strategy



(c) Flexible strategy



(d) Diagonal strategy



(e) Oct-directional strategy

図 3.10: センシングデバイスにそれぞれの定点維持戦略を与えたときの位置データ

第4章

外乱を考慮した定点維持戦略の構築と評価

4.1 本章の概要

本章では、外乱方向を考慮した定点維持戦略について評価する。外乱方向を考慮するために移動ポリシーとして Flexible ポリシーを与え、一時目標位置を定義するパラメータを変化させることによって、外乱方向を考慮した時にどこに一時目標位置をとれば最も効率的かを検証する。本章でも3章と同様に構築した定点維持戦略は実環境とシミュレーション環境において検証した。実環境実験と実環境を模倣したシミュレーション環境では一時目標位置として目標位置付近に配置することで消費電力が抑えられることが明らかになった。一方、自己位置推定誤差のない理想的なシミュレーション環境では、外乱が発生する方向に最も遠い位置に一時目標位置を配置する戦略が最も効率的であるということが検証された。

4.2 外乱を考慮した定点維持戦略

本章では外乱方向を考慮した最適な位置取りに関して検証する。本章で構築する定点維持戦略は3章で説明した Flexible ポリシーを応用することで、センシングデバイスが許容誤差範囲から押し出された際に、辿った奇跡から外乱方向を推定し、最適な位置取りを幾何学的に求める。

表 4.1: 2 台のスラスタのみを用いる場合のセンシングデバイスの移動方向とスラスタの回転方向の関係

direction	T_1	T_2	T_3	T_4
D_1	P	P	-	-
D_2	P	-	-	N
D_3	-	N	-	N
D_4	-	N	P	-
D_5	-	-	P	P
D_6	N	-	-	P
D_7	N	-	N	-
D_8	-	P	N	-

4.2.1 戦略構成パラメータ

3.2.1 項で述べた通り、本章における定点維持戦略には戦略構成パラメータとして、「許容誤差範囲」、「アプローチポリシー」、「移動ポリシー」を与える。以下に本章における各パラメータの制約条件について説明する。

許容誤差範囲

3 章と同様の理由、定義で戦略構成パラメータとして許容誤差範囲を与える。

アプローチポリシー

本章ではセンシングデバイスが移動するとき必ず 2 台のスラスタを用いるようにする。3 章における実験において、スラスタを 2 台のみ使用して移動する Diagonal strategy が効率的であることが明らかになった。表 2.2 で示されている通り、センシングデバイスが D_1, D_3, D_5, D_7 方向へ移動する場合、センシングデバイスは 4 台のスラスタを使用する必要があった。本章では、3 章の実験結果を受けて、センシングデバイスが D_1, D_3, D_5, D_7 方向へ移動する場合も 2 台のスラスタを使用するように変更する。表 4.1 はセンシングデバイスの移動可能方向と使用するスラスタの回転方向について示している。

また、本章で構築するアプローチポリシーは Oct-directional のみに限定する。図 3.3 で示している通り、Oct-directional は他のアプローチポリシーと比較して、移動可能な方向に関する分解能が高く目標位置方向に対して直線的に移動できる。本章で構築する定点維持戦略に与えるアプローチポリシーは表 4.1 に従う Oct-directional のみとする。

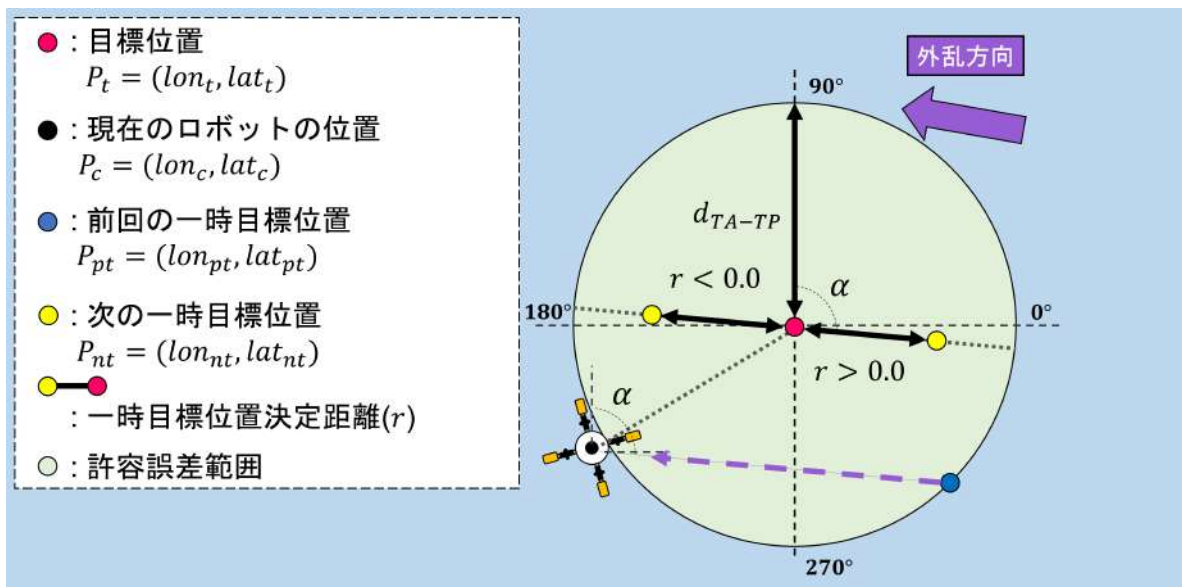


図 4.1: 一時目標位置を決定するための変数定義

移動ポリシー

本章では移動ポリシーに Flexible ポリシーを用いる。3章における Flexible ポリシーの一時目標位置は式 (3.3) に従って計算される。しかし、本章では、Flexible ポリシーにおける最適な一時目標位置について検討するために Flexible ポリシーを構成する新たなパラメータとして一時目標位置決定距離を導入する。

センシングデバイスが許容誤差範囲から押し出されたとき、一時目標位置決定距離に従ってセンシングデバイスの位置と目標位置を結ぶ直線上に一時目標位置が計算される。図 4.1 は一時目標位置を決定するために必要なパラメータを記している。図 4.1 において、 d_{TA-TP} , r , α は許容誤差距離、一時目標位置決定距離、世界座標系における外乱方向を表している。 r は $r < 0.0$ のときセンシングデバイス位置と目標位置を結ぶ直線上のセンシングデバイス位置と目標位置の間に配置される。一方、 $r > 0.0$ のとき、一時目標位置はセンシングデバイスの位置と目標位置を結ぶ直線上の目標位置と境界線上に配置される。また、 P_t と P_c は 3章で扱った通り、目標位置とセンシングデバイスの位置を表す。さらに P_{pt} と P_{nt} は前回の一時目標位置と次の一時目標位置を表している。

4.2.2 一時目標位置計算

4.2.1 項で本章で扱う Flexible ポリシーに必要なパラメータと一時目標位置の位置関係について述べた。本節では、一時目標位置を決定するための計算について述べる。

$$\alpha = \frac{(90 - \text{atan2}(\sin(\Delta lon), \cos(lat_c) \tan(lat_{pt}) - \sin(lat_c) \cos(\Delta lon))) \pi}{180} \quad (4.1)$$

式 (4.1) はセンシングデバイス位置と前回の一時目標位置から世界座標における外乱方向を算出している。式 (4.1) で Δlon は前回の一時目標位置の経度とセンシングデバイスの位置の経度を用いて、 $\Delta lon = lon_{pt} - lon_c$ と計算される。また、次の一時目標位置 $P_{nt} = lon_{nt}, lat_{nt}$ は

$$\begin{aligned} lon_{nt} &= lon_t + r \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) lon_e \\ &= lon_t + r \sin(\alpha) lon_e \\ lat_{nt} &= lat_t + r \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) lat_e \\ &= lat_t + r \cos(\alpha) lat_e \end{aligned} \quad (4.2)$$

と計算される。式 (4.2) において lon_e, lat_e はそれぞれ経度、緯度の 1m あたりの度数を表し、

$$\begin{aligned} lon_e &= \frac{1}{R \cos(lat_t)} \\ lat_e &= \frac{1}{R} \end{aligned} \quad (4.3)$$

と計算される。ここで、 R は地球の半径を表し、本論文では $R = 6378.137\text{m}$ と定義されている。

4.2.3 数理モデルによる最適一時目標位置計算

図 4.2 は最適な一時目標位置の計算に必要なパラメータについて示している。図 4.2 において、 $d_{TA-TP}, d_{TA-TTP}, d_{temp}, d_{net}, d_{rem}, d_{LE}$ はそれぞれ許容誤差距離、一時目標位置の許容誤差距離、センシングデバイスが許容誤差範囲から出た位置から一時目標位置までの距離、自己位置推定誤差と d_{TA-TTP} を加味したセンシングデバイスの正味の位置、 d_{net} からセンシングデバイスが許容誤差範囲から出た位置の反対方向の境界線までの距離、自己位置推定誤差を表している。

許容誤差範囲から出たセンシングデバイスは一時目標位置を設定し、一時目標位置まで確実に移動しようとするが、自己位置推定誤差の影響で厳密に一時目標位置に到達す

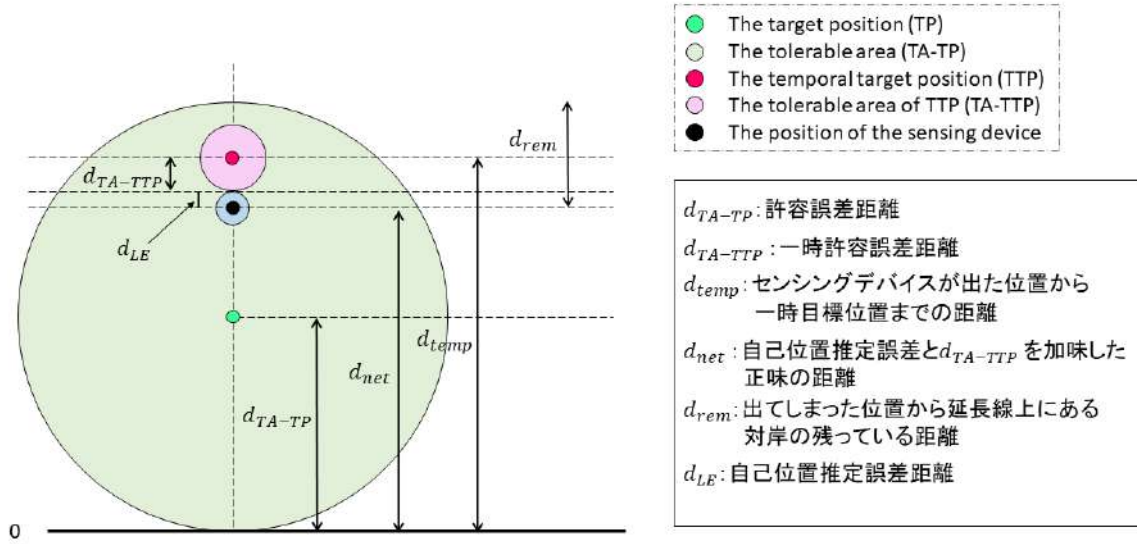


図 4.2: 外乱を考慮した最適な一時目標位置は位置計算

ることはできない. 図 4.2 において d_{net} はセンシングデバイスが許容誤差範囲から出た位置から一時目標位置まで移動しようとした際に停止する位置までの距離を表している. d_{rem} はセンシングデバイスの正味の位置からセンシングデバイスが許容誤差範囲から出た位置と反対側の境界線までの距離を表すため, $d_{rem} = 0$ のときセンシングデバイスは外乱方向を考慮し最適な位置取りができると仮定できる. d_{rem} は図 4.2 に記されている変数で計算でき, 以下のように計算できる.

$$d_{temp} = kd_{TA-TP} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} d_{net} &= d_{temp} - d_{TA-TTP} \pm d_{LE} \\ &= kd_{TA-TP} - d_{TA-TTP} \pm d_{LE} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} d_{rem} &= 2d_{TA-TP} - d_{net} \\ &= 2d_{TA-TP} - kd_{TA-TP} \\ &\quad - d_{TA-TTP} \mp d_{LE} \\ &= (2 - k)d_{TA-TP} - d_{TA-TTP} \mp d_{LE} \end{aligned} \quad (4.6)$$

式 (4.4), 式 (4.5), 式 (4.6) において k は d_{TA-TP} から一時目標位置を決定するための係数を表している. 式 (4.6) では, 仮に $d_{LE} = 0$ とすれば $k = 2$ の場合に一時目標位置が最適に配置できることを表している. しかし, d_{LE} は実環境において不規則な値をとるため正確にモデル化することが困難である. そのため, 本章で述べる実験ではさまざまな一時目標位置決定距離を与えることによって実験的に最適な位置取りについて検証した.

表 4.2: 長期稼働実験で評価する定点維持戦略パラメータ

許容誤差距離 (m)	一時目標位置決定距離 (m)	実験継続時間 (分)
3.0	-1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0	180
5.0	-2.0, -1.0, 0.0, 1.0, 2.0	

4.3 実環境実験

本節では、本章で述べてきた外乱方向を考慮した定点維持戦略をセンシングデバイスに適用し実環境で消費電力と目標位置からの平均誤差距離について評価する。実環境実験では、それぞれの定点維持戦略を長時間連続的に適用し評価した長期稼働実験と環境条件を限りなく一定になるように評価実験を実施した同一環境実験を実施した。本節では、両実験の実験結果についてまとめる。

4.3.1 長期稼働実験

実験条件

本実験ではそれぞれの定点維持戦略を構成するパラメータとして 2 種類の許容誤差距離と 5 種類の一時目標位置決定距離が与えられた、それぞれを組み合わせた合計 10 種類の定点維持戦略を評価した。また、それぞれの定点維持戦略は実環境において 180 分の実験継続時間で評価された。なお、それぞれの戦略の評価実験はそれぞれ別日に実施されたため、風向・風速などの外乱条件が実験ごとに異なっていた。表 4.2 は本実験で評価した定点維持戦略構成パラメータの組み合わせを示している。

実験結果

本実験では許容誤差範囲と一時目標位置決定距離の両方が消費電力と平均誤差距離に影響することが示された。図 4.3a と図 4.3b は本実験におけるそれぞれの戦略を適用したときの累積消費電力を表している。図 4.3a, 図 4.3b から r が最も大きい場合、許容誤差範囲の大きさに関わらず、消費電力が大きいことが確認できる。 $r > 0.0$ のときセンシングデバイスは 1 回の移動あたり移動距離が長く、1 回の移動でより多くの電力を消費してしまう。一方、 $d_{TA-TP} = 5.0$ m で $r = 1.0$ m のとき他の戦略と比較して r の値が大きいにもかかわらず、消費電力が小さくなった。この戦略を実験したときは、外乱状況が比較的穏やかであり、センシングデバイスが許容誤差範囲外に押し出される回数が少なく、外乱強度の弱さが消費電力に影響したと考えられる。 $d_{TA-TP} = 3.0$ m, $r = -1.0$ m の戦略と

$d_{TA-TP} = 5.0 \text{ m}$, $r = -1.0 \text{ m}$ の戦略は r の値が小さいにもかかわらず消費電力が大きくなった。これらの戦略を実験したとき、他の戦略を実験した日程と比較して、外乱が激しかった。そのため、これらの戦略の実験結果も実験実施日の外乱強度に影響されており、消費電力が大きくなったと考えられる。

平均誤差距離の観点では、許容誤差距離の長さがセンシングデバイスの位置決め精度に影響を与えていることが確認された。図 4.4a, 図 4.4b はそれぞれの戦略を与えたときにセンシングデバイスの目標位置からの平均誤差距離とその分散を示している。図 4.4a, 図 4.4b から、一時目標位置を目標位置付近に配置するほど平均誤差距離が小さくなることを確認できる。また、許容誤差距離の大きさに関わらず、 r の値が小さいほど分散が小さくなり、 r の値が大きくなるにつれて分散が大きくなる傾向も確認できる。 $r > 0.0 \text{ m}$ の戦略を適用した場合、センシングデバイスは許容誤差範囲から出た位置からその位置と目標位置を結ぶ直線上の反対側の境界線付近まで移動するため、移動範囲が大きくなる。一方、 $r < 0.0 \text{ m}$ の戦略を適用した場合、センシングデバイスはセンシングデバイスが許容誤差範囲から出た位置付近に一時目標位置を設定するため、比較的同じ位置を維持しようとする。そのため、これらの一時目標位置決定距離の特徴から $r > 0.0 \text{ m}$ の場合に平均誤差距離の分散が大きくなり、 $r < 0.0 \text{ m}$ の場合に平均誤差距離の分散が小さくなることが考えられる。

4.3.2 同一環境実験

実験条件

本実験では、外乱強度の違いによる影響を受けづらい環境下において、それぞれの戦略を評価する。長期稼働実験では、それぞれの戦略の評価実験はそれぞれ異なる日時に実施されたため、実験実施日時によって外乱強度が異なり、その違いがそれぞれの戦略の消費電力影響を与えた。そのため、それぞれの戦略を可能な限り同じ外乱状況下で評価できる環境を整えた。本実験では、それぞれの戦略を与えてセンシングデバイスを稼働させる実験を同一日の同じ時間帯に短時間実施し、それを複数回繰り返すことで、それぞれの戦略を可能な限り同じ外乱状況下で評価した。具体的には、1 回の評価実験で 15 分の実験継続時間を与え、それを 4 回繰り返し合計 60 分の実験継続時間でそれぞれの戦略を評価した。なお、本実験においても長期稼働実験で評価された計 10 種類の定点維持戦略について評価する。表 4.3 は本実験で評価した定点維持戦略構成パラメータの組み合わせを示している。

表 4.3: シミュレーション実験で評価する定点維持戦略パラメータ

許容誤差距離 (m)	一時目標位置決定距離 (m)	実験継続時間 (分)
3.0	-1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0	60 (15×4)
5.0	-2.0, -1.0, 0.0, 1.0, 2.0	

実験結果

図 4.3a と 4.3b は本実験におけるそれぞれの戦略を適用したときの累積消費電力を表している。図 4.3a, 4.3b から許容誤差範囲が小さい方が平均的に消費電力が大きくなることが確認された。また、許容誤差範囲の大きさに関わらず、一時目標決定距離の値が小さいとき、消費電力が小さくなる傾向が見られた。これらの消費電力に関する実験結果は 1 回の移動に必要な電力と自己位置推定誤差の影響を受けていると考えられる。スラストの出力はセンシングデバイスの位置と一時目標位置の距離に応じて決定され、移動距離が長い場合に消費電力が大きくなる。そのため、 $r < 0.0$ m の戦略と比較して、 $r > 0.0$ m の戦略は 1 回の移動に必要な消費電力が大きくなり、累積消費電力が多くなりやすい。また、許容誤差範囲内外を隔てる境界線付近に設定する戦略は自己位置推定誤差の影響を受けやすい。センシングデバイスが境界線付近に存在するとき、センシングデバイスが許容誤差範囲内に存在していたとしても自己位置推定誤差の影響を受けて、許容誤差範囲外に存在していると誤認識する場合がある。その場合、不必要な移動が多くなり必要以上に電力を消費する。これらの理由から、1 回の移動に必要な電力が大きく、自己位置推定誤差の影響も受けやすい戦略である許容誤差距離が 3.0 m かつ $r = 1.0$ の戦略と許容誤差距離が 5.0 m かつ $r = 2.0$ の戦略が許容誤差範囲の大きさに関わらず最も非効率になったと考えられる。

図 4.6 と図 4.7 は本実験におけるそれぞれの戦略における平均誤差距離とその分散を示している。図 4.6, 図 4.7 から、許容誤差範囲の大きさに関わらず、平均誤差距離は $r > 0.0$ m のときに最も小さくなることが確認できる。また、許容誤差距離が 3.0 m の場合と許容誤差距離が 5.0 m の場合を比較すると許容誤差距離が 3.0 m の場合の方が分散が小さくなっていることが確認できる。この結果から、センシングデバイスは許容誤差範囲が小さい戦略を適用することで目標位置の近くに定点維持することができることが考えられる。

さらに、図 4.9 はセンシングデバイスに許容誤差距離が 3.0 m の戦略を与えたときのセンシングデバイスが 15 分間の実験継続時間内に描いた軌跡を表している。図 4.9 の各図において、青色の点はセンシングデバイスが描いた軌跡を表している。また、図 4.9 の各図において中央の赤色の点は目標位置を表しており、目標位置を囲むように描いている橙

色の円は許容誤差範囲内外を隔てる境界線を示している。図 4.9a と図 4.9b から $r < 0.0$ m の戦略をセンシングデバイスに与えたとき、センシングデバイスは外乱によって押し出された位置付近を往来していることが確認できる。一方、図 4.9c, 図 4.9d, 図 4.9e から $r \geq 0.0$ m の場合、 $r < 0.0$ m の戦略と比較して、目標位置付近を含む許容誤差範囲内の広範囲に位置していることが確認できる。

4.4 シミュレーション実験

3 章で構築した定点維持戦略をシミュレーション環境で評価した通り、実験条件を整えた環境において、本章で構築した定点維持戦略を評価する。

4.4.1 消費電力モデル

3.3.1 項で述べた通り、センシングデバイスが稼働中に消費する電力の多くは移動時に用いられるスラストの回転による消費である。3.3 節で述べたシミュレーション実験では、スラストによる消費電力は使用しているスラストのデータシートに従った消費電力モデルを用いて、シミュレーション環境内における消費電力計測を実現した。一方、実機消費電力は必ずしもデータシートの値に従わないことから、本章ではより詳細にモデリングした消費電力モデルによってシミュレーション環境内における消費電力計測を実現する。

スラストの回転強度と消費電流の関係を調査するため、外乱の影響のない屋外プールにて消費電流計測実験を予備実験として実施した。本予備実験では、「 D_1 方向に 4 台のスラストで移動する場合 (4TD)」、「 D_2 方向に 2 台のスラストで移動する場合 (Diagonal)」、「 D_1 方向に T_1 , T_2 の 2 台のスラストで移動する場合 (Push)」の 3 種類の移動方法でセンシングデバイスを移動させ、その時の消費電流を計測した。また、回転強度 10% から 100% まで 10% 刻みでスラストに命令を与えた。さらに、予備実験ではそれぞれの回転強度に対して消費電流取得実験は 5 回ずつ実施した。

図 4.10 はスラストが回転し始めるときの消費電流グラフの例を表している。図 4.10 において $t = 1.0$ のタイミングでスラストを回転する命令を与え、その後連続的に同じ強度で回転させ続けた。図 4.10 から、スラストは回転を始める瞬間に大きな電流を瞬間的に消費し、その後一定の電流を消費することが確認できる。この結果から、それぞれの移動方法におけるそれぞれのスラストの回転強度に対して、定常消費電流とピーク消費電流を計算できる消費電流関数を構築した。

図 4.11a と図 4.11b はそれぞれスラストの回転強度に対する定常消費電流関数とピーク消費電流関数を表している。また、図 4.11a, 図 4.11b において破線はそれぞれのスラスト回転強度に対する予備実験で得た消費電流の平均値をもとに生成された関数を表してお

表 4.4: 消費電流関数に使用する係数

driving pattern	i	j	k	c_{max}
4TD	48.50	-3.77	0.28	4.13
Diagonal	23.50	-1.63	0.28	2.19
Push	24.00	-1.68	0.28	2.28

driving pattern	a	b	d	e	f	p_{max}
4TD	32.80	17.50	1.81	43.60	-3.41	14.40
Diagonal	19.20	4.90	1.71	25.10	-2.33	7.83
Push	13.20	3.60	2.23	24.20	-1.89	7.74

り、実線は平均値から生成された関数を近似した近似関数を表している。シミュレーション実験では、図 4.11 内の本線が表す近似関数を用いて消費電流を計算する。

本章における実験では、アプローチポリシーとして Oct-directional を採用するため、 D_1, D_3, D_5, D_7 方向へ移動する場合は図 4.11 における緑色の線で描かれている関数を用いる。また、 D_2, D_4, D_6, D_8 方向へ移動する場合は図 4.11 青色の線で描かれている関数を用いて計算する。

$$CA = \begin{cases} 0.28 & (p = 0.0) \\ ip^2 + jp + k & (0.0 < p \leq 0.3) \\ c_{max} & (0.3 < p \leq 1.0), \end{cases} \quad (4.7)$$

$$PA = \begin{cases} 0.28 & (p = 0.0) \\ ap + 0.28 & (0 < p \leq 0.1) \\ bp + c & (0.1 < p \leq 0.2) \\ dp + e & (0.2 < p \leq 0.4) \\ p_{max} & (0.4 < p \leq 1.0), \end{cases} \quad (4.8)$$

さらに、近似関数は表 4.4 の値を用いて、式 (4.7)、式 (4.8) のように計算される。式 (4.7)、式 (4.8) において、 CA および PA はそれぞれ定常消費電流関数とピーク消費電流関数によって算出される定常消費電流とピーク消費電流を表している。また、式 (4.7)、式 (4.8) において p , c_{max} , p_{max} はそれぞれスラストの回転強度、最大の定常消費電流、最大のピーク消費電流を表している。

一方、電圧は 3.3.1 で述べた通り、本章のシミュレーション実験においても常に 12V に設定されている。以下に続くシミュレーション実験における消費電力は、式 (4.8) に従って算出される消費電流と一定の値をとる電圧値によって消費電力を計算する。

表 4.5: シミュレーションパターン

パターン	平均 [m]	分散 [m]	実験継続時間 [min]	外乱パターン
A	0.0	0.0	180	NATURAL
B	1.0	0.5	180	NATURAL
C	0.0	0.0	180	STEP
D	1.0	0.5	180	STEP

表 4.6: シミュレーション実験で評価する定点維持戦略パラメータ

許容誤差距離 (m)	一時目標位置決定距離 (m)	一時目標位置許容誤差距離 (m)
3.0	-1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0	1.5
5.0	-5.0, -4.0, -3.0, -2.0, -1.0, 0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0	

4.4.2 実験条件

シミュレータは3章と同様に Webots シミュレータ上に環境条件を設定して、センシングデバイスの消費電力と平均誤差距離について評価する。また、設定するシミュレーションパラメータは3章のシミュレーション実験と同様に自己位置推定誤差と外乱パターンを設定した。外乱パターンには新たに「NATURAL」という外乱パターンを定義した。外乱パターンが NATURAL の場合、センシングデバイスは一定の方向に 0.10 m/sec で移動させられる力を受ける。この外乱パターンは平均的な実環境の外乱状況を模倣してモデル化した。表 4.5 は本節で検証するシミュレーション環境のパターンを示している。

シミュレーションパターン A では、自己位置推定誤差の影響がなく一定の外乱を設定した環境でそれぞれの戦略を評価することで、平均的な外乱状況下におけるそれぞれの戦略の性能について検証する。シミュレーションパターン B では、自己位置推定誤差を実機に近づけることによって、実環境に近い環境におけるそれぞれの戦略について評価する。シミュレーションパターン C では、シミュレーションパターン A から外乱状況を STEP に変更することで、外乱強度が大きくなる時のそれぞれの戦略そのものの性能を検証する。シミュレーションパターン D では、シミュレーションパターン B から外乱状況を STEP に変更することで、自己位置推定誤差が実機に近い条件下における外乱強度の変化に対する消費電力の変化について検証する。本シミュレーション実験では、表 4.6 に記載のパラメータをそれぞれ組み合わせた合計 18 種類の定点維持戦略について検証する。

4.4.3 実験結果

図 4.12 はシミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の消費電力を表している。図 4.12a, 4.12b, 4.12e, 4.12f から外乱強度の影響が消費電力に影響を与えていることが確認できる。3.3.1 項の実験結果と同様に外乱強度が段階的に大きくなるシミュレーションパターンでは、センシングデバイスが許容誤差範囲から押し出される回数が多くなるため、放物線を描くように消費電力が大きくなっていることが確認できる。また、自己位置推定誤差があるシミュレーションパターンとないパターンの実験結果を比較すると自己位置推定誤差は最適な一時目標位置の決定に影響を与えていることが確認できる。図 4.12a, 4.12b, 4.12c, 4.12d によると、自己位置推定誤差がない場合はセンシングデバイスが許容誤差範囲から出た位置から可能な限り離れた位置に一時目標位置を設定する戦略が効率的である。一方、自己位置推定誤差がある場合は目標位置付近に一時目標位置を設定する戦略が効率的であり、境界線付近に一時目標位置を設定する戦略が非効率であった。この結果も 3.3.1 項で述べた通り、境界線付近に一時目標位置を設定すると自己位置推定誤差によって許容誤差範囲外に存在していると誤認識する可能性が高くなり、必要以上に移動して電力を消費してしまう。この結果から許容誤差範囲の大きさも電力効率に影響を与えていると考えられる。許容誤差範囲を大きくし、一時目標位置と境界線の間を大きくすることでこの問題は解決できる可能性がある。

図 4.13 はそれぞれのシミュレーションパターンにおける各戦略の平均誤差距離とその分散を示している。図 4.13a, 図 4.13b, 図 4.13e, 図 4.13f は自己位置推定誤差のないシミュレーションパターンにおける平均誤差距離とその分散を示している。これらの実験結果は、自己位置推定誤差のない環境では一時目標位置をセンシングデバイスが許容誤差範囲から出た位置から遠くに配置することで平均誤差距離が小さくなることを示している。しかし、自己位置推定誤差のあるシミュレーションパターンの実験結果を示している図 4.13c, 図 4.13d, 図 4.13g, 図 4.13h は一時目標位置を目標位置付近に設定する戦略の平均誤差距離が小さくなっていることを示している。

4.5 考察

本実験では、実環境とシミュレーション環境で外乱を考慮した定点維持戦略の消費電力と平均誤差距離について評価した。長期稼働実験ではそれぞれの戦略を評価した実験実施日が異なっていたことから、実験実施日によって外乱状況が異なっていた。このような環境で実施された評価実験では、それぞれの戦略の消費電力は外乱の影響を強く受けることが確認された。

実環境において、外乱状況の差による影響を限りなく小さくするために同一環境実験を実施した。同一環境実験から外乱を考慮した最適な定点維持戦略を適用することで消費電力を削減できることが明らかになった。同一環境実験では、 $r \leq 0.0$ m の戦略は一回の移動に必要な消費電力が小さいことと自己位置推定誤差による影響が小さいことから効率的であるということが示された。

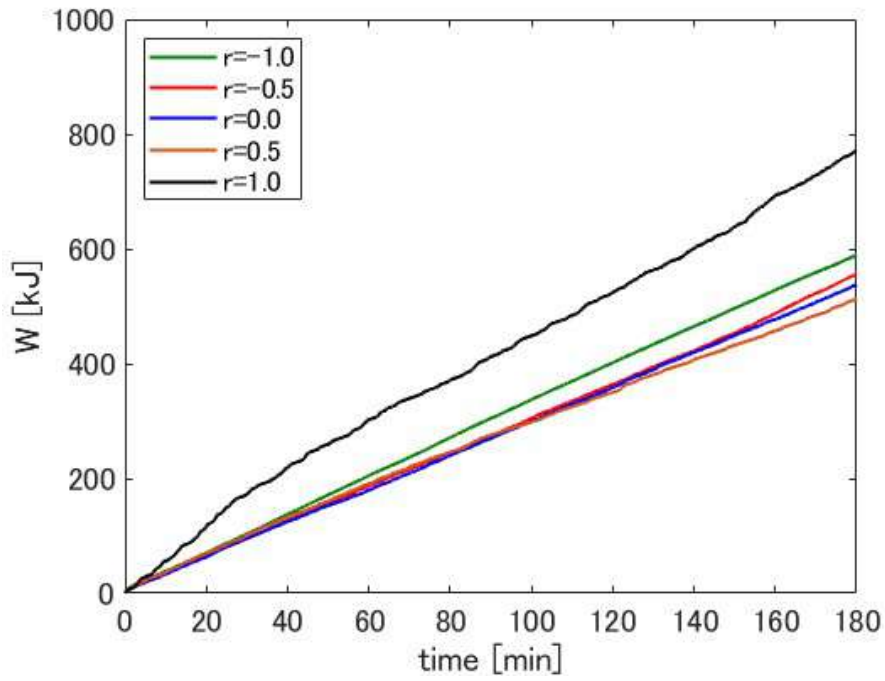
シミュレーション実験では、環境条件によって最適な一時目標位置が異なることが明らかになった。自己位置推定誤差がないような理想的な環境では、センシングデバイスが許容誤差範囲から出た位置から最も遠い位置に一時目標位置を配置することが効率的であった。しかし、自己位置推定誤差が含まれる環境ではセンシングデバイスは目標位置付近に一時目標位置を設置することで消費電力を抑えることができることが明らかになった。

平均誤差距離とその分散の観点からはシミュレーションパターンによって位置取りの傾向が異なることが明らかになった。自己位置推定誤差がない環境では $r < 0.0$ m の戦略は平均誤差距離が大きくなり、 $r > 0.0$ m の戦略の戦略よりも分散が小さくなった。自己位置推定誤差がある環境では、 r の値に関わらず分散がほとんど同じであった。この結果から、本実験で評価した戦略を適用した場合は、センシングデバイスは自己位置推定誤差の影響を受け、許容誤差範囲内で移動していることが確認できる。水圏環境を観測する場合、センシングデバイスの位置取りと消費電力を考慮することは重要である。例えば、水温や pH などの水質を観測するシナリオでは、水質のデータは目標位置から数 m 離れていたとしても大幅に変わらないため、センシングデバイスの位置取りは厳密に要求されない。一方、カメラを使って人の安全や養殖現場の魚を監視するようなシナリオでは、より厳密にセンシングデバイスの位置を維持する必要がある。そのため、効率や環境条件、センシングデバイスを利用するシナリオに応じて、最適な定点維持戦略を選択する必要があると考えられる。

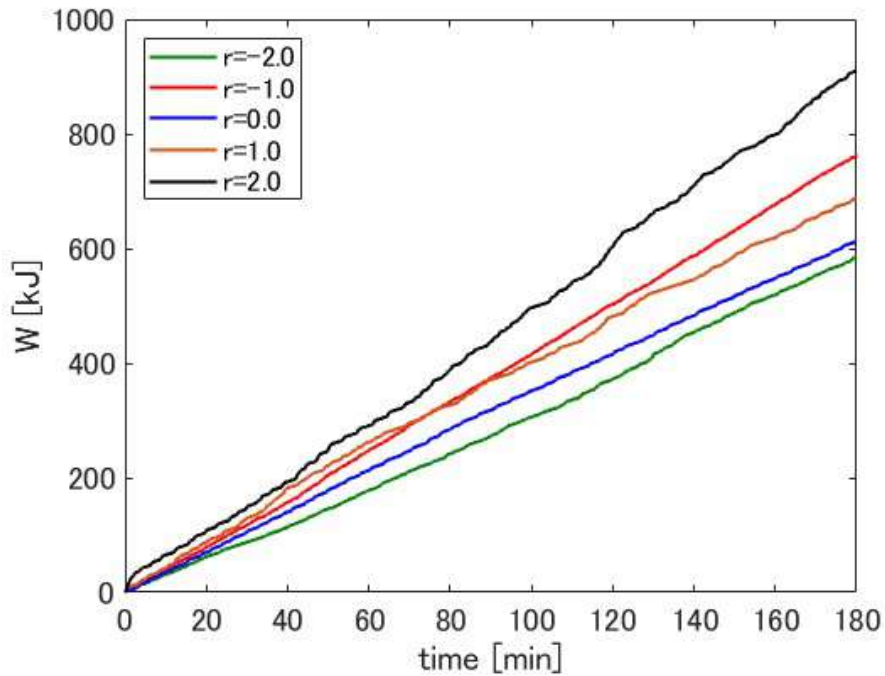
4.6 本章のまとめ

本章では、外乱を考慮した定点維持戦略を構築し、その効率性についてさまざまな実験を通して検証した。外乱を考慮した定点維持戦略は 3 章で検証した実験結果をもとに変更された戦略構成パラメータによって構成された。また、センシングデバイスの位置、目標位置、前回の一時目標位置から外乱の方向を計算し、次の一時目標位置を決定するアルゴリズムを構築した。それぞれの位置関係から、数理モデルによって外乱方向を考慮した最適な一時目標位置を検証し、そのモデルを検証するために実環境実験とシミュレーション実験を実施し、それぞれの定点維持戦略の消費電力と平均誤差距離について評価した。実環境実験では、連続的にセンシングデバイスを稼働させる長期稼働実験と環境条件をできるだけ調整した同一環境実験でそれぞれの戦略を評価した。また、さまざまな環境を想定

し、環境条件を調整したシミュレーション実験においてもそれぞれの戦略を評価した。本章で実施したこれらの実験から、1回の移動における消費電力が少ない戦略や自己位置推定誤差の影響を受けづらい位置に一時目標位置を設定する戦略が電力的に効率的な定点維持戦略であることが明らかになった。また、センシングデバイスの位置取りに関しては戦略によって平均誤差距離や分散の大きさが異なることが明らかになった。そのため、環境条件、センシングデバイスを利用するシナリオに応じて、最適な定点維持戦略を選択する必要があると示唆された。

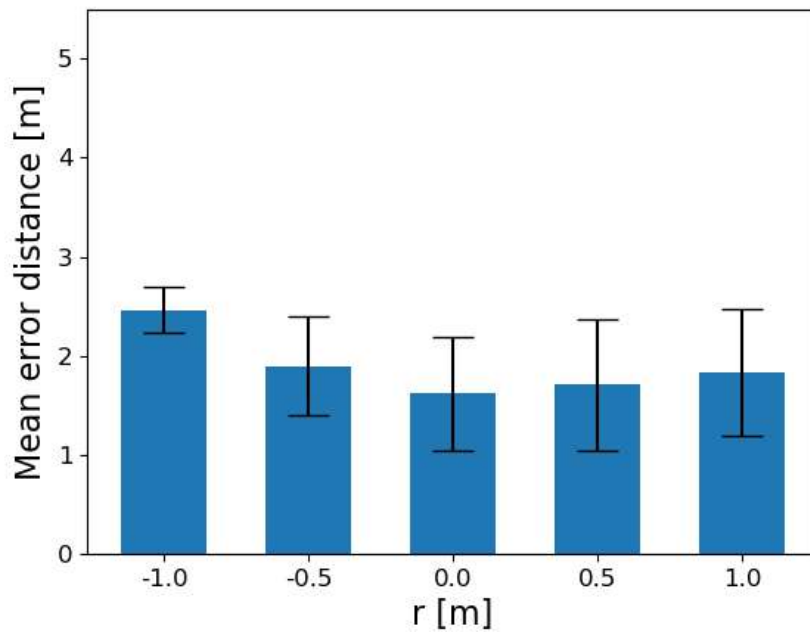


(a) $d_{TA-TP} = 3.0$ の場合の消費電力

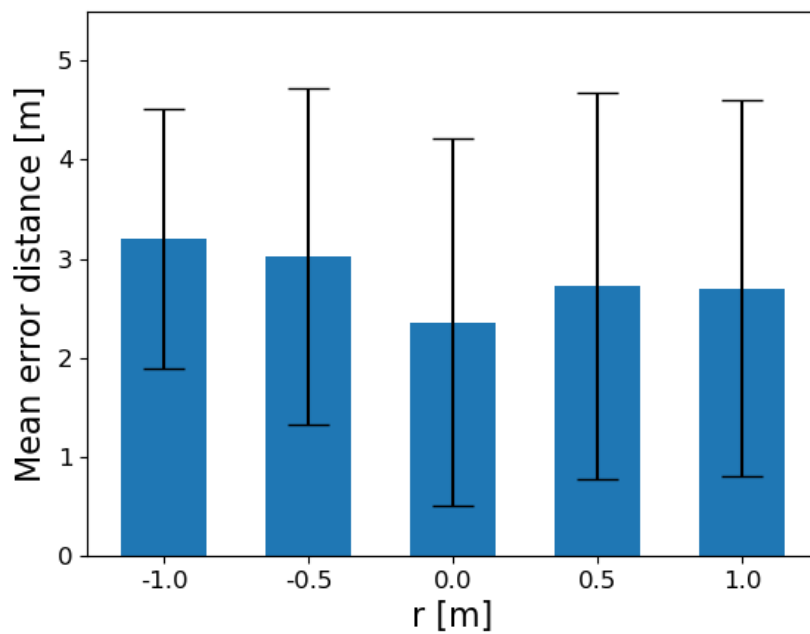


(b) $d_{TA-TP} = 5.0$ の場合の消費電力

図 4.3: 長期稼働実験における消費電力

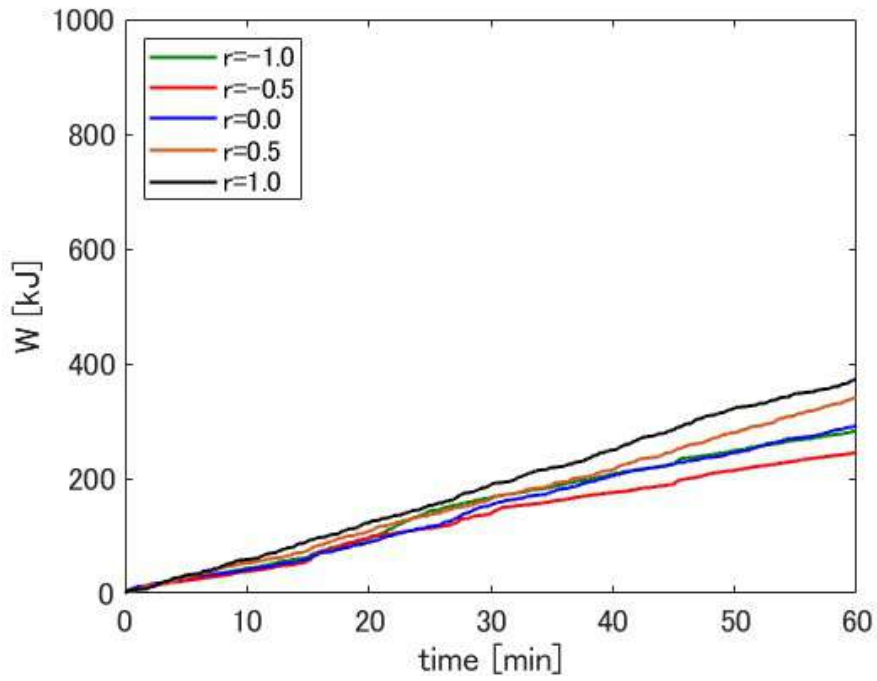


(a) $d_{TA-TP} = 3.0$ の場合の平均誤差距離とその分散

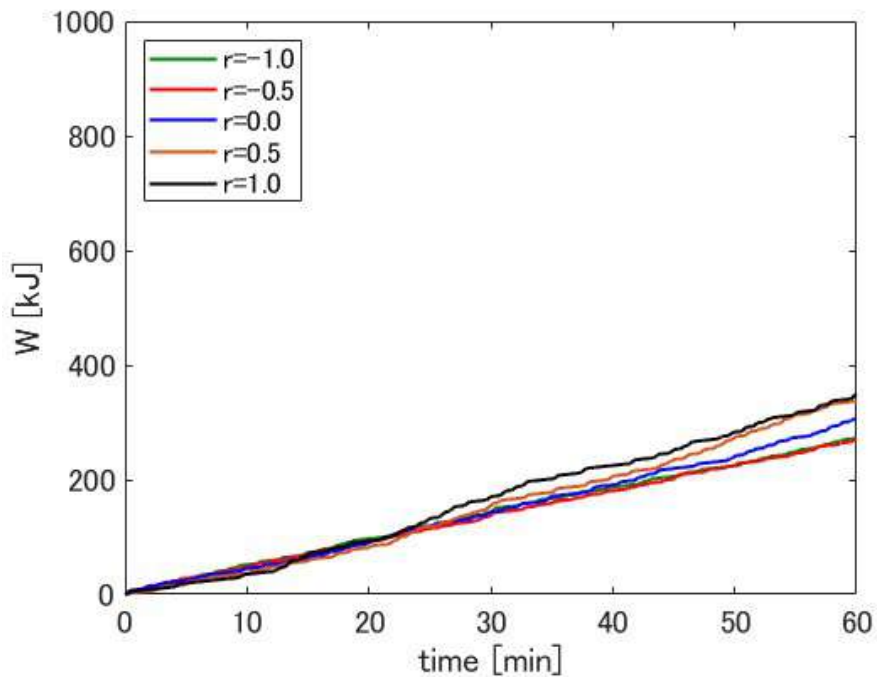


(b) $d_{TA-TP} = 5.0$ の場合の平均誤差距離とその分散

図 4.4: 長期稼働実験における平均誤差距離とその分散



(a) $d_{TA-TP} = 3.0$ の場合の消費電力



(b) $d_{TA-TP} = 5.0$ の場合の消費電力

図 4.5: 同一環境実験における消費電力

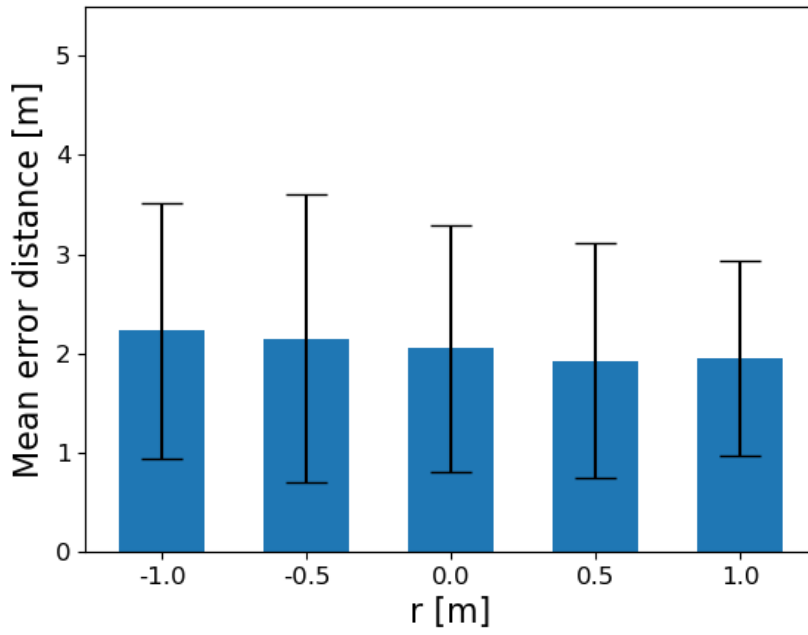


図 4.6: $d_{TA-TP} = 3.0$ の場合の平均誤差距離とその分散

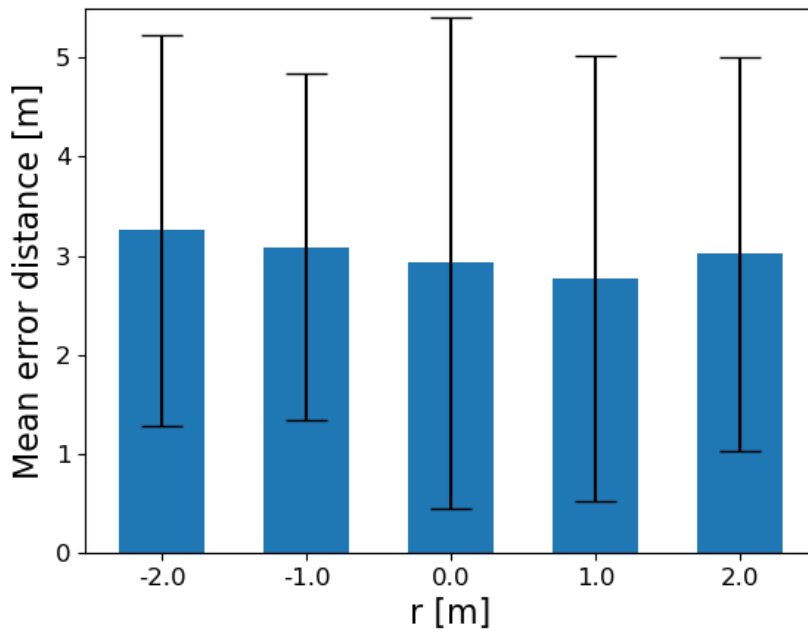


図 4.7: $d_{TA-TP} = 5.0$ の場合の平均誤差距離とその分散

図 4.8: 同一環境実験における平均誤差距離とその分散

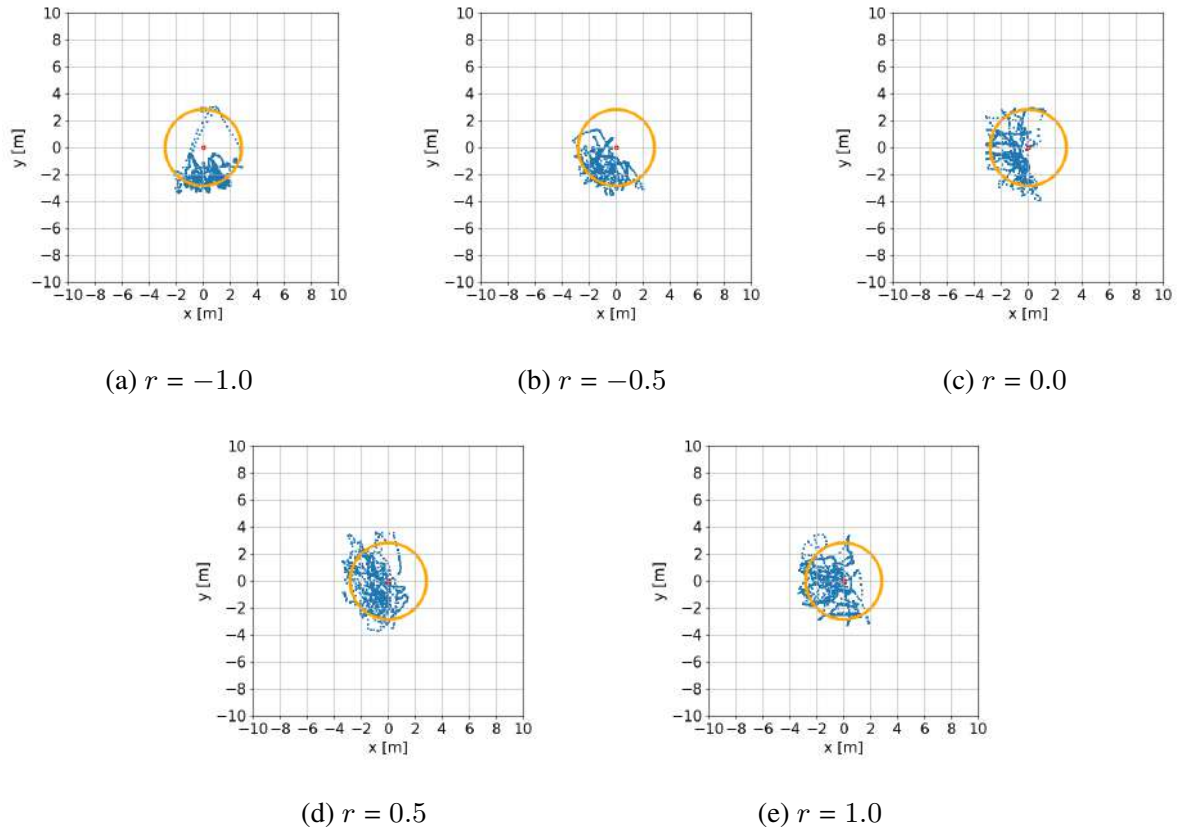


図 4.9: センシングデバイスが 15 分間の実験継続時間内に描いた軌跡の例 ($d_{TA-TP} = 3.0$ m)

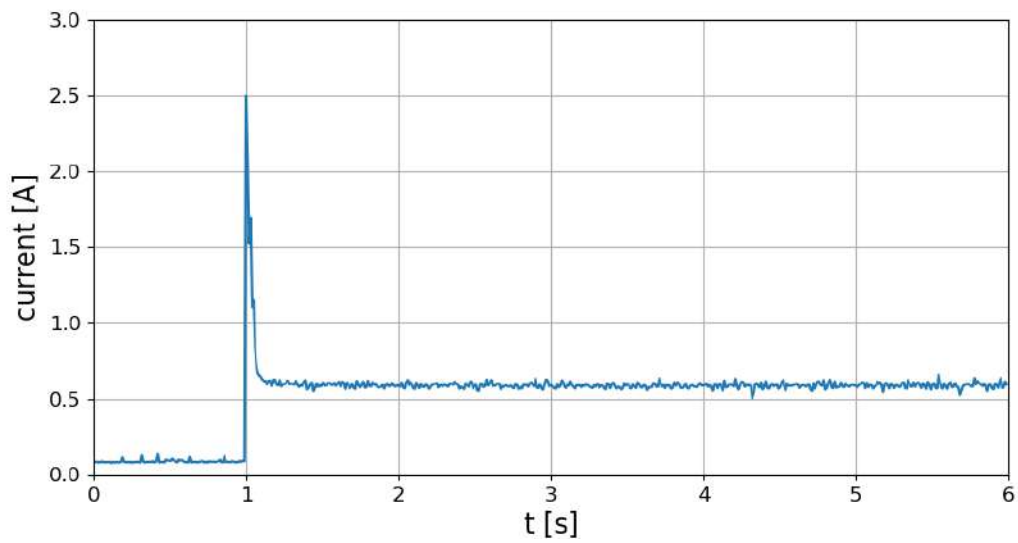
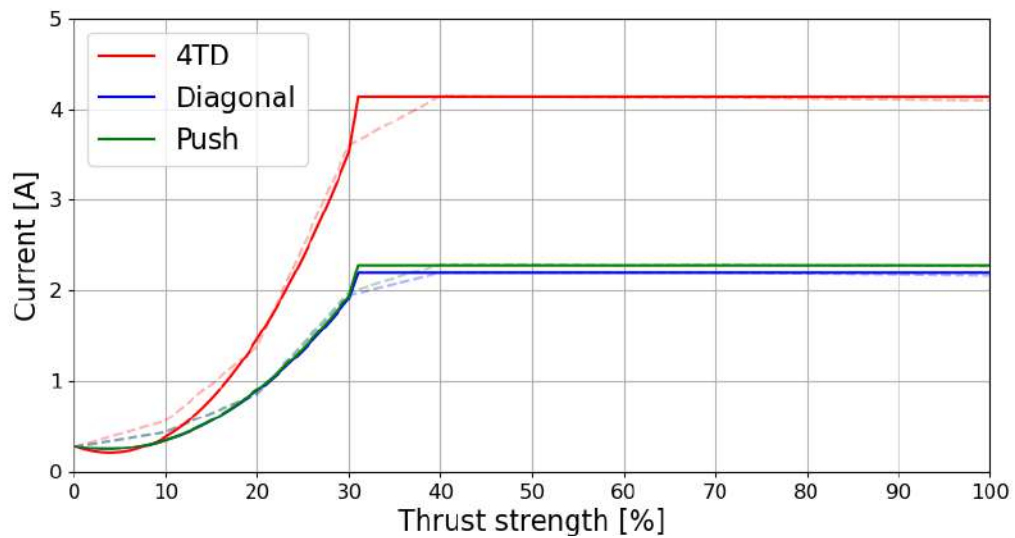
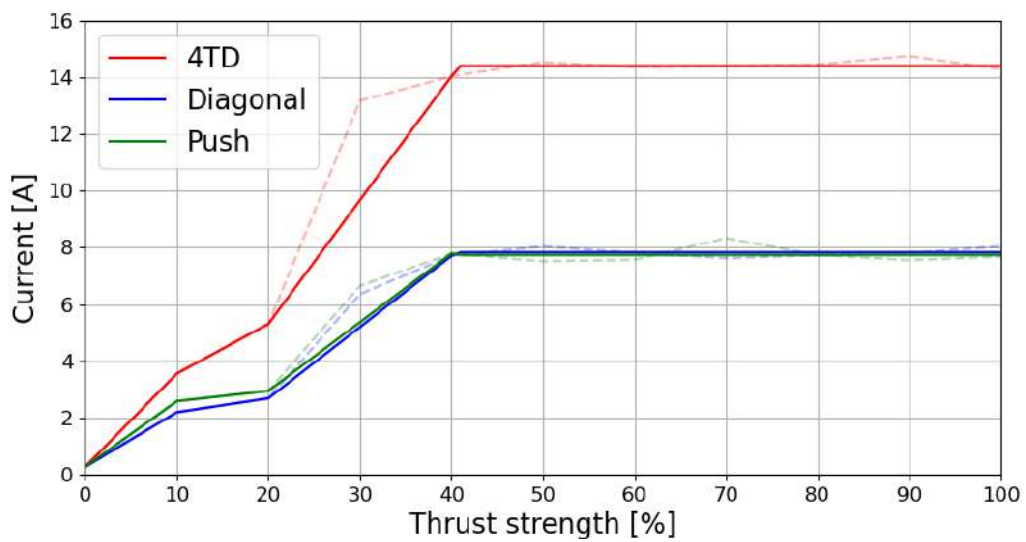


図 4.10: スラストが回転し始めるときに得られる消費電流の波形

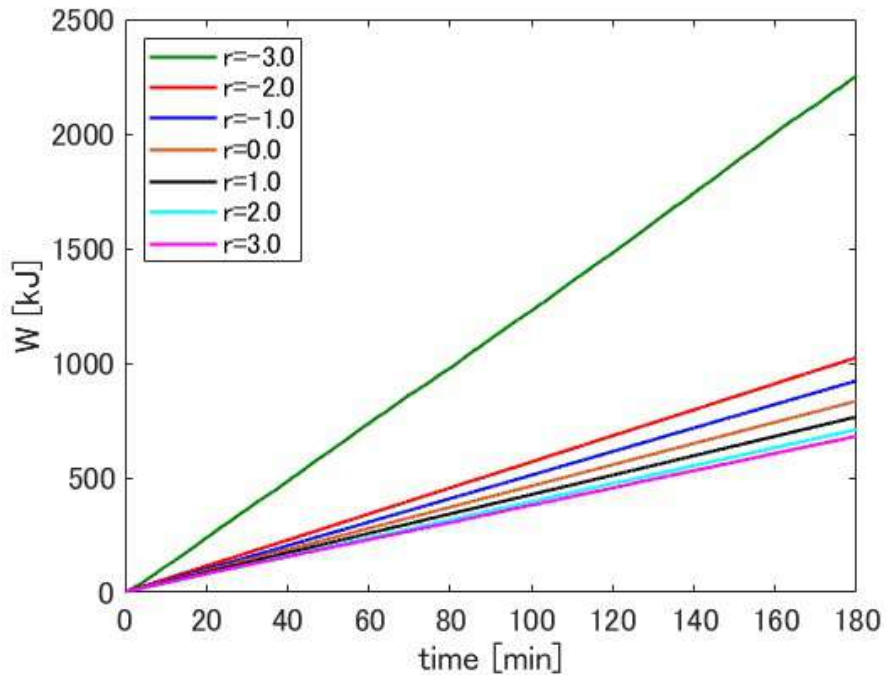


(a) スラストの回転強度に対する定常消費電流を求める近似関数

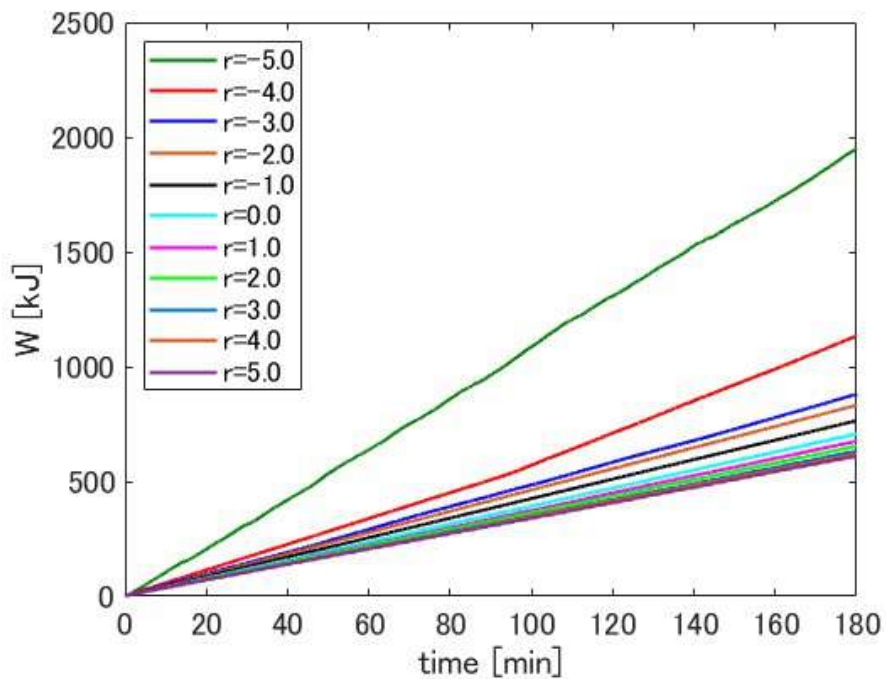


(b) スラストの回転強度に対するピーク消費電流を求める近似関数

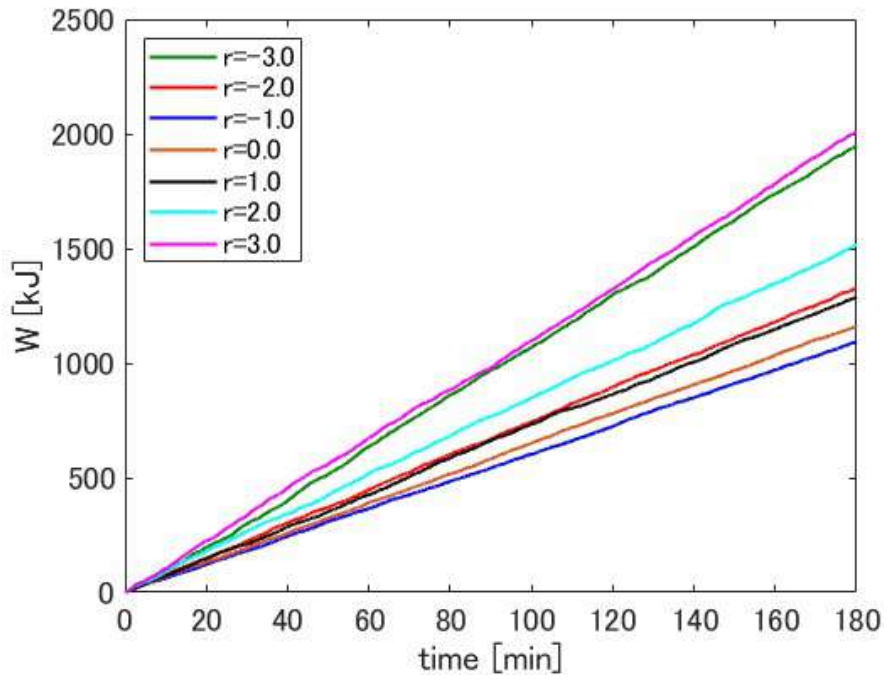
図 4.11: スラストの回転強度に対する消費電流計測実験結果と消費電流計算のための近似関数



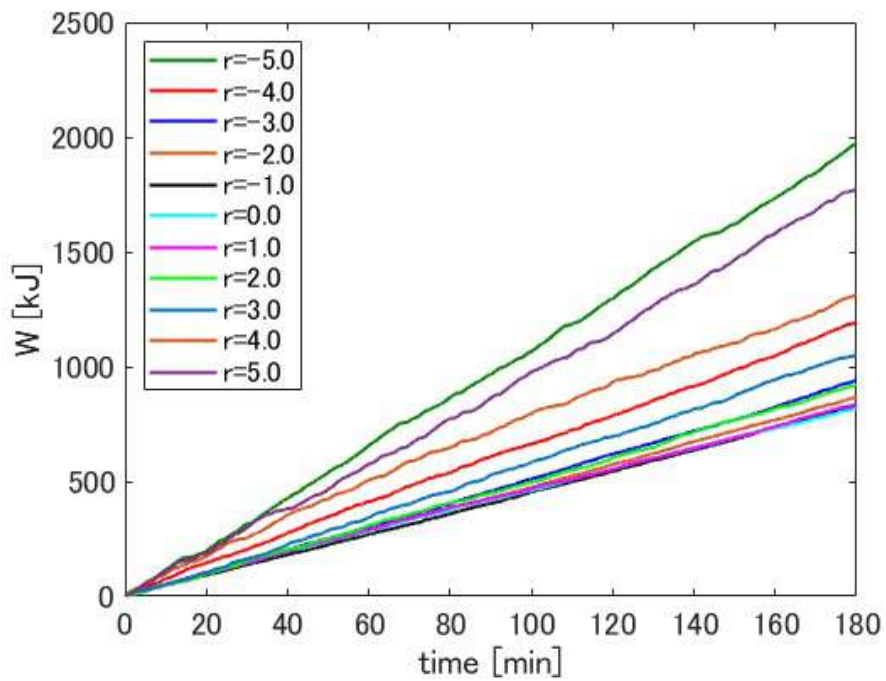
(a) パターン A, $d_{TA-TP} = 3.0$ m



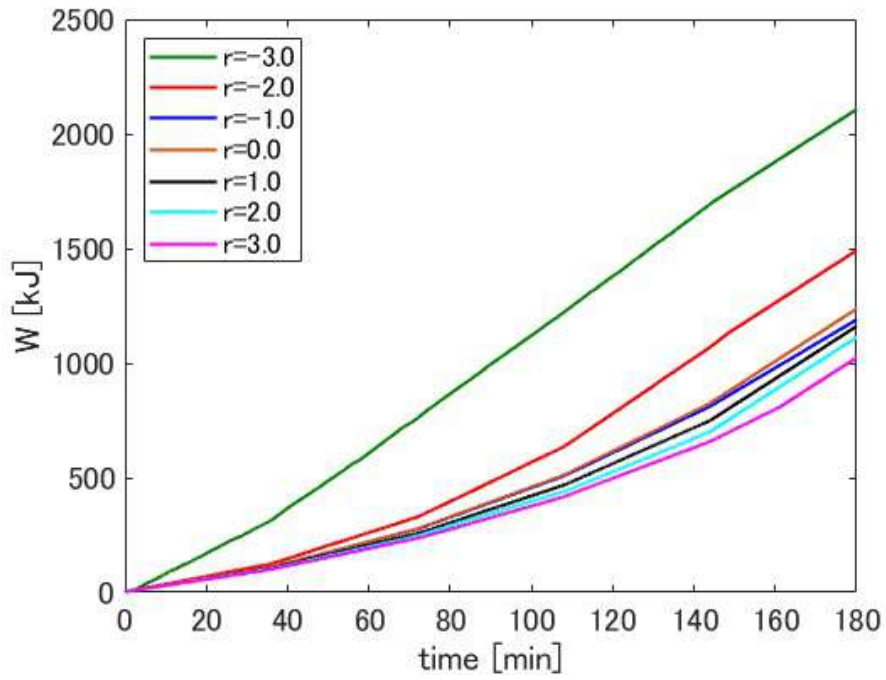
(b) パターン A, $d_{TA-TP} = 5.0$ m



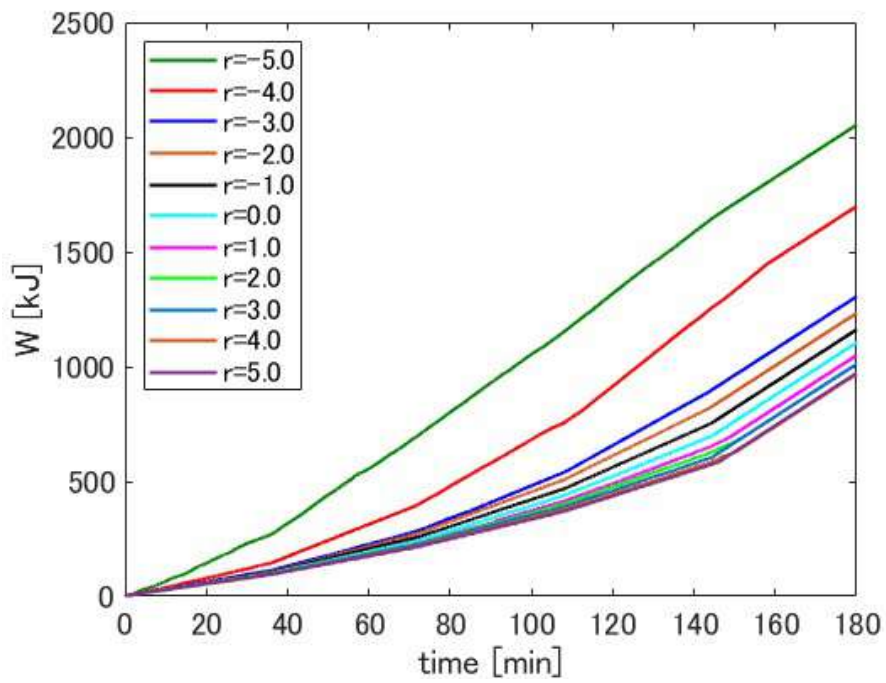
(c) パターン B, $d_{TA-TP} = 3.0$ m



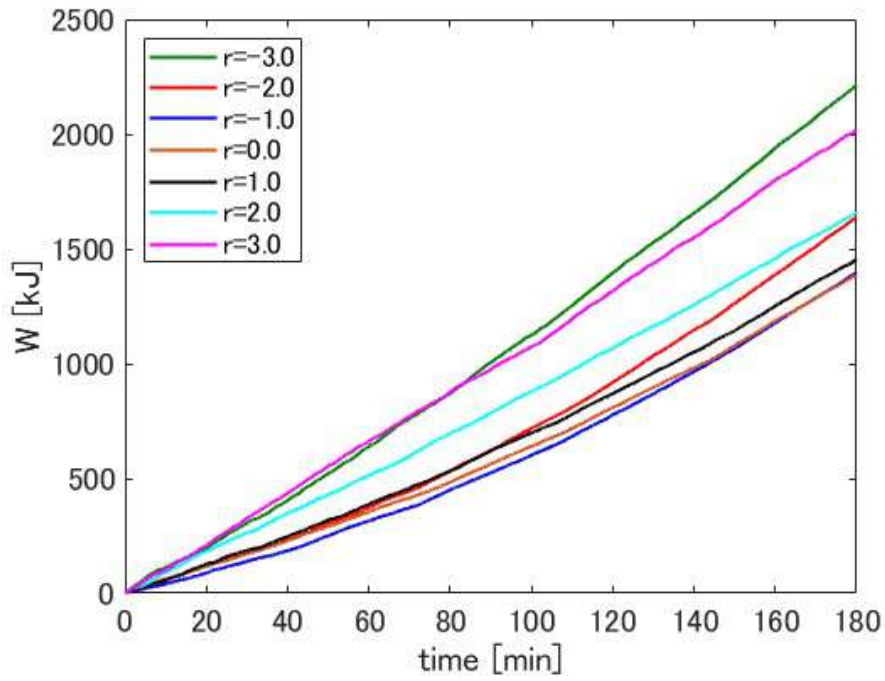
(d) パターン B, $d_{TA-TP} = 5.0$ m



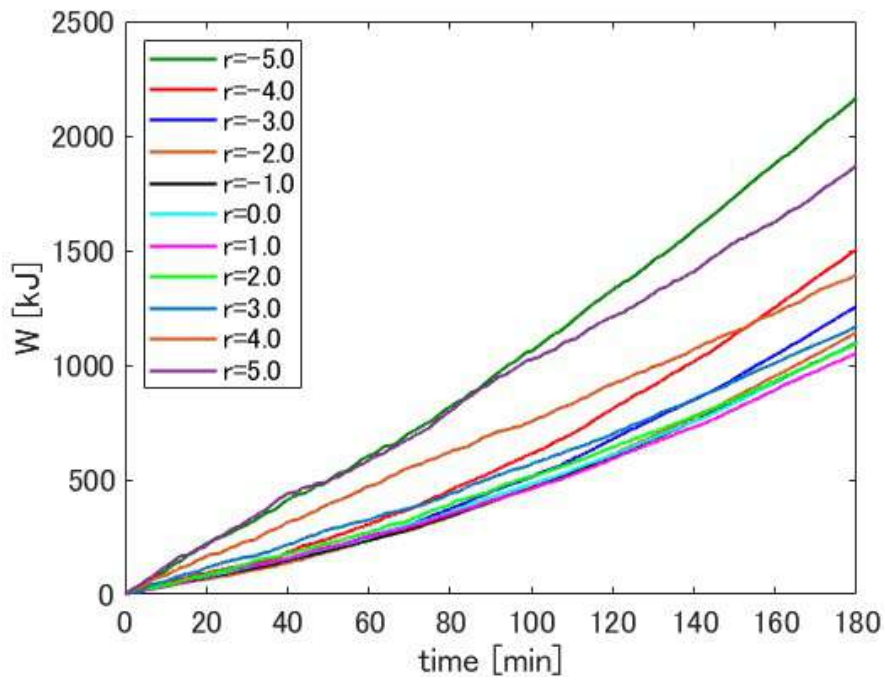
(e) パターン C, $d_{TA-TP} = 3.0$ m



(f) パターン C, $d_{TA-TP} = 5.0$ m

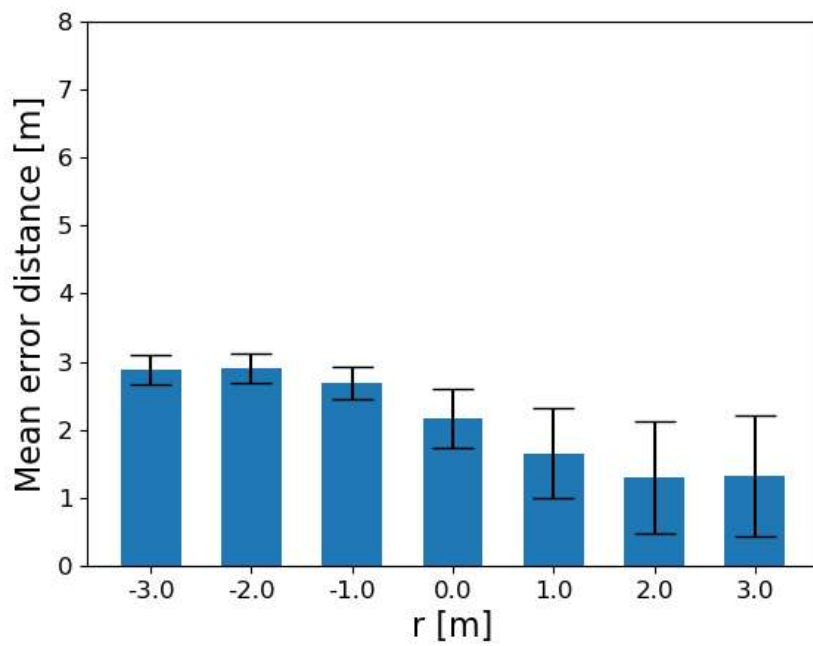


(g) パターン D, $d_{TA-TP} = 3.0$ m

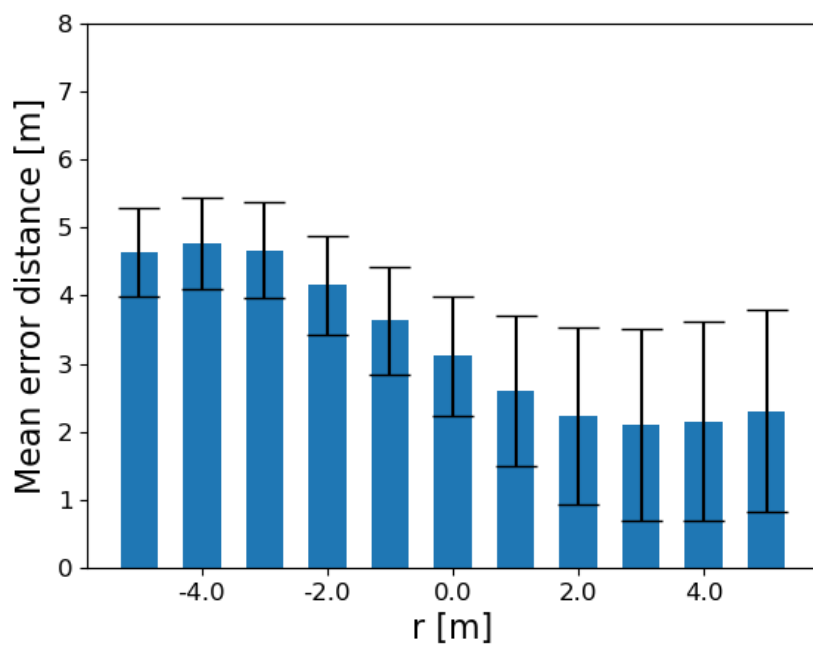


(h) パターン D, $d_{TA-TP} = 5.0$ m

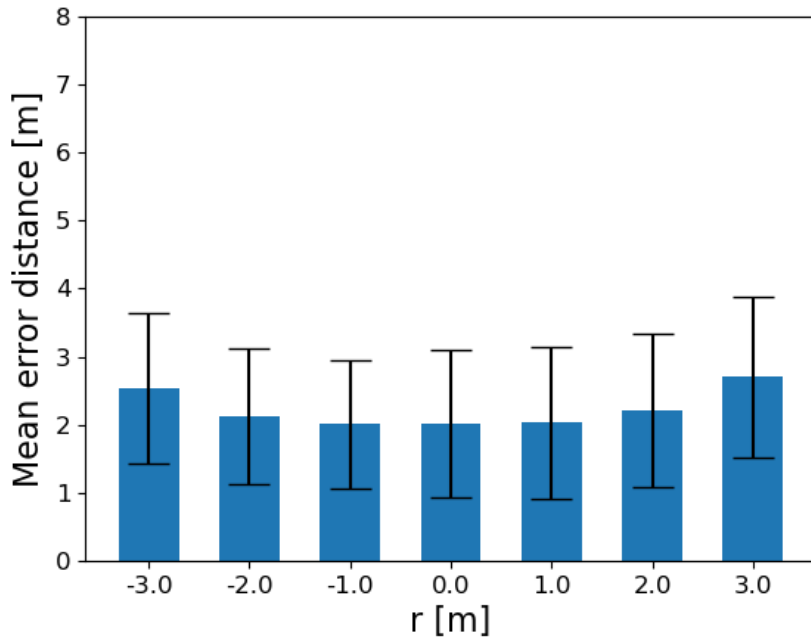
図 4.12: シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の消費電力



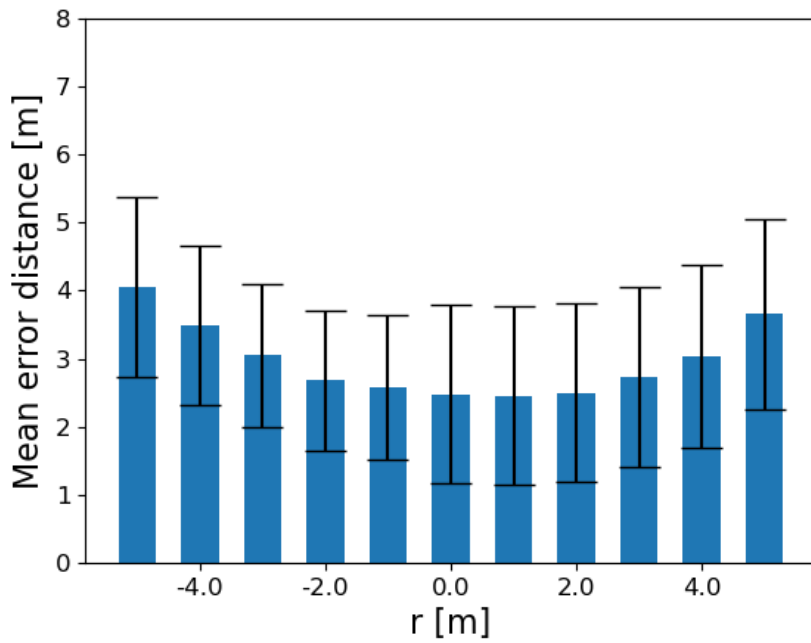
(a) パターン A, $d_{TA-TP} = 3.0$ m



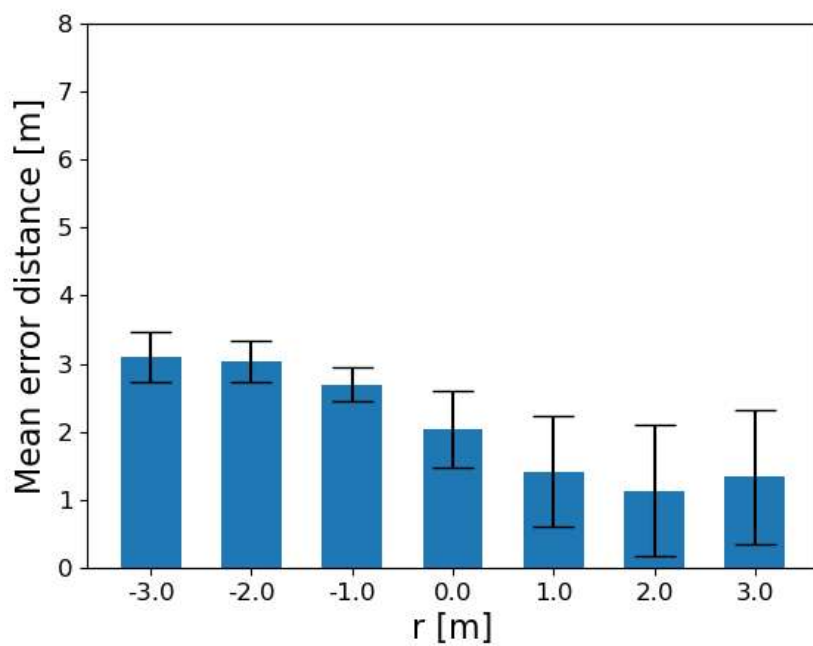
(b) パターン A, $d_{TA-TP} = 5.0$ m



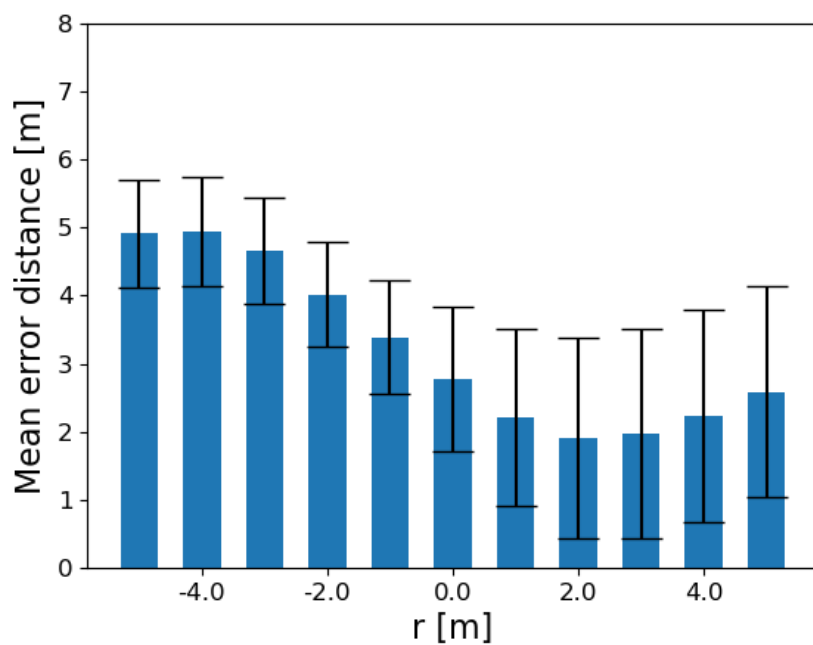
(c) パターン B, $d_{TA-TP} = 3.0$ m



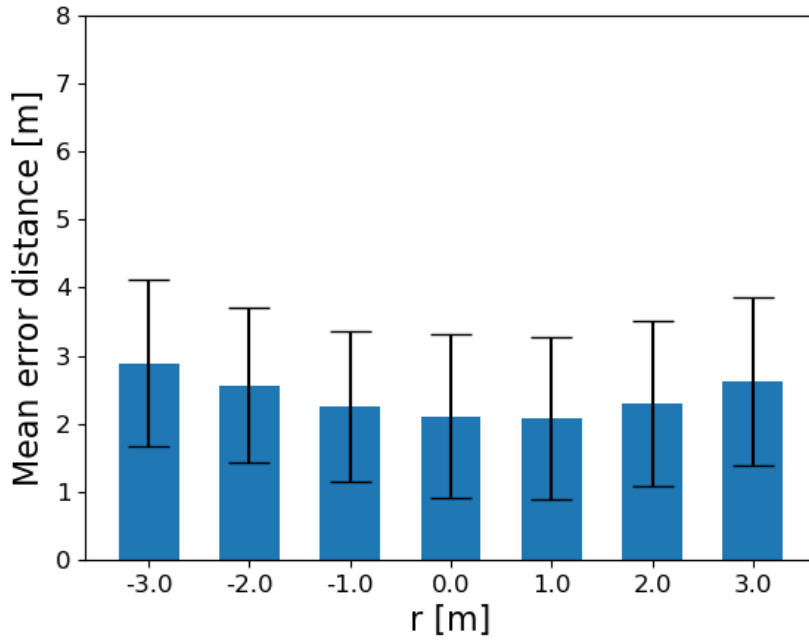
(d) パターン B, $d_{TA-TP} = 5.0$ m



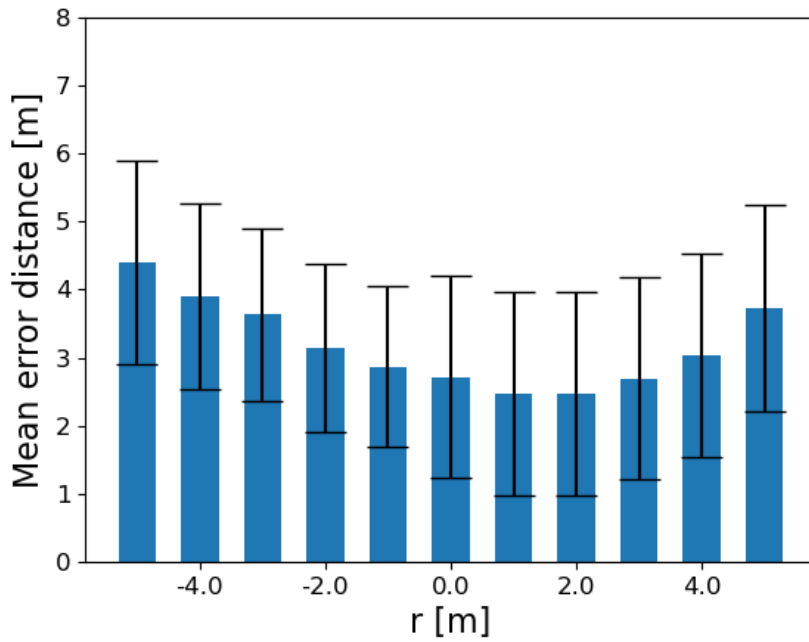
(e) パターン C, $d_{TA-TP} = 3.0$ m



(f) パターン C, $d_{TA-TP} = 5.0$ m



(g) パターン D, $d_{TA-TP} = 3.0$ m



(h) パターン D, $d_{TA-TP} = 5.0$ m

図 4.13: シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の平均誤差距離とその分散

第5章

複数地点の水上環境観測を目的とした複数地点巡回戦略の構築と評価

5.1 本章の概要

本章では、複数地点の環境観測を想定した複数の複数地点巡回移動戦略の構築と評価について述べる。水圏環境観測においては、定点観測と同様に複数地点を巡回しながら各地点においてそれぞれの環境を観測することが求められる。本章では、巡回時間間隔と巡回地点間距離を構成パラメータとして用いて、巡回時間間隔と巡回地点間距離の違いによる消費電力と水質観測精度の関係を評価する。シミュレーション実験では、実環境を模倣した環境を構築し、センシングデバイスを長期的に稼働させた場合の消費電力を評価した。実験の結果、巡回時間間隔、巡回地点間距離の違いが消費電力と観測精度に影響を与えることが明らかになった。

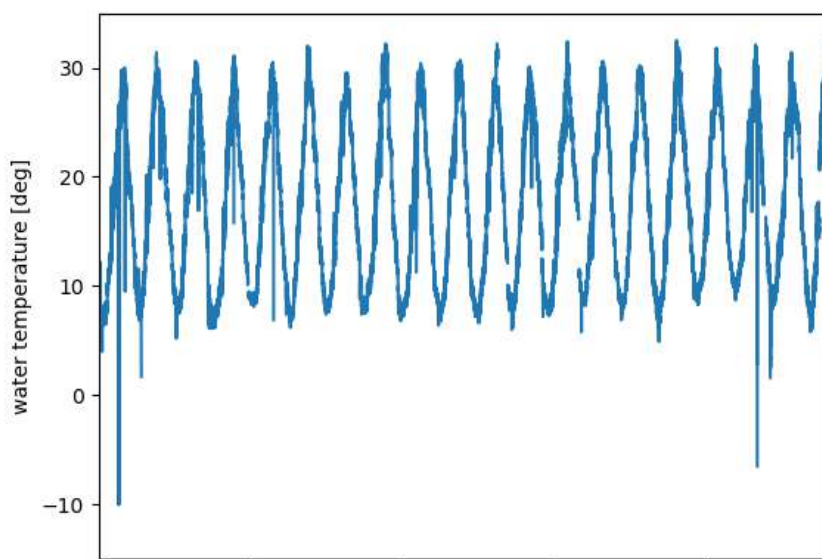


図 5.1: 2003 年 1 月から 2021 年 12 月の水温データ

5.2 巡回移動戦略

5.2.1 巡回時間間隔

巡回時間間隔は設定されている環境観測地点を訪れる時間間隔を表す。図 5.1 は琵琶湖の水文観測地点（琵琶湖大橋）にて 2003 年 1 月から 2021 年 12 月まで観測された水温データを表している（データの欠落や明確な計測失敗データも含まれている。）[50]。この水文観測地点では 1 時間に 1 回の観測周期で長期的に水質データを観測している。また、図 5.2 はその水文観測地点で観測されたある 1 か月の水温データを表している。図 5.1 から、水温が長期的な一定の周期で変化していることが確認でき、図 5.2 からは 24 時間の中で一定の周期で変化していることが確認できる。これらのデータから、水温データを観測する場合、センシングデバイスはある観測地点において、時間的に高い観測解像度は求められないと考えられる。そのため、ある観測地点においてセンシングデバイスは数分、数時間の単位でその地点まで移動すればよいことがわかる。

また、図 5.3 と図 5.4 は直近 5 年間の 2 月の水温データと 5 月の水温データを示している。2003 年から 2021 年までの水温データを分析すると、対象の観測地点では 2 月はひと月あたりの水温データの分散が最も小さく、対象期間の分散の平均値は 0.45 であった。

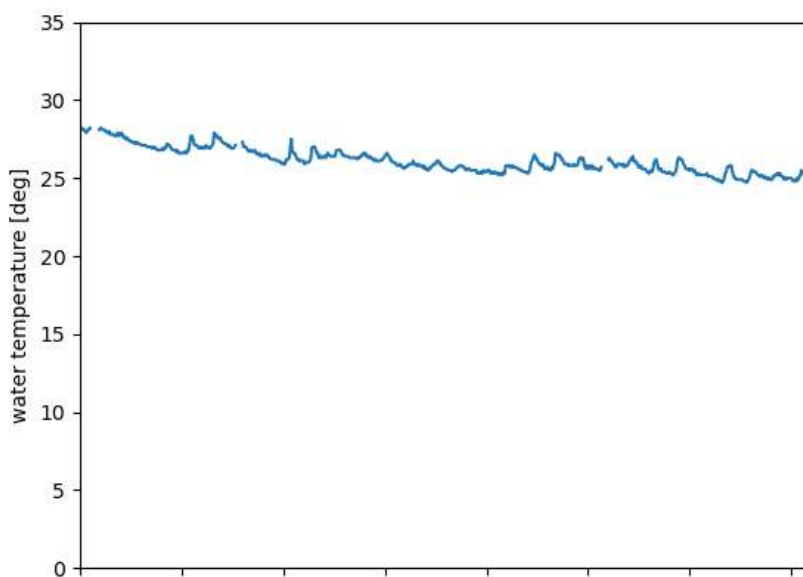


図 5.2: 1 か月間の水温データ変化の例 (2021 年 9 月)

一方、5 月はひと月あたりの水温データの分散が最も大きな値であり、対象期間の分散の平均値は 1.71 であった。このように月ごとに水温の変化に特性があり、変化が大きさに合わせて巡回時間間隔を調整する必要があると考えられる。

本章で構築する構成パラメータである巡回時間観測は、複数地点を巡回するにあたり、何時間に一度その地点を訪れるかを表す。巡回移動戦略では、巡回時間間隔を与え、ある地点について定められた周期でその地点を訪れ、次回にその地点を訪れるまでの時間は待機地点にて、定点維持し続ける。通常、待機時の消費電力と比較して移動時消費電力の方が大きくなると想定できるため、この巡回移動戦略を適用すると巡回時間間隔が短い戦略は水質データの観測解像度が上がる一方、消費電力が大きくなることが予想される。

5.2.2 巡回地点間距離

巡回地点は緯度・経度データを用いて、あらかじめセンシングデバイスに与える。本論文における巡回地点は一定の距離を隔てた四方を描くような巡回地点を与える。通常、巡回地点間の距離が長くなるにつれて、1 サイクルの巡回距離、巡回時間が長くなるため、電力の消費が激しくなると考えられる。1 サイクルの電力消費が大きくなるにつれて、待機時に消費する電力差が大きくなるため、単位時間当たりの巡回回数を減らすことで効率的に巡回できることができると考えられる。

表 5.1: シミュレーションパターン

自己位置推定誤差	x 軸, y 軸方向外乱強度 (m/sec)	外乱変更間隔 (min)
あり/なし	-0.1 ~0.1	15

表 5.2: 巡回移動戦略パラメータ

巡回時間間隔 (h)	巡回地点間距離 (m)	巡回時定点維持時間 (min)
0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0	30, 100	5

表 5.3: 巡回地点間隔 30 m, 自己位置推定誤差がない場合のシミュレーション実験結果

巡回時間間隔 (h)	平均消費電力 (kJ)
0.5	6051.76
1.0	5600.00
2.0	5386.58
3.0	5288.85
4.0	5240.66
6.0	5189.65
8.0	5182.05

表 5.4: 巡回地点間隔 30 m, 自己位置推定誤差がある場合のシミュレーション実験結果

巡回時間間隔 (h)	平均消費電力 (kJ)
0.5	7320.84
1.0	6428.41
2.0	6023.98
3.0	5784.71
4.0	5730.12
6.0	5690.54
8.0	5634.50

表 5.5: 巡回地点間隔 100 m, 自己位置推定誤差がない場合のシミュレーション実験結果

巡回時間間隔 (h)	平均消費電力 (kJ)
0.5	10625.80
1.0	7397.13
2.0	7160.71
3.0	6261.26
4.0	6338.91
6.0	6000.03
8.0	5880.59

表 5.6: 巡回地点間隔 100 m, 自己位置推定誤差がある場合のシミュレーション実験結果

巡回時間間隔 (h)	平均消費電力 (kJ)
0.5	11936.14
1.0	8267.31
2.0	6505.65
3.0	6822.02
4.0	5928.76
6.0	6517.38
8.0	6451.05

5.3 シミュレーション実験

5.3.1 実験条件

シミュレーション実験では, 3 章, 4 章で実施したシミュレーションと同様に複数のパラメータを与えたシミュレーション環境でそれぞれの戦略を比較する. 表 5.1 は本実験で検証するシミュレーションパターンについて示している. 本シミュレーション実験では自己位置推定誤差と外乱状況を与える. 自己位置推定誤差は 3 章, 4 章のシミュレーション実験でも用いたモデルに従って, 誤差が与えられる.

一方, 外乱状況は一定時間ごとにランダムで変化するように与える. 本シミュレーション実験では, 実時間で 24 時間のシミュレーションを与えるため, 実際の環境を考慮して一定時間が経過すると外乱方向と外乱強度が変化する外乱を与えるようにする. 世界座標

系における x 軸方向, y 軸方向にそれぞれ $-0.1 \leq x_d \leq 0.1$, $-0.1 \leq y_d \leq 0.1$ の範囲でランダムで単位時間ごとに決定される. 本実験では, 実時間で 15 分に 1 回の時間間隔で外乱方向と外乱強度が変化する.

表 5.2 は本実験で検証する戦略パターンを示している. 本実験では, 巡回時間間隔として 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0 時間の 7 パターンの時間間隔を与え, 巡回時間間隔が消費電力に与える影響について考察する. また, 観測地点として正方形を描く 4 点の地点を設け, 地点間の距離を巡回地点間距離として, 30, 100 m の 2 パターンの距離を与えることで, 巡回地点間の距離が消費電力に与える影響についても検証する.

それぞれの観測地点では環境データ観測時間として 5 分与え, その時間はそれぞれの観測地点で定点維持する. その際の定点維持戦略は許容誤差範囲 3 m, 移動アプローチには Simple ポリシーを適用している. また, 待機時の定点維持戦略は許容誤差範囲 10 m, 移動アプローチには Simple ポリシーを適用している.

図 5.5 はシミュレーション環境を示している. シミュレーション実施ごとに外乱条件がランダムで設定されるため, それぞれのシミュレーションパターンにおいて, それぞれの戦略は 10 回ずつ試行し, それぞれの実験で得た消費電力の平均値を評価する.

5.3.2 実験結果

図 5.6, 図 5.7, 図 5.8, 図 5.9 はセンシングデバイスにそれぞれの戦略を与えたときの消費電力グラフの例を表している。図 5.6, 図 5.7, 図 5.8, 図 5.9 において、赤色の破線は外乱強度を表している。また、表 5.3, 表 5.4, 表 5.5, 表 5.6 はシミュレーション実験におけるそれぞれの戦略を構成する巡回時間間隔ごとの平均消費電力を表している。

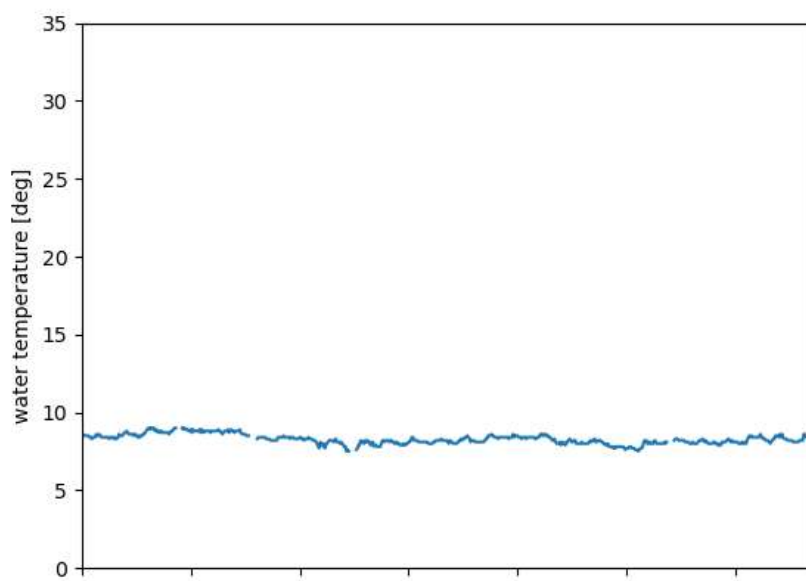
実験の結果、巡回時間間隔の観点では、巡回地点間距離に関わらず時間間隔が短いほど消費電力が大きくなることが確認できる。この結果は待機時の消費電力と比較して、移動時の消費電力が大きいことを表している。一方、表 5.3, 表 5.4, 表 5.5, 表 5.6 から、実験結果から巡回地点間距離に関わらず、時間間隔が長くなるにつれて消費電力の変化が小さくなることが確認された。この結果は巡回時間間隔が長くなるにつれて巡回回数の変化の差が小さくなることに起因している。

表 5.3, 表 5.4, 表 5.5, 表 5.6 から、巡回地点間距離の観点では、距離が短いほど消費電力が小さいことが確認できる。この結果は上述した通り、移動時の消費電力が待機時の消費電力と比較して大きいことを表している。また、移動時の消費電力が待機時の消費電力と比較して大きいため、巡回地点間距離が短いほど、巡回時間間隔の影響を受けづらくなることも確認できる。

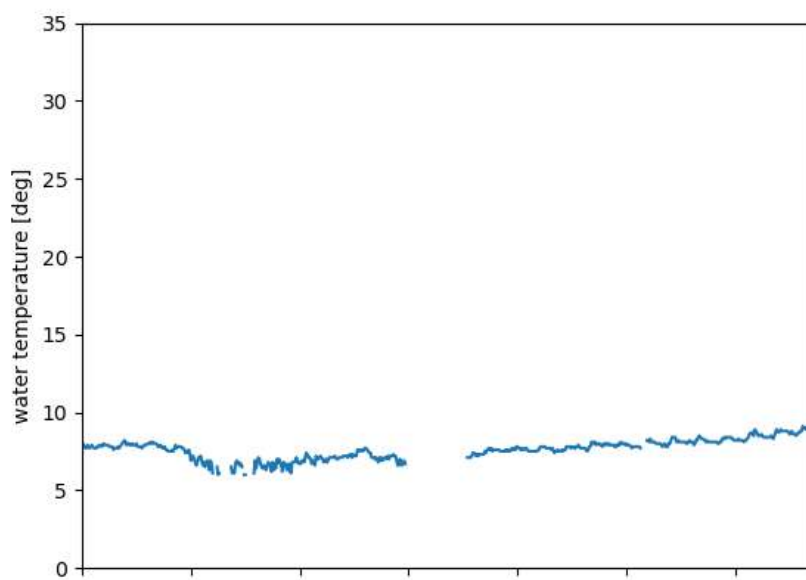
これらの結果から、巡回地点間距離が長い場合は移動距離が長くなり、移動時の消費電力が大きくなるため、長期的な稼働を想定すると、環境観測の時間的解像度を抑制し、巡回時間間隔を長く設定する必要がある。一方、巡回地点間距離が短い場合は移動時の消費電力の変化が小さいため、巡回時間間隔を短く設定し、ある観測地点における観測の時間的解像度を高めることが期待できる。

5.4 本章のまとめ

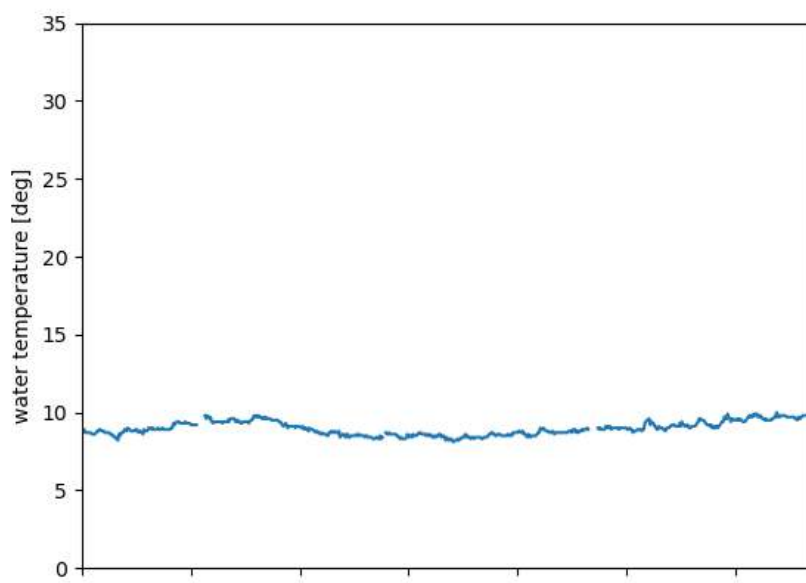
本章では、複数地点の環境観測地点を巡回観測するシナリオを想定した巡回移動戦略を構築し、シミュレーション実験において巡回時間間隔と巡回地点間距離が異なる移動戦略を評価した。巡回移動時に消費される電力は定点維持時に消費される電力と比較して大きいため、巡回地点間距離が長い場合、巡回時間間隔の影響を受けやすく時間間隔が短いほど消費電力が大きくなりやすいことが確認された。一方、巡回地点間距離が短い場合、巡回時間間隔の影響を受けづらいため観測解像度を上げるために巡回時間間隔を短くすることが可能である。また、巡回時間間隔が長くなるにつれて、消費電力の変化が小さくなることを確認された。



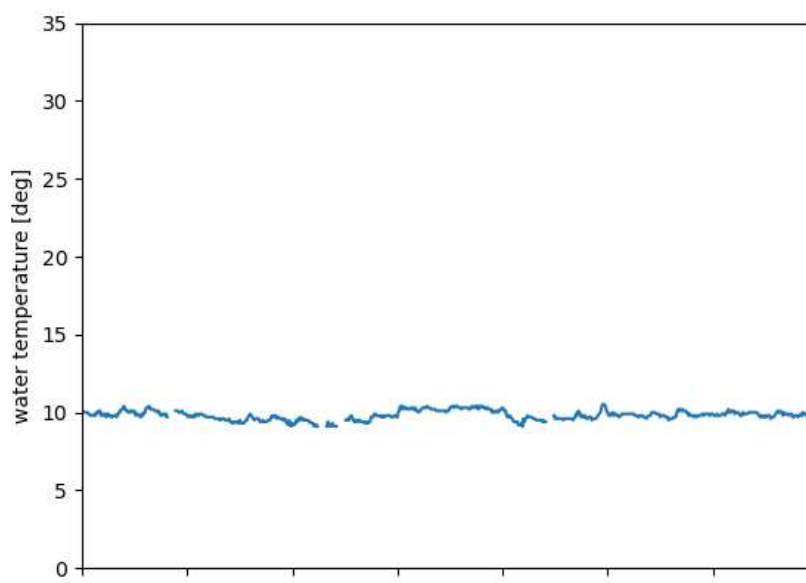
(a) 2017 年 2 月の水温データ



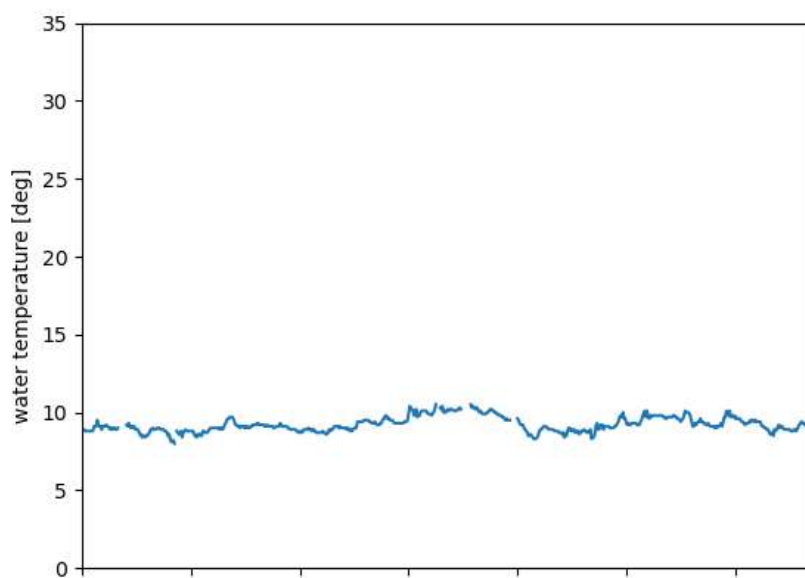
(b) 2018 年 2 月の水温データ



(c) 2019 年 2 月の水温データ

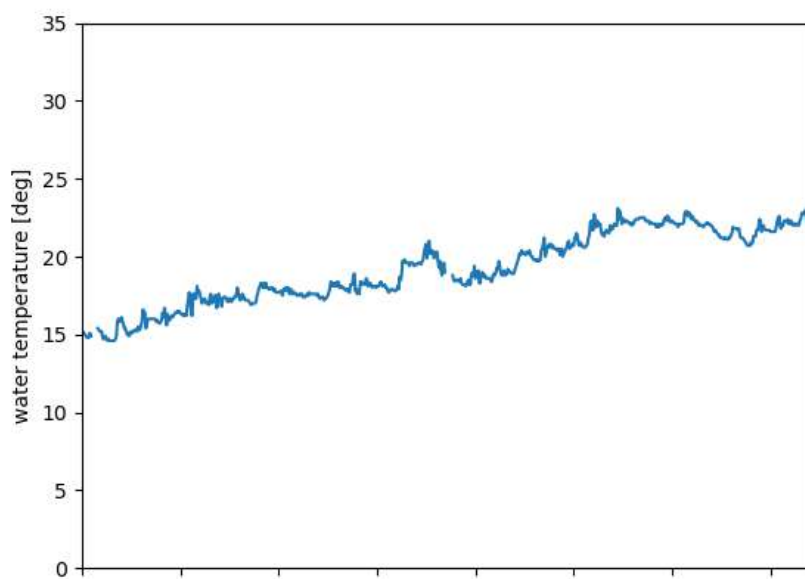


(d) 2020 年 2 月の水温データ

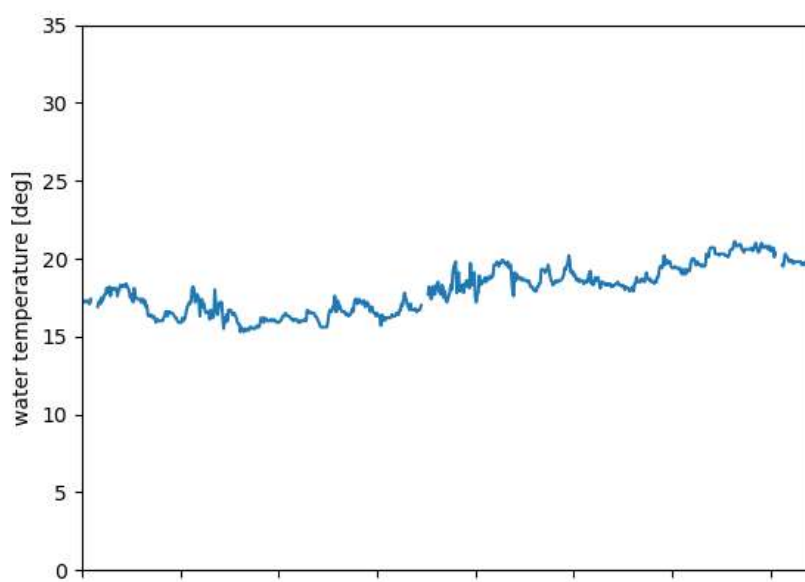


(e) 2021 年 2 月の水温データ

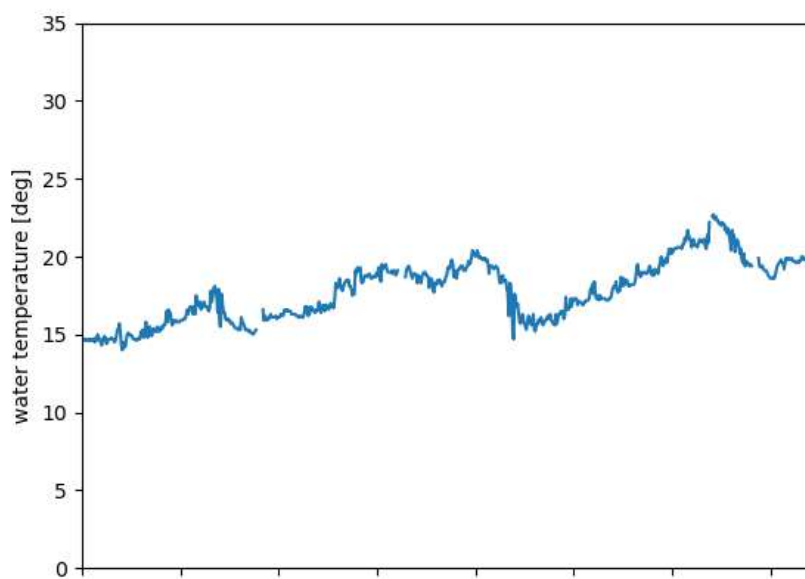
図 5.3: 2017 年～2021 年の各年における 2 月の水温データ



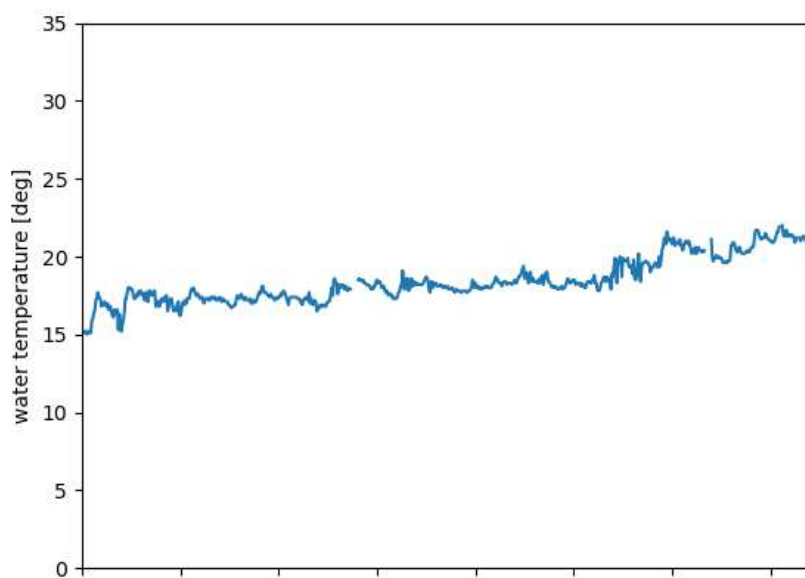
(a) 2017 年 5 月の水温データ



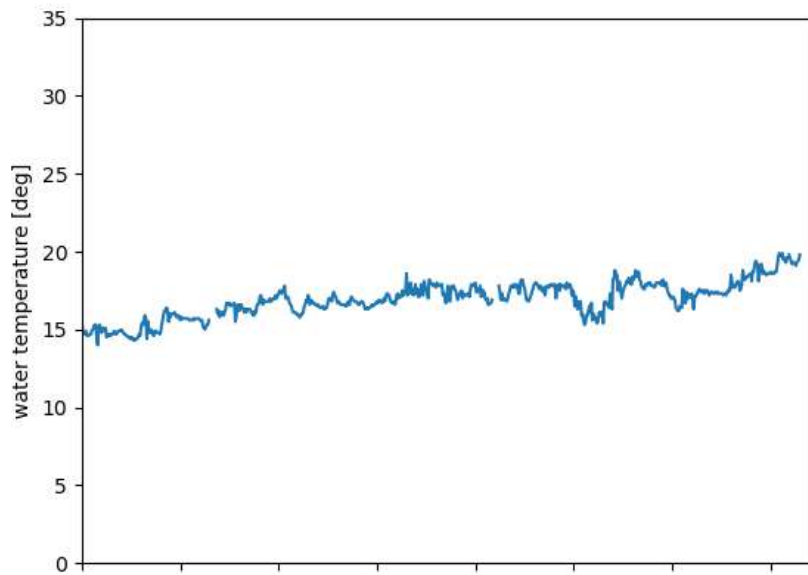
(b) 2018 年 5 月の水温データ



(c) 2019 年 5 月の水温データ



(d) 2020 年 5 月の水温データ



(e) 2021 年 5 月の水温データ

図 5.4: 2017 年～2021 年の各年における 5 月の水温データ

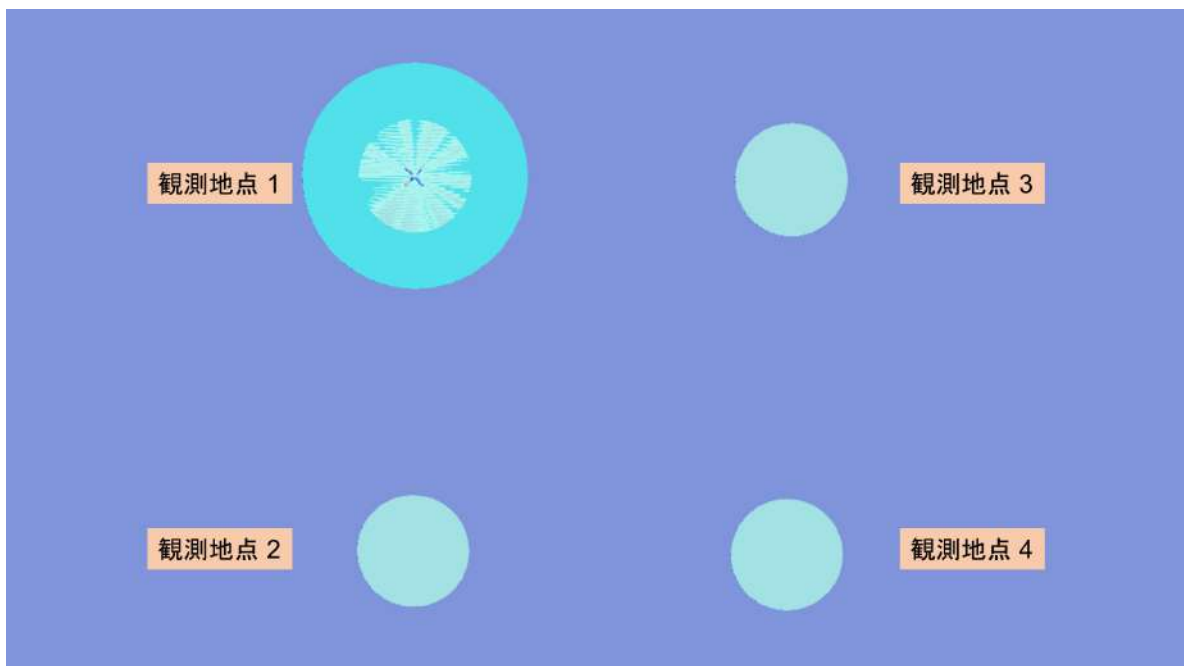
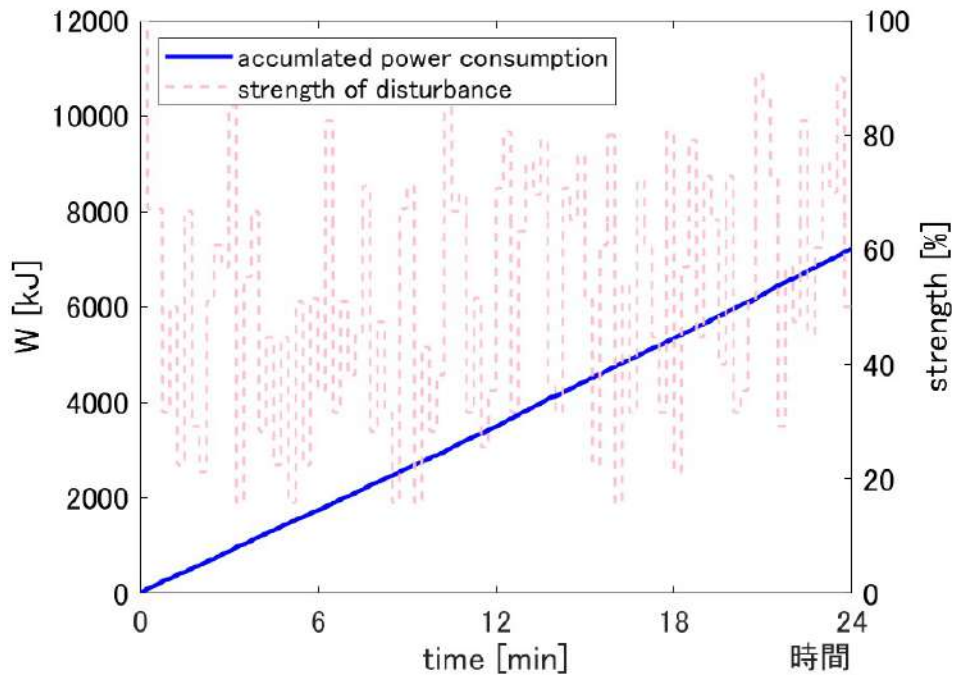
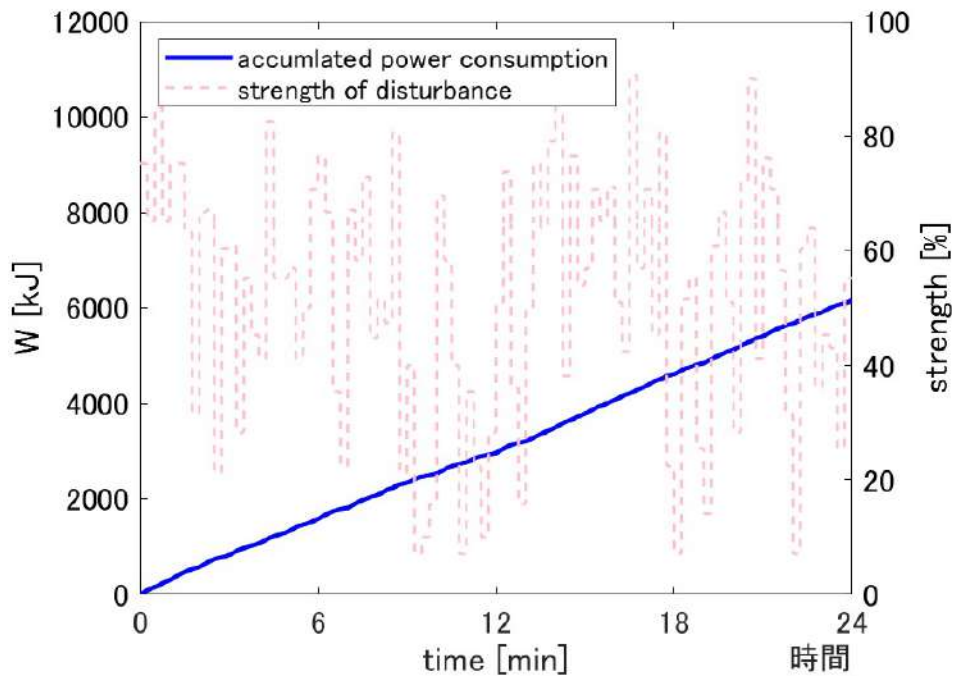


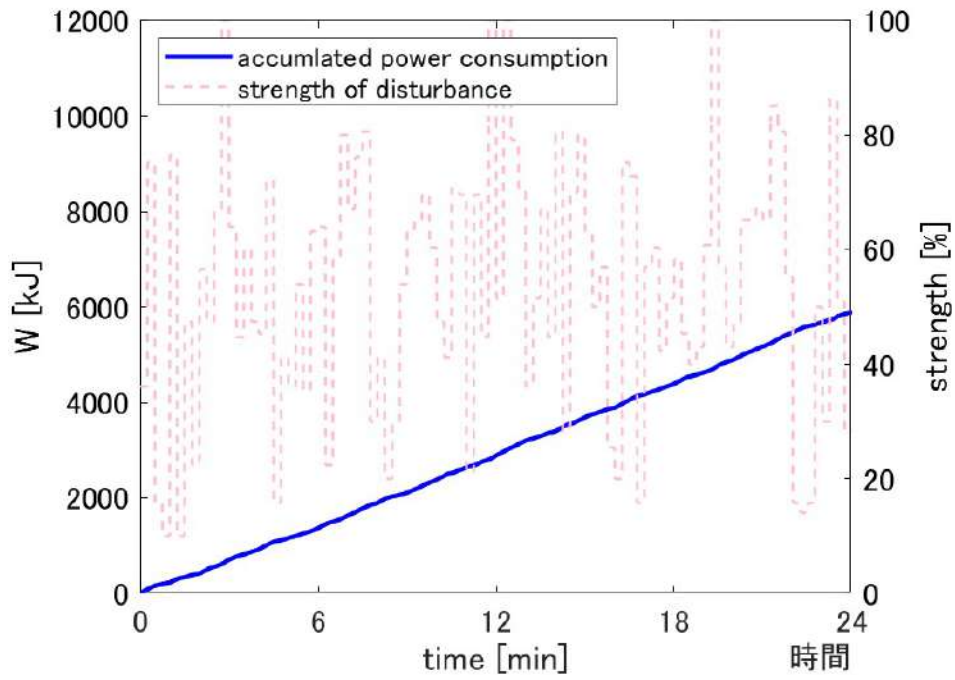
図 5.5: 巡回移動戦略を評価するシミュレーション環境



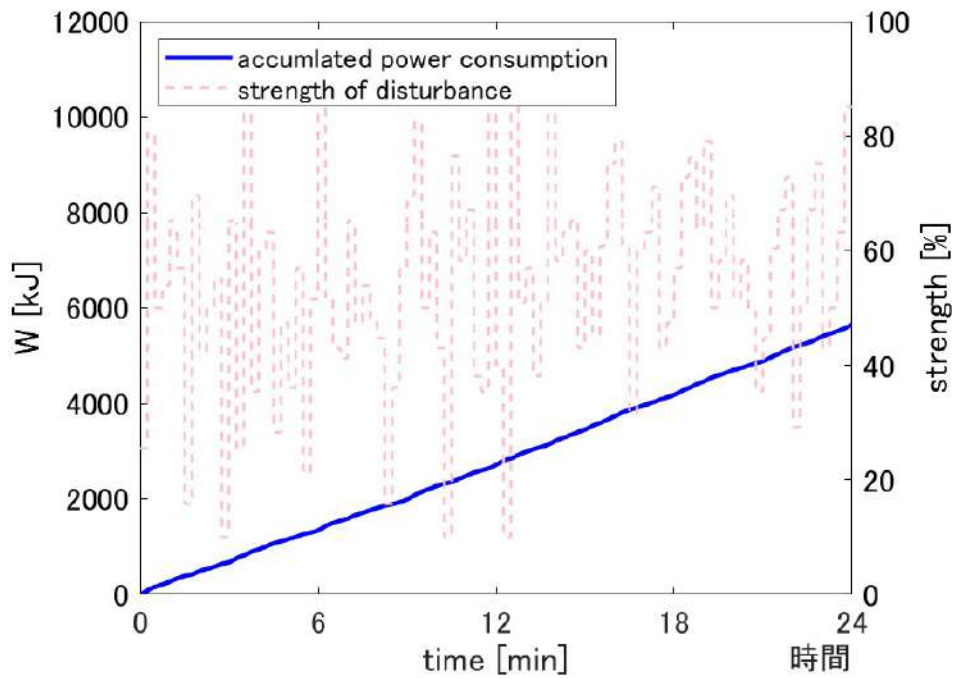
(a) 巡回時間間隔: 0.5 時間



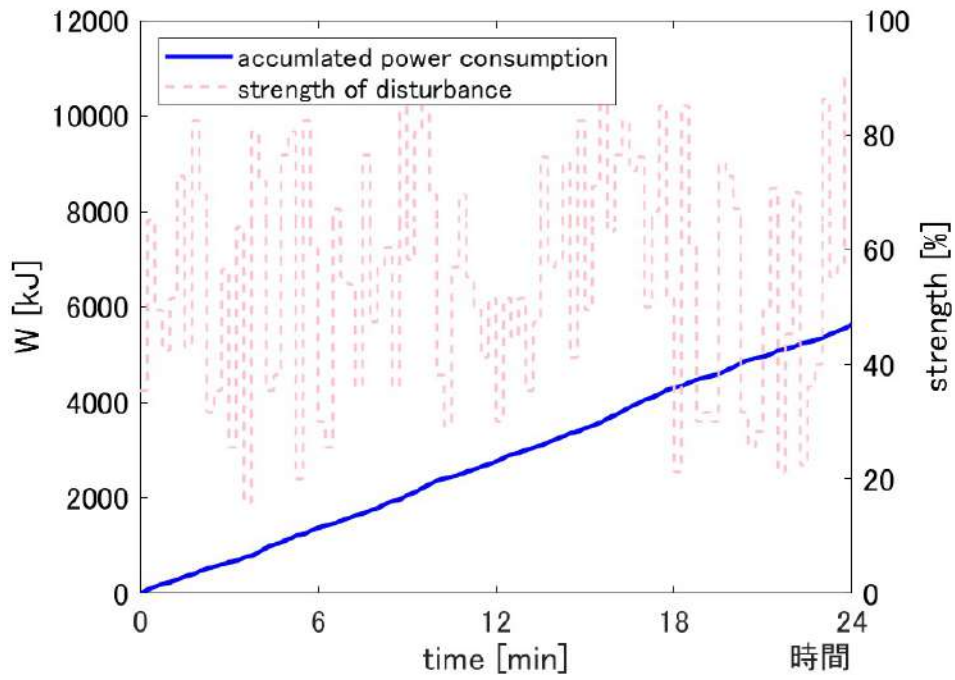
(b) 巡回時間間隔: 1.0 時間



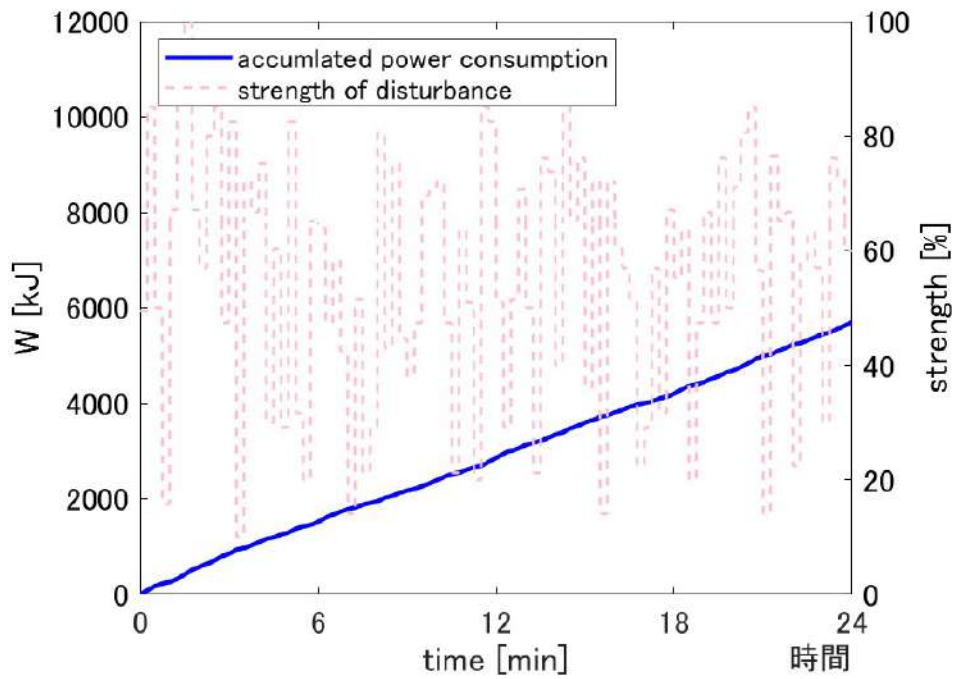
(c) 巡回時間間隔: 2.0 時間



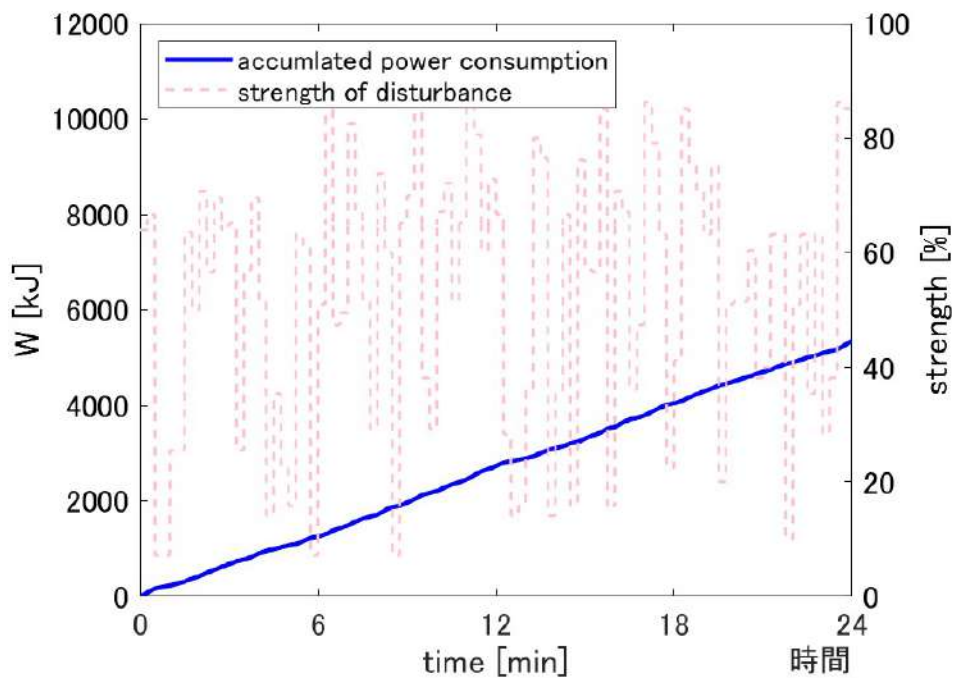
(d) 巡回時間間隔: 3.0 時間



(e) 巡回時間間隔: 4.0 時間

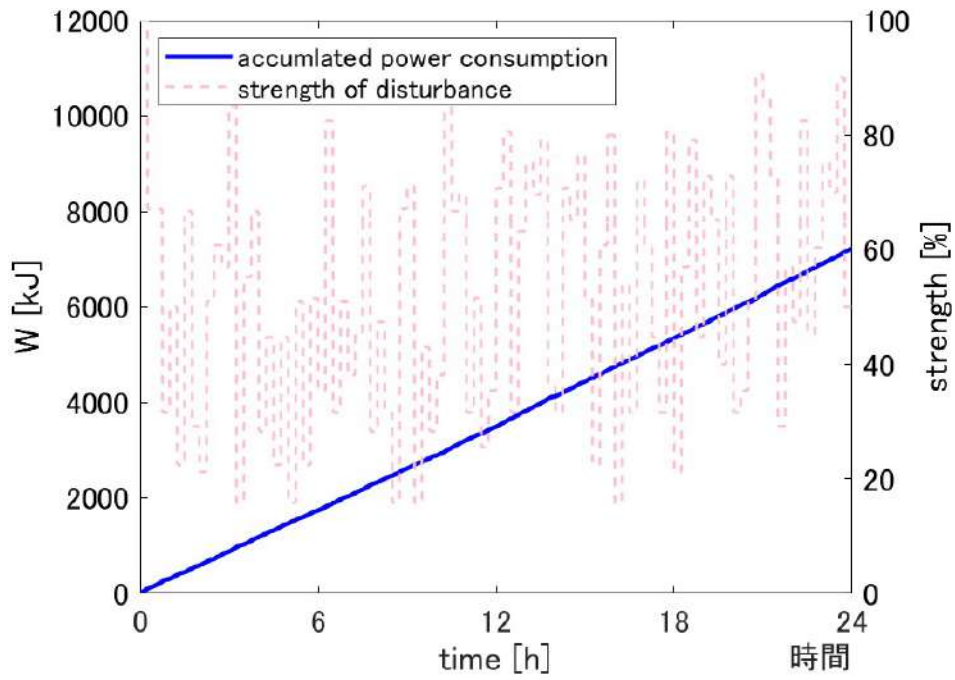


(f) 巡回時間間隔: 6.0 時間

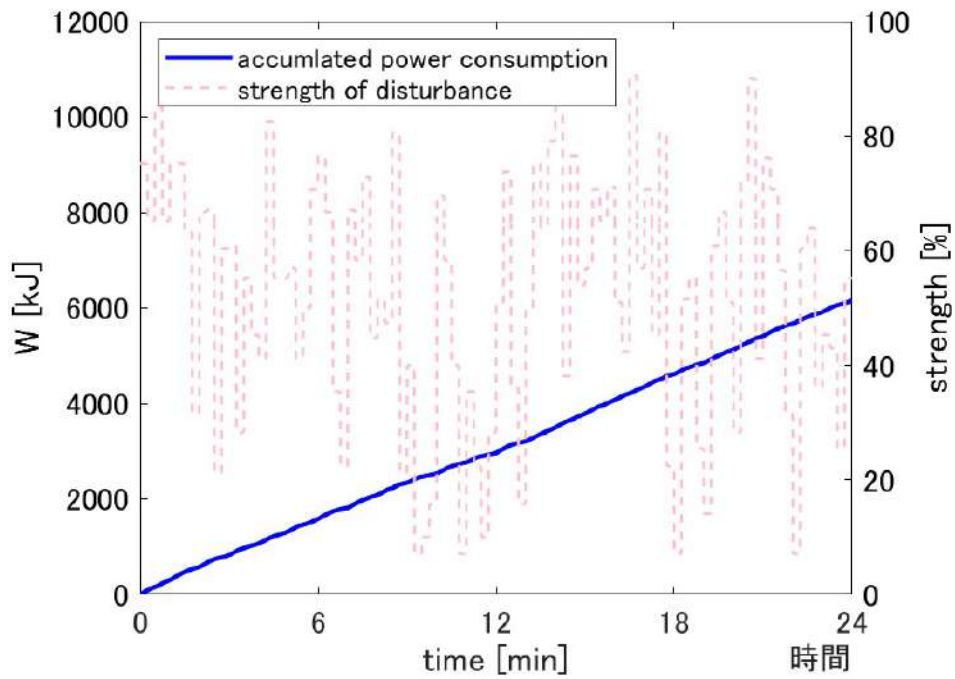


(g) 巡回時間間隔: 8.0 時間

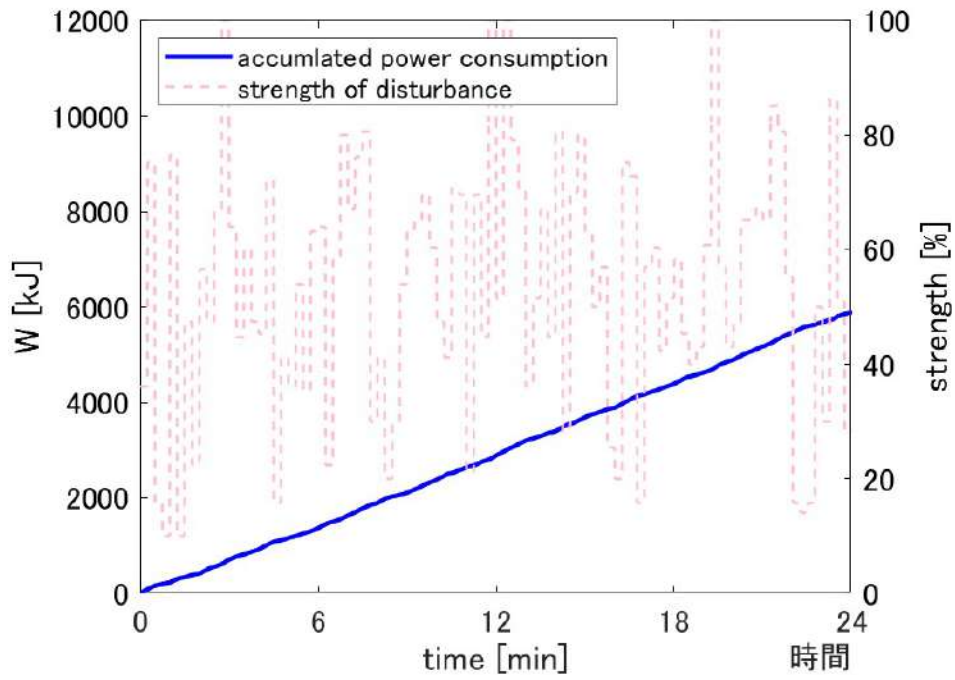
図 5.6: 巡回地点間距離 30 m, シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の消費電力グラフ例 (自己位置推定誤差なし)



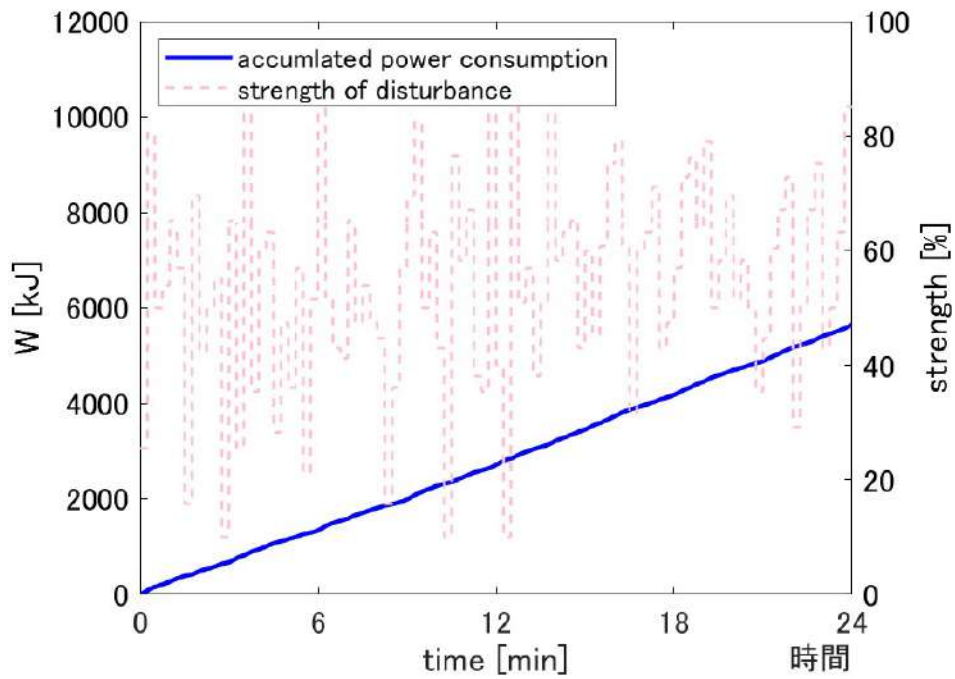
(a) 巡回時間間隔: 0.5 時間



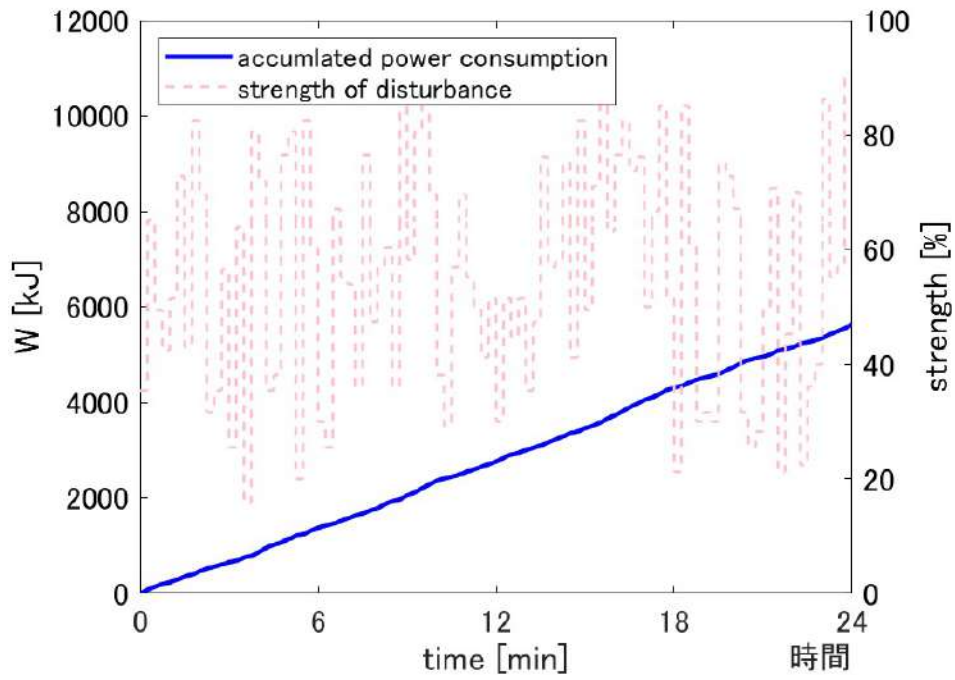
(b) 巡回時間間隔: 1.0 時間



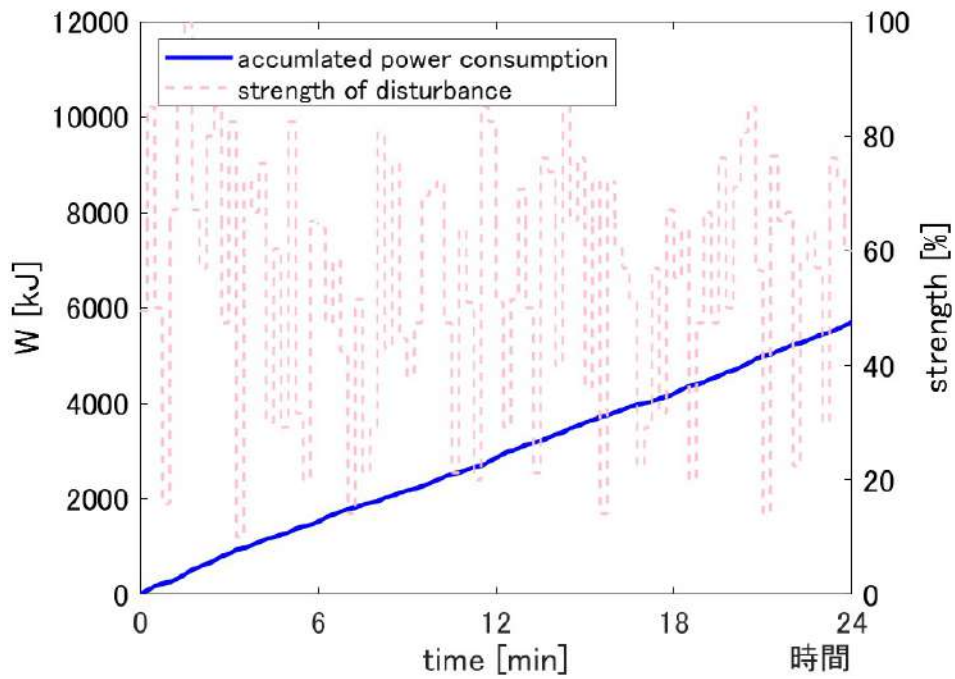
(c) 巡回時間間隔: 2.0 時間



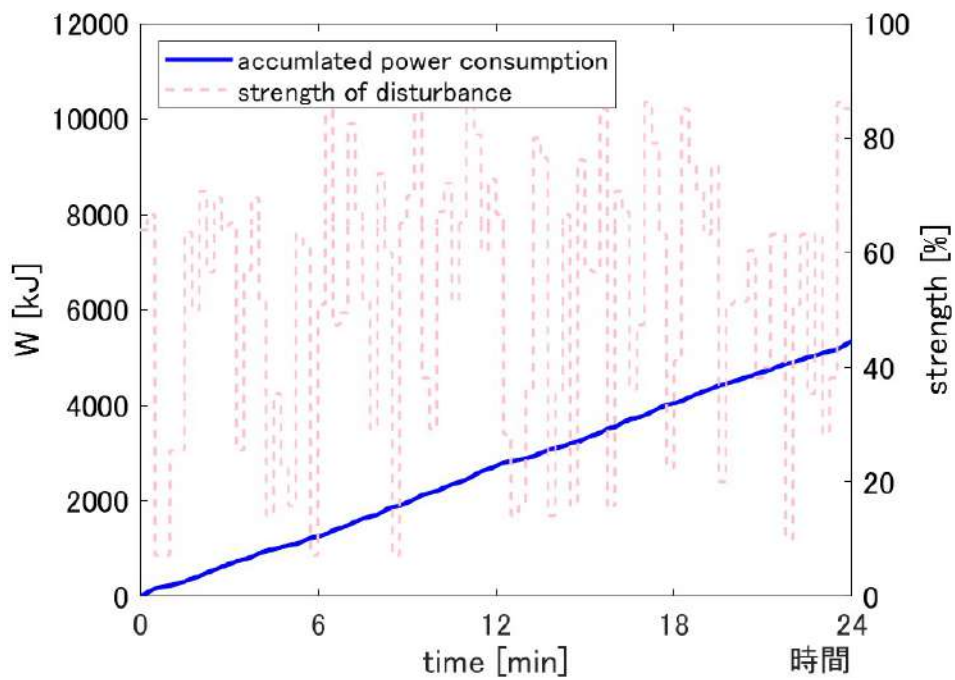
(d) 巡回時間間隔: 3.0 時間



(e) 巡回時間間隔: 4.0 時間

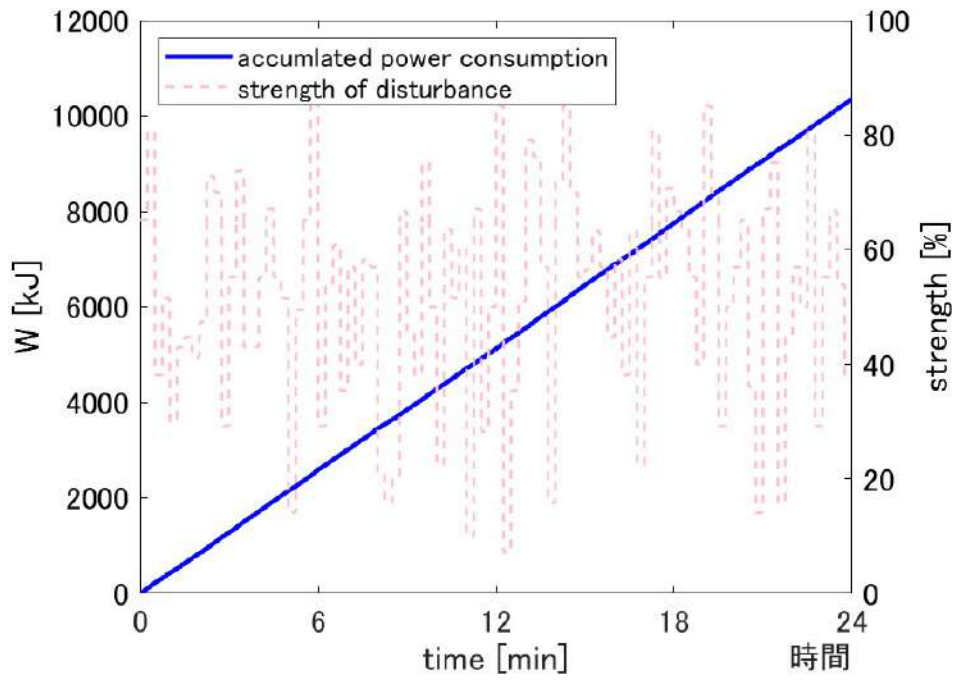


(f) 巡回時間間隔: 6.0 時間

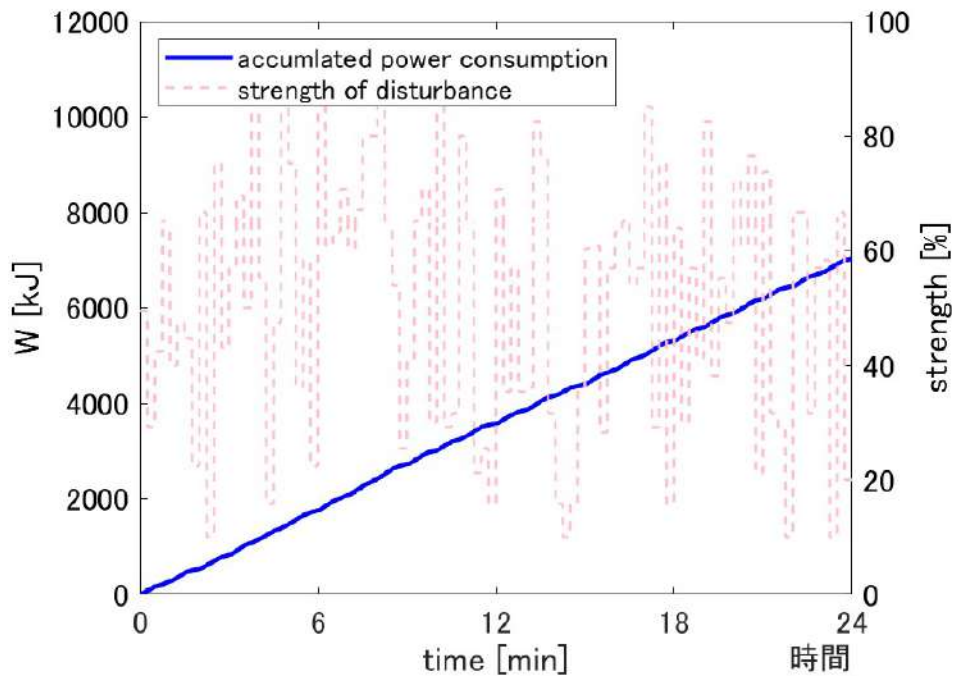


(g) 巡回時間間隔: 8.0 時間

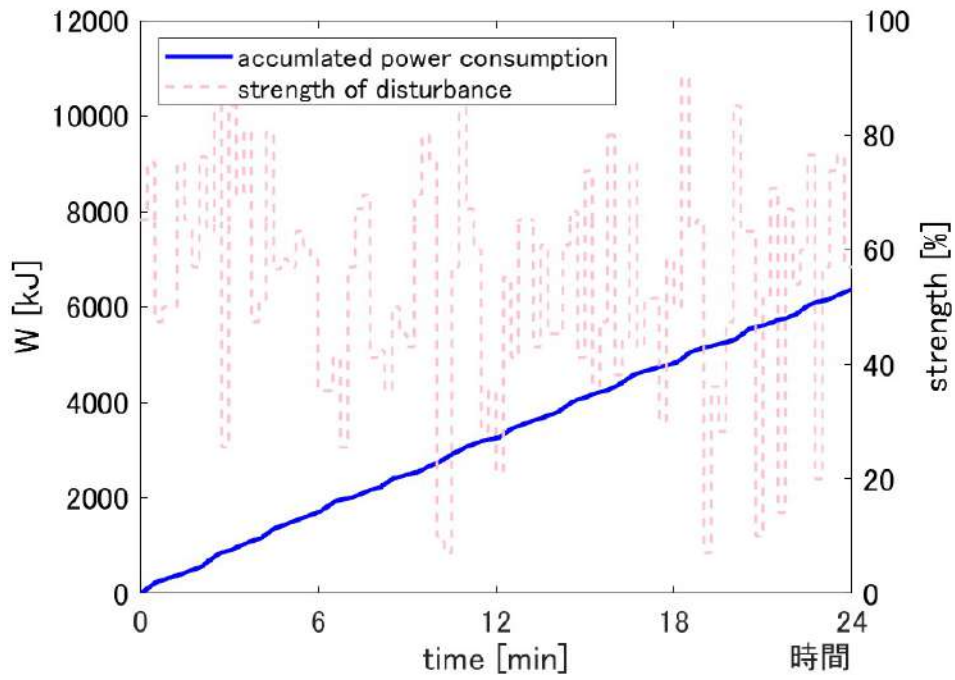
図 5.7: 巡回地点間距離 30 m, シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の消費電力グラフ例 (自己位置推定誤差あり)



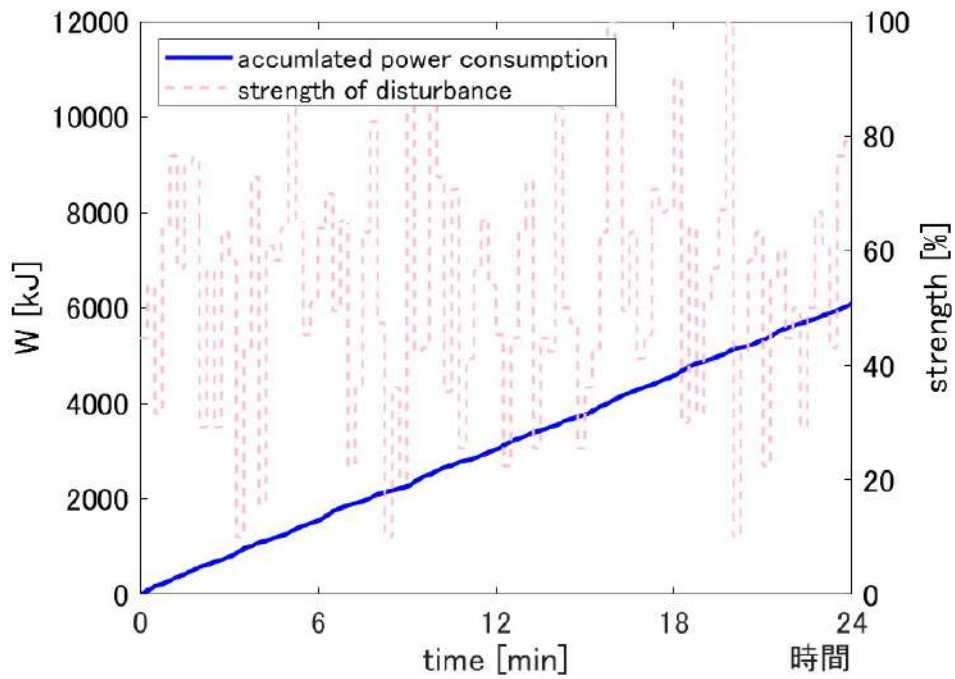
(a) 巡回時間間隔: 0.5 時間



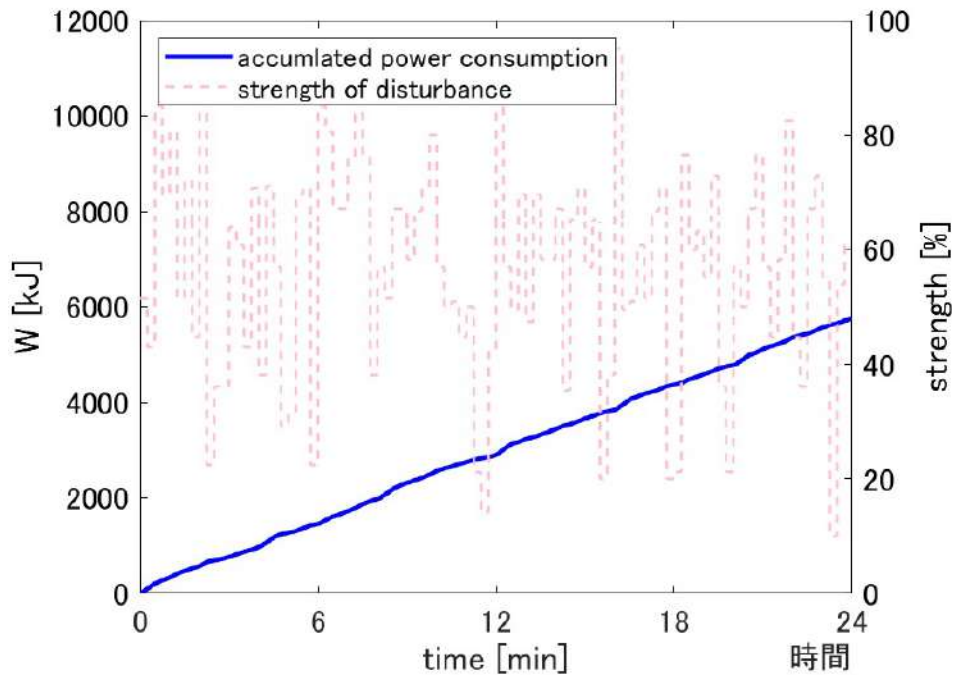
(b) 巡回時間間隔: 1.0 時間



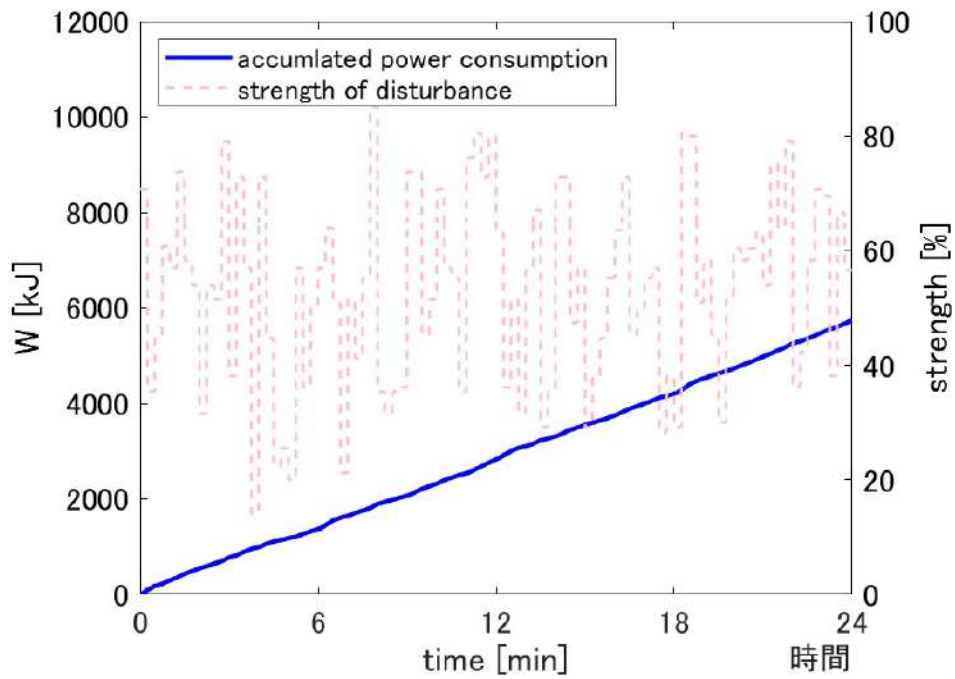
(c) 巡回時間間隔: 2.0 時間



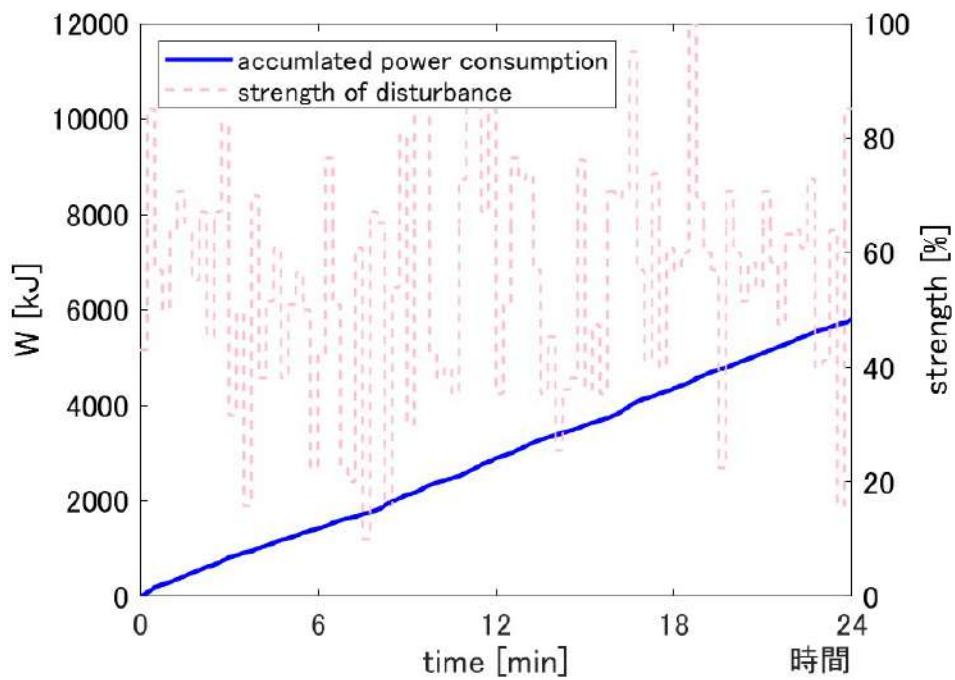
(d) 巡回時間間隔: 3.0 時間



(e) 巡回時間間隔: 4.0 時間

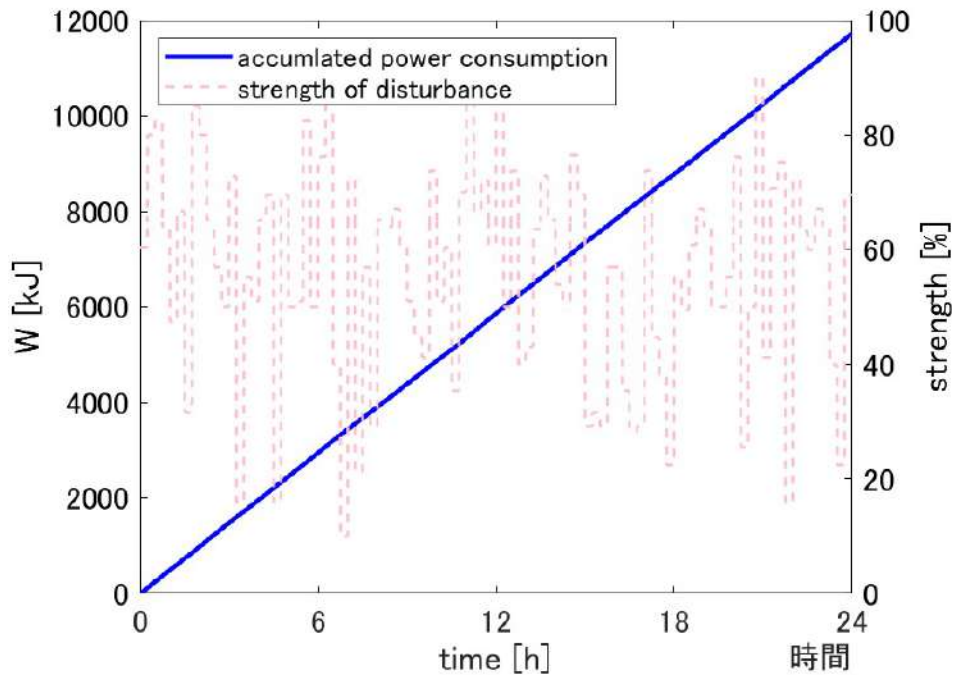


(f) 巡回時間間隔: 6.0 時間

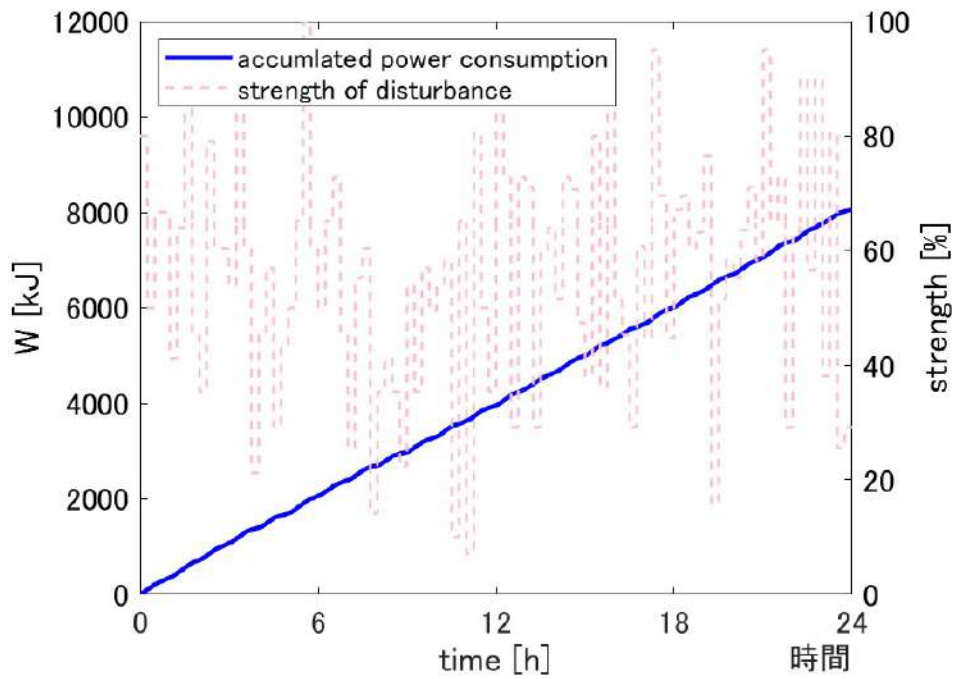


(g) 巡回時間間隔: 8.0 時間

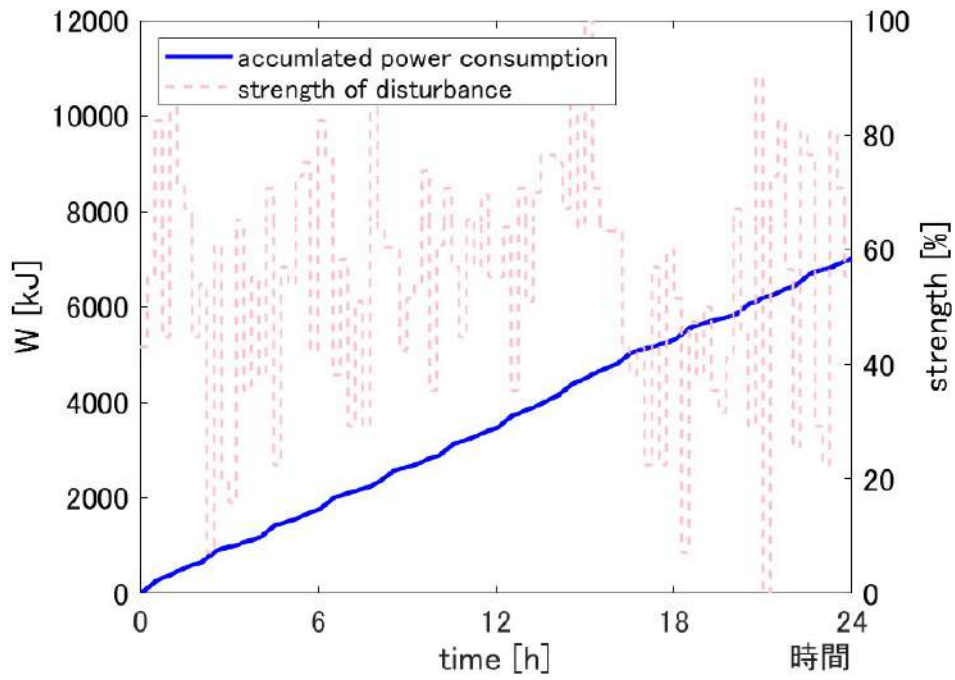
図 5.8: 巡回地点間距離 100 m, シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の消費電力グラフ例 (自己位置推定誤差なし)



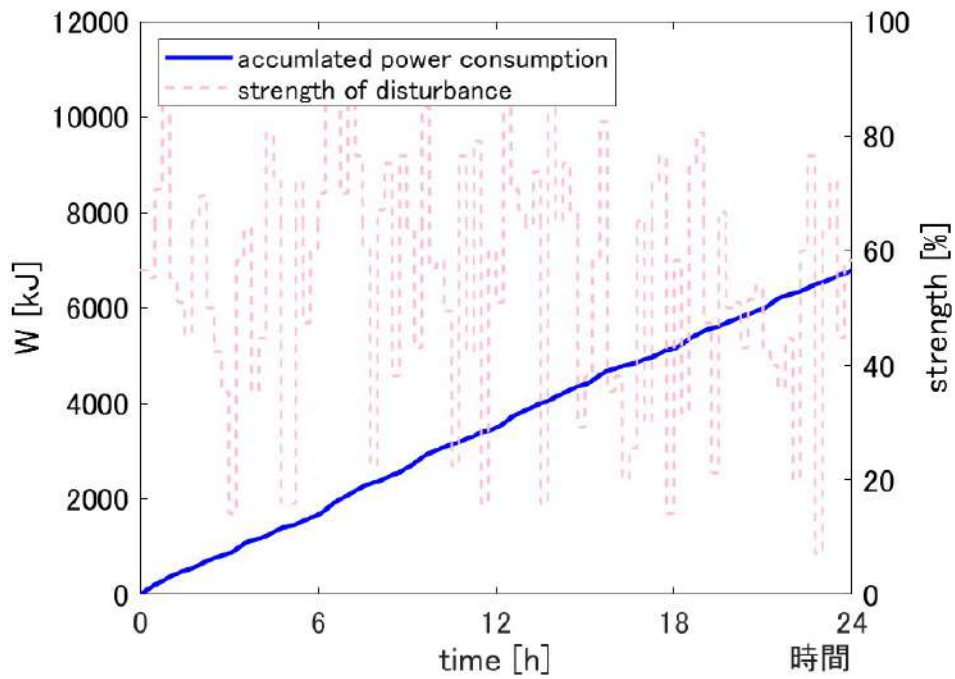
(a) 巡回時間間隔: 0.5 時間



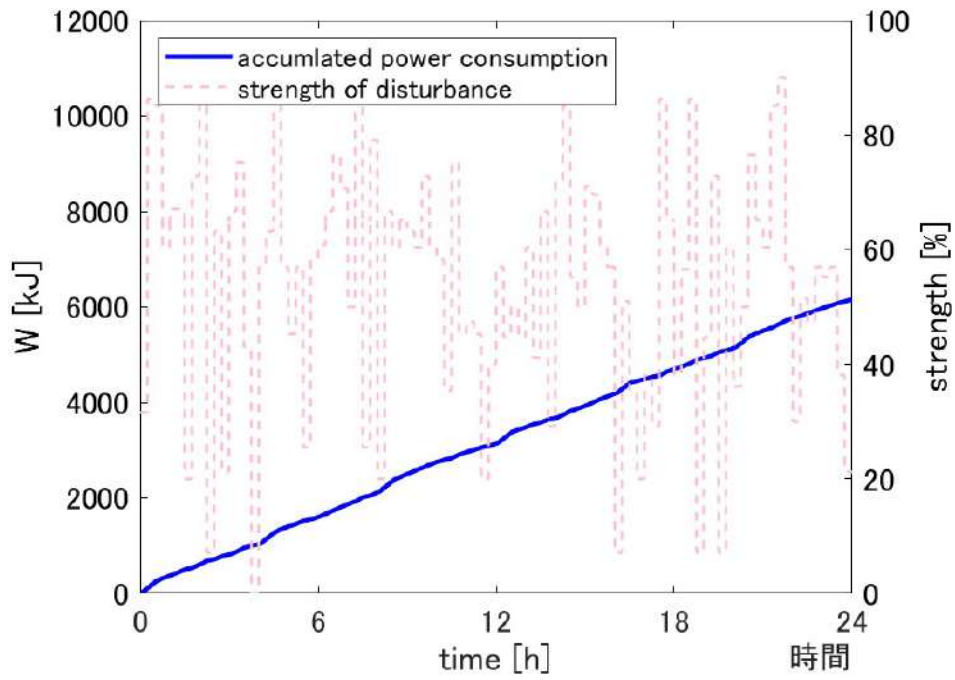
(b) 巡回時間間隔: 1.0 時間



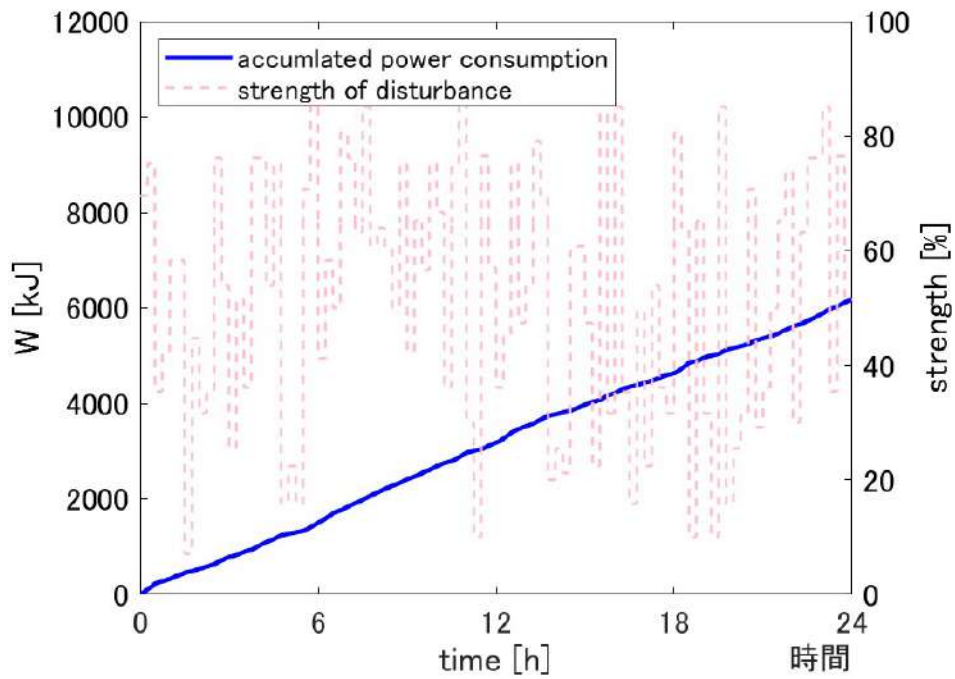
(c) 巡回時間間隔: 2.0 時間



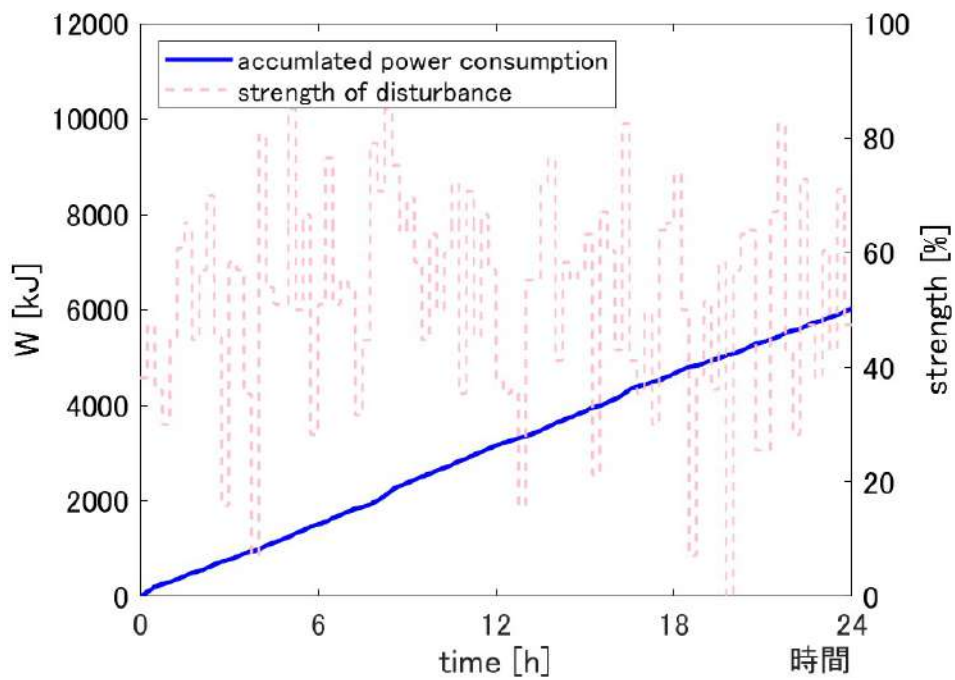
(d) 巡回時間間隔: 3.0 時間



(e) 巡回時間間隔: 4.0 時間



(f) 巡回時間間隔: 6.0 時間



(g) 巡回時間間隔: 8.0 時間

図 5.9: 巡回地点間距離 100 m, シミュレーション実験におけるそれぞれの戦略の消費電力グラフ例 (自己位置推定誤差あり)

第6章

結言

6.1 本論文のまとめ

本論文では、小型水上自律移動センシングデバイスを用いた水圏環境観測について提案し、長期的にセンシングデバイスを稼働させるための移動戦略について様々な環境下で評価した。

まず、従来の人間が直接水圏環境で水をサンプリングする手法や ICT を活用した近年研究されている水圏環境観測手法について分析し、それらの手法の問題点を補完する小型水上自律移動センシングデバイスを用いた新たな水圏環境観測手法を提案し、提案する水圏環境観測手法を実現する小型水上自律移動センシングデバイスを開発した。小型水上自律移動センシングデバイスは従来の水圏環境観測手法を克服する4つの開発コンセプトに適うように開発された。センシングデバイスは中心の密閉チャンバーから放射線状に"X"の形状をなすように4本のスラストマウント用のアルミフレームが取り付けられており、それぞれのアルミフレームに搭載された4台のスラストを用いて移動する。そして、4台のスラストを用いた移動方法は数理モデルによって表し、水上で自律移動するための自己位置推定方法とセンシングデバイスの位置と目標位置から計算されるスラストの出力強度の計算方法について表した。

実環境におけるセンシングデバイスの長期的な稼働のために必要な効率的な移動戦略について、定点環境観測のシナリオと巡回環境観測の両シナリオを想定して、定点維持戦略と巡回移動戦略を構築し、実環境とシミュレーション環境の両環境で検証実験を実施した。

定点環境観測のシナリオを想定して構築した定点維持戦略では、戦略構成パラメータとして許容誤差範囲、アプローチポリシー、移動ポリシーを与え、それぞれのパラメータを組み合わせた戦略を与えた際の消費電力と平均誤差距離について実環境とシミュレーション環境で検証した。実験の結果、1回の移動でスラストが消費する電力が小さい戦略が効

率的であることが確認された。また、最も効率的な定点維持戦略を適用した場合、基準となる定点維持戦略と比較しておよそ 50% 消費電力を削減できることが明らかになった。

また、同様に外乱を考慮した定点維持戦略も構築し、実環境とシミュレーションにおいて消費電力と平均誤差距離について評価した。外乱を考慮した定点維持戦略はセンシングデバイスが許容誤差範囲から出たとき、センシングデバイスの位置、目標位置、前回の一時目標位置、一時目標位置決定距離から次の一時目標位置を計算する。実験では複数の一時目標位置決定距離を与え、最適な位置取りについて検証した。実環境実験では、自己位置推定誤差の影響を受けづらい戦略である、一時目標位置を目標位置付近に設定する戦略の消費電力が最も小さくなった。一方、シミュレーション環境で構築した自己位置推定誤差のない理想的な環境では、センシングデバイスが許容誤差範囲から出た位置から最も遠くに一時目標位置を配置する戦略が最も効率的であった。また、平均誤差距離の観点では一時目標位置の距離によってセンシングデバイスの位置取りに偏りがあり、センシングデバイスを使用する目的に応じて一時目標距離を設定することが必要であることが確認された。

複数の地点を巡回して観測する巡回環境観測のシナリオを想定した巡回移動戦略も構築し、シミュレーション環境で実験した。巡回移動戦略は巡回時間間隔と巡回地点で構成され、ある観測地点を訪れる時間間隔と合計の巡回距離から効率性と観測解像度について検討した。シミュレーション実験では、巡回時間間隔が長くなるにつれて消費電力が大きくなることが明らかになった。また、巡回時間間隔が長くなるにつれて消費電力の変化が小さくなることが確認された。

6.2 今後の展望

本論文では 1 台のセンシングデバイスを用いた効率的な定点観測、巡回観測について想定し、定点維持戦略と巡回移動戦略について研究してきた。本研究はこれからの発展として、本論文をベースとした複数台のセンシングデバイスによる広域水圏環境観測や観測データリアルタイム閲覧アプリケーションを展開することが考えられる。また、実用的な観点から実環境で長期的かつ連続的にセンシングデバイスを稼働させることを想定し、水中無線給電を導入し、水上で無線給電することが有効であると考えられる。以下にそれぞれの展望について述べる。

6.2.1 複数台のセンシングデバイスによる広域水圏環境観測

今後の展望の一つとして、複数のセンシングデバイスを用いた消費電力の観点から効率的な広域環境観測システムの研究を実施することが挙げられる。琵琶湖では、約 50 か所

で定期的に水質観測が実施されており、定点観測だけでなく、複数の観測ポイントにおける水質観測も重要である。この研究では、複数のセンシングデバイスがそれぞれの位置関係やバッテリー残量、外乱の状態から、最適な巡回地点を与え、消費電力的に効率的なタスク遂行をさせる手法について研究し、広域環境を観測できるようにする。この問題に関しては、マルチエージェントシステムや群ロボット分野などで用いられる遺伝的アルゴリズムをベースとした協調的なタスクプランニング手法を応用する。開発した複数のセンシングデバイスを用いた広域環境観測方法は、実環境とシミュレーション環境の両環境にて、実証実験をする。

6.2.2 観測データリアルタイム閲覧アプリケーション

センシングデバイスが取得した環境観測データをリアルタイムで閲覧できるようにする。現在使用しているセンシングデバイスはインターネットに接続されておらず、観測した環境データをリアルタイムで観測することができない。実用的な観点では、センシングデバイスは観測したデータを常にデータサーバへ送り、ユーザがいつでもセンシングデバイスが観測した環境データを閲覧、分析できるようにする必要がある。観測データ閲覧システムを構築すれば、複数のセンシングデバイスが観測した環境データ(水温、pH、溶存酸素量など)を位置データ(緯度・経度)、観測時間とともにデータサーバへ送信することで、いつでもどこでもリアルタイムの水質状況を閲覧することができるようにすることができる。このように本研究の発展として、観測データリアルタイム閲覧アプリケーション開発によって、観測から閲覧までカバーする総合的な水圏環境観測システムを提案する。

6.2.3 給電システムとの連携による長期的かつ連続的な稼働

本論文では、水圏環境観測のミッション時にセンシングデバイスの消費電力を抑制する戦略を構築し、評価してきた。一方でセンシングデバイスの小型化をコンセプトに掲げている、本論文で提案したセンシングデバイスに搭載できるバッテリーの寸法には限度があり、そのバッテリーの容量にも限界がある。そのため、実環境で長期的かつ連続的にセンシングデバイスを稼働させるには併せて、給電システムを導入する必要がある。本論文で提案したセンシングデバイスに適合する給電システムの1つとして水中無線給電方式が挙げられる。[51,52]では、水中ロボットの連続的なタスク遂行を想定した水中無線給電方式が提案されている。水上に水中無線給電位置を設け、センシングデバイスのバッテリー残量が少なくなった時に給電位置まで移動することで長期的かつ連続的な稼働を実現することができると考えられる。水中無線給電位置を導入することを考えると本論文で想定した定点環境観測と巡回移動観測の両シナリオにおいて、水中無線給電位置とバッテリー残

量を考慮した効率的な移動戦略に関する研究へ発展できることも考えられる。

謝辞

最後に本博士学位論文執筆に携わっていただいた方々、学生生活を支えていただいた方々に感謝申し上げます。

立命館大学情報理工学部 李周浩教授には、学部一回生の時から博士後期課程修了まで10年にわたってお世話になりました。特に学部三回生からは李研究室の学生として、研究に必要な知識・技術を座学や実践でまじえて教わりました。修士学生からは、私の希望と先生のアイデアを織り交ぜ、本博士学位論文の基礎となる水上ロボットの研究を始めさせていただき、博士学生になってからは先生のご指導のおかげで本研究をさらに発展させることができました。フィールドロボットの研究には危険性が伴い、特に琵琶湖での実験はさまざまな危険と隣り合わせであり、先生のご理解、ご協力がなければ実現できない研究テーマでした。このような研究環境を整えることが難しい研究テーマに挑戦させていただけたおかげもあり、学術論文投稿、国際会議発表、日本ロボット学会での受賞などさまざまな実績を残すことができました。その他、ここには書ききれないほどさまざまな側面から私の学生生活をサポートしていただきました。博士学位論文執筆までの長きにわたる研究指導、成長できる環境を整えてくださったことに深く感謝申し上げます。

兵庫県立大学工学部大学院工学研究科 山添大丈准教授には、私が学部三回生から博士後期課程一回生の間、本研究室で丁寧な研究指導していただきました。また、立命館大学情報理工学部 Dinh Tuan Tran 助教には研究室の先輩として、指導教員として日々のディスカッションや論文執筆指導で本研究をサポートしていただきました。両氏とも、本研究の挑戦的な課題に対してさまざまな角度からアドバイスしていただきました。また、発表能力が未熟だった学部三回生の私がこのように論文を書いたり、国際会議で発表できるようになったのは、両氏の論文執筆指導や研究発表指導があったからにほかなりません。両氏には、研究を進めるにあたり有意義なご意見・ご指導いただいたこと深く感謝申し上げます。

共同研究でお世話になりました立命館大学総合科学技術研究機構 熊谷道夫教授には地球物理の観点から本研究に対するご意見をいただいたり、ドイツ・イスラエルで研究活動する機会やソーラーボート大会へ参画する機会など、さまざまな挑戦的な機会を紹介して

いただいたりしました。研究の発展に協力していただいただけでなく、さまざまな挑戦を後押しして下さったことに感謝申し上げます。

株式会社近江デジタルファブリケーションズ代表取締役 平山巧馬氏には、Solar-powered Autonomous Surface Vehicle の開発を通じて、本研究の主である水上ロボットを開発するのに必要な諸技術を教えてくださいました。惜しみなく知識・技術をご教授していただいたことに感謝申し上げます。

本研究室秘書の黒田博子氏には、研究室での日々の生活や事務的な仕事をサポートしていただき、研究活動をサポートしていただきました。事務資料の提出がギリギリになったり、書き間違いがあったりしてご迷惑をおかけした際でも、迅速かつ的確に対応していただきました。研究室生活のさまざまな場面で助けてくださいましたことに感謝いたします。

松田好明氏には、実験補助、ロボット開発の面でサポートしていただきました。また、研究に対するアドバイスだけでなく、研究室運営や進路についても相談に乗っていただきました。本研究にご協力していただいたこと、さまざまな相談に乗っていただいたことに感謝いたします。

李研究室の先輩、同期、後輩の多くのメンバーに感謝申し上げます。先輩には研究・技術のことを全く分かっていなかった私に研究に対する姿勢や開発技術を教えてくださいました。特に LEE Miran 氏、小島景行氏、施真琴氏は、同時期に博士後期課程学生として研究に励み、両氏の取り組みを見て様々なことを学びました。同期、後輩学生とは、たわいもない会話から研究ディスカッションまで、たくさんコミュニケーションを図り、日々の生活や研究を支えてもらいました。特に坂川裕太郎君、原田和輝君、鈴木大樹君は水環境に関して研究をする数少ないメンバーとして、実験や開発を手伝ってもらったことに感謝申し上げます。

本研究の一部は公益財団法人日本科学協会笹川科学研究助成から助成をいただきました。研究内容を理解していただき、助成していただいたこと感謝申し上げます。

公益財団法人大林財団には学部学生時の三年間、一般財団法人吉村財団には修士学生時の二年間、給付型奨学金という形で生活の金銭的支援をしていただきました。両財団の支援のおかげで学士・修士時代に学業に専念できるようになり、博士後期課程に進学する道を開くことができました。両財団には学士・修士時に経済的な面で支えていただいたことに感謝申し上げます。

株式会社ヤスダハンズ、株式会社ニューネクストの皆様には、私の事情をご理解していただいたうえで、さまざまな有意義な機会をいただきました。現場での仕事を見学させていただいたり、実際の仕事に携わせていただいたりすることで、さまざまなことを学ぶことができました。さまざまなことを学ぶ有意義な機会をいただいたことに深く感謝申し上げます。

松田頼彦氏，松田裕子氏には，大学入学時から10年に渡ってさまざまな面で支援していただきました。何か悩んだとき，落ち込んだときなど困難な局面でいつも相談に乗ってくださったおかげ，くじけずに研究活動を続けることができました。また，お話をする際にはいつも心身を気遣っていただき，おいしいお料理やお酒を振る舞っていただきました。日々の生活や研究活動で困難な時期にさまざまな支援をしていただいたことに深く感謝申し上げます。

最後に，私の長きにわたる学生生活を理解していただき，さまざまな側面から支えていただいた家族，祖父・野村久之，父・藤井清正，母・藤井佳子，姉・藤井はるかに謝意を表し，本論文の謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] Ubina NA, Cheng SC. A review of unmanned system technologies with its application to aquaculture farm monitoring and management. *Drones*. 2022;6(1):12.
- [2] Lakhiar IA, Jianmin G, Syed TN, et al. Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system. *Journal of Sensors*. 2018;2018.
- [3] Ullo SL, Sinha GR. Advances in smart environment monitoring systems using iot and sensors. *Sensors*. 2020;20(11):3113.
- [4] Xu G, Shi Y, Sun X, et al. Internet of things in marine environment monitoring: A review. *Sensors*. 2019;19(7):1711.
- [5] Adu-Manu KS, Tapparello C, Heinzelman W, et al. Water quality monitoring using wireless sensor networks: Current trends and future research directions. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*. 2017;13(1):1–41.
- [6] Babić A, Vasiljević G, Mišković N. Vehicle-in-the-loop framework for testing long-term autonomy in a heterogeneous marine robot swarm. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020;5(3):4439–4446.
- [7] Wang W, Shan T, Leoni P, et al. Roboat ii: A novel autonomous surface vessel for urban environments. In: *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*; IEEE; 2020. p. 1740–1747.
- [8] Wang W, Mateos LA, Park S, et al. Design, modeling, and nonlinear model predictive tracking control of a novel autonomous surface vehicle. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*; IEEE; 2018. p. 6189–6196.
- [9] Bae JH, Luo S, Kannan SS, et al. Development of an unmanned surface vehicle for remote sediment sampling with a van veen grab sampler. In: *OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE*; IEEE; 2019. p. 1–7.
- [10] Zoss BM, Mateo D, Kuan YK, et al. Distributed system of autonomous buoys for scalable deployment and monitoring of large waterbodies. *Autonomous Robots*. 2018;

42(8):1669–1689.

- [11] Kim J, Kiml T, Kim J, et al. Manipulation purpose underwater agent vehicle for ghost net recovery mission. In: 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS); IEEE; 2019. p. 3905–3910.
- [12] Zacchini L, Franchi M, Ridolfi A. Sensor-driven autonomous underwater inspections: A receding-horizon rrt-based view planning solution for auvs. *Journal of Field Robotics*. 2022;.
- [13] Ludvigsen M, Sørensen AJ. Towards integrated autonomous underwater operations for ocean mapping and monitoring. *Annual Reviews in Control*. 2016;42:145–157.
- [14] Betancourt J, Coral W, Colorado J. An integrated rovs solution for underwater net-cage inspection in fish farms using computer vision. *SN Applied Sciences*. 2020;2(12):1–15.
- [15] Hegarty A, Westbrook G, Glynn D, et al. A low-cost remote solar energy monitoring system for a buoyed iot ocean observation platform. In: 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT); IEEE; 2019. p. 386–391.
- [16] Tian L, Li S, Li Y, et al. A floating optical buoy (foby) for direct measurement of water-leaving radiance based on the skylight-blocked approach (sba): An experiment in honghu lake, china. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020;125(10):e2020JC016322.
- [17] Huo Y, Dong X, Beatty S. Cellular communications in ocean waves for maritime internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020;7(10):9965–9979.
- [18] Dallolio A, Agdal B, Zolich A, et al. Long-endurance green energy autonomous surface vehicle control architecture. In: *OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE*; IEEE; 2019. p. 1–10.
- [19] Manjanna S, Li AQ, Smith RN, et al. Heterogeneous multi-robot system for exploration and strategic water sampling. In: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); IEEE; 2018. p. 4873–4880.
- [20] Cong D, Shang J, Luo Z, et al. Energy efficiency analysis of multi-type floating bodies for a novel heaving point absorber with application to low-power unmanned ocean device. *Energies*. 2018;11(12):3282.
- [21] Trasviña-Moreno CA, Blasco R, Marco Á, et al. Unmanned aerial vehicle based wireless sensor network for marine-coastal environment monitoring. *Sensors*. 2017;17(3):460.
- [22] Xu G, Shen W, Wang X. Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: A survey. *Sensors*. 2014;14(9):16932–16954.
- [23] Manley JE. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. In: *OCEANS 2008*; IEEE; 2008. p. 1–4.
- [24] Alcântara EH, Stech JL, Lorenzetti JA, et al. Remote sensing of water surface tempera-

- ture and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. *Remote Sensing of Environment*. 2010;114(11):2651–2665.
- [25] Chang NB, Imen S, Vannah B. Remote sensing for monitoring surface water quality status and ecosystem state in relation to the nutrient cycle: a 40-year perspective. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2015;45(2):101–166.
- [26] Srinivasan R, Rajendran V, Zacharia S, et al. Indigenized indian drifting buoys with insat communication for ocean observations. *Ocean Engineering*. 2017;145:263–267.
- [27] Hostache R, Matgen P, Giustarini L, et al. A drifting gps buoy for retrieving effective riverbed bathymetry. *Journal of Hydrology*. 2015;520:397–406.
- [28] Baumgartner MF, Bonnell J, Van Parijs SM, et al. Persistent near real-time passive acoustic monitoring for baleen whales from a moored buoy: System description and evaluation. *Methods in Ecology and Evolution*. 2019;10(9):1476–1489.
- [29] Waseda T, Sinchi M, Kiyomatsu K, et al. Deep water observations of extreme waves with moored and free gps buoys. *Ocean Dynamics*. 2014;64(9):1269–1280.
- [30] Jiang M, Guo Z, Hong F, et al. Oceansense: A practical wireless sensor network on the surface of the sea. In: 2009 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications; IEEE; 2009. p. 1–5.
- [31] Jeong M, Roznere M, Lensgraf S, et al. Catabot: Autonomous surface vehicle with an optimized design for environmental monitoring. In: *Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast*; IEEE; 2020. p. 1–9.
- [32] Fujii Y, Tuan Tran D, Lee JH. An efficient in situ monitoring strategy for an active aquatic surface omni-directional sensing device. *Advanced Robotics*. 2022;;1–15.
- [33] Fujii Y, Harada K, Yamazoe H, et al. Development and performance experiments in lake biwa of a small sensing device keeping fixed position on water. In: 2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR); IEEE; 2020. p. 494–499.
- [34] Fujii Y, Yamazoe H, Lee JH. A water sensing device control system for long-term monitoring. In: 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII); IEEE; 2019. p. 572–577.
- [35] Fujii Y, Yamazoe H, Lee JH. Fundamental evaluation of fixed position on water sensing device for long-term monitoring system. In: *TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference*; IEEE; 2018. p. 1053–1058.
- [36] Tanakitkorn K, Phoemsaphawee S. Impacts of thruster configurations on the task performance of an unmanned surface vehicle. *Ocean Engineering*. 2022;256:111465.
- [37] Koubâa A, Allouch A, Alajlan M, et al. Micro air vehicle link (mavlink) in a nutshell: A survey. *IEEE Access*. 2019;7:87658–87680.

- [38] Fossen TI. Guidance and control of ocean vehicles. University of Trondheim, Norway, Printed by John Wiley & Sons, Chichester, England, ISBN: 0 471 94113 1, Doctors Thesis. 1999;.
- [39] Hoerner SF. Fluid-dynamic drag. Hoerner fluid dynamics. 1965;.
- [40] Team AD. Ardupilot [<https://ardupilot.org>]; 2009. [Online; accessed 16-September-2021].
- [41] Robusto CC. The cosine-haversine formula. The American Mathematical Monthly. 1957; 64(1):38–40.
- [42] Babić A, Mandić F, Vasiljević G, et al. Autonomous docking and energy sharing between two types of robotic agents. IFAC-PapersOnLine. 2018;51(29):406–411.
- [43] Sun Q, Qi W, Liu H, et al. Oceanvoy: A hybrid energy planning system for autonomous sailboat. In: 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS); IEEE; 2020. p. 2481–2487.
- [44] Elkolali M, Al-Tawil A, Much L, et al. A low-cost wave/solar powered unmanned surface vehicle. In: Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast; IEEE; 2020. p. 1–10.
- [45] Zhou X, Ling L, Ma J, et al. The design and application of an unmanned surface vehicle powered by solar and wind energy. In: 2015 6th international conference on power electronics systems and applications (PESA); IEEE; 2015. p. 1–10.
- [46] Wang P, Wang D, Zhang X, et al. Numerical and experimental study on the maneuverability of an active propeller control based wave glider. Applied Ocean Research. 2020; 104:102369.
- [47] Touzout W, Benmoussa Y, Benazzouz D, et al. Unmanned surface vehicle energy consumption modelling under various realistic disturbances integrated into simulation environment. Ocean engineering. 2021;222:108560.
- [48] Michel O. Webots: Professional mobile robot simulation. Journal of Advanced Robotics Systems. 2004;1(1):39–42. Available from: <http://www.ars-journal.com/International-Journal-of-Advanced-Robotic-Systems/Volume-1/39-42.pdf>.
- [49] Blue Robotics I. T200 スペックシート ;2022. <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/>.
- [50] 硬個. 水文水質データベース ;2022. <http://www1.river.go.jp/>.
- [51] Tamura M, Murai K, Matsumoto M. Design of conductive coupler for underwater wireless power and data transfer. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2020;69(1):1161–1175.
- [52] Matsuda T, Maki T, Masuda K, et al. Port experiments of the docking and charging

system using an auv and a seafloor station: Towards long-term seafloor observation. In: 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV); IEEE; 2018. p. 1–5.

研究業績

学術論文

1. Yasuyuki Fujii, Dinh Tuan Tran and Joo-Ho Lee (2022) An efficient in situ monitoring strategy for an active aquatic surface omni-directional sensing device, *Advanced Robotics*, 36:14, 700-714, DOI: 10.1080/01691864.2022.2078670

国際会議

1. Yasuyuki Fujii, Tran Dinh Tuana and Joo-Ho Lee, " An Evaluation of Position Keeping Strategies under Disturbances for a Symmetrical Shape Autonomous on Water Surface Robot", 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2022), Kyoto, Oct, 2022 (口頭発表, 査読有)
2. Yasuyuki Fujii, K. Harada, H. Yamazoe and Joo-Ho Lee, " Development and performance experiments in Lake Biwa of a small sensing device keeping fixed position on water” , 17th International Conference on Ubiquitous Robotics (UR2020), Kyoto (Online), Jun, 2020 (口頭発表, 査読有)
3. Yasuyuki Fujii, H. Yamazoe and Joo-Ho Lee, "Development and experiments of a sensing device keeping fixed position on water for long term environmental data collection, The 15th Join Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2019), Shiga, Oct, 2019 (ポスター発表, 査読無)
4. Yasuyuki Fujii, H. Yamazoe and Joo-Ho Lee, "A water sensing device control system for long-term monitoring” , 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2019), Paris, Jan, 2019 (口頭発表, 査読有)
5. Yasuyuki Fujii, H. Yamazoe and Joo-Ho Lee, "Fundamental evaluation of fixed positoin on water sensing device for long-term monitoring system” , TENCON2018, Jeju, Oct, 2018 (口頭発表, 査読有)

6. Yasuyuki Fujii, H. Yamazoe and Joo-Ho Lee, "Development of sensing device keeping fixed position on water for long term environmental measurement (MPR2017)", The 13th Join Workshop on Machine Perception and Robotics, Beijing, Oct, 2017 (ポスター発表, 査読無)

国内会議

1. 藤井康之, 鈴木大樹, チャン ディン トゥアン, 李周浩, "小型自律移動センシングデバイスのための外乱を考慮した定点維持制御戦略評価", 第 40 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2022), 東京, 9 月, 2022 年 (口頭発表, 査読無)
2. 藤井康之, チャン ディン トゥアン, 李周浩, "シミュレーションと実環境実験による小型水上自律移動センシングデバイスの定点維持制御戦略評価", 第 39 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2021), 長野 (オンライン), 9 月, 2021 年 (口頭発表, 査読無)
3. 藤井康之, チャン ディン トゥアン, 李周浩, "長期水環境観測を目的とした小型水上自律移動センシングデバイスのための制御戦略", ロボット・メカトロニクス講演会-2021, 大阪 (オンライン), 6 月, 2021 年 (ポスター発表, 査読無)
4. 藤井康之, チャン ディン トゥアン, 李周浩, "小型水上自律移動センシングデバイスを用いた実環境における長期水環境観測", 第 21 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, 福岡 (オンライン), 12 月, 2020 年 (口頭発表, 査読無)
5. 藤井康之, 山添大丈, 李周浩, "小型水上自律移動センシングデバイスによる水環境観測", 第 37 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2019), 東京, 9 月, 2019 年 (口頭発表, 査読無)
6. 藤井康之, 山添大丈, 李周浩, "小型水上自律移動センシングデバイスのための水上自己位置推定", ロボット・メカトロニクス講演会-2019, 広島, 6 月, 2019 年 (ポスター発表, 査読無)
7. 藤井康之, 山添大丈, 李周浩, "長期水上環境観測のための小型水上位置固定型センシングデバイスの基礎評価", ロボット・メカトロニクス講演会-2018, 福岡, 6 月, 2018 年 (ポスター発表, 査読無)
8. 藤井康之, 山添大丈, 李周浩, "長期環境計測を行う水上位置固定型小型センシングデバイスの開発". 第 18 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, 宮城, 12 月, 2017 年 (ポスター発表, 査読無)

受賞歴

- 2022年9月 第39回日本ロボット学会学術講演会 若手講演賞