

オフライン計算支援に基づく
移動ロボットのための
高性能な計測・制御システムの研究

渡辺 敦志

システム情報工学研究科

筑波大学

2014年3月

目次

目次	1
図目次	5
表目次	9
第 1 章 はじめに	11
1.1 研究の背景	11
1.2 屋外自律/自立走行ロボットシステムの設計・実装による問題の分析	12
1.2.1 対象とする環境と実現する動作	13
1.2.2 用いた計測・制御系	13
1.2.3 衛星写真上で作成した経路情報と環境認識に基づく自律走行	15
1.2.4 実験および結果の概要	16
1.2.5 移動ロボット計測・制御系設計に必要な要素の分析	17
1.3 研究の動機と目的	17
1.4 本論文の構成	17
第 2 章 オフライン計算支援に基づく移動ロボットの計測・制御系設計法	19
2.1 オフライン計算支援に基づく計測・制御システム設計法の提案	19
2.1.1 網羅的なシステム動作の順計算とその逆計算に基づくシステム設計	19
2.1.2 問題の種類毎の逆計算手法	20
2.1.3 数値計算的な逆計算における離散化の条件	21
2.2 本研究の位置づけ	22
2.3 自立型の移動ロボットに必要な計測・制御系	23
第 3 章 ブラシレスモータの高効率な電流制御	25
3.1 背景と関連研究	25
3.2 高効率な非線形駆動法と総当たり計算に基づく電流制御系設計手法	25
3.2.1 ブラシレスモータのハイインピーダンス状態を含む出力を用いた PWM ス イッチングによる駆動	26
3.2.2 順計算: モータ電流の解析	28

3.2.3 逆計算: 網羅的な数値計算による制御テーブル生成	31
3.3 オフライン計算支援に基づく設計と実験に基づく評価	32
3.4 関連研究との比較	38
3.5 結論	39
第 4 章 広い速度域に対応した移動ロボット軌跡追従レギュレータ制御	41
4.1 背景と関連研究	41
4.2 数値シミュレーションに基づく軌跡追従レギュレータ制御系設計	42
4.2.1 非ホロノミックな移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御	42
4.2.2 順計算: 制御系のシミュレーション	45
4.2.3 逆計算: 焼き鈍し法による制御パラメータ決定	46
4.3 オフライン計算支援に基づく設計と実験に基づく評価	49
4.4 関連研究との比較	52
4.5 結論	53
第 5 章 測域センサの誤検出の少ない高精度な計測	57
5.1 背景と関連研究	57
5.2 実測データに基づく測域センサ信号処理系設計	58
5.2.1 低飽和型のアナログ信号処理	59
5.2.2 測距計算手法	61
5.2.3 順計算: 非線形な高周波アナログ系の網羅的な実測データ取得	63
5.2.4 逆計算: 網羅的な実測データに基づく測域センサの計測テーブル生成	64
5.3 オフライン計算支援に基づく設計と実験に基づく評価	65
5.4 関連研究との比較	67
5.5 結論	68
第 6 章 オフライン計算支援に基づく計測・制御系設計の考察	71
6.1 提案した設計法の適用可能範囲	71
6.2 将来の展望	73
第 7 章 おわりに	75

7.1 本研究の成果と寄与	75
7.2 本論文のまとめ	77
7.3 まとめ	78

目次

1	典型的な移動ロボットシステムの構成	12
2	構築した移動ロボット“山彦 メロス”の外観	14
3	センサの取り付け位置・姿勢	14
4	空間周波数フィルタによる方位検出系	14
5	つくばチャレンジ 2011 において与えた Google Earth 上で作成した経路情報	15
6	オフライン計算支援に基づく計測・制御系設計手法の概要	20
7	本研究と関連研究の位置づけ	22
8	オフライン計算支援に基づく非線形な駆動法を用いた高効率な駆動系の電流制御系設計の概要	26
9	電氣的応答速度の速い小型ブラシレスモータ駆動電流の例	27
10	電源電圧と接地電圧を交互に印加する従来の一般的な PWM によるブラシレスモータ駆動において目標電流と逆方向に電流が流れるメカニズム	28
11	ハイインピーダンス状態を含む PWM によるブラシレスモータ駆動における目標電流と逆方向に流れる電流の削減	29
12	ブラシレスモータの内部抵抗、インダクタンス、逆起電力、駆動回路の半導体スイッチ、フリーホイーリングダイオードからなるブラシレスモータ駆動系の等価回路	30
13	従来の PWM スイッチングパターンおよび、ハイインピーダンス状態を含む PWM のスイッチングパターン	33
14	目標 q -軸電流および角速度に対する、従来の駆動手法における理想的な消費電力と構築した制御系の理想的な消費電力	34
15	ブラシレスモータ駆動・制御実験に用いたシステムの外観	36
16	目標 q -軸電流および角速度に対する、従来の駆動手法における消費電力と構築した制御系の消費電力	37
17	モータの動作領域例測定に用いた移動ロボット“山彦 LR-1”	38
18	構築した電流制御系の端子電流および、 d/q -軸電流の例 (PWM 基本周期 50 マイクロ秒の移動平均)	38
19	構築した制御系の d/q -軸電流の平均値および RMS 誤差	39
20	オフライン計算支援に基づく移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御系設計の概要	42

21	非ホロノミックな車輪型移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御を用いた直線追従制御におけるパラメータ	43
22	非ホロノミックな車輪型移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御を用いた円弧追従制御におけるパラメータ	43
23	軌跡追従制御系の線形近似領域における極配置	44
24	自立移動ロボット“山彦 Beesan”の外観	45
25	線形近似による解析的評価において安定な制御ゲインを用いた直線軌跡追従制御実験結果: 線形近似誤差 1 パーセント未満の動作領域において発振する	45
26	数値シミュレーションと焼き鈍し法による制御ゲイン設計のフローチャート	48
27	制御ゲインの評価に用いる目標軌跡	49
28	設計した制御系の位置偏差、角度偏差、角速度に対するフィードバックゲイン $K\eta, K\phi, K\omega$	50
29	ロボットの並進速度が離散化区間内で変化したときのシステム動作の評価値の変化	51
30	本設計手法により非線形性を考慮して設計した制御ゲインを用いた直線軌跡追従制御実験結果	52
31	軌跡追従制御実験に用いた、5mm 程度の凹凸のある石畳環境	53
32	設計した制御系のステップ入力的な目標軌跡に対する走行軌跡	55
33	測域センサ UTM-30LX における誤検出の例	58
34	オフライン計算支援に基づく測域センサ信号処理系設計の概要	59
35	測域センサ UTM-30LX の受光信号波形例 (センサから 0.45 メートルの位置に白紙を正対した状態)	60
36	構築した低飽和型の測域センサアナログ信号処理回路	60
37	構築した低飽和型の測域センサアナログ信号処理系と、UTM-30LX のアナログ信号処理系の飽和特性	61
38	AD8317 を用いたトランスインピーダンス対数アンプの基板外観	61
39	2つの距離における反射光がセンサに戻っているときの光信号波形のイメージ	62
40	センサに戻った2つの距離における反射光のうち、一方が微小な反射強度のときの光信号波形のイメージ	62
41	信号波形の初期の立ち上がり勾配、末尾の立ち下がり勾配、パルス幅、ピーク値を用いた測距計算手法の構成	63

42	反射物体がレーザスポットに当たる面積の変化による反射係数、反射光の強度の変化	64
43	網羅的に実測した測定対象の反射係数に対する受光信号波形	65
44	実験に用いた、従来の測域センサが誤検出を発生する典型的な環境	66
45	本設計法で構築した測域センサ計測系および従来の計測系の測域結果	67
46	通常の UTM-30LX で誤検出を発生する環境における計測結果	68

表目次

1	各モータ端子に接続されたハーフブリッジ回路の出力モード	30
2	ブラシレスモータドライバ 有限会社テクノクラフト TEC-3PMD-RB-V7K の主な 仕様	34
3	ブラシレスモータ Maxon EC-max 22 の主な仕様	34
4	オフライン計算支援に基づく非線形な駆動法を用いた高効率なブラシレスモータ 駆動系の電流制御系設計の離散化間隔	35
5	リノリウム床を等速で走行中の移動ロボットのモータ角速度および電流	37
6	自立移動ロボット “山彦 Beesan” およびそのコントローラのパラメータ	46
7	制御ゲインの評価に用いる目標軌跡のパラメータ	50
8	オフライン計算支援に基づく軌跡追従制御系設計の離散化間隔	50
9	無線信号用対数アンプ Analog Deveices AD8317 の主な仕様	60
10	オフライン計算支援に基づく測域センサ信号処理系設計の離散化間隔	66
11	本設計法で構築した測域センサ計測系および従来の計測系の誤検出点数	67
12	本研究で示した計算支援に基づく計測・制御系設計に用いた計算機	73

第1章 はじめに

本研究では、移動ロボットで用いられる複雑で非線形な計測・制御系を効果的に設計可能な、オフライン計算支援に基づく計測・制御システム設計法を提案する。移動ロボットで用いられる計測・制御系のうち、複雑で非線形性をもつ、ブラシレスモータの高効率な非線形駆動の制御、幅広い速度域での軌跡追従走行制御、およびレーザ測域センサの計測は、解析的な設計法の適用が難しいため、経験的にもしくは近似に基づいて設計されてきた。本研究では、これらの計測・制御系を、数値シミュレーションやデータから総当たりに適切な則やパラメータを見つけることで、特性、精度、効率の良い実用的なシステム設計が可能なることを示し、その効果と必要な計算コストを明らかにする。

1.1 研究の背景

近年、人間の仕事の省力化や危険な仕事の代替を目的とした移動ロボットの研究・開発が進められている。中でも、工場内搬送 [1]、巡回警備 [2]、掃除 [3]、災害対応用の探査ロボット [4, 5] などの、動作する環境が限られるもの、仕事が限定されるもの、人間による遠隔操作により動作するものを中心に実用化が進められている。これらの適用可能な範囲を広げ、更なる省力化や危険な仕事の代替を進めるためには、移動ロボットが複雑な仕事を自律的 (Autonomous) かつ自立的 (Self-contained) に行う必要がある。そのためには、移動ロボットの環境認識能力、行動決定能力の向上および、動作の効率、安定性、応答性能、信頼性、ロバスト性、すべての向上が重要である。これには、移動ロボットの全ての構成要素について同時に高度化する必要があるため、再利用可能で統一的な設計方法が重要となる。

自律型の移動ロボットは、Figure. 1 に構造を示すように、与えられたタスクを実現するためのアプリケーションソフトウェア、ハードウェアを抽象化してソフトウェアの汎用性や再利用性を高めるためのミドルウェア、ソフトウェア実行のプラットフォームである基本ソフトウェア (OS)、組み込み信号処理によりハードウェアを制御するファームウェア、動作を実現したり環境の情報を取得するためのハードウェアから構成される。これらの構成要素のうち、基本ソフトウェアおよびミドルウェアは、Unix、Unix-like (Linux など)、Windows といった、販売または公開されているプラットフォームが利用される。また、Robot Operating System (ROS) [6] や RT-middleware [7] などの、ミドルウェアの発展に伴い、ソフトウェア機能モジュールの汎用性や再利用性が高まっている。また、画像処理ライブラリ OpenCV [8] や、ポイントクラウ



Figure. 1: 典型的な移動ロボットシステムの構成

ド処理ライブラリ Point Cloud Library (PCL) [9]、動作計画ライブラリ Open Motion Planning Library(OMPL) [10] など、アプリケーションソフトウェアに用いられるオープンソースライブラリの開発・公開が進み、高度で複雑な自律移動ロボットアプリケーションの開発の基盤が整いつつある。一方で、ハードウェア、ファームウェアは、目的や想定する動作環境に合わせて異なる構成をもつため、個別に設計を行う必要がある。

移動ロボットに用いられるファームウェアは、センサおよびアクチュエータを用いた計測および制御のための信号処理系である。この種の系の設計手法としては、解析的な計算でシステムを適切に設計する、現代制御理論 [11]、ポスト現代制御 [12, 13, 14, 13, 15, 16]、およびこれらの制御理論と同様の考え方に基づく計測理論が盛んに研究されている。一方、移動ロボットの計測・制御系は、複雑で、非ホロノミック拘束、クリッピング、飽和などの非線形性を含み、解析的な扱いが難しいため、これらの設計理論をそのまま適用することが難しい。そのため、移動ロボット計測・制御系の設計はこれまで、ポスト現代制御の一部である非線形制御論に基づく設計や、近似による線形制御論の適用により行われてきた。これには、個々の問題に対して、システムの内容に合わせた解析的な解き方を個別に見つける必要があり、システム設計が煩雑になる、もしくは過度な近似が必要となる。また、解析的な解法による設計が困難な場合には、経験的なパラメータ設計を行うことになり、計測・制御系の十分な性能での統一的な設計は困難であった。

1.2 屋外自律/自立走行ロボットシステムの設計・実装による問題の分析

実現が期待されている高度な移動ロボットシステムの典型例として、実際の市街地などにおける、自動荷物運搬、人間の移動支援などがある。これらの移動ロボットシステムは、現在地から目的地への自律的な移動機能をベースにしている。本節では、移動ロボットの高度化に必

要な要素を確認するため、移動ロボットの自律ナビゲーションシステムを設計し、実際の市街地において実験した結果を述べる。

1.2.1 対象とする環境と実現する動作

市街地の遊歩道、公園などの一般市民のいる環境を対象とした自律ナビゲーションシステムを構築した。移動ロボットは、一般の歩行者および自転車が利用している中で走行し、開始地点から目的地まで、予め指定した経路通りに移動する。このような環境における自律ナビゲーション手法としては、レーザ測域センサで周辺の物体との距離を走査して得た点群データを、現地で予め取得しておいたデータと照合してメトリックな位置を推定し、これをベースに走行する手法 [17, 18, 19, 20, 21] がよく用いられる。これらの手法は、事前に現地でセンサデータを取得しておく必要があるため、ロボットを初めて持ち込む場所での運用が困難である。また、周辺にある物体が、季節や工事により変化した際の対応が必要である。

本手法では、幅広い環境で、容易に経路を指定して自律走行が実現できるように、センサデータを現地で予め取得する必要のない、自律ナビゲーションを構築した。そのため、経路の指定は、「ここから北に 100 メートルくらい進んだ交差点を右に進む」といった、言葉で人に道を教えるような形式で、衛星写真上で作成することにした。ロボットは自律的に、自身の持つセンサを用いて道を認識し、与えられた経路情報に従って道沿いに走行することで、目的地まで移動する。

1.2.2 用いた計測・制御系

開発した移動ロボット「山彦メロス」(Figure. 2) は、2 個の独立に駆動される動輪と 2 個のキャスターから構成される独立二輪操舵形 (差動駆動型) 車両である。市街地環境における段差を走破するため、最大 2 センチメートル程度の段差を乗り越えて走行することを想定して、動輪及びキャスターにオイルサスペンションを搭載した。動力源として 12 ボルト 7 アンペア時の密閉型鉛蓄電池を 1 個搭載し、1 時間程度の連続走行が可能である。また、センサとしては、車輪の回転を検出するためのロータリーエンコーダ、走査型レーザ測域センサ (北陽電機 UTM-30LX) を 2 台、3 軸磁気センサ (Honeywell HMC1043) を 1 個、搭載している。

2 台のレーザ測域センサはそれぞれ、走査平面を地面と水平に設置して壁や歩行者の足を検出するため、走査平面を地面に向けて傾けて設置して路面の形状を取得するために用いた。レーザ測域センサの点群データは、後ろに物体がある状態で、手前の物体の端を測定すると物体間に誤検出が発生する。そのため経験的に、検出された点それぞれについて、近傍に他の点がない場合は、誤検出として除去して用いた。

地図上に記した方位を利用してロボットを走行させる向きを決定するために、ロボットの向いている方位を検出する。磁気センサから検出される絶対方位には地中や建物中の磁化した鉄



Figure. 2: 構築した移動ロボット“山彦 メロス”の外観

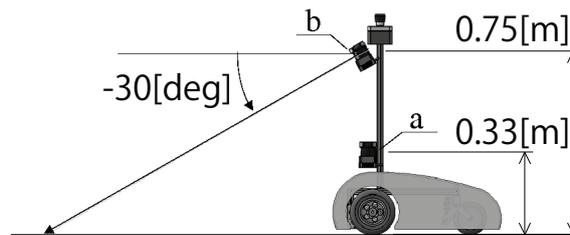


Figure. 3: センサの取り付け位置・姿勢

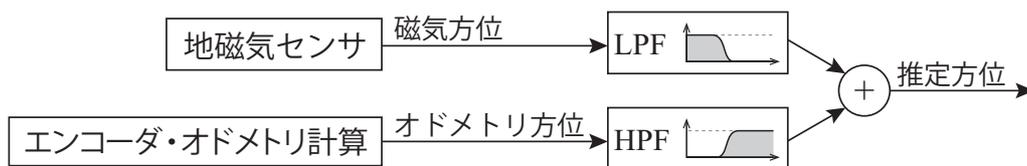


Figure. 4: 空間周波数フィルタによる方位検出系

骨等によって局所的に発生している環境磁場が含まれ、オドメトリを用いた方位検出では短距離では精度の高い相対方位が得られる。そこで、Figure. 4 に示すように、磁気センサから求められた方位の低周波成分とオドメトリにより求められた方位の高周波成分の和を求める周波数領域のフィルタで、ロボットの方位を推定する。環境磁場は位置に依存して発生しているため、市街地環境中に存在する鉄骨等の大きさと同程度の周期をもつ成分を除去するように、走行距離の関数として表した方位について、1次 IIR デジタルフィルタとして構成した。

走行制御系においては、ロボットの向きを、目標方向に与えられた最大角速度・角加速度のもと最短時間で到達するように台形加速制御を行う。また、ロボットの速度・角速度から、逆



Figure. 5: つくばチャレンジ 2011 において与えた Google Earth 上で作成した経路情報

キネマティクスの計算によりモータ速度を求める操舵制御と、ロボットのダイナミクスを考慮したモータの速度制御を用いた。制御のパラメータは、筑波大学構内の歩道で安定に走行するよう、カットアンドトライで決定した。

1.2.3 衛星写真上で作成した経路情報と環境認識に基づく自律走行

本手法では、全体の経路をいくつかの区間に切り分け、各 구간において、ロボットの進むべき方位と次の区間までの距離、交差点の形状の種類を与える。この経路情報は、Figure. 5 に例を示すように、Google Earth 上で衛星写真上に走行する経路を折れ線として書き込み、また交差点と思われる座標にマーカーを置き、そこに交差点の種類を表すラベルを記録することで作成する。この際、緯度経度の情報は使用せず、折れ線の向きおよび長さのみを使用する。

市街地において、移動ロボットにとっての静止している障害物として、壁、路肩・縁石・階段等の段差や走行路のまわりの斜面、芝生がある。また、移動する障害物として、歩行者、自転車が考えられる。ロボットは常時走行可能な路面の上にいるという前提に基づき、ロボットの中心からロボット前方の扇形領域の中で、各方向について障害物があり走行不可能な地点の手前までを、ロボットの走行可能領域として考え、以下の2つの手法を用いて、これを認識する。

1. 移動物体・静止物体の分離・検出

水平に向けて設置した測域センサから得られた点と、センサの間には壁、自転車や歩行者などの大きな障害物は存在しない。この測距点とセンサの間の領域を、自由領域として記録する。過去に自由領域として記録された地点に検出された点を移動物体、それ以外の点を静止物体として検出する。

2. 段差検出

地面に向けて傾けて設置した測域センサから得られた点の、地面からの高さから、閾値により段差を検出する。

多くの場合、道には左右に植木・壁・路肩が存在するため、それらの障害物に衝突したり路肩から外れないようにロボットの幅より広い幅を持つ空間が開いている方向に進めば、道なりに走行できる。そこで、ロボットの現在の位置から、ロボットの幅が検出された走行不可能な地点群に当たらずに進むことのできる距離と、経路情報として予め与えられているロボットが走行すべき方位などから、方向毎の評価値を求め、評価値を最大化する方位を求めることで動作を決定する。

与えられた経路情報では、交差点や道の特徴的な地点について、その形状を、丁字路(左・右に空間がある)、ト字路(前方・右に空間がある)、逆ト字路(前方・左に空間がある)、十字路(前方・左・右に空間がある)、正面に建物の壁がある環境(前方に直線を検出)、などに分けて表現している。交差点や道の特徴的な地点に近づくと、経路情報で与えられた交差点の形状と、周辺のロボットが通れる幅の空間の有無を照合し、認識することで、ロボットの経路情報中での位置を認識する。これらの処理を繰り返すことで自律ナビゲーションを実現する。

1.2.4 実験および結果の概要

実世界で利用可能な技術開発・研究を行うための実証実験の場として茨城県つくば市のつくば駅周辺で開催されている、つくばチャレンジ [22] に参加して実験を行った。つくばチャレンジ 2011 においてロボットが走行すべき課題として示されたコースには、実際の市街地の遊歩道および公園の環境中に設定されており、ロボットが走行中も一般の歩行者および自転車が利用している。経路の全長は 1.4 キロメートルで、経路中にはタイル張りの路面、車道沿いの歩道、公園内の歩道、歩道橋などがある。歩道橋では、ロボットが衝突して歩道橋下の車道に部品等を落下させないよう、ロボットを走行させて良い領域が制限されている。

つくばチャレンジ 2011 の公開実験日に行った公開実験走行では、経路の各部分を自律的に走行できることを確かめた。公開実験走行においては、搭載したバッテリーが経路全体を一度走行できる程度の容量しか持たないため、途中で歩行者を避けるためなどで時間がかかった場合に、電圧の低下により走行不能に陥る場合があった。また、初期の公開実験走行では、状況によって若干の振動が発生したり、加減速度が大きすぎる場合があり、カットアンドトライでのパラメータ調整が必要になる場合があった。

2011 年 11 月 14 日に行われた最終実証走行においては、経路中の 1010 メートル地点付近まで自律走行したものの、プログラムの不具合で異なる道に向かって走行し、実験を終了した。

1.2.5 移動ロボット計測・制御系設計に必要な要素の分析

屋外自律走行ロボットシステムの設計・実装を通して確認した、移動ロボット計測・制御系に必要な要素として、以下の点が挙げられる。

正確な測域センサデータ

測域センサデータのデータに含まれる誤検出の除去を経験的に行っている。誤検出を除去することで最終的に得られる情報量が減少するため、測域センサ自体の精度を高める必要がある。

安定な走行制御

本例では、限定された速度域内で安定な制御パラメータをカットアンドトライで決定している。より幅広い動作領域で働くロボットのための制御系を設計するためには、ロボットがもつ非ホロノミック拘束や制御値のクリッピングといった非線形性をよく考慮した設計が必要である。

電力効率

自立で長距離の自律走行を実現するためには、モータ制御や動作計画において、高効率化を行う必要がある。

1.3 研究の動機と目的

本研究では、従来の計測・制御系構築に用いられる経験的な設計法や、近似に基づく解析的設計および非線形制御論に基づく設計などの、問題毎に個別の解き方を見つける必要がある設計法において設計が難しかった、解析的に扱いにくい移動ロボット計測・制御系の、統一的な設計指針を提案する。これにより、屋外自律走行ロボットシステムの設計・実装における問題の分析結果として挙げた、移動ロボットの計測・制御系における、非線形で複雑なシステムの設計を統一的かつ容易にできれば、これまでに実現されてきた汎用性や再利用性を高められるミドルウェア、基本ソフトウェアとあわせて、様々な移動ロボットアプリケーションの実現を促進できる。

本研究は、大量の数値計算や実測データといった「オフライン計算支援」に基づく計測・制御システム設計法を提案し、移動ロボットの設計問題に適用して効果を検証することを目的とする。

1.4 本論文の構成

第1章 研究の背景として、従来の移動ロボットシステムの構成と設計方法および実際の屋外自律走行ロボットシステムの設計・実装を例に、従来の設計法の適用が難しい移動ロ

ボットの非線形計測・制御系の設計問題について述べる。これらの問題を解決することを研究の動機として、本研究の目的を述べる。(本章)

第2章 従来の設計法の適用が難しい移動ロボットの非線形な計測・制御系を、統一的な考え方で設計可能な、オフライン計算支援に基づく移動ロボットの計測・制御システム設計法を提案し、本設計法に必要な計算の条件を述べる。また、従来の計測・制御系設計法との比較により本研究の位置づけを明らかにするとともに、移動ロボット計測・制御系設計において残されていた問題を洗い出し、それぞれの問題で考慮すべき非線形性の種類を明らかにする。

第3章 電力効率を向上可能な一方で非線形で複雑な回路動作を伴うブラシレスモータの駆動手法を用いた、高効率なブラシレスモータ制御則を、本研究のシステム設計法により設計する方法を述べる。実験に基づき、設計した制御系の特性を評価し、高効率かつ十分な精度での制御が可能であることを明らかにする。

第4章 非ホロノミック拘束および速度・加速度のクリップによる非線形性により、特に高速域で安定化が難しい移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御パラメータを、本研究のシステム設計法により設計する方法を述べる。実験に基づき、設計した制御系の特性を確認し、広い速度域で安定な軌跡追従制御が実現できることを明らかにする。

第5章 高周波アナログ信号処理系の非線形性により誤検出を発生するレーザ測域センサの計測則を、本研究のシステム設計法により設計する方法を述べる。実験に基づき、従来の計測系が誤検出を発生する環境において、設計した計測系により誤検出の少ない計測が実現できることを明らかにする。

第6章 第3章から第5章で明らかにした、移動ロボット計測・制御系において残されていた問題における本研究のシステム設計法の有効性を考察し、提案設計法が有効に働く範囲および、その条件を明らかにする。

第7章 本研究の成果を総括し、本研究の移動ロボット分野、工学分野への寄与を述べる。

第2章 オフライン計算支援に基づく移動ロボットの計測・制御系設計法

2.1 オフライン計算支援に基づく計測・制御システム設計法の提案

本研究では、解析的な手法による設計が難しかった、移動ロボットの計測・制御系等のシステムを、対象のシステムの取り得る全ての状態および与える入力について数値シミュレーションや実測によりシステムの動作を求め、その結果から目的の動作を実現する適切な則やパラメータを探索することで、実用的に設計する手法を提案する。網羅的に入出力の関係を求めることで実用的な則を設計すれば、多くの計算・データ量が必要となる一方、複雑性、非線形性を十分に考慮でき、率直な手法であるため直感的な手順での設計が可能になる。

2.1.1 網羅的なシステム動作の順計算とその逆計算に基づくシステム設計

計測・制御系設計とは、計測・制御の対象となるシステムの動作の結果から、その動作を引き起こすシステムの入力を求める則を導くことである。すなわち、制御系設計とは、目的とする動作を得るために必要な、適切な制御入力を求める則を導くことである。これは、制御入力を与えた結果として、システムにより実現される動作を求める、計測対象システムの動作解析やシミュレーションの逆計算に当たる。また、計測系設計とは、システムの動作の結果として得られた信号から、システムの入力、つまり計測対象の状態を、求める則を導くことである。同様にこれは、計測対象の状態を入力として、システムにより得られる信号を求める、計測対象システムの動作解析またはシミュレーションの逆計算に当たる。

従来の解析的な計測・制御系設計論は、システムの動作を数式としてモデル化して表し、この逆計算を解析的に求めることで、適切な計測・制御則を導く。したがって、システム動作モデルが複雑で非線形で、解析的な逆計算が困難な場合、解析的な手法による設計が難しい。従来の解析的な計測・制御系設計においては、このような場合に、モデルの正確さ、ひいては設計される計測・制御系の特性を犠牲に、計算方法を簡単にするため、システムモデルを線形近似する。現実の環境で複雑な動作を実現する移動ロボットの計測・制御系は、複雑で非線形なものを含むため、従来の計測・制御系設計法では十分な特性が実現できず、適切なシステムの構築の妨げとなっていた。

しかし、与えた入力から得られる結果が推定可能な決定論的システムにおいては、システム

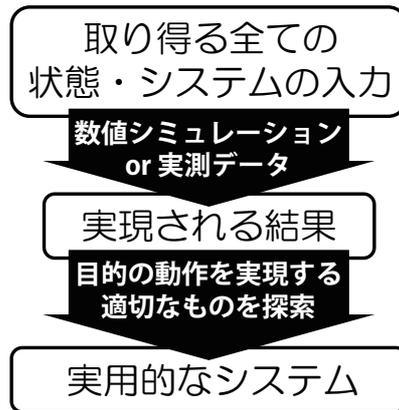


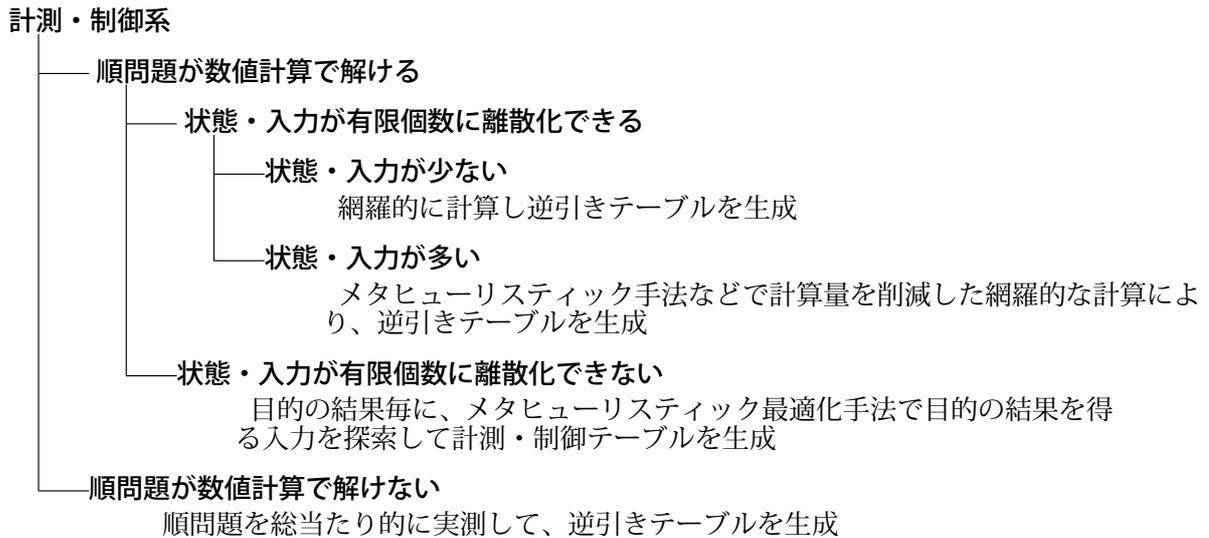
Figure. 6: オフライン計算支援に基づく計測・制御系設計手法の概要

動作モデルの解析的逆計算が難しい非線形で複雑なシステムを対象とした場合でも、数値シミュレーションや実測による順計算は可能である。したがって、このようなシステムにおいては、解析的な逆計算手法を用いず、数値計算的な逆計算によりシステムの動作結果からシステムの入力を求める則を導けば、計測・制御系設計が可能となる。すなわち、Figure. 6 に流れを示すように、取り得る全ての状態・システムの入力に対して網羅的に数値シミュレーションまたは実測データといったシステム動作の順計算を行い、その結果から目的の結果を実現する入出力関係を抽出して記録する。記録した入出力関係を逆引きし、同じ出力を得る入力複数ある場合には最良なものを選択すれば、目的を実現するための適切な入力が見られる。これにより得られた逆関係を逆引きテーブルとしてまとめたものが、本手法において設計される計測・制御則である。

本設計手法は、網羅的に入出力の関係を求めて適切な計測・制御則を得るため、複雑な非線形性を持つシステムであっても、数値シミュレーションや実測により動作が表せれば、非線形性を陽に考慮したシステム設計が可能である。また、従来の計測・制御系設計のように、解き方の都合で個々の問題にあわせて線形近似を行ったり、個々の問題にあわせて非線形解法を見つける必要がないため、直感的な設計が可能である。一方、網羅的な計算による設計手法は、莫大な計算量、データ量が必要となるが、近年の半導体技術の向上や、ハイパフォーマンスコンピューティング技術、クラウドコンピューティング技術などの発展に伴う計算資源の増加により適用可能な範囲が広がっている。

2.1.2 問題の種類毎の逆計算手法

本設計手法においてシステムの動作結果からシステムの入力を求める則を網羅的な計算により導くためには、システムの入力および、システムの状態の離散化条件および、適用可能な順計算の種類に適した方法で逆計算を行えばよい。問題の種類毎の、代表的な逆計算手法を以下に示す。



本設計手法では、従来の解析的な設計法で必要だった、問題の内容毎に異なる非線形解法や近似方法を導出する手間を不要にして、数値計算によりシステムを設計できる。この数値計算による設計は、計算量および対象とするシステムの動作の数値計算可能性を考慮すれば、前述のようにある程度統一的手法で実現できる。すなわち、従来の解析的な設計手法において、設計者はシステム動作の順計算手法および、解析的な逆計算手法の両方を深く理解している必要があったが、本設計手法では順計算手法のみを深く理解していればよい。

2.1.3 数値計算的な逆計算における離散化の条件

あらゆる入力や状態について数値シミュレーションや実測によりシステム動作の順計算を行って、その結果から逆計算を導けば、最良の計測・制御測を見つけられることは自明である。このとき、数値シミュレーションや実測による順計算においては、入力や状態を離散化して与える必要がある。入力や状態を、全ての離散化区間内でシステムの動作が単調に変化するように離散化すれば、区間内でのシステムの動作は、区間の両端それぞれにおける動作の範囲内に収まる。すなわち、離散化区間内におけるシステムの動作の単調性が満たされれば、離散化の間隔は本設計法の適用において妥当であると言える。単調性が満たされない場合でも、離散化区間内におけるシステム動作が、システム設計の要件で許容される範囲内であることが確かめられればよい。

また、得られた計測・制御則を用いて、計測・制御を行う際には、必要に応じて則を補間して利用する必要がある。このとき、入力や状態を、全ての離散化区間内でシステムの動作が単調に変化するように離散化すれば、離散化区間内の計測・制御則は、区間の両端から内挿で与えられる。すなわち、離散化区間内におけるシステムの動作の単調性が満たされれば、離散化の間隔は、計測・制御則を補完して用いるのに十分である。単調性が満たされない場合でも、

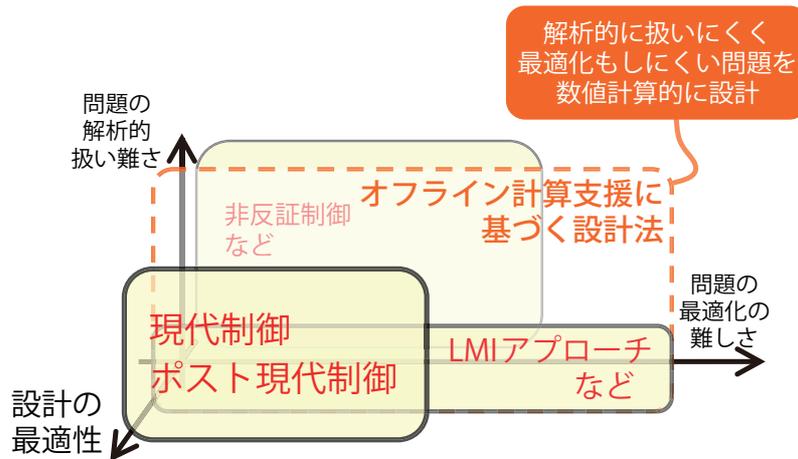


Figure. 7: 本研究と関連研究の位置づけ

離散化区間内で補間により与えた則で得られるシステム動作が、システム設計の要件で許容される範囲内であることが確かめられればよい。

2.2 本研究の位置づけ

関連する研究として、実測したシステムの応答のシミュレーションや実測値に基づいて、要求仕様を満たさないパラメータ領域を求めることでシステムを設計する非反証制御 [23] や、問題を行列不等式で定式化し、数値最適化アルゴリズムにより設計する LMI アプローチの制御系設計手法 [12, 24, 25] が報告されている。これらの手法はそれぞれ、システムの解析的なモデル化が難しい問題、解析的最適化が難しい問題に対して有効である。本研究で提案する手法は、解析的なモデル化も、解析的最適化も難しい問題にも同様に適用できる。

すなわち、本研究は Figure. 7 に示すように、解析的に扱いにくく最適化も難しい計測・制御問題を、数値計算的な最適化により実用的に設計するものである。これにより、要求仕様を満たさないパラメータ領域を求めることでシステムを安定に設計する非反証制御 [23] などの対象とする、解析的に扱いにくく最適化も難しい問題を、システムの特性を考慮して設計可能にする。また、行列不等式で定式化できる問題を準最適に設計できる LMI アプローチ [12, 24, 25] などと比較すると、解析的な取り扱いが難しい問題にも適用可能な範囲を広げられ、現代制御・ポスト現代制御などの解析的最適化に基づく制御理論の適用が難しかった、解析的な扱いや最適化が難しい問題についても、数値計算的な最適化により、実用的な計測・制御系を実現できる。

本研究の計測・制御系設計法と同様の適用可能な範囲を持つ制御系の設計手法として、振り子を振り上げる動作制御などを例に、システムの状態遷移とその挙動を数値シミュレーションにより計算し、最適化手法の一種である動的計画法により制御則を生成する手法が提案されて

いる [26, 27]。この手法では、システムの状態を分割してその状態遷移を考慮して、最終的な目標状態へ到達する制御則を、数値計算的な最適化により見つけるため、計算量をある程度削減しつつ、解析的なモデル化、解析的最適化が難しい問題に対して有効に働く。これに対して本研究で提案する手法は、総当たりにシステムの状態および与える入力に対して数値計算して則やパラメータを見つめるため、計算量が増大する一方で、システムの状態遷移の考慮が不要になり、より直感的な利用と得られる結果の高性能化が期待できる。

また、動的システム開発には、モデルベースデザインと呼ばれる、システムモデルの数値解析的な評価を行いながら、その結果に基づくフィードバックにより洗練されたシステム設計を実現する手法 [28, 29] が用いられている。これは、本研究の考え方を手動で適用する設計法と言える。更に、同様の手法でハードウェアパラメータをモデル評価に基づいて、自動的に決定する例 [30] も報告されている。

2.3 自立型の移動ロボットに必要な計測・制御系

1.2 節で述べた自立移動ロボットによる屋外自律走行システムにおいては、設計・実装・実験を通して、正確な測域センサデータ、安定な走行制御、電力効率が重要であることが分かった。ここでは、1.2 節の結果を踏まえて、自立移動ロボットを構成する計測・制御系を列挙し、それぞれの計測・制御系の従来の設計法と、残されている課題を確認する。

移動ロボットに必要な計測・制御系として、アクチュエータ制御、移動体制御、モーション制御、内界センサ計測、パッシブ外界センサ計測、アクティブ外界センサ計測がある。これらのうち、ほとんどの計測・制御系は、線形計測、線形制御系として適切に設計できる。一方で、高効率なブラシレスモータ制御、軌跡追従制御、レーザ測域センサ計測といった計測・制御問題は、設計を容易にするため、複雑な回路動作や、非ホロノミック拘束、制御系の実装上組み込まれる例外的処理、クリッピングの影響を無視し、特性を犠牲にして設計されている。それぞれの制御・計測系の特徴を以下に示す。

- アクチュエータ制御

具体例	DC モータ制御、ブラシレスモータ制御
従来の設計法	限定された駆動方式では線形制御での設計
残されている課題	非線形な駆動方式も含めた高効率な制御の実現が必要

- 移動体制御

具体例	操舵制御
従来の設計法	一般的な操舵方式についてはキネマティクス計算により設計

- モーション制御

具体例	軌跡追従制御
従来の設計法	複雑な例外的処理やクリッピング、非ホロノミックなどの非線形性を無視した制御系設計
残されている課題	長期的な挙動と非線形性を考慮した広い動作範囲で安定な制御の実現が必要
● 内界センサ計測	
具体例	ロータリエンコーダ、ジャイロ・加速度センサ
従来の設計法	必要な値を直接測定可能なため線形系として設計可能
● パッシブ外界センサ計測	
具体例	画像センサ、地磁気センサ
従来の設計法	必要な値を直接測定可能なため線形系として設計可能
● アクティブ外界センサ計測	
具体例	レーザ測域センサ
従来の設計法	複雑な非線形信号処理を経験的に設計
残されている課題	複雑・非線形性を考慮した高精度な計測系設計が必要

これらの計測・制御系のうち、モータ制御においては、現在は限定された駆動方式での線形制御による設計が行われるが、高効率な制御の実現には非線形な駆動方式も含めた高効率な制御の実現が必要である。また、軌跡追従制御においては、例外動作、クリッピング、非ホロノミックなどの性質を無視した制御系設計が行われるが、制御の特性や広い速度範囲での安定性を向上するためには、これらを考慮する必要がある。レーザ測域センサにおいては、計測に必要な高周波アナログ系の複雑な非線形動作に対して経験的な設計でデジタル信号処理が行われるが、誤検出の少ない高精度な計測の実現には、複雑・非線形性をよく考慮する必要がある。

本研究では、提案したオフライン計算支援に基づく計測・制御システム設計法を、これらの移動ロボットの計測・制御系に残された問題に適用して、設計法の効果と適用可能な問題の範囲を検証する。

第3章 ブラシレスモータの高効率な電流制御

3.1 背景と関連研究

小型の移動ロボットでよく用いられる、電氣的応答の速い小型の永久磁石同期モータ(ブラシレスモータ)は、パルス幅変調(PWM)方式で駆動すると電流の脈動により損失が生じる。特にトルクむらが少なく、制御性に優れるコアレス型のモータでは、この損失が顕著に表れる。この損失は複数の電圧をPWMで与えるマルチレベルPWM[31]、Step-downインバータを用いて電源電圧を状況に応じて下げることで電流の脈動を低減する手法[32]、LCフィルタで電流の脈動を低減しつつ高精度に制御する手法[33, 34]で低減できるが、回路の規模が増大する問題があった。

一方、電源電圧と接地電圧を交互に印加する一般的なPWMの代わりに、ハイインピーダンス状態を含むPWMを用いると、電流の脈動による損失を低減できるが、その場合、PWM信号とモータ電流の関係が非線形で複雑になる。この駆動方法を用いたDCモータの電流制御系設計法[35]は既に報告されているが、モータの端子数が多いブラシレスモータにおいては動作が複雑になり、適用が困難であった。

3.2 高効率な非線形駆動法と総当たり計算に基づく電流制御系設計手法

電流の脈動による損失を低減可能なハイインピーダンス状態を含むスイッチングによるブラシレスモータ駆動系は、複数の回路方程式が状態によって逐次切り替わる数値計算として表せる。すなわち、モータの角速度、角度、および電流の初期値の3次元のシステム状態と、駆動方式(提案駆動方式による駆動、提案駆動方式による制動、従来の駆動方式の3パターン)、3次元のPWMデューティ比の4次元の与える入力について、それぞれで実現される電流と消費電力(スイッチング損失も含む)を数値シミュレーションにより計算できる。本章では、その結果から、Figure. 8に概要を示すように、システムの状態(モータの角速度、角度)と目標電流ごとに、消費電力を最小にするPWMデューティ比と駆動方式を見つけることで、非線形な駆動方法も用いて高効率に制御系を構築する方法を述べる。

この問題において対象のシステムの状態と入力は、モータの角度・角速度、与えるPWMのデューティ比の組み合わせであり、それぞれの取り得る範囲はモータの定格、および駆動回路の仕様で限定されるため、有限個数に離散化して扱える。したがって、システムの入力に対

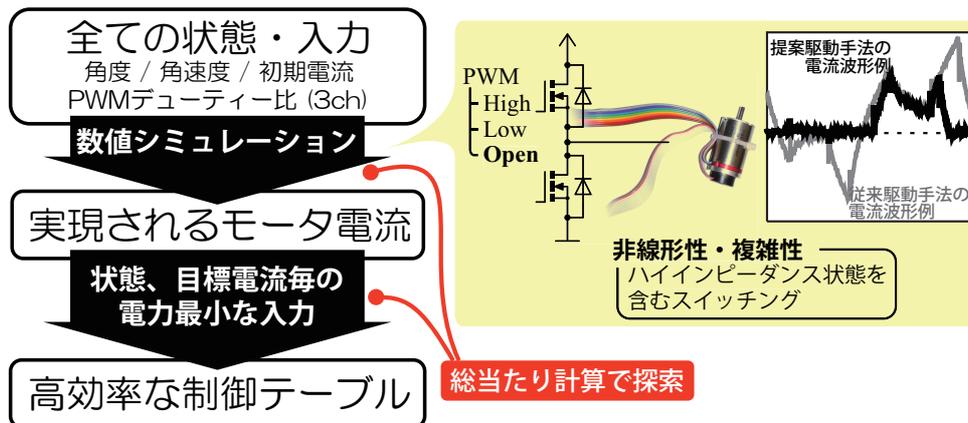


Figure. 8: オフライン計算支援に基づく非線形な駆動法を用いた高効率な駆動系の電流制御系設計の概要

する出力を網羅的に計算してモータ軸角度、角速度、目標電流の振幅をインデックスとして、与えるべき PWM デューティ比の組を引く逆引きテーブルを生成すれば、モータ制御が可能になる。ただし、システムの状態と入力の組み合わせは莫大なため、ここでは分枝限定法により計算量を削減することで網羅的な順計算および逆計算を行う。

3.2.1 ブラシレスモータのハイインピーダンス状態を含む出力を用いた PWM スwitchングによる駆動

電源電圧と接地電圧を交互に印加する従来の一般的な PWM によるブラシレスモータ駆動電流と、ハイインピーダンス状態を含む PWM によるブラシレスモータ駆動電流の例を Figure. 9 に示す。Figure. 9 は、有限会社テクノクラフト社製モータドライバ TEC-3PMD-RB-V7K を用いて、PWM 周期 50 マイクロ秒で、maxon 社製ブラシレスモータ EC-max 22 を駆動した場合の、モータ端子電流波形である。モータの電気時定数が小さいため電流値が大きく脈動し、従来の一般的な PWM による駆動電流波形には、目標電流と逆方向に電流が流れていることが確認できる。これは、Figure. 10 に回路の動作を示すように、モータ端子に印加される電圧が切り替わった際に、モータ内部インダクタンスの作用によって連続的に電流が流れた後、インダクタンスに蓄積されたエネルギーが尽きると、逆方向に電流が流れることによる。このモータの内部抵抗では、電流の 2 乗積分値に比例して熱が発生するため、この電流の脈動により電力損失が増大する。

ハイインピーダンス状態を含む PWM による駆動手法では、Figure. 11 に示すように、各相に電源電圧とオープン状態、もしくは接地電圧とオープン状態を交互に与えるため、モータ内部インダクタンスの作用によって連続的に電流が流れる際には、ダイオードを通してのみ電流が流れるため、電流が 0 になるとダイオードが OFF 状態になり、目標電流と逆方向の電流は発生しない。これにより、電流の脈動による PWM 損が抑制され、効率が向上する。

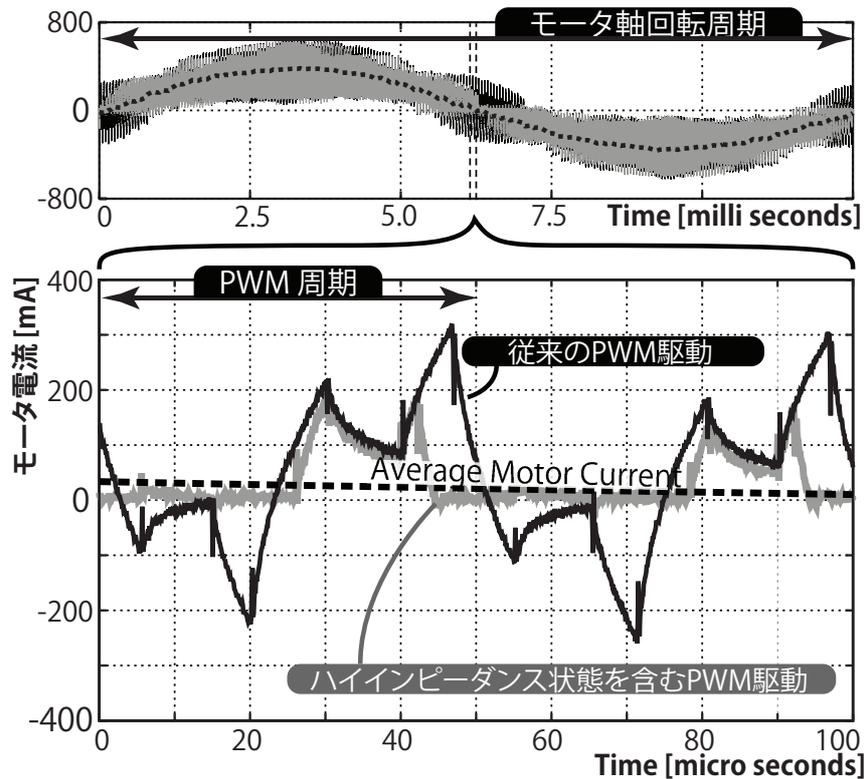


Figure. 9: 電氣的応答速度の速い小型ブラシレスモータ駆動電流の例

与える PWM パターンのパラメータとモータに流れる電流の関係は、従来の一般的な PWM では線形な回路方程式として表せるが、ハイインピーダンス状態を含む PWM ではこれが非線形で複雑になる。従来の PWM では、モータ端子は常に半導体スイッチによって、電源電圧および接地電圧にほぼゼロインピーダンスで接続されているため、平均端子電圧は電源電圧と接地電圧の時間比率の重み付き平均で表せる。すなわち、従来の PWM ではスイッチング波形を考慮せずに、端子にアナログ電圧を印加しているように扱えるため、モータの線形回路方程式を解けば、PWM デューティ比とモータ電流の関係が容易に求められる。一方で、ハイインピーダンス状態を含む PWM では、ダイオードを通して電流が流れている際に電流が 0 になり、ダイオードが OFF 状態になると、モータ端子と電源電圧・接地電圧のインピーダンスが変化する。そのため、PWM デューティ比と端子電圧の関係を線形な式で表せない。

したがって、ハイインピーダンス状態を含む PWM を用いて、モータ電流を非線形な回路動作を陽に考慮して制御できれば、本章で扱う電気時定数が小さいブラシレスモータの駆動における消費電力を削減できる。

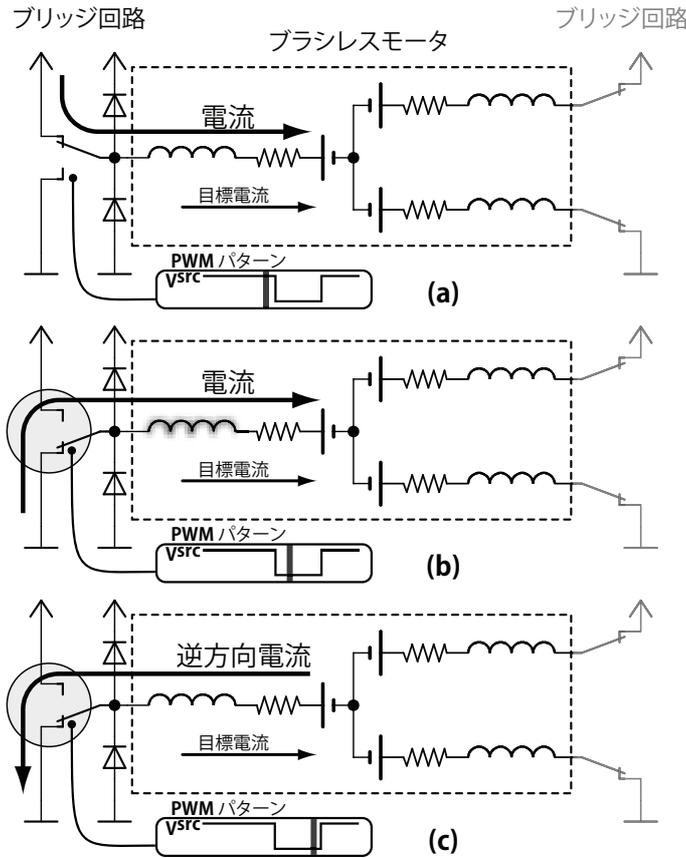


Figure. 10: 電源電圧と接地電圧を交互に印加する従来の一般的な PWM によるブラシレスモータ駆動において目標電流と逆方向に電流が流れるメカニズム

3.2.2 順計算: モータ電流の解析

ブラシレスモータをフィードフォワード的に電流制御するため、まずハイインピーダンス状態を含む PWM スイッチングによるブラシレスモータ駆動時の、スイッチングパターンとモータ電流の順関係を解析する。スター型等価回路で表した 3 相ブラシレスモータの等価回路を Figure. 12 に示す。ここでは、モータの内部抵抗値を R 、内部インダクタンスを L と表す。機械的な応答速度は、PWM 周期と比較して十分に遅いため、PWM 周期中のモータの回転数・逆起電力 E_k は一定と見なせる。

いま、変数を以下のように定義する。

E_k モータ端子 k の逆起電力電圧

X_k モータ端子 k の印加電圧

s_k モータ端子 k に接続された駆動回路の出力モード

R モータ内部抵抗

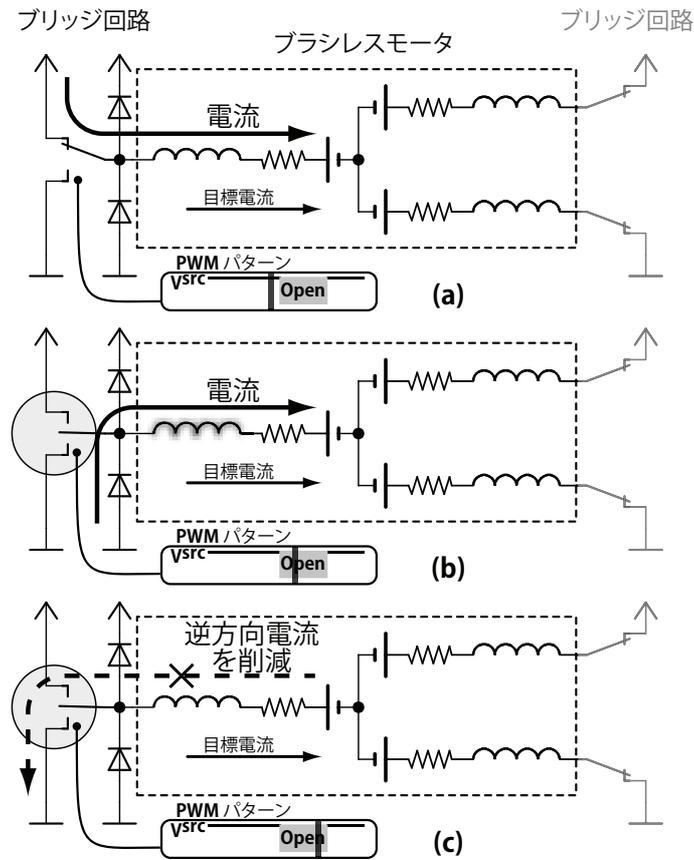


Figure. 11: ハイインピーダンス状態を含む PWM によるブラシレスモータ駆動における目標電流と逆方向に流れる電流の削減

L モータ内部インダクタンス

V^{src} 電源電圧

V^{diode} ダイオード順方向電圧

i_k モータ端子 k に流れる電流

\bar{i}_k モータ端子 k の平均電流

T PWM 基本周期

d_k モータ端子 k に印加する PWM デューティ比

モータ端子 k に接続されたハーフブリッジ回路の出力 S_k が取る状態を Table 1 に示す。また、ハーフブリッジ回路の出力が、High ($S_k = H$)、Low ($S_k = L$)、Open ($S_k = O$) それぞれのときの、端子 k に印加される電圧 X_k を式 (1) に示す。出力が Open の状態では、モータ電流はフリーホイリングダイオードを通して流れる。

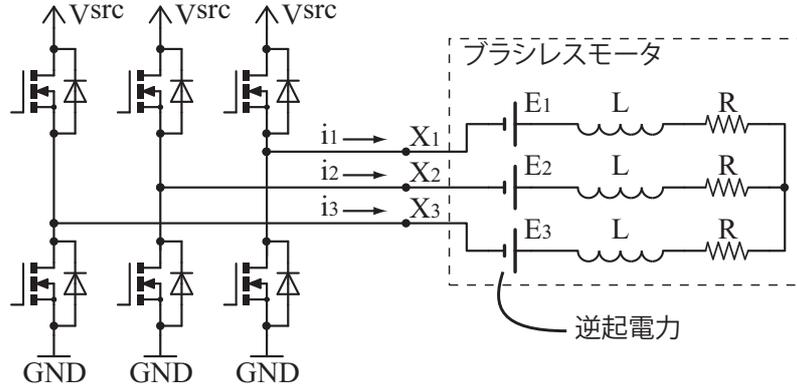


Figure. 12: ブラシレスモータの内部抵抗、インダクタンス、逆起電力、駆動回路の半導体スイッチ、フリーホイリングダイオードからなるブラシレスモータ駆動系の等価回路

$$X_k(t) = \begin{cases} V^{src} & s_k(t) = H \\ 0 & s_k(t) = L \\ -V^{diode} & s_k(t) = O \wedge i_k(t) < 0 \\ V^{src} + V^{diode} & s_k(t) = O \wedge i_k(t) > 0 \end{cases} \quad (1)$$

このとき、トランジスタとダイオードの On/Off の状態が変化しない期間、 $t = t_0$ から $t = t_0 + \tau$ におけるモータ電流は、式 (2) で表される。式中の t_0 はその期間の開始時刻、 $A_k(t_0)$ は端子電流の増加量を表す係数である。 $A_k(t_0)$ はモータ端子電圧によって決まり、式 (3) で表される。

$$i_k(t_0 + \tau) = i_k(t_0) e^{-\frac{R}{L}\tau} + A_k(t_0) \left(1 - e^{-\frac{R}{L}\tau}\right) \quad (2)$$

$$A_k(t) = \begin{cases} \frac{1}{R} \left(X_k(t) + E_k - \frac{\sum_{j \in \mathbb{T}} X_j(t) + E_j}{\sum_{j \in \mathbb{T}} 1} \right) & s_k(t) \ni \mathbb{T} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbb{T} = \{l \mid s_l(t) = H \vee s_l(t) = L \vee i_l(t) \neq 0\}$$

Table. 1: 各モータ端子に接続されたハーフブリッジ回路の出力モード

出力モード	S_k	端子 k の状態
Open	O	ブリッジ回路の全トランジスタが OFF
High	H	ブリッジ回路のハイサイドトランジスタが ON
Low	L	ブリッジ回路のローサイドトランジスタが ON

また、平均モータ端子電流は式 (4) で、電源から駆動回路を通してモータ端子に供給される電力は式 (5) で表される。

$$\int_{t_0}^{t_0+\tau} i_k(t) dt = \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}\tau}) (i_k(t_0) - A_k(t_0)) + A_k(t_0) \tau \quad (4)$$

$$\int_{t_0}^{t_0+\tau} p_k(t) dt = \begin{cases} V^{src} \int_{t_0}^{t_0+\tau} i_k(t) dt & s_k=H \vee (s_k=O \wedge i_k > 0) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

ブリッジ回路の出力が **Open** のとき、直前にモータ電流が流れていると、モータのインダクタンスによりフリーホイリングダイオードを通して連続的に電流が流れる。このとき、スイッチングパターンを電流が 0 になるタイミングで分割し、残りの期間は該当するダイオードを **Off** として、すなわち該当するモータ端子が接続されていないものとして、再帰的に同様の処理をくり返す。このとき、ダイオードが **Off** になるまでの時間 $t_{turnoff}$ は、式 (6) で表される。

$$t_{turnoff} = \frac{L}{R} \log \left(\frac{i(t_0) - A_k(t_0)}{A_k(t_0)} \right) \quad (6)$$

また、ハーフブリッジ回路の各スイッチング素子に発生するスイッチング損失 P_k^{sw} は、式 (7) で求め、消費電力に加算する。

$$P_k^{sw} = \frac{1}{6} \tau_{sw} i_k(t_0) \left| X_k(t_0) - X_k(t_0 - \Delta t) \right| \quad (7)$$

ここで、 τ_{sw} はスイッチング素子の立ち上がり、立ち下がり時間を、 $X_k(t_0)$ はスイッチング直後の出力電圧、 $X_k(t_0 - \Delta t)$ はスイッチング直前の出力電圧を表す。式 (7) は、スイッチング素子に流れる電流と、素子の両端に印加される電圧が一次関数的に変化すると仮定した場合に、スイッチング素子中で消費される電力を表す。

上記の式を用いて、スイッチングパターンで時分割した期間ごとに逐次的にモータ電流を計算することで、平均モータ電流、消費電力が計算できる。このとき、電流の初期値は直前の軸角度におけるモータ電流目標値を与える。各端子の逆起電力は、モータの逆起電力関数にモータ軸角度と回転数から求まるため、ブラシレスモータに流れる平均電流は、モータ定数、電源電圧、PWM 基本周期と、軸角度、回転数および PWM デューティ比から、計算により求まる。

3.2.3 逆計算: 網羅的な数値計算による制御テーブル生成

一般的な PWM 生成器で出力できる、位相同期 PWM による 3 相モータ駆動のスイッチングパターンとしては、Figure. 13a, 13c, 13b に示す、従来の駆動方式、ハイインピーダンス状態を

含む制動方式、ハイインピーダンス状態を含む駆動方式がある。モータ軸角度、角速度、および駆動方式にスイッチングパターンを示した駆動方式ごとに、以下の手順をくり返すことで、電流制御テーブルを生成する。

1. モータ軸角度および角速度からモータ内部の逆起電力を計算してこれを前述の回路解析結果に代入し、すべての PWM デューティ比の組み合わせについてモータ電流を計算する。
2. 目標電流の振幅ごとに、正弦波駆動などの駆動方式に従って決まる、各瞬間の端子毎の目標モータ電流と最も近い電流を実現する PWM デューティ比を検索し、該当するテーブル中の場所に、PWM デューティ比と駆動方法を記録する。複数の PWM デューティ比の組み合わせで、目標電流を実現できる場合には、消費電力が最も少ないものを選ぶ。

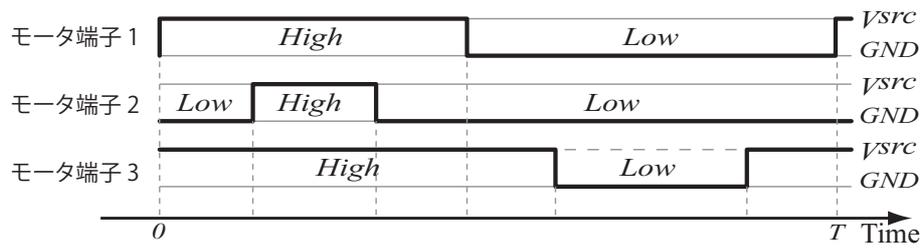
この際、予め状態を粗く離散化した結果を用いて、モータ電流を概算しておき、明らかに目標電流を実現できない領域について計算を省くことで、網羅的な計算における分枝限定を行い、計算コストを削減する。

モータを実際に制御する際には、制御装置内の組み込みコンピュータ内に、生成した逆引きテーブルを記録しておき、逐次、このテーブルを目標の電流と測定したモータ軸角度、角速度をインデックスとして引き、駆動回路に出力する。

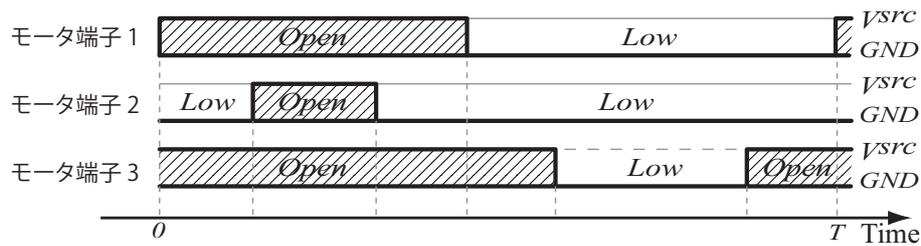
3.3 オフライン計算支援に基づく設計と実験に基づく評価

評価のために、12W の小型 3 相ブラシレスモータを対象として制御系を構築し、電流制御の精度と消費電力を測定した。用いたブラシレスモータ maxon EC-max 22 のパラメータを、Table. 3 に、モータドライバ 有限会社テクノクラフト TEC-3PMD-RB-V7K のパラメータを Table. 2 に示す。システムの状態と入力を、Table. 4 に示すように、計 7 次元を、 1.1×10^{14} に離散化したところ、前述の制御系設計手法による 13 時間の計算で制御テーブルを生成できた。従来の駆動手法における理想的な消費電力と、生成した制御テーブルを用いた際の理想的な消費電力を Figure. 14 に示す。その際、端子毎の目標電流は進角 0 の正弦波駆動方式を用いることとし、モータ軸角度 θ 、角速度 ω 、および目標電流の振幅 A に対して、以下の式で与えた。

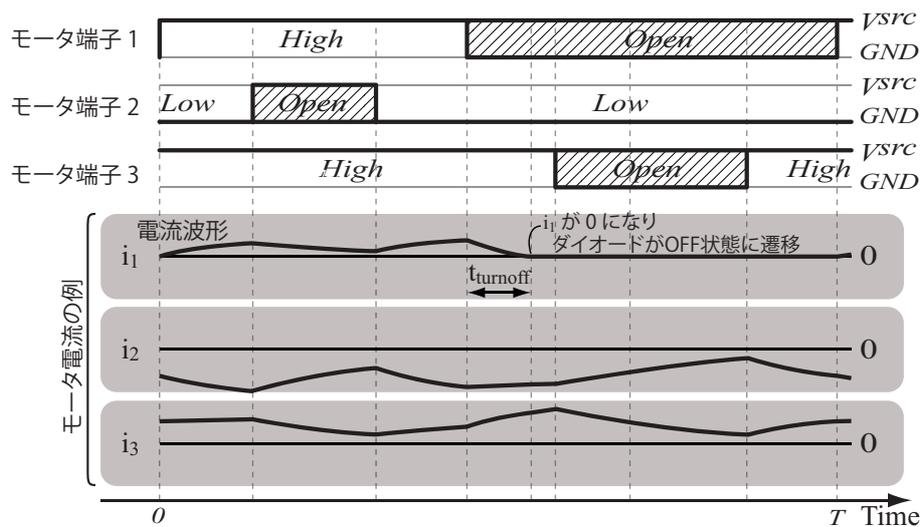
$$\begin{aligned}
 i_1^{ref}(\theta) &= A \sin(\theta) \\
 i_2^{ref}(\theta) &= A \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 i_3^{ref}(\theta) &= A \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{8}$$



(a) 従来の PWM スイッチングパターン



(b) ハイインピーダンス状態を含む PWM による制動スイッチングパターン



(c) ハイインピーダンス状態を含む PWM による駆動スイッチングパターン

Figure. 13: 従来の PWM スイッチングパターンおよび、ハイインピーダンス状態を含む PWM のスイッチングパターン

また、逆起電力の値は以下の式で与える。

$$\begin{aligned}
 E_1(\theta) &= \omega K_E \sin(\theta) \\
 E_2(\theta) &= \omega K_E \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 E_3(\theta) &= \omega K_E \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

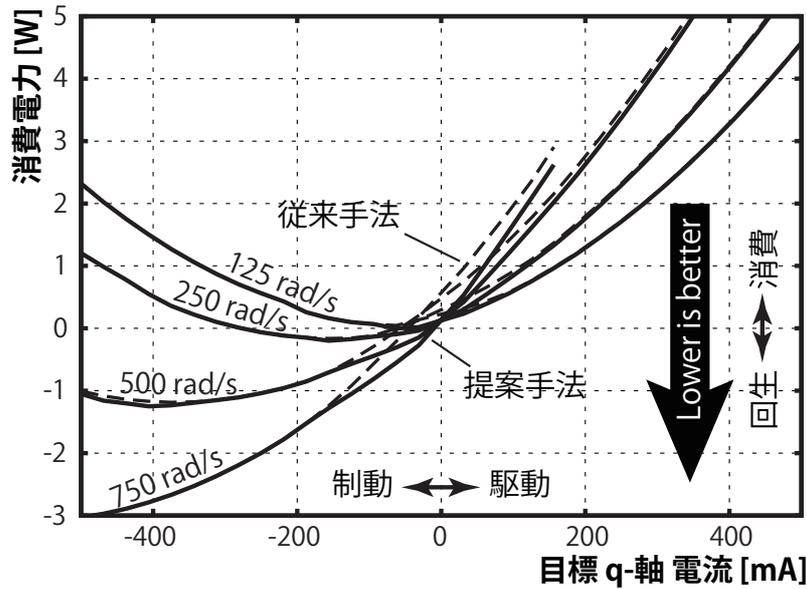


Figure. 14: 目標 q -軸電流および角速度に対する、従来の駆動手法における理想的な消費電力と構築した制御系の理想的な消費電力

ただし、 K_E はモータの逆起電力係数を表す。

数値計算的なシステム設計において用いた、入力・状態の離散化の妥当性を確かめるため、

Table. 2: ブラシレスモータドライバ 有限会社テクノクラフト TEC-3PMD-RB-V7K の主な仕様

PWM デューティ比の分解能	1000
PWM 基本周期	50 μsec
ブリッジ回路のデッドタイム	2.5 μsec

Table. 3: ブラシレスモータ Maxon EC-max 22 の主な仕様

定格出力	12	W
定格電圧	24	V
最大回転数	11500	rpm
端子間抵抗	12.4	Ω
端子間インダクタンス	0.488	mH
回転数定数	495	rpm/V
機械的応答速度	7.5	m
最大連続電流	661	mA

入力・状態毎に、離散化区間内での単調性を確認する。システムの入力は、モータの3端子それぞれに与える PWM デューティ比 d_1, d_2, d_3 、システムの状態は、モータ角度を位相、角速度を振幅とする正弦波で表される逆起電力電圧 E_1, E_2, E_3 にあたる。各変数が変化したときの、システムの出力行であるモータ電流および消費電力の変化を以下に示す。

PWM デューティ比

ある端子に与える PWM デューティ比 d_i を変化させたとき、PWM 基本周期の中でモータ電流を増加させる時間比率が単調に変化するため、モータ電流・消費電力は PWM デューティ比に対して単調に変化する。

モータ角速度

式 3 でモータ端子電流の増加量を表す係数 A_k に現れ得る逆起電力電圧の項、 $E_i - E_j$ 、または $E_i - (E_j + E_k)/2$ はモータ角速度に比例するため、モータ角速度に対して単調に変化する。従って、モータ角速度に対して、 A_k は常に単調に変化し、式 4 および式 5 よりモータ電流・消費電力も単調に変化する。

モータ角度

$E_i - E_j$ および $E_i - (E_j + E_k)/2$ は、角度を変数とする正弦波である。これらは正弦波のピーク部分を除いて、モータ角度に対して単調である。また、正弦波のピーク部分は、角度分解能を 96 とした場合の角度の離散化区間で、 $\cos(2\pi/96) \simeq 0.99786$ より、0.21 パーセントの誤差で直線に近似できる。したがって、 $E_i - E_j$ および $E_i - (E_j + E_k)/2$ は、モータ角度に対して離散化区間内ではほぼ単調に変化するため、 A_k およびモータ電流・消費電力はモータ角度に対して角度の離散化区間内ではほぼ単調に変化すると言える。

したがって、この非線形な駆動法を用いた高効率なブラシレスモータ駆動系の電流制御系設計において、数値計算的なシステム設計における離散化の条件である、離散化された区間内での

Table. 4: オフライン計算支援に基づく非線形な駆動法を用いた高効率なブラシレスモータ駆動系の電流制御系設計の離散化間隔

	次元	離散化	範囲
駆動方式	1	3	n/a
モータ角速度	1	48	0 ~ 1204 rad/s
モータ角度	1	96	0 ~ 2π rad
モータ電流初期値	1	64	-1 ~ 1 A
PWM duty 比	3	500 ³	0 ~ 1
合計	7	1.1×10^{14}	
計算時間		13 時間	

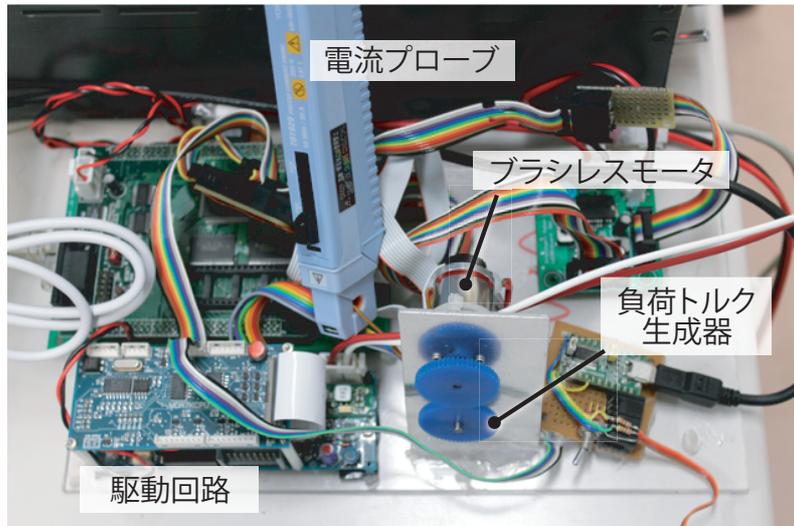


Figure. 15: ブラシレスモータ駆動・制御実験に用いたシステムの外観

単調性がほぼ満たされることが確かめられた。以降の評価実験において制御テーブルを引く際には、線形補間で分解能を高めて用いた。

実験に用いたシステムを Figure. 15 に示す。ブラシレスモータ軸は速度制御された負荷トルク発生用の DC モータに接続されている。電流の測定にはデジタルオシロスコープ YOKOGAWA DL9140 および電流プローブ YOKOGAWA PBC050 を用いた。

消費電力を評価するために、従来の PWM を用いた駆動・制御系と、ハイインピーダンス状態を含む PWM を用いた駆動法と本研究の設計手法により構築した制御系、それぞれの消費電力を測定した。ここでは、負荷トルク発生用の DC モータ一定速度で駆動した状態で、ブラシレスモータの電流を制御し、その際に電源装置から駆動回路に流れ込む電流を測定し、消費電力を求めた。これにより得られた、従来の制御手法と、提案した電流制御手法の回転数と目標電流値毎の消費電力を Figure. 16 に示す。実験結果から、提案した駆動・制御手法を用いて実装したシステムで、回転数が高い領域と駆動電流が小さい領域において、消費電力を削減できることが確認された。また、Figure. 14 に示した理想的な消費電力と同様の傾向を示す結果が得られることが確かめられた。

Table. 5 に、著者らの研究室で使用している、小型移動ロボット“山彦 LR-1” (Figure. 17) を、平坦な床で一定速度で直進させるために必要な、回転数とトルクを測定した結果を示す。これを前述の実験に用いたブラシレスモータに換算すると、駆動系のモータの動作領域は、回転数が 200 ラジアン毎秒から 700 ラジアン毎秒、モータ電流は 100 ミリアンペア前後である。従って、本研究で対象として考えている小型移動ロボット系で定常的に用いられる動作領域は、実装した駆動系が消費電力を削減できる動作領域に含まれており、提案した手法が、対象としている小型移動ロボットの動作領域で消費電力を 15 パーセント程度削減できることが確

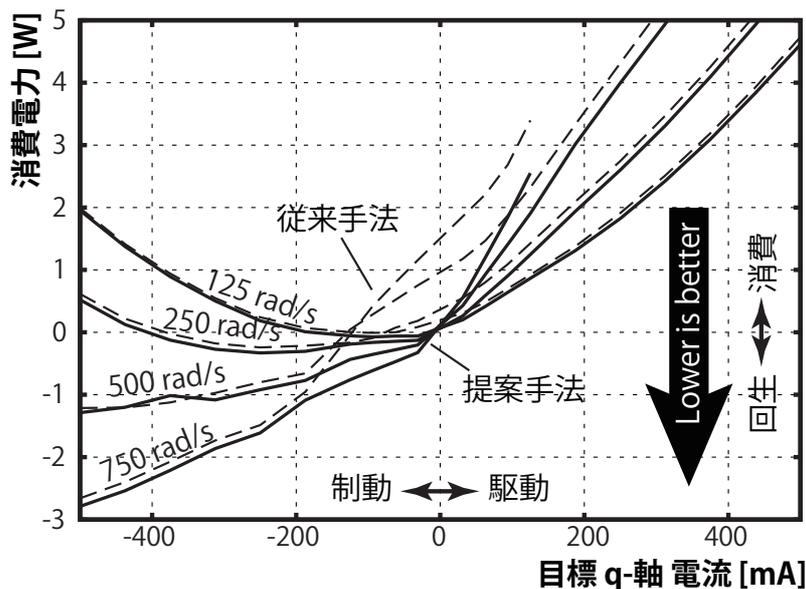


Figure. 16: 目標 q -軸電流および角速度に対する、従来の駆動手法における消費電力と構築した制御系の消費電力

認できた。

また、電流制御系の精度を評価するため、本研究の設計手法により構築した制御系における、電流波形を測定する実験を行った。ここでは、負荷トルク発生用モータを速度制御して、速度を一定に保ち、実装したフィードフォワード電流制御の目標値に対する実際の電流波形を測定した。電流波形の例を Figure. 18 に示す。電流波形は、PWM 基本周期中のモータ電流の脈動を除去してモータのトルク生成成分の電流を確認するため、電流波形に 50 マイクロ秒の移動平均フィルタを適用している。Figure. 18 から、構築した電流制御系がモータ電流を正弦波駆動できていることが確認できる。また、実現されたモータ電流のトルク生成成分 (q 軸電流) および無効成分 (d 軸電流) と、目標値に対する RMS 誤差を Figure. 19 に示す。全動作領域で、RMS 誤差 4 パーセント以内の精度で制御できていることを確認した。

Table. 5: リノリウム床を等速で走行中の移動ロボットのモータ角速度および電流

“山彦 LR-1” における実験結果			用いたブラシレスモータへの換算結果	
ロボット並進速度 [cm/s]	モータ角速度 [rad/s]	出力トルク [mNm]	モータ角速度 [rad/s]	q -軸電流 [mA]
30	255	2.1	419	66
50	424	2.9	696	93
80	678	3.1	1114	99

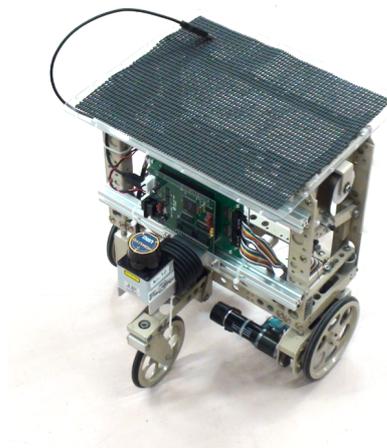


Figure. 17: モータの動作領域例測定に用いた移動ロボット“山彦 LR-1”

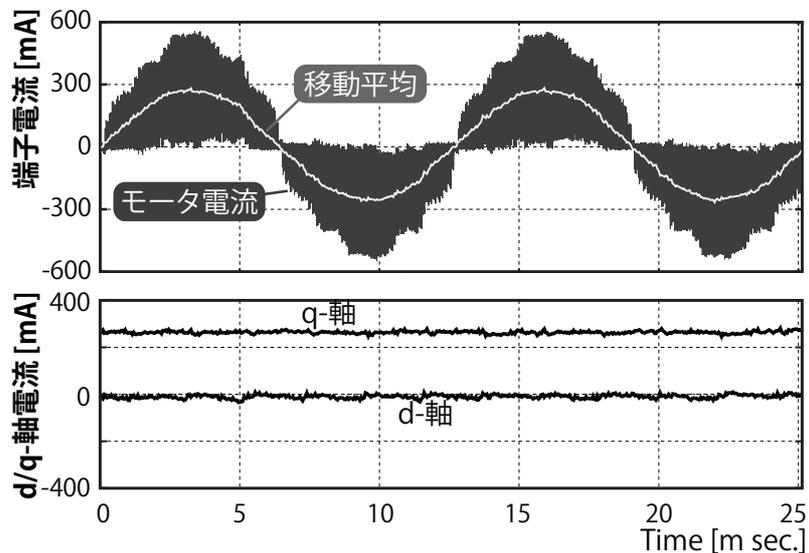


Figure. 18: 構築した電流制御系の端子電流および、 d/q -軸電流の例 (PWM 基本周期 50 マイクロ秒の移動平均)

3.4 関連研究との比較

電源電圧を状況に応じて下げることで電流の脈動を低減可能な、Step-down インバータを用いた制御 [32, 36, 37]、複数の電圧を生成して PWM で与えて電流の脈動を低減可能な、マルチレベル PWM による制御 [38, 39, 40, 41, 31]、LC フィルタで電流の脈動を低減しつつ高精度に制御する手法 [33, 34] は、消費電力を削減できる一方、駆動回路の構成を変更する必要があり、回路の規模が増大する。本手法では、スイッチング方式のみを変更して消費電力を削減し、ソフトウェアによって制御を行うため、既存のモータドライバ回路のみを用いて実現可能である。

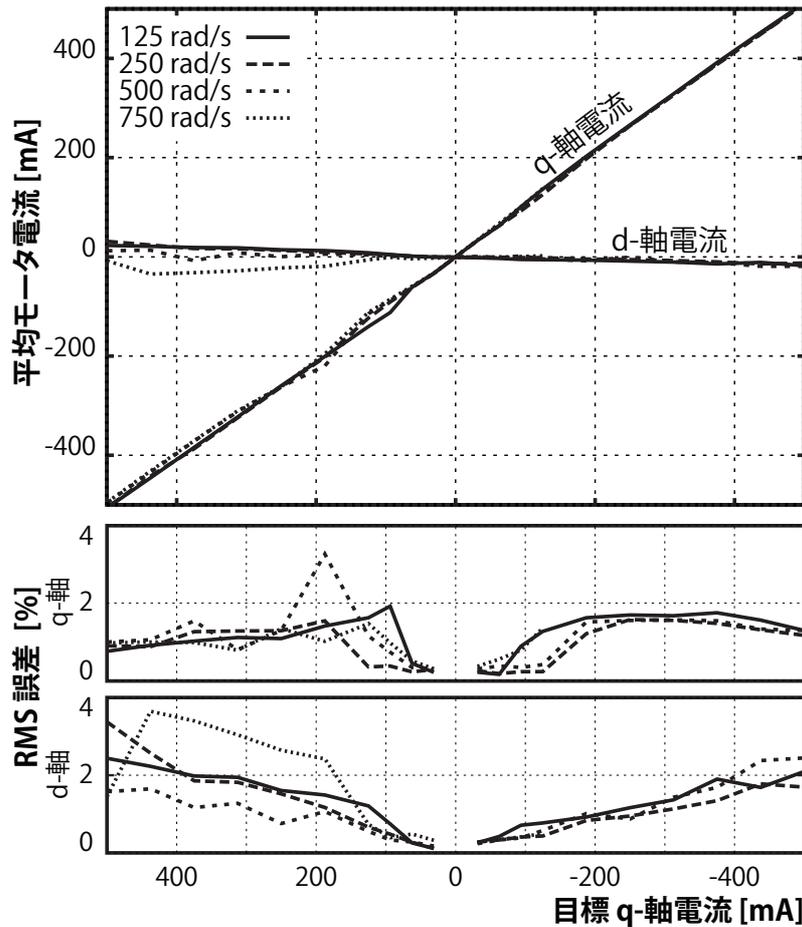


Figure. 19: 構築した制御系の d/q -軸電流の平均値および RMS 誤差

また本手法は、システムの状態と入力の組み合わせが少ない DC モータ制御系において有効に働く、同様の駆動・制御手法を用いた電流制御系設計法 [35] を、システムの状態と入力の組み合わせが大幅に多いブラシレスモータ制御系に拡張したものである。ブラシレスモータへの適用には、システムを取り得る状態・入力が、モータ角速度と 1 次元の PWM デューティ比の計 2 次元から、角速度、角度、および 3 次元の PWM デューティ比の計 5 次元に増え、数値計算による制御系設計に必要な計算コストが莫大になる問題があった。本研究では、近年利用可能になった高性能なコンピュータを用いてこれを可能にし、高効率なブラシレスモータ制御を実現できた。

3.5 結論

本章では、電気時定数が小さいブラシレスモータの駆動における消費電力を削減できるが、与える PWM と実現されるモータ電流の関係が非線形な、ハイインピーダンス状態を含む非線

形な回路動作を伴う駆動法の電流制御系設計に、オフライン計算支援に基づく設計手法を適用した結果を述べた。本設計手法に基づき、モータと駆動回路の取り得る全ての状態および与える入力に対して総当たりに数値シミュレーションを行って動作結果を求め、その結果から目的の動作を実現する電力が最小な PWM のパターンを探索することで、ハイインピーダンス状態を含む非線形な PWM による駆動を用いた、高効率な電流制御系を設計できることを示した。

また本章では、オフライン計算支援に基づく設計手法により設計したブラシレスモータ電流制御系が、従来の制御方式と比較して電力効率が高く、十分な精度の非線形電流制御系を設計できることを明らかにした。実験の結果、本手法は小型移動ロボットの動作領域で消費電力を 15 パーセント程度削減できることが確認できた。実現されたモータ電流のトルク生成成分および無効成分の、目標値に対する誤差を実験により評価した結果、全動作領域で RMS 誤差 4 パーセント以内の精度で制御できていることが確認できた。これにより、本研究で提案するオフライン計算支援に基づく設計手法は、本章で述べたような、複雑で非線形な動作をする回路の制御系設計において、有効に働くことが確かめられた。

本章で適用した、計 7 次元、 1.1×10^{14} に離散化したシステムの状態・入力について、分枝限定法により網羅的に回路解析を行って逆引き制御テーブルを生成する例では、数値計算的な制御系設計に半日程度を要した。この制御系設計はモータの品種毎に 1 度行えばよいので、実用上十分な時間で計算ができていると考える。

これにより、限定された駆動方式と解析的な線形制御による設計法により電力効率が悪化していたブラシレスモータの制御系について、オフライン計算支援に基づく設計手法により非線形な駆動方式も含めた高効率な制御系設計が可能になった。

第4章 広い速度域に対応した移動ロボット軌跡追従レギュレータ制御

4.1 背景と関連研究

移動ロボットの軌跡追従制御系として、非ホロノミックな車輪型移動ロボットの軌跡追従制御 [42] が提案されており、実用化されているレスキュー探査ロボット [4, 5]、警備ロボット [2]、サービスロボット [43] など広く使用されている。この軌跡追従制御系は、目標の軌跡との距離偏差・角度偏差・角速度をロボットの角加速度に線形フィードバックするレギュレータ制御であり、線形近似領域では解析的にシステムの安定性を議論できる。一方、実際のシステムでは角速度・加速度や遠心加速度のクリップによる非線形性や、速度の変化による時変性、非ホロノミック拘束をもつため解析的な設計および安定性の評価が難しい。特に高速域では、角速度・加速度や遠心加速度のクリップの影響が支配的になり、不安定化しやすいため、トリアンドエラーによる経験的な設計も難しかった。

非ホロノミックな移動ロボット軌跡の安定な非線形制御手法として、チャタリングを抑制したスライディングモード制御による手法 [44] が提案されている。この手法は、非ホロノミック拘束の非線形性を陽に考慮して軌跡追従制御の安定性を保証できるが、角速度・加速度や遠心加速度のクリップによる非線形性は考慮できない。そのため、角速度・加速度や遠心加速度のクリップの影響が支配的になる高速域で動作する移動ロボットへの適用は難しかった。

また、システムの状態によって特性が変化するような系の制御法として、ゲインスケジューリング法が古くから用いられており、マニピュレータ制御や倒立安定化制御などへの応用 [45, 46, 47] や、移動ロボットの可変ゲイン制御手法 [48] などが報告されている。これらの手法では、システムの状態に応じて適切に制御則を切り替えることで、非線形な制御系を安定に制御する。そのため、システムの状態を限定し、その範囲内で線形化などの近似に基づいて制御系を設計できるため、問題を単純化して設計できる。一方、ゲインスケジューリング法においても、システムの状態毎に、線形近似や何らかの制御系設計手法を用いて制御則を決定する必要があるため、角速度・加速度や遠心加速度のクリップなどの、システムの状態を限定しても残る非線形性を陽に考慮した設計には、別の非線形制御論に基づく設計が必要だった。

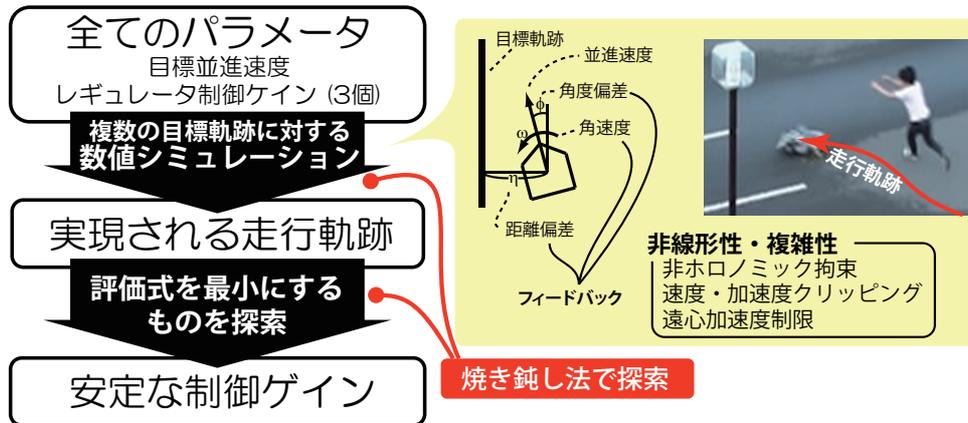


Figure. 20: オフライン計算支援に基づく移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御系設計の概要

4.2 数値シミュレーションに基づく軌跡追従レギュレータ制御系設計

目標軌跡の位置偏差、角度偏差、角速度偏差に対するレギュレータ制御として構築される移動ロボットの軌跡追従走行制御系 [42] は、レギュレータ制御ゲインと目標速度、目標軌跡が与えられたときのシステム動作を、微小時間ごとの逐次計算による数値シミュレーションで表せる。本章では、その結果から、Figure. 20 に概要を示すように、目標速度毎に、制御ゲインに対するシステム動作の評価値を、メタヒューリスティック最適化手法により準最適化することで、実用的な制御系を設計する。

この軌跡追従制御系の制御パラメータ決定においては、制御ゲインの値域に制約がないため、求めるべきパラメータが有限個数に離散化できない。そこで、本研究で提案する計測・制御系の問題設計法に基づいて、求めるべきパラメータについて大域的かつ網羅的に順計算して数値計算的最適化によりパラメータを決定するために、メタヒューリスティックな大域的最適化アルゴリズムとしてよく用いられる、焼き鈍し法を用いる。

4.2.1 非ホロノミックな移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御

この軌跡追従レギュレータ制御系 [42] は、ロボット車体の目標角加速度 $\dot{\omega}^{ref}(t)$ を、ロボットの目標直線との距離偏差 $\eta(t)$ 、角度偏差 $\phi(t)$ 、角速度 $\omega(t)$ 、必要角速度 $\omega^{required}$ から、フィードバックパラメータ K_η 、 K_ϕ 、 K_ω により

$$\dot{\omega}^{ref}(t + \Delta t) = -K_\eta \eta'(t) - K_\phi \phi(t) - K_\omega (\omega(t) - \omega^{required}(t)) \quad (10)$$

で与える。各パラメータの概要を、Figure. 21, 22 に示す。 $\omega^{required}$ は、目標の軌跡に追従するために必要なロボットの角速度であり、目標の軌跡が直線の場合、0、目標の軌跡が円弧の場合は、円の中心からの距離 r 、ロボットの速度 v から、 v/r で与える。 Δt は軌跡追従制御周期を表し、 η および ϕ はロボットのモータに取り付けられたロータリエンコーダの信号から計算

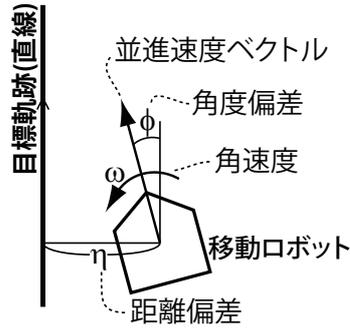


Figure. 21: 非ホロノミックな車輪型移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御を用いた直線追従制御におけるパラメータ

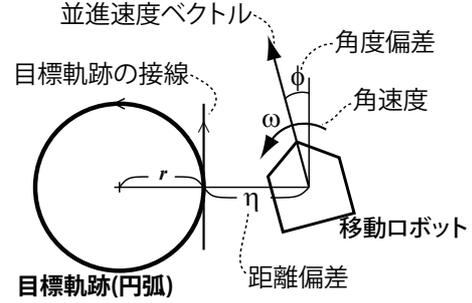


Figure. 22: 非ホロノミックな車輪型移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御を用いた円弧追従制御におけるパラメータ

された、ロボットの自己位置・姿勢を用いて与える。また、 $\eta'(t)$ は、実際の距離偏差 $\eta(t)$ から、距離偏差の制限値 η_{max} を超えないよう、式 (11) を満たすようにクリップして与える。

$$\eta'(t) = \begin{cases} \eta_{max} & (\eta(t) > \eta_{max}) \\ \eta(t) & (\eta_{max} \geq \eta(t) \geq -\eta_{max}) \\ -\eta_{max} & (-\eta_{max} > \eta(t)) \end{cases} \quad (11)$$

車輪の路面グリップ力の限界によるスリップを防ぐため、角加速度、角速度には、その上限によるクリップが適用される。また、遠心加速度による横転を防ぐため、遠心加速度が上限をこえないように、ロボットの角速度を走行速度に応じてクリップする。すなわち、角加速度の上限を $\dot{\omega}_{max}$ 、角速度の上限を ω_{max} 、遠心加速度の上限を α_{max}^c 、ロボットの並進速度を v として、ロボットの目標角速度 $\omega^{ref}(t)$ を次式で与える。

$$\omega^{ref'}(t) = \begin{cases} \omega^{ref}(t) + \dot{\omega}_{max} & (\dot{\omega}^{ref}(t) > \dot{\omega}_{max}) \\ \omega^{ref}(t) + \dot{\omega}^{ref}(t) & (\dot{\omega}_{max} \geq \dot{\omega}^{ref}(t) \geq -\dot{\omega}_{max}) \\ \omega^{ref}(t) - \dot{\omega}_{max} & (-\dot{\omega}_{max} > \dot{\omega}^{ref}(t)) \end{cases} \quad (12)$$

$$\omega^{ref}(t) = \begin{cases} \omega_{max}' & (\omega^{ref'}(t) > \omega_{max}') \\ \omega^{ref'}(t) & (\omega_{max}' \geq \omega^{ref'}(t) \geq -\omega_{max}') \\ -\omega_{max}' & (-\omega_{max}' > \omega^{ref'}(t)) \end{cases} \quad (13)$$

$$\omega_{max}' = \min(\omega_{max}, \frac{\alpha_{max}^c}{v})$$

この軌跡追従制御系は、ロボットの直線に対する角度が 0 近傍をとる動作範囲では、式 (10)

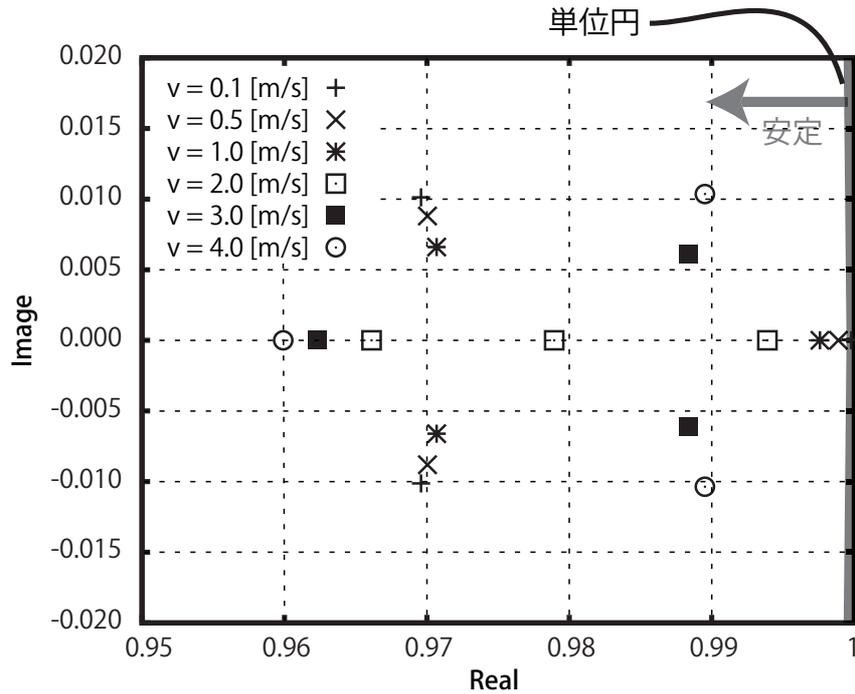


Figure. 23: 軌跡追従制御系の線形近似領域における極配置

は齊次線型常差分方程式として近似することができ、容易に安定な制御ゲインを設計できる。ただし、この安定性は、ロボットの角速度・角加速度および制御パラメータのクリップが無く、ロボットが直線に追従している状態でのみ議論できる。たとえば、 $K_\eta = 36.6$ 、 $K_\phi = 9.8$ 、 $K_\omega = 3.7$ のとき、この離散制御系は、線形近似が可能な動作範囲では、0.1 から 4 メートル毎秒の走行速度の範囲では、Figure. 23 に示すように、極が全て半径 1 の単位円内にあり、安定である。なお、この制御系の極は速度によって変化する。このとき、Figure. 24 に外観を示す移動ロボット“山彦 Beesan”を用いて、走行速度を 1 から 4 メートル毎秒に変化させたときの直線軌跡への追従制御を行った結果を Figure. 25 に示す。これは、目標の直線上で、0.24 ラジアン の角度偏差を持たせた状態から直線追従制御を開始した結果である。前述の線形近似による誤差は 1 パーセント未満だが、角速度・角加速度などにクリッピング処理が適用されている実際のシステムでは、軌跡が発振することが確認できる。なお、実際のシステムで用いている、制御周期や、タイヤのスリップを抑えられるように設定したクリップ値などの一覧を Table. 6 に示す。移動ロボット“山彦 Beesan”は差動駆動型台車で、駆動系に maxon 社のブラシレスモータ EC-max 44 と、有限会社テクノクラフトのモータドライバ TEC-3PMD-RB-V7K が搭載されており、最大 4 メートル毎秒程度の速度域で走行できる。

この制御系は、線形近似の範囲内でも、安定性が速度によって変化する。また、角加速度、角速度、遠心加速度のクリップも、影響が速度によって変化するため、安定な制御を実現するためには、速度毎に制御ゲインを設計する必要がある。

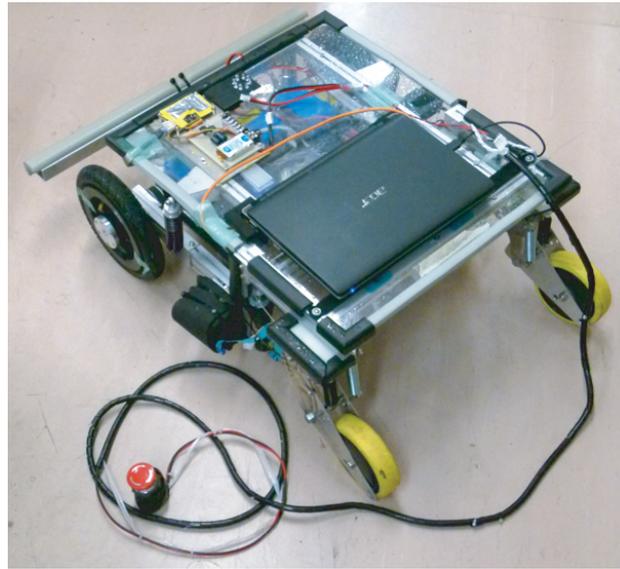


Figure. 24: 自立移動ロボット“山彦 Beesan”の外観

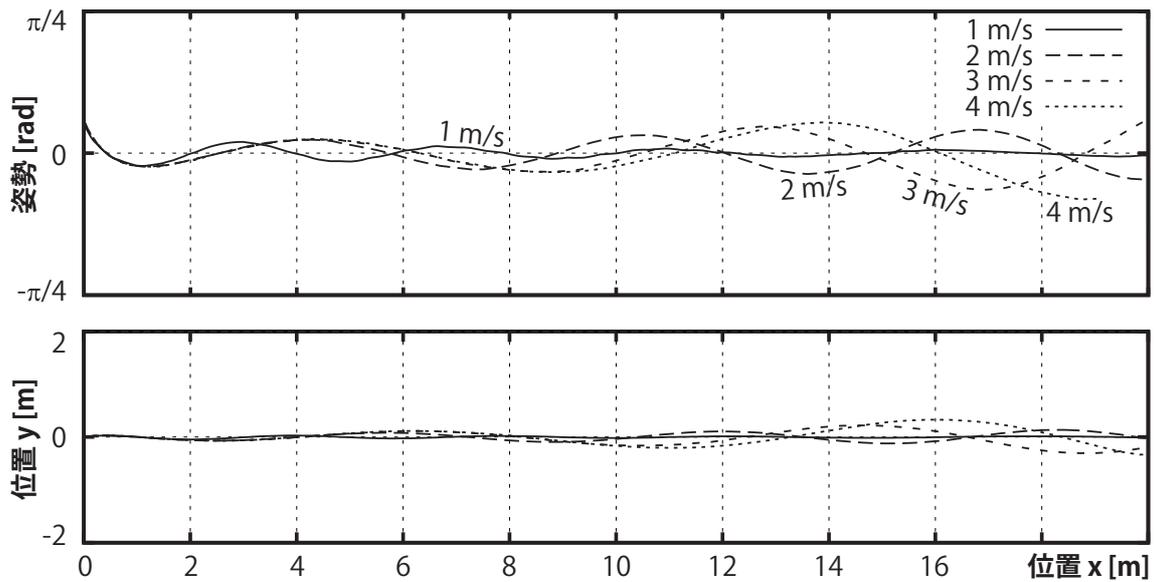


Figure. 25: 線形近似による解析的評価において安定な制御ゲインを用いた直線軌跡追従制御実験結果: 線形近似誤差 1 パーセント未満の動作領域において発振する

4.2.2 順計算: 制御系のシミュレーション

移動ロボットの時刻 t における位置 $x(t), y(t)$ および角度 $\theta(t)$ は、ロボットの並進速度 $v(t)$ および回転角速度 $\omega(t)$ を用いて、次式で計算できる。

$$\begin{cases} \theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau & +\theta(0) \\ x(t) = \int_0^t v(\tau) \cos \theta(\tau) d\tau & +x(0) \\ y(t) = \int_0^t v(\tau) \sin \theta(\tau) d\tau & +y(0) \end{cases} \quad (14)$$

軌跡追従制御系は、前述の制御式 [42] を用いて、実際のロボット制御系と同様の制御パラメータ、ロボットの角加速度・角速度、遠心加速度の上限によるクリップを適用している。また、車輪の速度制御系や軌跡追従制御系の制御周期等の条件も Table. 6 に示す実際の制御系と同様に与えて数値計算を行っている。これにより、クリップによる非線形性、離散時間制御の制御周期などを考慮したシステム動作の計算が実現できる。

4.2.3 逆計算: 焼き鈍し法による制御パラメータ決定

本研究の計測・制御系設計法に基づいて、数値計算的最適化手法により実用的なパラメータを決定するために、メタヒューリスティックな大域的最適化アルゴリズムである焼き鈍し法を用いる。焼き鈍し法は、逐次改善法の一つで、現在の解のランダムな近傍解を生成し、評価値の値が改善する場合には近傍解を現在の解として採用し、これを繰り返して最適解を探索する。更に、評価値の値が改善しない場合にも、評価値の変化量と、焼き鈍し法のパラメータである温度 T から計算される遷移確率に応じて、近傍解を採用する。遷移確率は、温度 T が高く、評価値の変化量が小さいほど高くなるように設定する。この温度 T を大きな初期値 T_0 から徐々に減少させながら評価値の改善を繰り返すことで、大域的な最適解を得ることが期待で

Table. 6: 自立移動ロボット“山彦 Beesan” およびそのコントローラのパラメータ

パラメータ	値
最大並進速度	5.0 [m/s]
最大加速度	0.75 [m/s ²]
最大角速度	1.05 [rad/s]
最大角加速度	1.57 [rad/s ²]
最大遠心加速度	1.6 [m/s ²]
速度制御周期	1 [ms]
軌跡追従制御周期	4 [ms]
式 (11) の距離偏差のクリップ	0.3 [m]
制御周期毎の角加速度の差分のクリップ	0.0175 [rad/s]

きる [49]。

本手法における制御パラメータの決定アルゴリズムの処理フローを Figure. 26 に示す。フローチャート中の符号に対応する処理の概要を以下に示す。

a. 初期パラメータ設定

初期解として、適当なパラメータ s_0 を生成し、 $s = s_0$ とする。 s をパラメータとした場合のシステムの動作を数値シミュレートし、その結果から評価値 E_s を求める。

b. 初期温度設定

$T = T_0$ とする。

c. 近傍パラメータ生成

現在の解 s と近い値を持つ、ランダムなパラメータ s' を生成する。

d. 評価値の算出

パラメータ s' を適用した場合のシステムの動作を数値シミュレートし、その結果から評価値 $E_{s'}$ を求める。

e. 遷移確率に応じてパラメータ更新

パラメータ s および s' の評価値 $E_s, E_{s'}$ を比較し、 $E_s > E_{s'}$ であれば、 $s = s'$ とする。また、 $E_s < E_{s'}$ の場合には、遷移確率関数値 $P(E_s, E_{s'}, T)$ を求め、0~1 の範囲を取る一様乱数 r に対して、 $r > P(E_s, E_{s'}, T)$ を満たす場合のみ、 $s = s'$ とする。

f. 冷却

T の値を減少させる。

g. 繰り返し終了判定

閾値 T_0 に対して、 $T \leq T_0$ を満たす場合にアルゴリズムを終了する。 $T > T_0$ の場合には、c から f を繰り返す。

軌跡追従制御系の制御パラメータ決定のために用いた、最適化アルゴリズムの焼き鈍し法における記号、関数、およびパラメータ値は、次のように設定した。

最適化パラメータ s

求めるべきパラメータは、 $(K_\eta, K_\phi, K_\omega)$ とする。

評価関数 E

パラメータに対する評価関数は、ロボットを初期位置から Figure. 27 および Table. 7 に示す $L_1 \sim L_8$ の 8 種の直線に各々追従させることとして、その各々の場合のシミュレー

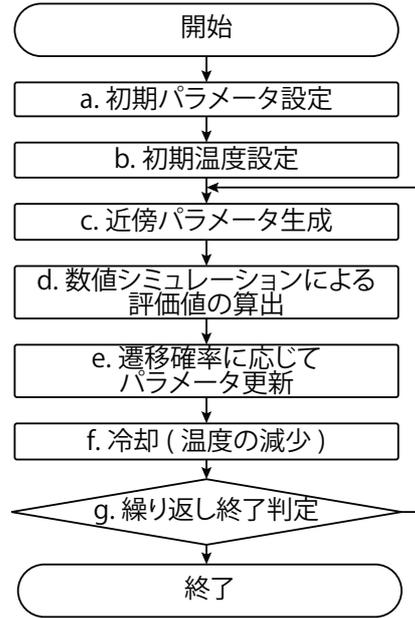


Figure. 26: 数値シミュレーションと焼き鈍し法による制御ゲイン設計のフローチャート

シミュレーションによる走行軌跡を求め、

$$E_s = \begin{cases} \sum_{\text{for each desired trajectory}} \int_0^{t_{max}} \eta(t)^2 + p(\phi(t))^2 + q\left(\frac{d}{dt}\omega(t)^{ref}\right)^2 dt & (\eta(t_{max}) < \eta_\epsilon) \\ \infty & otherwise \end{cases} \quad (15)$$

によって、計算する。十分に長く取った時間 t_{max} で、距離偏差 $\eta(t_{max})$ が、閾値 η_ϵ より大きいときは、評価値を無限大として与えた。また、評価値はオーバーシュートが少なく、応答速度が速くなるよう、目標軌跡との距離偏差、角度偏差および、フィードバックによって得られる目標角加速度の、重み付き二乗和を評価式として用いており、 p, q の値を変更することで、得られる制御パラメータにおける、軌跡の収束性と、滑らかさのバランスを調節する。

近傍状態 s' の生成

近傍パラメータを $K'_\eta, K'_\phi, K'_\omega$ とし、焼き鈍し法の温度を T として、以下のように設定する。なお、 $rand1, 2, 3$ は 10 個の独立な一様乱数 (0 ~ 1) の平均値とする。これは、

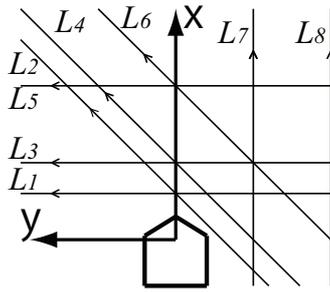


Figure. 27: 制御ゲインの評価に用いる目標軌跡

平均 0.5 のガウス分布乱数の近似を意味する。

$$\begin{aligned} K'_\eta &= K_\eta + 10(\text{rand1} - 0.5)/T \\ K'_\phi &= K_\phi + 10(\text{rand2} - 0.5)/T \\ K'_\omega &= K_\omega + 10(\text{rand3} - 0.5)/T \end{aligned} \quad (16)$$

遷移確率 P

近傍パラメータ s' が採用される確率 $P(E_s, E_{s'}, T)$ として、以下の式を用いる。

$$P(E_s, E_{s'}, T) = \exp \frac{T_0 \{E_s - E_{s'}\}}{T} \quad (17)$$

近傍パラメータの生成と遷移確率は、パラメータが初期温度時に十分に広範囲を移動するように設定する。また遷移確率は、終了条件に近づいたときの、評価値が悪化するパラメータが採用される確率が十分に小さくなるように与える。

初期温度

$T_0 = 10$ とする。

T の減少

温度 T に、繰り返しごとに 0.999 を乗ずる。パラメータ生成に要する時間と、生成されるパラメータの精度の兼ね合いで調整する。

繰り返し終了判定の閾値

$T_0 < 0.01$ の場合に繰り返しを終了する。

4.3 オフライン計算支援に基づく設計と実験に基づく評価

本設計手法に基づく軌跡追従制御系設計の有効性を実験により確認するため、Table. 6 にパラメータを示す移動ロボット “Beesan” (Figure. 24) の軌跡追従制御系を設計した。この例では、Table. 4 に示すように、目標速度 0.4 から 4 メートル毎秒を 18 段階に離散化し、目標速度毎に評価値を最小化する 3 次元制御ゲインを設計した。ここでは、評価値の重み付けは

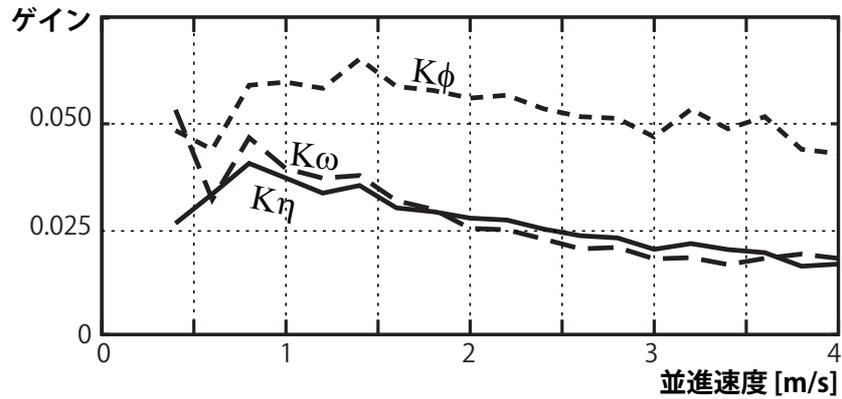


Figure. 28: 設計した制御系の位置偏差、角度偏差、角速度に対するフィードバックゲイン K_η, K_ϕ, K_ω

$p = 1, q = 0.2$ とした。生成した目標速度毎の制御ゲインを Figure. 28 に示す。制御ゲインの生成には、Intel Xeon X3450 2.67 ギガヘルツプロセッサ (2 CPU、24 スレッド) を用いて 61 分を要した。

数値計算的なシステム設計において用いた、入力・状態の離散化の妥当性を確かめるため、入力・状態毎に、離散化区間内での単調性を確認する。システムの入力の与え方を決める制

Table. 7: 制御ゲインの評価に用いる目標軌跡のパラメータ

直線番号	直線の通る座標 (x [m], y [m])	角度 [deg]
L_1	(0.5, 0.0)	45
L_2	(0.5, 0.0)	90
L_3	(1.0, 0.0)	45
L_4	(1.0, 0.0)	90
L_5	(2.0, 0.0)	45
L_6	(2.0, 0.0)	90
L_7	(0.0, 0.5)	0
L_8	(0.0, 1.0)	0

Table. 8: オフライン計算支援に基づく軌跡追従制御系設計の離散化間隔

	次元	離散化	範囲
ロボットの並進速度	1	18	0.4 ~ 4 m/s
制御ゲイン	3	連続	> 0
合計	4		
計算時間		61 分	

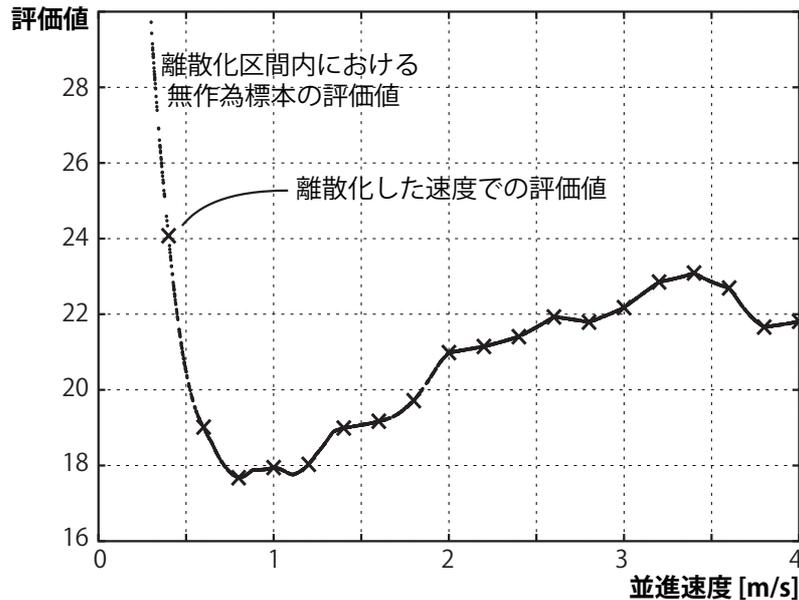


Figure. 29: ロボットの並進速度が離散化区間で変化したときのシステム動作の評価値の変化

御ゲインについては、焼き鈍し法のパラメータが適切であれば、本手法は連続なパラメータ空間中で離散化せずに網羅的に計算することと近似的に等しい。また、ロボットの並進速度がその離散化区間で変化したときの、システムの動作の評価値の変化を Figure. 29 に示す。Figure. 29 は、速度を乱数で決めた 2000 個の無作為標本に対して、設計した速度毎の制御ゲインから線形補完により決めたゲインを用いた場合の評価値を示す。この標本数においては、全ての離散化区間内において、ロボットの並進速度に対してシステムの動作がほぼ単調に変化していることが確かめられた。したがって、この軌跡追従制御系設計において、数値計算的なシステム設計における離散化の条件である、離散化された区間内での単調性がほぼ満たされることが確かめられた。

本手法で求めた直線追従制御パラメータを、実際の対象とするシステムのモータドライバ TEC-3PMD-RB-V7K の制御系に組み込み、目標並進速度に応じて制御パラメータが設定されるように実装した。ロボットの自己位置および姿勢は、タイヤの回転数から計算される並進移動量と、地磁気センサから得られる磁気方位から求めた。ここでは、使用したロボットのタイヤが並進速度約 3 メートル毎秒以上の動作領域において若干のスリップを起こし、モータ回転数から計算されるロボットの向きが不正確になるため、地磁気センサから得られる絶対方位を用いている。

設計した制御系を実装したロボットを用いて、走行速度を 1 メートル毎秒から 4 メートル毎秒に変化させたときの直線軌跡への追従制御を行った結果を Figure. 30 に示す。これは、Figure. 25 と同様に、目標の直線上で、0.24 ラジアン の角度偏差を持たせた状態から直線追従制御を開始した結果である。実験結果から、ロボットの角加速度・角速度、遠心加速度の上限

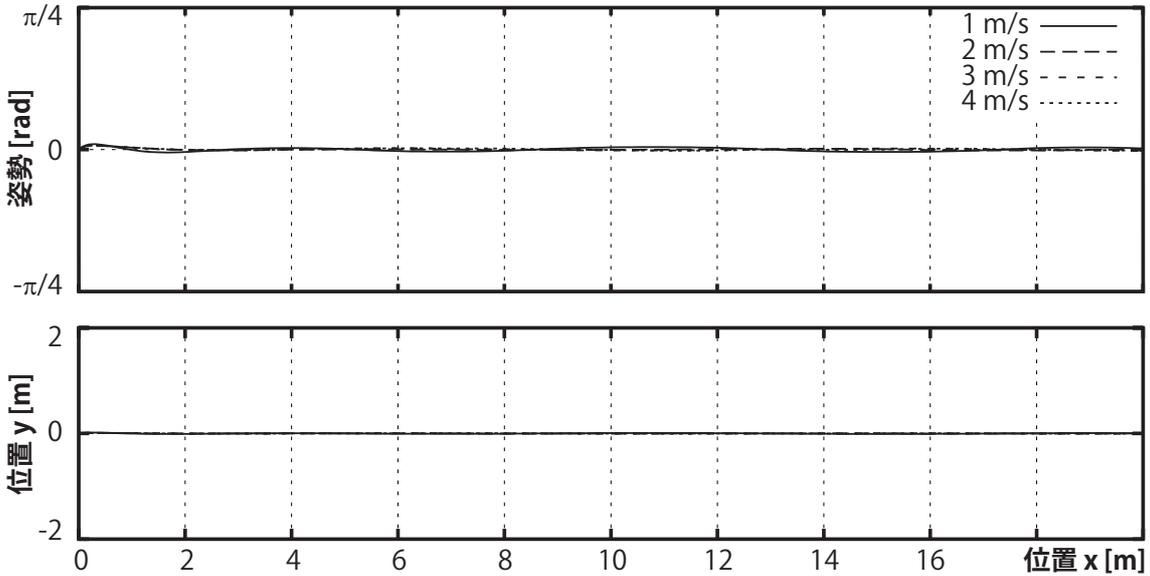


Figure. 30: 本設計手法により非線形性を考慮して設計した制御ゲインを用いた直線軌跡追従制御実験結果

によるクリップの非線形性が強く表れる高速域においても、安定な軌跡追従制御が実現できることが確かめられた。

また、設計した軌跡追従制御系の広い速度域での安定性を確かめるため、ステップ入力的な目標軌跡が与えられたときの動作を、実験により確認した。実験環境は、Figure. 31 に概観を示す、筑波大学内「石の広場」であり、凹凸や点字ブロックのある石畳の環境で外乱が多く存在する。目標軌跡を直線としたときに 0.5 メートル毎秒から 4 メートル毎秒まで、速度ごとに得られた走行軌跡を、Figure. 32a に示す。また、目標軌跡を円弧としたときに速度ごとに得られた走行軌跡を、Figure. 32b に示す。走行開始時の目標軌跡は $y = 0$ の直線とし、 $x = 25$ で表される直線に、ロボットの最大角速度から求まる最小旋回半径の距離まで近づいた時点で、 $x = 25$ の直線を目標軌跡として与えた。実験の結果、全ての速度で、振動が少なく安定な制御が実現できることを確かめた。

4.4 関連研究との比較

チャタリングを抑制したスライディングモード制御による移動ロボットの軌跡追従制御手法 [44] は、非ホロノミック拘束の非線形性を陽に考慮して軌跡追従制御の安定性を保証できるが、角速度・加速度や遠心加速度のクリップによる非線形性は考慮できずこれらの影響が支配的になる高速域で動作する移動ロボットへの適用は難しかった。本研究で提案する計測・制御系設計法では、非ホロノミック性、角速度・加速度や遠心加速度のクリップによる非線形性も

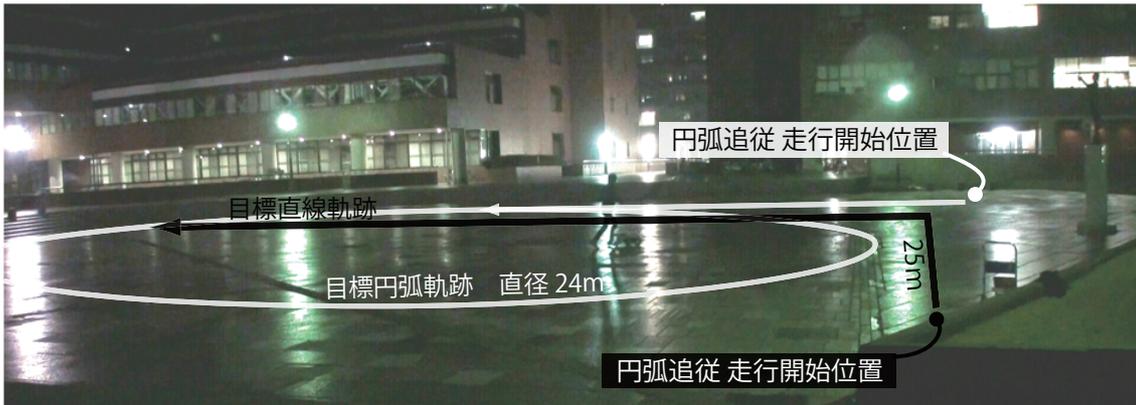


Figure. 31: 軌跡追従制御実験に用いた、5mm 程度の凹凸のある石畳環境

考慮して、速度毎に安定な制御ゲインを設計できた。

また、本研究で提案する計測・制御系設計法を用いた軌跡追従制御系設計は、ゲインスケジューリング法におけるスケジューリングを、数値解析的な手法により実現したものと言える。従来のゲインスケジューリング法による非線形制御系設計においては、システムの状態毎に、何らかの制御系設計手法を用いて制御ゲインを決定する必要があり、システムの状態を限定しても残る非線形性を陽に考慮した設計には、別途、線形近似による設計や、非線形制御論に基づく設計が必要だった。本手法では従来のゲインスケジューリング法を応用した可変ゲイン制御手法 [48] では考慮できなかった、移動ロボットのシステム状態を限定しても残る、角速度・加速度や遠心加速度のクリップといった非線形性を陽に考慮した制御系を設計できた。

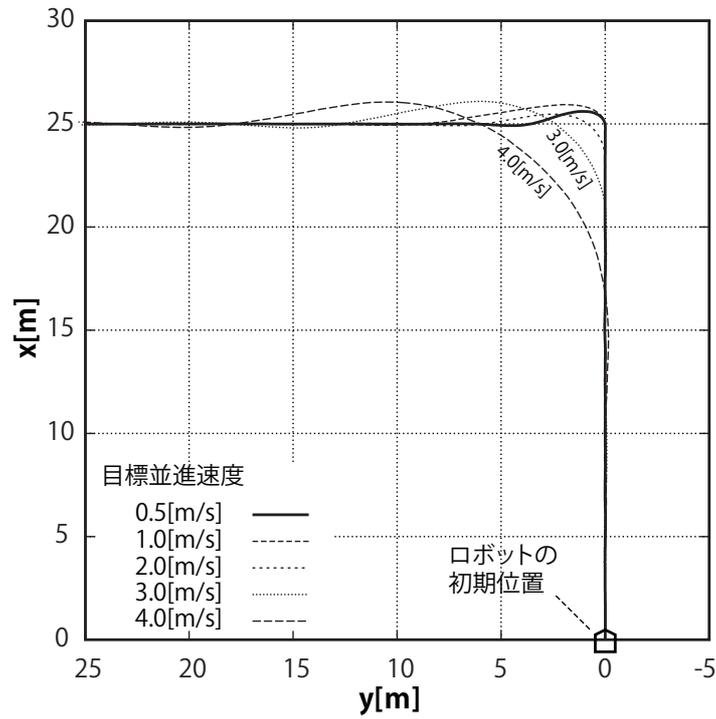
4.5 結論

本章では、非ホロノミック拘束、角速度や遠心加速度のクリップによる非線形性を持つため、広い速度域で安定な制御が難しかった移動ロボットの軌跡追従制御系にオフライン計算支援に基づく設計手法を適用した結果を述べた。目標の軌跡との距離偏差・角度偏差・角速度をロボットの角加速度に線形フィードバックするレギュレータ制御問題について、レギュレータ制御ゲインと目標速度毎にその動作を逐次計算による数値シミュレーションで計算し、それぞれの評価値を最小にするパラメータを、最適化手法である焼き鈍し法により探索することで広い速度域で安定に動作する、実用的な制御系を実現した。これにより、オフライン計算支援に基づく設計手法を用いることで、角速度・角加速度、遠心加速度のクリップによる非線形性を考慮して、軌跡追従制御系が設計可能であることを明らかにした。

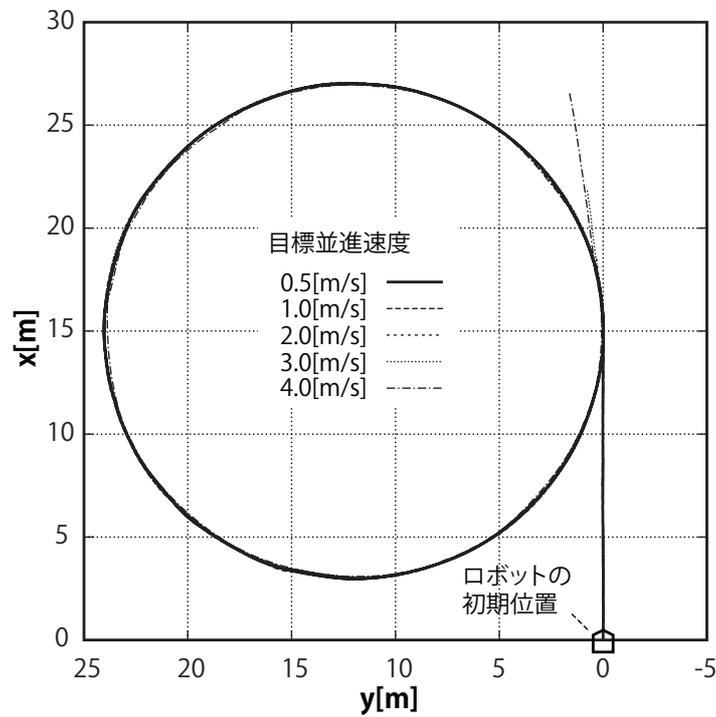
また本章では、オフライン計算支援に基づく設計手法により設計した軌跡追従制御系が、角速度・角加速度、遠心加速度のクリップの影響が支配的になり不安定化しやすい高速域においても、安定に動作することを実験により確認した。また、ステップ入力的な目標軌跡が与えら

れたときの動作を実験により確認し、実験を行った0.5メートル毎秒から4メートル毎秒までの広い速度範囲で振動が少なく安定な制御が実現できることを明らかにした。

制御ゲインの生成は1時間程度を要するが、これはロボットのハードウェアを設計する際に、その制御回路のパラメータおよび、加速度・角加速度、および最大遠心加速度の制限を決める毎に1度行えばよいので、実用上十分な時間で計算ができていると考える。



(a) 直線追従制御の結果



(b) 円弧追従制御の結果

Figure. 32: 設計した制御系のステップ入力的な目標軌跡に対する走行軌跡

第5章 測域センサの誤検出の少ない高精度な計測

5.1 背景と関連研究

自動搬送台車 [1] や巡回警備ロボット [2] をはじめとする、移動ロボットの環境認識用センサとして、レーザ光を投光して測定対象物からの反射光の到達時間から距離を測定し、これを回転させて、走査平面上の形状を測定する、レーザ測域センサが広く用いられる。また、既存の建物の CAD データの作成 [50] や、森林での樹木の生育状態の調査 [51] など、リモートセンシング分野においても、可搬型の環境計測センサとして、レーザ測域センサが用いられている。

現在のレーザ測域センサでは、実際には物体が無い位置にデータが誤検出されたり、形状や大きさが実際とは異なって得られる問題がある。レーザ測域センサ UTM-30LX(北陽電機社) を用いて環境形状を取得した際に発生する誤検出の例を Figure. 33 に示す。この例では、棚の側面と配管の中間に点群が誤検出されている。これは、レーザ光の広がりにより、棚の側面と配管それぞれにおいて反射が起こり、それらが合成されたレーザ光がセンサに戻ることで、測距計算に失敗したと考えられる。この誤検出は、SICK 社の LMS-200, LMS-291、Velodyne 社の HDL-32E などでも同様に発生する。

物体が無い位置に不正確なデータが誤検出されると、環境情報の取得、移動ロボットの自己位置推定や動作計画の妨げになるため、これを識別・除去する移動ロボットの環境認識のための経験的手法 [52] が研究されている。

近年のリモートセンシング分野では、受光信号波形を取得可能な“Full-Waveform LiDAR”を用いたセンシング技術が注目されており、対象のモデルを当てはめ、誤差を最小化することで環境を計測する手法 [53] や、時間軸でのデコンボリューションフィルタにより、反射光の位置を正確に検出する手法 [54]、森林のパラメータを計測する応用例 [55] などが報告されている。これらのリモートセンシング分野における測域センサは、航空機に搭載したり、地面に設置して用い、樹木のように広範囲にある大きな物体の位置、距離、分布などを計測するため、移動ロボット分野で用いられるセンサと比較して大型かつ重いことが許容される。また、移動ロボット分野で用いられる測域センサは、近い距離に様々な物体が存在する環境で動作するため、前述のような誤検出が発生しやすい。

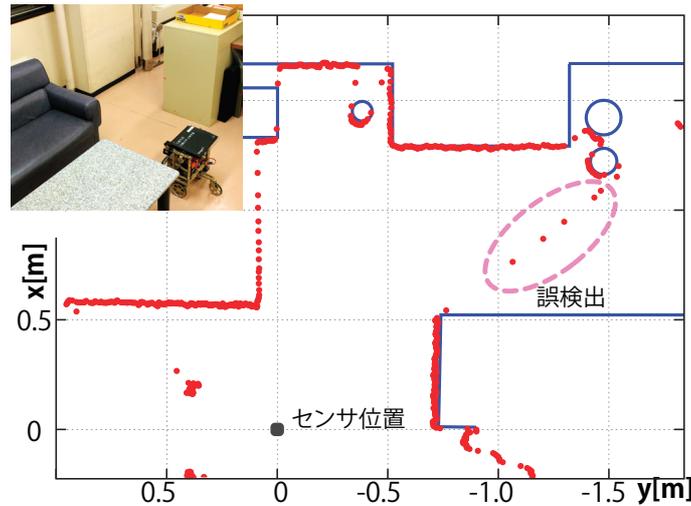


Figure. 33: 測域センサ UTM-30LX における誤検出の例

5.2 実測データに基づく測域センサ信号処理系設計

レーザ測域センサで生じる誤検出は、複数の場所で反射したレーザ光の波形が混合されて非線形なアナログ系で処理された結果、センサのデジタル信号処理系が反射位置の推定に失敗することが原因である。複数の場所で反射したレーザ光の波形が混合された場合でも、その信号波形を十分なダイナミックレンジで線形に取得できれば、デコンボリューション計算によりそれぞれの波形を分離できる。しかし現実のセンサでは、対象物に反射してセンサに戻るレーザ光信号のダイナミックレンジが広いため、アナログ信号処理系において飽和動作を起こし、信号を線形に扱うことが困難である。また、理想的な対数アンプなどを用いてダイナミックレンジを圧縮して非飽和に信号を処理すれば、取り込んだ信号を逆対数変換して線形な信号に戻し、デコンボリューション計算による信号分離が可能と考えられるが、信号波形をコンピュータに取り込むアナログ/デジタル変換器の量子化ビット数が限定されるため、実際のセンサでの実現は困難である。これは、元の信号のダイナミックレンジが広く、信号レベルが大きく異なる波形が混在した信号を扱うため、ダイナミックレンジを圧縮すると、大きな信号と重なった小さな信号が、アナログ/デジタル変換器の量子化誤差により失われるためである。

この測域センサの計測系は、アナログ高周波回路の挙動が複雑で非線形なため、解析的なモデル化、および数値計算的な回路シミュレーションが難しい。そこで本章では、複数の場所で反射したレーザ光の波形が非線形に混合されて得られる信号から、それぞれの反射の距離や反射の強さを分離して検出する計測系設計に、本研究で提案する計測・制御系設計手法を適用する。ここでは、Figure. 34 に概要を示すように、計測対象の反射係数毎にアナログ系で非線形に歪んで得られる信号波形の特徴を予め網羅的に実測しておき、その結果を用いて、信号波形の特徴から計測対象の位置と反射強度を求める計測テーブルを作成することで、計測系を設計する。

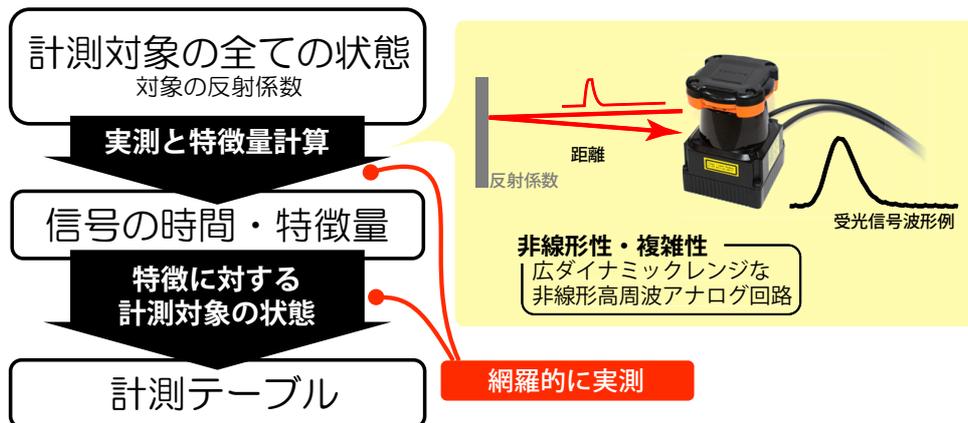


Figure. 34: オフライン計算支援に基づく測域センサ信号処理系設計の概要

5.2.1 低飽和型のアナログ信号処理

測域センサ UTM-30LX のアナログ信号処理系は、出力制限付きトランスインピーダンスアンプで構成されている。この信号処理系は、信号強度が小さい動作領域では光強度に対して線形に動作するが、信号強度が大きい動作領域では Figure. 35 に例を示すように、回路が飽和して一定値が出力され、その間は光強度の変化を検出することはできない。UTM-30LX では、ソフトリカバリダイオードの飽和・逆回復特性を利用して、逆回復時間から光強度を求める手法を用いている [56]。これにより、5 ナノ秒程度の幅をもつ投光パルスに対して、白い壁などでの反射光は飽和特性により十数ナノ秒程度に伸びたパルス状の受光信号波形が取得される。その結果、アナログ回路系が飽和中に混合した別の反射波形の情報が失われてしまうため、原理的に信号の分離・検出が不可能であった。

複数の反射光が合成された光信号波形からそれぞれの反射位置を分離・検出を可能にするため、トランスインピーダンス対数アンプによりダイナミックレンジを圧縮して処理するアナログ信号処理系を製作する。レーザ測域センサの受光信号処理系のアンプは、UTM-30LX においては 100 メガヘルツ程度の帯域と、数ナノ秒程度の立ち上がり・立ち下がり時間が必要である。また、入力信号のダイナミックレンジは数マイクロアンペアから 1 アンペア程度であり、アンプには 60 デンベル程度のダイナミックレンジが必要となる。

広いダイナミックレンジと高周波特性を実現するため、無線機器用の信号レベル検出用対数アンプ IC Analog Devices AD8317[57] を用いた。Table. 9 に、AD8317 の主な仕様を示す。AD8317 を用いたトランスインピーダンス対数アンプの回路図を Figure. 36 に、作成したアンプ基板の外観を Figure. 38 に示す。構築したトランスインピーダンス対数アンプは、アバランシェフォトダイオード (図中 PD) から出力される光電流を、電流検出用の抵抗 (R1) で電圧に変換し、AD8317 で対数変換する。構築した対数アンプの特性を確認するため、入力する光信号の減衰量を変化させたときの、出力信号電圧を測定した結果を、Figure. 37 に示す。構築し

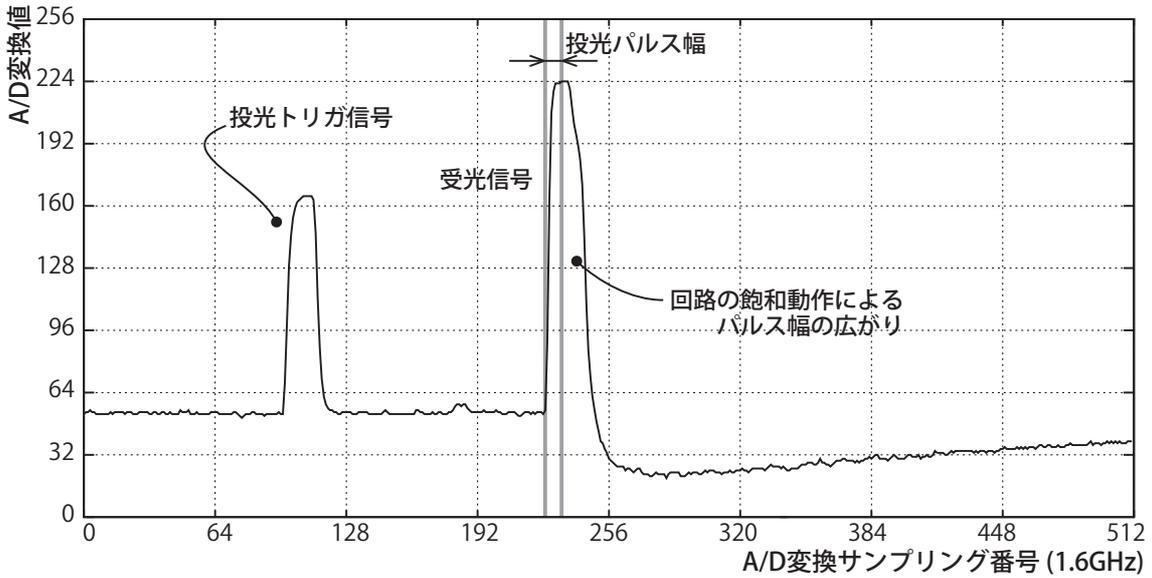


Figure. 35: 測域センサ UTM-30LX の受光信号波形例 (センサから 0.45 メートルの位置に白紙を正対した状態)

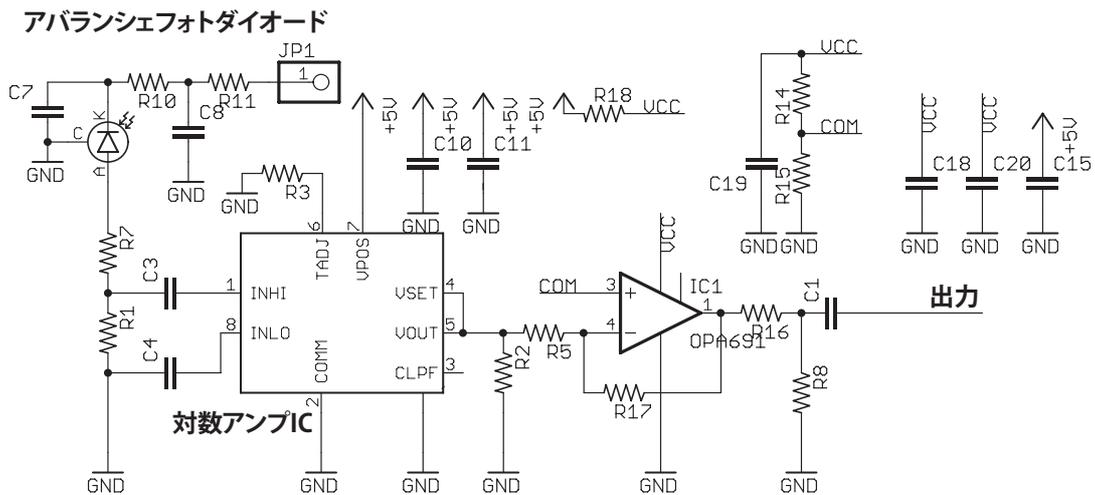


Figure. 36: 構築した低飽和型の測域センサアナログ信号処理回路

た対数アンプを用いると、測域センサ UTM-30LX のアナログ信号処理系で信号が飽和していた動作領域でも、飽和動作が少なく信号が処理できることが確認できた。

Table. 9: 無線信号用対数アンプ Analog Deveices AD8317 の主な仕様

入力帯域	1 MHz to 10 GHz
パルス応答時間	6 ns / 10 ns (fall/rise)
対数増幅誤差 1 dB 以下のダイナミックレンジ	50 dB @ 900 MHz

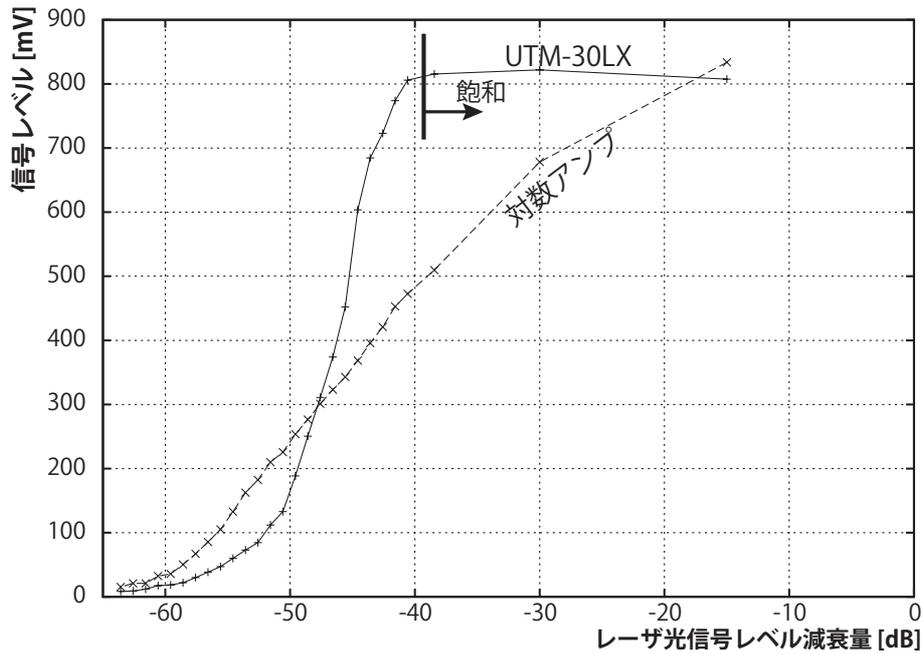


Figure. 37: 構築した低飽和型の測域センサアナログ信号処理系と、UTM-30LX のアナログ信号処理系の飽和特性

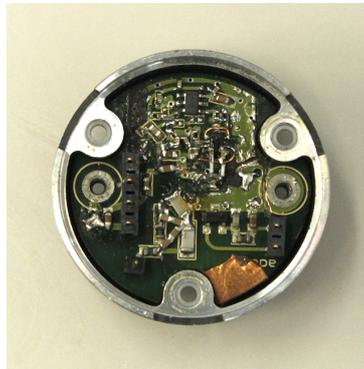


Figure. 38: AD8317 を用いたトランスインピーダンス対数アンプの基板外観

ただし、構築した低飽和型のアナログ信号処理系においても、若干の飽和動作は含まれている。また、対数アンプ IC の厳密な動作モデルも不明なため、解析的な動作のモデル化は困難である。

5.2.2 測距計算手法

複数の距離における反射光がセンサに戻っているとき、反射位置間の距離が近いと、それぞれの反射による受光信号が合成された波形が得られる。そのため、受光信号の立ち上がりエッジやピークの位置から距離を計算すると、それぞれの反射位置の中間の距離が得られる。一方

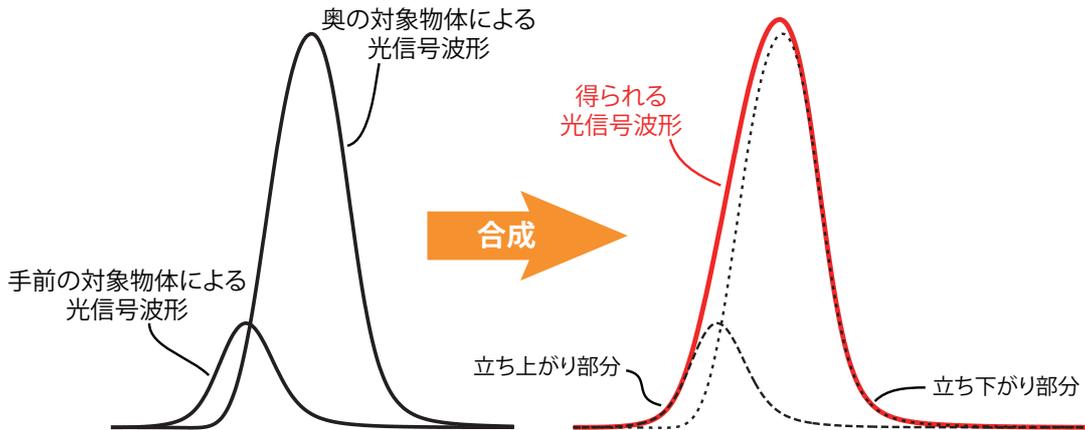


Figure. 39: 2つの距離における反射光がセンサに戻っているときの光信号波形のイメージ

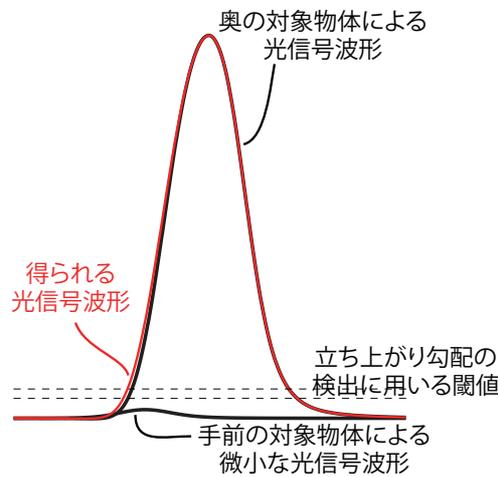


Figure. 40: センサに戻った2つの距離における反射光のうち、一方が微小な反射強度のときの光信号波形のイメージ

で、Figure. 39 に示すように、受光信号の立ち上がりのごく初期の部分は、手前の反射位置による受光信号のみが含まれていると考えられる。同様に、受光信号の立ち下がり部分は、奥の反射位置による受光信号のみが含まれている。そこで本手法では、受光信号の初期の立ち上がり勾配、末尾の立ち下がり勾配を閾値によって検出し、これを用いて距離および強度を求める。

ただし、Figure. 40 に示すように、センサに戻った反射光の手前に、初期の立ち上がり勾配の検出に用いる閾値に対して微小な反射強度の反射光が含まれるとき、手前の波形の立ち上がりは検出できない。この場合、奥の反射波形の勾配が変化する。そこで、本手法ではまず、受光信号波形のピーク値とパルス幅から、複数の検出可能な信号レベルの反射が含まれているか判定し、含まれていない場合には信号波形のピーク値と位置から、距離および強度を求める。

すなわち本手法では Figure. 41 に概要を示すように、信号波形の初期の立ち上がり勾配、末尾の立ち下がり勾配、パルス幅、ピーク値を用いて、以下の手順で、受光信号に含まれる反射

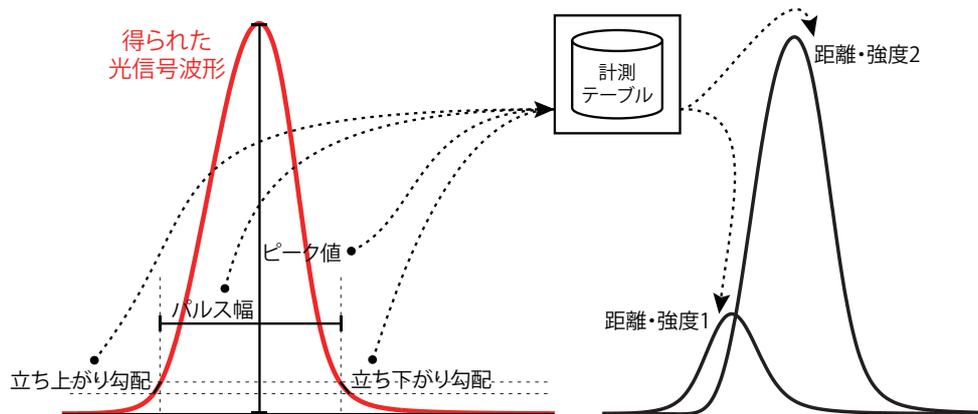


Figure. 41: 信号波形の初期の立ち上がり勾配、末尾の立ち下がり勾配、パルス幅、ピーク値を用いた測距計算手法の構成

光の強度および位置を検出する。

1. A/D 変換器で受光信号波形を取得
2. ローパスフィルタによる高周波ノイズ除去
3. 信号波形のパルス幅、ピーク値から、複数の検出可能な信号レベルの反射が含まれているか判定する

含まれる場合

- 3.1 信号波形の初期の立ち上がり勾配から手前の反射の強度を求め、強度と立ち上がり位置から距離を求める
- 3.2 信号波形の末尾の立ち下がり勾配から奥の反射の強度を求め、強度と立ち上がり位置から距離を求める

含まれない場合

- 3.1 信号波形のピーク値から反射の強度を求め、強度とピーク位置から距離を求める

ただし、受光信号立ち上がりおよび立ち下がり勾配を求めるフォトダイオード電流の閾値は、可能な限り初期・末尾の部分を検出するため、無信号時のノイズの影響を受けない範囲でできるだけ小さくなるように設定する。

5.2.3 順計算: 非線形な高周波アナログ系の網羅的な実測データ取得

測域センサの計測対象のパラメータとしては、センサからの距離および、物体の反射・拡散の係数がある。センサからの計測においては、光パルスの時間遅れと信号強度が可変なため、これらについて網羅的な信号波形を取得しておけば、計測対象の動作モデルの順計算ができる。

一般的な光学素子および空気、反射物体で構成される光学系は十分に線形で時不変なため、

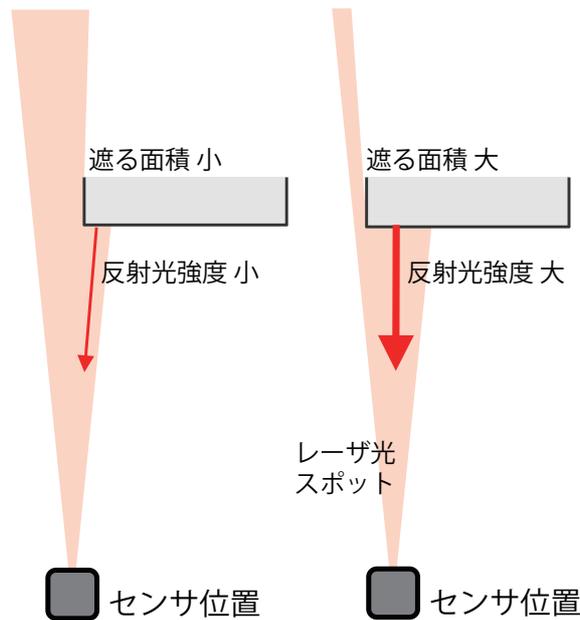


Figure. 42: 反射物体がレーザスポットに当たる面積の変化による反射係数、反射光の強度の変化

距離に対する信号波形の変化は少ない。そのため、距離の変化による反射光の光強度の変化のみを考慮して、網羅的な信号波形を取得しておけばよい。そこで、測域センサの計測信号処理系設計においては、一定距離に単一の反射があるときの、対象物体からセンサに帰る反射光の強度が変化したときの信号波形を網羅的に取得する。このとき、Figure. 42 に示すように、反射物体がレーザスポットに当たる面積を変化させることで反射係数を変化させて、反射光の強度を変化させる。網羅的な信号波形の取得時には、計測を複数回行い平均をとることで、ランダムな高周波ノイズの影響を抑えた。

5.2.4 逆計算: 網羅的な実測データに基づく測域センサの計測テーブル生成

測域センサの高周波アナログ回路は、解析や回路シミュレーションにより入力に対する出力信号波形を求めることが困難だが、実際の回路を用いて実測すれば、入力に対する出力信号波形が得られる。そこで、計測対象からの反射光の強度を網羅的に変化させて実測した信号波形を用いて、信号の特徴から、計測対象の距離および反射光強度を引く、逆引き計測テーブルを生成することで計測系を設計する。

前述の測距計算手法で用いるために、一定距離に単一の反射があるときの、対象物体からセンサに帰る反射光の強度が変化したときの信号波形を網羅的に取得した信号波形を用いて、以下の3つの逆引き計測テーブルをそれぞれ作成する。

1. 初期の立ち上がり勾配をインデックスに、対象物体の距離および反射光強度を取得する逆引き計測テーブル

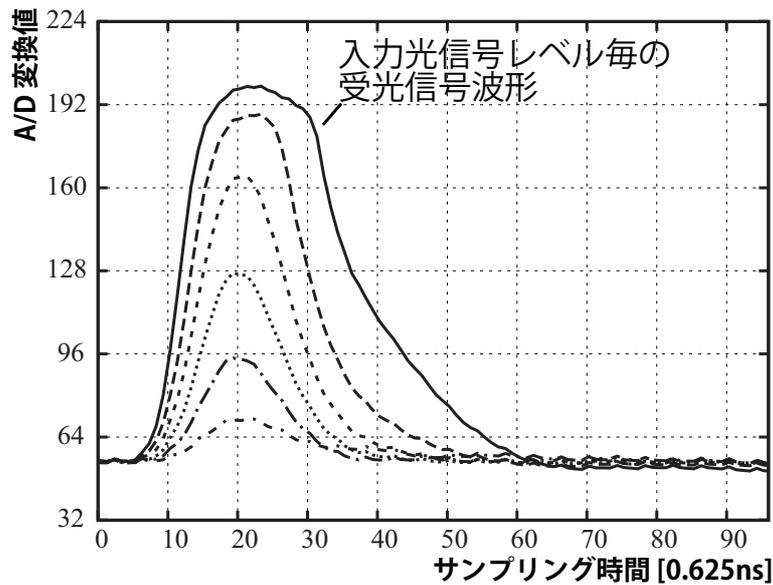


Figure. 43: 網羅的に実測した測定対象の反射係数に対する受光信号波形

2. 末尾の立ち下がり勾配をインデックスに、対象物体の距離および反射光強度を取得する逆引き計測テーブル
3. パルス幅をインデックスに、信号のピーク値、対象物体の距離および反射光強度を取得する逆引き計測テーブル

5.3 オフライン計算支援に基づく設計と実験に基づく評価

信号波形は、UTM-30LX の、1.6 ギガヘルツのサンプリング、8 ビット分解能の A/D 変換器を用いて取得し、ノイズ除去のためにカットオフ周波数 600 メガヘルツの 10 次ベッセルフィルタを適用した。初期の立ち上がり勾配、末尾の立ち下がり勾配、パルス幅の検出に用いるフォトダイオード電流の閾値は、無信号時のノイズレベルを考慮して、24 マイクロアンペアおよび 49 マイクロアンペアとした。

反射光の光強度に対する受光波形を網羅的に取得した結果の一部を、Figure. 43 に示す。網羅的なデータ取得の分解能は、Table. 10 に示すように計測対象の反射係数毎に 39 個とした。信号波形の取得時には、ランダムな高周波ノイズの影響を抑えるため、計測を 16 回行い平均を取っている。このとき、手動での、網羅的な信号の実測に要した時間は約 1 時間であった。

網羅的な信号の実測にあたって、信号波形を確認しながら、計測対象の反射係数を微小に変化させることで、信号波形の初期の立ち上がり勾配、末尾の立ち下がり勾配、パルス幅、ピーク値が単調に変化することを確認した。これにより、この測域センサ信号処理系設計において、数値計算的なシステム設計における離散化の条件である、離散化された区間内でのシステ

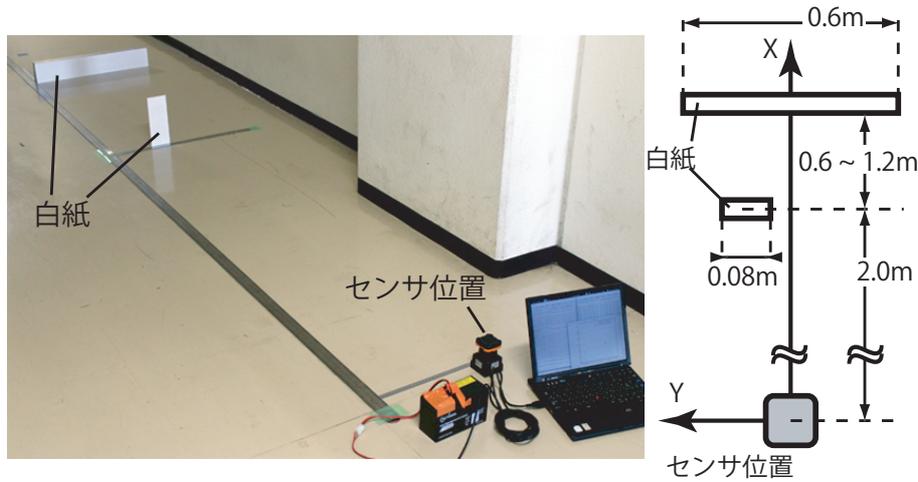


Figure. 44: 実験に用いた、従来の測域センサが誤検出を発生する典型的な環境

ム動作の単調性が満たされることが確かめられた。以降の評価実験において計測テーブルを引く際には、線形補間で分解能を高めて用いた。

誤検出の発生しやすい環境における、設計した計測系の動作を確かめるため、Figure. 44 に示すように、センサ正面 2.0 メートルの位置および、その 0.6 メートル、0.9 メートル、1.2 メートル後方に白紙を設置した環境において実験を行った。提案した手法で得られた測距データと、同環境で通常の UTM-30LX で取得した測距データの一部を Figure. 45 に示す。通常の計測手法では、手前の白紙と、奥の白紙の間に誤検出が見られるが、提案した手法では削減できていることが確かめられた。

誤検出の量を評価するため、通常の計測手法と提案手法について各 8 回実験を行い、白紙と白紙の間で誤検出された 1 番目の反射点の個数を測定した。実験の結果を、Table. 11 に示す。通常の計測手法では、それぞれの白紙間の距離で、平均で 3.0 点、3.38 点、2.88 点の誤検出が発生するが、提案手法を用いると平均で 0.25 点、0 点、0 点に削減できた。提案手法により、誤検出を 90 パーセントから 100 パーセント削減できることが確かめられた。

また、レーザー測域センサ UTM-30LX を用いて環境形状を取得した際に発生する誤検出の例として挙げた Figure. 33 と同一の環境で、計測を行った結果を Figure. 46 に示す。UTM-30LX で発生していた誤検出が、本手法で設計した計測系では発生していないことが確認できる。

Table. 10: オフライン計算支援に基づく測域センサ信号処理系設計の離散化間隔

	次元	離散化	範囲
計測対象の反射係数	1	39	0 ~ 100 % (無反射 ~ 鏡面反射)
実測に要した時間		約 1 時間	

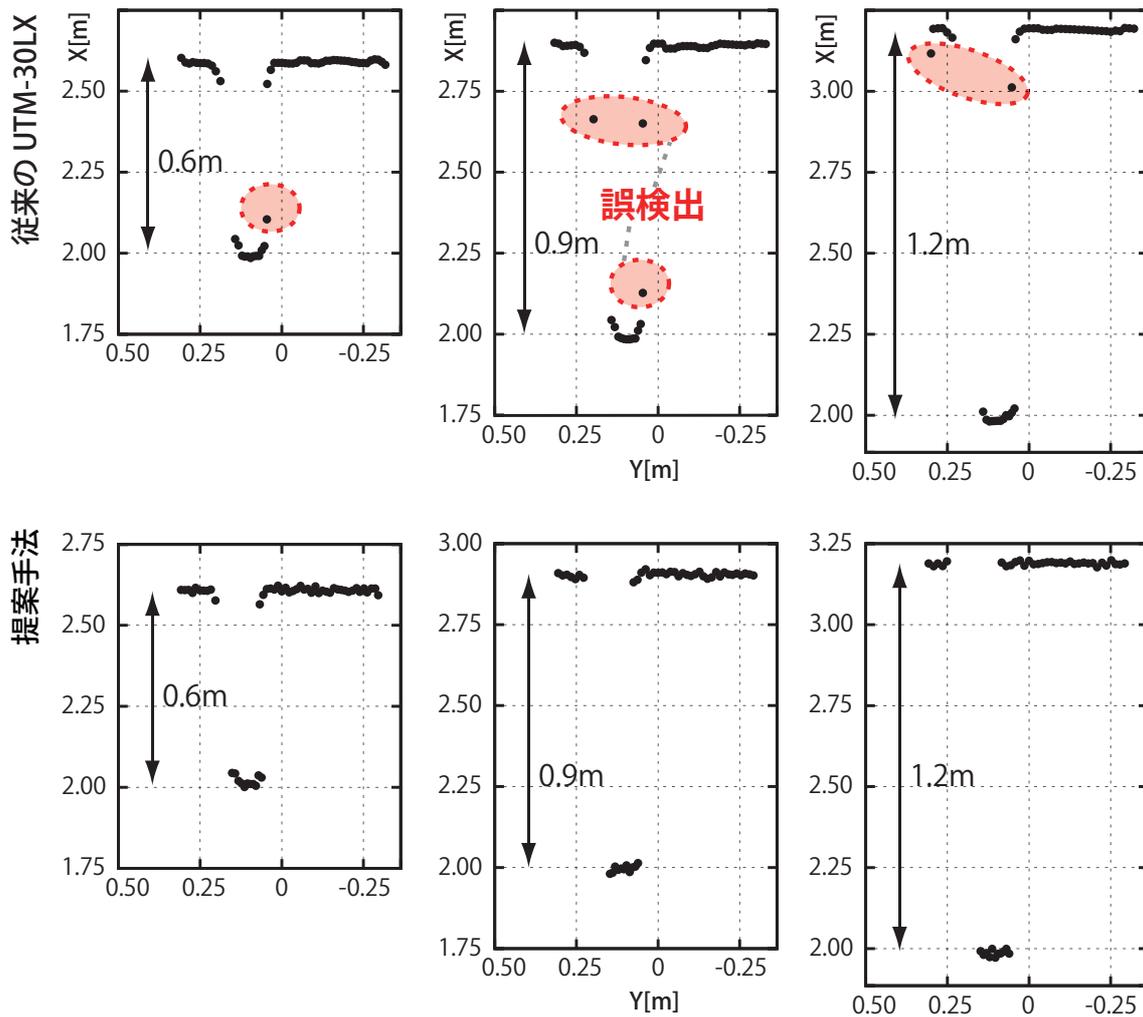


Figure. 45: 本設計法で構築した測域センサ計測系および従来の計測系の測域結果

5.4 関連研究との比較

リモートセンシング分野で用いられる、“Full-Waveform LiDAR”を用いた測域センサ計測系 [53, 54, 55] は移動ロボット用のセンサと比較して大型なため、光学系の制約が少なくレーザー光の広がりが最小限に抑えられ、本章で扱ったような誤差の発生が少ない。また、移動ロボッ

Table. 11: 本設計法で構築した測域センサ計測系および従来の計測系の誤検出点数

	0.6 m	0.9 m	1.2 m
通常の UTM-30LX	3.00	3.38	2.88
構築した計測系	0.25	0	0

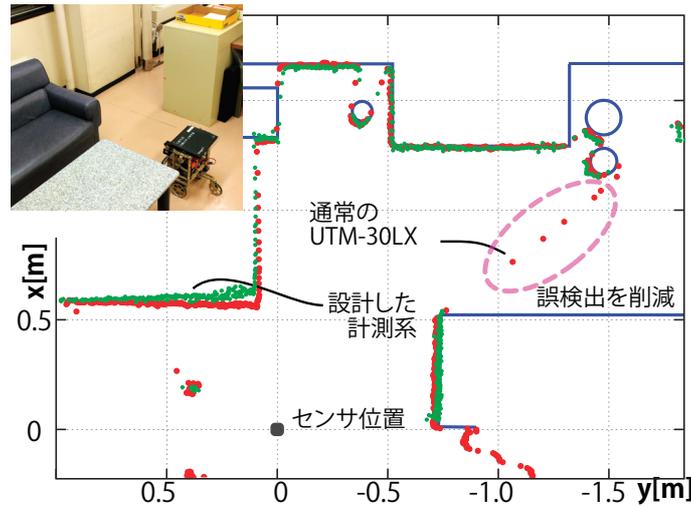


Figure. 46: 通常の UTM-30LX で誤検出が発生する環境における計測結果

ト用のセンサでは、計測の対象となる環境において複数の物体が狭い範囲に存在することが多く、レーザ光の信号を処理するアナログ信号処理系の非線形性が強く影響するため、広い範囲にある大きな物体を計測するためのこれらの手法は有効に働かなかった。本研究で提案する計測・制御系設計法では、実際のアナログ信号処理系における非線形回路の挙動を網羅的に取得して計測系を設計するため、これらの手法では実現できなかった、狭い範囲に多くの物体があるような計測対象の環境においても、誤検出が少ない測定を可能にした。

測域センサのデータから誤検出らしい点を判別して除去する手法 [52] などと比較して、誤検出の除去が不要なため、得られる情報量を減らさずに計測できる。更に、アプリケーションプログラムで、センサに固有の問題に対する、経験的な対処を行う必要がなくなるため、アプリケーションプログラムの再利用性が高められると考える。

5.5 結論

本章では、複数の場所で反射したレーザ光の波形が混合されて非線形なアナログ系で処理されるために、信号波形のデコンボリューション計算などによる分離が難しく、誤検出を多く発生させていた測域センサ距離計測系に、オフライン計算支援に基づく設計手法を適用した結果を述べた。トランスインピーダンス対数アンプによる低飽和なアナログ高周波信号処理系を構築し、このアナログ系から得られた信号から計測対象物の距離と反射光強度を求める計測問題について、計測対象の反射光強度を変化させて網羅的に取得した受光信号波形から作成した逆引き計測テーブルを用いる計測系を実現した。これにより、オフライン計算支援に基づく設計手法を用いることで、アナログ高周波信号処理系の非線形性を考慮した計測系を設計可能であることを明らかにした。

また本章では、オフライン計算支援に基づく設計手法により設計した測域センサ距離計測系が、通常の測域センサにおいて誤検出を発生しやすい、狭い範囲に複数の物体が存在する環境においても、誤検出が少なく計測可能であることを、実験により明らかにした。

計測系の設計に必要な、網羅的な信号波形の取得には手動で1時間程度要した。これはセンサのアナログ信号処理系の仕様が決まったときに1度行えばよいので、実用上十分な時間で計算ができていると考える。

第6章 オフライン計算支援に基づく計測・制御系設計の考察

6.1 提案した設計法の適用可能範囲

本研究では、対象のシステムの取り得る全ての状態および与える入力について数値シミュレーションや実測により動作結果を求め、その結果から目的の動作を実現する則やパラメータを探索することで計測・制御系を設計する手法を提案し、解析的な設計手法の適用が難しかった移動ロボットの計測・制御系にこれを適用して効果を確認した。

本研究でオフライン計算支援に基づく計測・制御系設計法を適用した、非線形な駆動法によるブラシレスモータの高効率な制御、非ホロノミック拘束および出力のクリップによる非線形性を考慮した安定な軌跡追従制御、非線形に歪んだ信号を用いた誤検出の少ないレーザ測域センサ計測は、システムのもつ非線形性により、解析的な扱いが難しく、従来の解析的な設計法の適用が難しい。一方、それぞれの問題については、システム動作を表す順計算は、以下のようにならぬに数値計算や実測により行える。

非線形な駆動法によるブラシレスモータの高効率な制御

数値シミュレーションでモータの内部状態と与えるスイッチングパターンからモータ電流が網羅的に計算できる

非ホロノミック拘束および出力のクリップによる非線形性を考慮した安定な軌跡追従制御

数値シミュレーションで制御ゲインおよび目標速度が与えられたときの走行軌跡が網羅的に計算できる

非線形に歪んだ信号を用いた誤検出の少ないレーザ測域センサ計測

計測対象の反射光強度毎の受光信号波形が実測により網羅的に取得できる

提案したオフライン計算支援に基づく計測・制御系設計法により、非線形な駆動法を用いたブラシレスモータの高効率な制御系、非線形性を考慮した安定な軌跡追従制御系、非線形に歪んだ信号を用いた誤検出の少ないレーザ測域センサ計測系を設計した結果、それぞれの問題について、解析的な扱いが難しい非線形性をよく考慮したシステム設計が可能であることが明らかになった。この結果から本設計法は、システム動作の解析的逆計算による計測・制御系設計が困難な問題について、数値計算や実測によりシステム動作の順方向の計算が可能であれば有

効に設計できることが確認できた。

また、本研究の計測・制御系設計手法を用いた結果、従来の解析的設計において必要であった、問題毎の非線形解法や近似方法の導出を不要にできることが明らかになった。ただし本手法においても、従来の設計と同様に、システム動作の順問題について十分な理解が必要である。

提案した設計法を、それぞれの問題に適用した際の、システム動作の網羅的な順計算の分解能および、設計に要した計算時間を以下に示す。

非線形な駆動法によるブラシレスモータの高効率な制御

1.1 × 10¹⁴ の状態・入力について 13 時間で計算

非ホロノミック拘束および出力のクリップによる非線形性を考慮した安定な軌跡追従制御

18 の状態、および連続な入力について 1 時間で計算

非線形に歪んだ信号を用いた誤検出の少ないレーザ測域センサ計測

39 の状態について 1 時間で実測

それぞれの問題について、離散化の分解能で分割した状態・入力の範囲内で、システムの挙動が単調に変化していることを確かめている。すなわち、この分解能で離散化して得られた結果は補完して利用可能であり、必要な分解能が確保されていることが分かる。またそれぞれの問題について、設計に要する計算時間は、実用的な時間の範囲内になることが明らかになった。

本研究で用いた計算機は、Table. 12 に仕様を示す、Intel Xeon X5650 プロセッサを 2 台搭載し、計 12 コア、24 スレッドで 2.67 ギガヘルツのクロックで動作する、2011 年に一般に入手可能だった卓上サイズのワークステーションである。2013 年現在では、CPU の演算コア数が 2 倍の製品が登場しており、また、並列コンピューティング用の演算ボード (例: Intel Xeon Phi 5110P、1 ギガヘルツ、60 コア) や、汎目的計算用のグラフィックスプロセッシングユニット (例: NVIDIA GeForce GTX 780、1 ギガヘルツ、2880 コア) などのハードウェアおよびプログラミング環境が整備され、より多くの網羅的な数値計算が可能になっている。そのため、順計算の離散化間隔を細かくした計測・制御系設計や、移動ロボット分野以外の更に複雑な問題についても、適用可能な範囲は広がると考える。

一方で、離散化された状態や入力の数が増加すると、その組み合わせにより計算量が指数関数的に増大するため、更に莫大な計算が必要な系については、現在のところ、本手法の適用が難しい。また、解析的にうまく設計可能な問題は、数値計算的に計算を行うと計算コストが大きく時間がかかるため、このような問題への適用は向いていないと考える。

6.2 将来の展望

提案したオフライン計算支援に基づく計測・制御系設計手法は、移動ロボットの計測・制御系以外の幅広いシステム設計に利用できると考える。自立型移動ロボット以外の計測・制御系への適用による、非線形性を陽に考慮した高性能なシステムの実現と、その効果の確認を行うことで、本設計手法の利用範囲の拡大が期待できる。例えば、以下のような計測・制御系に本手法が有効に働き、高性能なシステムを実現できると考える。

- 環境によって非線形な遅れを受ける衛星測位システムの計測系
- 脳波、筋電位などのシステムモデルが不明な生体信号の計測系
- 複雑で非線形な性質をもつマニピュレータの制御系
- 人工筋肉などの非線形な動作を伴うアクチュエータ制御系
- 非線形な摩擦などの特性をもつアクチュエータ制御系
- 正確なモデルが不明な生体・生物などの動作制御

また、本研究で自立型移動ロボットに残された計測・制御問題に適用した、オフライン計算支援に基づく計測・制御系設計手法の一般化が将来の課題として残されている。本設計手法の一般化には、設計法の適用可能性の論理的な判定方法、安定性・ロバスト性の証明方法の確立が必要と考える。更には、これを応用して、数値計算や実測データで表現したシステム動作のモデルと、目的とする結果から計測・制御則を半自動的に生成するような、ソルバの開発が長期的な展望である。

Table. 12: 本研究で示した計算支援に基づく計測・制御系設計に用いた計算機

CPU モデル	Intel(R) Xeon(R) X5650
並列計算の仕様	2 CPU、6 コア (Hyper-Threading) 計 24 スレッド
CPU 動作周波数	2.67 GHz
L2 キャッシュ	256 kB/コア
L3 キャッシュ	12 MB/CPU
命令セット	x86-64 (64bit)
SIMD 拡張命令	SSE4.2
搭載メモリ	6 GB

第7章 おわりに

本研究では、移動ロボットで用いられる複雑で非線形な計測・制御系を効果的に設計可能な、オフライン計算支援に基づく計測・制御システム設計法を提案した。移動ロボットで用いられる計測・制御系のうち、複雑で非線形性をもつ、ブラシレスモータの高効率な非線形駆動の制御、幅広い速度域での軌跡追従走行制御、およびレーザ測域センサの計測は、解析的な設計法の適用が難しいため、経験的にもしくは近似に基づいて設計されてきた。本研究では、これらの計測・制御系を、数値シミュレーションやデータから総当たりに適切な則やパラメータを見つけることで、特性、精度、効率のよい実用的なシステム設計が可能なることを示し、その効果と必要な計算コストを明らかにした。

本章では、本研究により得られた成果を総括し、これらの成果の、移動ロボット分野、工学分野への寄与を明らかにする。

7.1 本研究の成果と寄与

本研究では、移動ロボットの計測・制御系に残された問題を“オフライン計算支援に基づく設計法”に基づき設計および実装し、実験により効果を明らかにした。それぞれの問題の設計における成果と寄与を以下に示す。

高効率なブラシレスモータ制御

非線形で解析的扱いが困難なブラシレスモータ駆動法について、数値シミュレーションと分枝限定法と網羅的な計算による逆引き制御テーブルの生成によって制御系を設計し、RMS 誤差 4 パーセント以下の精度での制御と、移動ロボットの動作領域での 15 パーセントの効率改善が可能であることを明らかにした。これにより、駆動回路の規模を増大させず、市販のモータドライバユニットのソフトウェアの入れ替えによりモータ駆動効率を向上して、移動ロボットの連続動作時間の拡張を可能にした。

広い速度域で安定な軌跡追従制御

非ホロノミック拘束および角速度・角加速度のクリップによる非線形性から、不安定化しやすく、解析的な設計が困難だった移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御系の制御ゲイン設計問題について、数値シミュレーションによる走行軌跡の評価と大域的最適化手法である焼き鈍し法により制御系を設計し、0.5 メートル毎秒から 4 メートル毎秒の

広い速度範囲で安定で、ステップ入力上の目標軌跡に対しても振動の少ない軌跡追従制御を実現した。これにより、ダイナミクスを考慮した角速度・角加速度などの制限を伴う現実的な移動ロボットシステムの軌跡追従制御系を、非線形な動作領域において、広い速度域で安定に設計可能にした。

誤検出の少ないレーザ測域センサ計測

広ダイナミックレンジのアナログ高周波信号処理系の非線形性により混在した反射光信号の分離が困難なために、近い距離範囲に複数の対象物体がある環境で誤検出を多く発生させていた、移動ロボット向けの小型レーザ測域センサの距離計測系について、計測対象の反射光強度を網羅的に変化させて実測した信号波形を用いて計測系を設計し、誤検出の少ない計測を実現した。これにより、移動ロボットの認識能力の向上を可能にするとともに、アプリケーションソフトウェアでの誤検出対策の処理を不要にして汎用性を向上可能にした。

移動ロボットの計測・制御系に残された問題を“オフライン計算支援に基づく設計法”に基づき設計したことによる本研究の成果と、ロボティクス分野、工学分野への寄与を以下に示す。

- 提案したオフライン計算支援に基づく設計法に基づき、移動ロボット計測・制御系に残されていた以下の問題を解決できることを示した。
 - 高効率なブラシレスモータ制御
 - 広い速度域で安定な軌跡追従制御
 - 誤検出の少ないレーザ測域センサ計測

これにより、移動ロボットの計測・制御系を、目的にあわせて設計されたハードウェアの性質を良く考慮して高性能に設計可能になり、移動ロボットの適用可能な動作領域およびアプリケーションの範囲を拡大可能にした。ひいては、本研究の成果が移動ロボットによる省力化や危険な仕事の代替のための技術発展に貢献すると考える。

- 解析的な設計が難しい非線形計測・制御系設計のオフライン計算支援に基づく設計法を提案し、移動ロボットの計測・制御系設計に有効に働くことを示した。本設計法は、非線形制御論や近似による線形制御論に基づく、個別の問題に対する解析的な非線形解法を見つけるような設計方法の代わりに、対象とするシステムの動作を数値計算や実測で網羅的に表して逆引きテーブルを作成することで移動ロボットの計測・制御を設計できる。これにより、個別の問題に対する解析的な解法を見つける必要が無く、直感的な手順によって、複雑性、非線形性を十分に考慮した移動ロボットのシステム設計が可能になった。

- これらの成果を通して、“オフライン計算支援に基づく設計法”に基づく、ある程度統一的な計測・制御系の設計指針が得られた。これにより、システム設計問題の解決可能な範囲を拡大でき、非線形で複雑なシステムを用いた計測・制御を基盤とする、工学分野の発展に貢献すると考える。

7.2 本論文のまとめ

本論文では、各章で以下に示す内容を述べた。

第1章

本研究の背景として、従来の移動ロボットシステムの構成と設計方法および実際の屋外自律走行ロボットシステムの設計・実装を例に、従来の設計法の適用が難しい移動ロボットの非線形計測・制御系の設計問題について述べた。これらの問題を解決することを研究の動機として、本研究の目的を述べた。

第2章

従来の設計法の適用が難しい移動ロボットの非線形な計測・制御系を、統一的な考え方で設計可能な、オフライン計算支援に基づく移動ロボットの計測・制御システム設計法を提案し、本設計法に必要な計算の条件を述べた。また、従来の計測・制御系設計法との比較により本研究の位置づけを明らかにするとともに、移動ロボット計測・制御系設計において残されていた問題を洗い出し、それぞれの問題で考慮すべき非線形性の種類を明らかにした。

第3章

電力効率を向上可能な一方で非線形で複雑な回路動作を伴うブラシレスモータの駆動手法を用いた、高効率なブラシレスモータ制御則を、本研究のシステム設計法により設計する方法を述べた。また、実験に基づき、設計した制御系の特性を評価し、高効率かつ十分な精度での制御が可能であることを明らかにした。

第4章

非ホロノミック拘束および速度・加速度のクリップによる非線形性により、特に高速域で安定化が難しい移動ロボットの軌跡追従レギュレータ制御パラメータを、本研究のシステム設計法により設計する方法を述べた。実験に基づき、設計した制御系の特性を確認し、広い速度域で安定な軌跡追従制御が実現できることを明らかにした。

第5章

高周波アナログ信号処理系の非線形性により誤検出を発生するレーザ測域センサの計測則を、本研究のシステム設計法により設計する方法を述べた。実験に基づき、従来の計測系が誤検出を発生する環境において、設計した計測系により誤検出の少ない計測が実現できることを明らかにした。

第6章

第3章から第5章で明らかにした、移動ロボット計測・制御系において残されていた問題における本研究のシステム設計法の有効性を考察し、提案設計法が有効に働く範囲および、その条件を明らかにした。

第7章

本研究の成果を総括し、本研究の移動ロボット分野、工学分野への寄与を述べた。

7.3 まとめ

移動ロボットによる、人間の仕事の省力化や危険な仕事の代替を進めるためには、移動ロボットが複雑な仕事を自律的 (Autonomous) かつ自立的 (Self-contained) に行う必要がある。これには、移動ロボットの全ての構成要素について同時に高度化して、環境認識能力、行動決定能力の向上および、動作の効率、安定性、応答性能、信頼性、ロバスト性を向上する必要があるため、再利用可能で統一的な移動ロボットの構成要素の設計方法が重要となる。

自律型の移動ロボットを構成する要素のうち、与えられたタスクを実現するためのアプリケーションソフトウェア、ハードウェアを抽象化してソフトウェアの汎用性や再利用性を高めるためのミドルウェア、ソフトウェア実行のプラットフォームである基本ソフトウェア (OS) は、販売または公開されているプラットフォームや、オープンソースライブラリの開発・公開が進んでいる。一方で、移動ロボットを構成する要素の、ハードウェア、ファームウェアは、目的や想定する動作環境に合わせて個別に設計を行う必要があり、これを統一的に設計するための制御理論、計測理論が盛んに研究されてきた。従来の計測・制御理論では、個々の問題に対して、システムの内容に合わせた解析的な解き方を個別に見つける必要があり、複雑で、非ホロミック拘束、クリッピング、飽和などの非線形性を含み、解析的な扱いが難しい移動ロボットの計測・制御系の、統一的な手法による設計は煩雑、もしくは困難であった。

本研究は、大量の数値計算や実測データといった「オフライン計算支援」に基づく計測・制御システム設計法を提案し、移動ロボットの設計問題に適用して、その効果を検証することを目的とした。計測・制御系設計とは、計測・制御の対象となるシステムの動作結果から、システムの入力を求める則を導くことにあたる。本研究で提案した設計法は、システムの取り得る全ての状態・システムの入力に対して網羅的に数値シミュレーションまたは実測データといっ

たシステム動作の順計算により実現される結果を求め、その結果から目的の結果を実現する入出力関係を抽出することで計測・制御則を導くものである。これにより、従来の問題毎に個別の解き方を見つける必要がある計測・制御系設計法において設計が難しかった、解析的に扱いきれない移動ロボット計測・制御系の統一的な設計指針が得られた。

また、提案した設計法を、移動ロボット計測・制御系に残された、非線形な駆動方式を用いた高効率なブラシレスモータ制御系、長期的な挙動と非線形性を考慮した広い動作範囲で安定な移動ロボット軌跡追従制御系、複雑・非線形性を考慮した高精度な測域センサ計測系に適用して、それぞれについて効果を確認した。本研究によって、移動ロボットの計測・制御系における、非線形で複雑なシステムの設計を統一的かつ容易にしたことで、これまでに実現されてきた汎用性や再利用性を高められるミドルウェア、基本ソフトウェアとあわせて、移動ロボットアプリケーションの発展を促進できると考える。

謝辞

本研究は、博士(工学)大矢晃久 筑波大学システム情報系教授の指導のもとで行われました。大矢教授には、研究を進めるにあたっての多くの議論、論文執筆、発表準備などにおつきあい頂き、多くの有益なアドバイスを頂きました。

本論文をまとめるにあたり、博士(工学)河辺徹 筑波大学システム情報系教授、博士(工学)亀山啓輔 筑波大学システム情報系准教授、工学博士 坪内孝司 筑波大学システム情報系教授には適切なご助言を頂きました。

また、工学博士 油田信一 芝浦工業大学工学部特任教授および筑波大学名誉教授には、博士前期課程中の実質的な指導教員をお願いし、研究に関する議論を通しての数多くの有益なアドバイスを頂くとともに、研究者としての心構えや考え方などの様々なヒントを頂きました。

千葉工業大学未来ロボット技術研究センター上席研究員 吉田智章博士には、本研究の「ブラシレスモータの高効率な電流制御」において、実験に用いたモータ、およびモータドライバに関する多くのご助言を頂きました。北陽電機株式会社技術部 山本明人様、同取締役技術本部長 森利宏様、同経営企画本部 R & D 推進室室長 嶋地直広様、同 R & D 推進室 川田浩彦博士には、本研究の「測域センサの誤検出の少ない高精度な計測」において、実験のための機器のご提供、評価実験などに関する大変有用なご助言やご助力を頂きました。藤原卓磨氏(現：旭硝子株式会社)には、筑波大学知能ロボット研究室において、広い速度域で動作する移動ロボットのハードウェアを共同で管理・使用して頂き、ハードウェアの構成などについて行った多くの議論は、本研究の「広い速度域に対応した移動ロボット軌跡追従レギュレータ制御」における研究の重要な基盤となりました。また、筑波大学知能ロボット研究室において移動ロボット軌跡追従制御についての成果などを応用した、走行制御プラットフォームの管理・維持に、共に尽力して頂いた木下和樹氏(現：任天堂株式会社)、識名拓氏(現：株式会社安川電機)の諸氏には、有用なご助言やご助力を頂きました。

筑波大学知能ロボット研究室の皆さまには、研究に関する議論はもちろん、研究の合間の雑談や食事、遊びなどで多くの助力を頂きました。

また、経済的な面での支援だけでなく、多くの心遣いをいただいた両親に心より感謝いたします。

上記の皆さまをはじめとして、ここに書ききれない多くの方々のご助言やご助力により、本研究が実現したと確信しています。この場を借りて、深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 槇 修一, 松本 高斉, 正木 良三, 谷口 素也. 位置同定コンポーネントの開発と自律移動ロボット lapi への適用 (地理空間情報とロボットと人). 電子情報通信学会技術研究報告. CNR, クラウドネットワークロボット, Vol. 111, No. 366, pp. 15–19, dec 2011.
- [2] 総合警備保障株式会社. 警備員とロボットの新しい警備システム reborg-q (特集ビルメンテナンス業界とロボットの現在). ビルメンテナンス, Vol. 42, No. 5, pp. 36–39, may 2007.
- [3] 元青山, 和良石川. ビルのロボット清掃システム (iメカライフ特集, 綺麗にする). 日本機械学会誌, Vol. 113, No. 1102, pp. 708–709, sep 2010.
- [4] K. Ohno, S. Tadokoro, Keiji Nagatani, E. Koyanagi, and T. Yoshida. Trials of 3-d map construction using the tele-operated tracked vehicle kenaf at disaster city. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 2864–2870, 2010.
- [5] Keiji Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, K. Otake, Kazuya Yoshida, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, M. Fukushima, and S. Kawatsuma. Gamma-ray irradiation test of electric components of rescue mobile robot quince. In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on*, pp. 56–60, 2011.
- [6] S. Cousins, B. Gerkey, K. Conley, and W. Garage. Sharing software with ros [ros topics]. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, Vol. 17, No. 2, pp. 12–14, 2010.
- [7] 松本 吉央. R T ミドルウェアによるロボットアーキテクチャ 移動ロボットシステム. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 5, pp. 564–565, 2010.
- [8] Gary Bradski. Programmer’s toolchest-the opencv library-opencv is an open-source, computer-vision library for extracting and processing meaningful data from images. *Dr Dobb’s Journal-Software Tools for the Professional Programmer*, Vol. 25, No. 11, pp. 120–126, 2000.
- [9] Radu Bogdan Rusu and Steve Cousins. 3d is here: Point cloud library (pcl). In *International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 2011 2011.
- [10] Ioan Alexandru Sutan, Mark Moll, and Lydia E. Kavraki. The open motion planning library. *IEEE Robot. Automat. Mag.*, Vol. 19, No. 4, pp. 72–82, 2012.
- [11] Thang Nguyen and Z. Gajic. Solving the matrix differential riccati equation: A lyapunov equation approach. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, Vol. 55, No. 1, pp. 191–194, 2010.
- [12] Hong Chen and Kong-Hui Guo. Constrained h_{∞} control of active suspensions: an lmi approach. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 13, No. 3, pp. 412–421,

- 2005.
- [13] Hong Chen, Miao-Miao Ma, Hu Wang, Zhi-Yuan Liu, and Zi xing Cai. Moving horizon H_∞ tracking control of wheeled mobile robots with actuator saturation. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 17, No. 2, pp. 449–457, 2009.
- [14] H. Chaoui, P. Sicard, and W. Gueaieb. Ann-based adaptive control of robotic manipulators with friction and joint elasticity. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 56, No. 8, pp. 3174–3187, 2009.
- [15] E. Scholte and M.E. Campbell. Robust nonlinear model predictive control with partial state information. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 16, No. 4, pp. 636–651, 2008.
- [16] S. Akiba, T. Zanma, and M. Ishida. Optimal tracking control of two-wheeled mobile robots based on model predictive control. In *Advanced Motion Control, 2010 11th IEEE International Workshop on*, pp. 454–459, 2010.
- [17] 伊達 央, 滝田 好宏. 自律移動ロボット smart dump による実世界環境走行実験: 歩行者環境における人の群れ行動による影響と対策. *日本ロボット学会誌*, Vol. 30, No. 3, pp. 305–313, apr 2012.
- [18] 原 祥堯, 大島 章, 小野 幸彦, 網野 梓, 山本 健次郎. 人込み歩道環境に適応した自律移動技術の開発と実験機 sofara-t を用いた実環境での評価. *日本ロボット学会誌*, Vol. 30, No. 3, pp. 287–295, apr 2012.
- [19] 友納 正裕, 吉田 智章, 入江 清, 小柳 栄次. つくばチャレンジにおける屋外ナビゲーションシステムの問題分析と基本設計. *日本ロボット学会誌*, Vol. 30, No. 3, pp. 262–270, apr 2012.
- [20] 山田 大地, 石田 卓也, 関口 誠, 岡村 公望, 福永 和海, 大矢 晃久. 高所特徴による自己位置推定を用いた明示的な動作計画に基づく屋外自律ナビゲーション. *日本ロボット学会誌*, Vol. 30, No. 3, pp. 253–261, apr 2012.
- [21] 井上 一道, Rahok Sam Ann, 尾崎 功一. つくばチャレンジにおける移動ロボットの設計方針の提案と考察. *日本ロボット学会誌*, Vol. 30, No. 3, pp. 234–244, apr 2012.
- [22] 油田 信一, 水川 真, 橋本 秀紀. つくばチャレンジのねらいと成果. *計測と制御= Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 49, No. 9, pp. 572–578, 2010.
- [23] M. Saeki, O. Hamada, N. Wada, and I. Masubuchi. Pid gain tuning based on falsification using bandpass filters. In *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference*, pp. 4032–4037, 2006.
- [24] Chibum Lee, S.M. Salapaka, and P.G. Voulgaris. Two degree of freedom robust optimal

- control design using a linear matrix inequality optimization. In *Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on*, pp. 714–719, 2009.
- [25] M. Saeki and A. Takahashi. Parameter space pid design based on simulation and its application. In *Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference on*, pp. 7241–7246, 2005.
- [26] R. Ueda and T. Arai. Dynamic programming for global control of the acrobot and its chaotic aspect. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pp. 2416–2422, 2008.
- [27] R. Ueda, T. Arai, and K. Matsushita. Creation and compression of global control policy for swinging up control of the acrobot. In *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 2557–2562, 2006.
- [28] Fabio Paterno. *Model-based Design and Evaluation of Interactive Applications &c Fabio Paterno*. Springer, 2000.
- [29] Steven D Eppinger, Daniel E Whitney, Robert P Smith, and David A Gebala. A model-based method for organizing tasks in product development. *Research in Engineering Design*, Vol. 6, No. 1, pp. 1–13, 1994.
- [30] 原 祥堯, 小野 幸彦, 中拓 久哉, 山田 弘幸, 城吉 宏泰, 大島 章, 池田慎太郎, 田中 航, 岡 和道, 松原 満, 網野 梓, 柄川 索. ピッチ・ロール傾斜させた 2D 測域センサを用いた屋外自律移動のための 3D 環境形状の取得. 計測自動制御学会 第 13 回システムインテグレーション部門講演会, pp. 70–73, 2009.
- [31] Liming Liu, Hui Li, Seon-Hwan Hwang, and Jang-Mok Kim. An energy-efficient motor drive with autonomous power regenerative control system based on cascaded multilevel inverters and segmented energy storage. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 49, No. 1, pp. 178–188, 2013.
- [32] Jiancheng Fang, Xinxiu Zhou, and Gang Liu. Instantaneous torque control of small inductance brushless dc motor. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 27, No. 12, pp. 4952–4964, 2012.
- [33] M. Kojima, K. Hirabayashi, Yoshitaka Kawabata, E.C. Ejiogu, and Takao Kawabata. Novel vector control system using deadbeat-controlled pwm inverter with output lc filter. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 40, No. 1, pp. 162–169, 2004.
- [34] T. Laczynski and A. Mertens. Predictive stator current control for medium voltage drives with lc filters. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 24, No. 11, pp. 2427–2435,

- 2009.
- [35] S. Iida and S. Yuta. Feedforward current control method of dc servomotor using table for software servo system. *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 109, No. 4, pp. 122–131, 1989.
- [36] Xinxiu Zhou and Jiancheng Fang. Precise braking torque control for attitude control flywheel with small inductance brushless dc motor. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 28, No. 11, pp. 5380–5390, 2013.
- [37] Jiancheng Fang, Xinxiu Zhou, and Gang Liu. Precise accelerated torque control for small inductance brushless dc motor. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 28, No. 3, pp. 1400–1412, 2013.
- [38] Zhe Zhang, O.C. Thomsen, and M.A.E. Andersen. Discontinuous pwm modulation strategy with circuit-level decoupling concept of three-level neutral-point-clamped (npc) inverter. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 60, No. 5, pp. 1897–1906, 2013.
- [39] A. Shukla, A. Ghosh, and A. Joshi. Flying-capacitor-based chopper circuit for dc capacitor voltage balancing in diode-clamped multilevel inverter. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 57, No. 7, pp. 2249–2261, 2010.
- [40] Sung-Geun Song, Feel Soon Kang, and Sung-Jun Park. Cascaded multilevel inverter employing three-phase transformers and single dc input. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 56, No. 6, pp. 2005–2014, 2009.
- [41] E. Prasad, A. Sudhakar, and V. Kumar. Simulation of five-level inverter fed pmsm based on fast svpwm. In *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 1–5, 2012.
- [42] S. Iida and S. Yuta. Vehicle command system and trajectory control for autonomous mobile robots. In *Intelligent Robots and Systems '91. 'Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS '91. IEEE/RSJ International Workshop on*, pp. 212–217 vol.1, 1991.
- [43] 大西 献. ホームユースロボット「wakamaru」(家庭用・ペット・ホビー、メカライフ特集; ロボット). *日本機械学会誌*, Vol. 109, No. 1051, pp. 448–449, jun 2006.
- [44] H. Mehrjerdi and M. Saad. Dynamic tracking control of mobile robot using exponential sliding mode. In *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1517–1521, 2010.
- [45] Bin Niu and Hui Zhang. Model based control of industrial robot and implementation of its gain scheduling robust control. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 2156–2162, 2011.
- [46] HongZhe Jin, Jie Zhao, Jizhuang Fan, and JangMyung Lee. Gain-scheduling control of

- a 6-dof single-wheeled pendulum robot based on dit parameterization. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 3511–3516, 2011.
- [47] Jie Zhao, Mei Xiong, and Hongzhe Jin. Dynamics and a convenient control design approach for a unicycle robot. In *Information and Automation (ICIA), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 706–711, 2010.
- [48] S. Nandy, S.N. Shome, G. Chakraborty, and C.S. Kumar. A modular approach to detailed dynamic formulation and control of wheeled mobile robot. In *Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on*, pp. 1471–1478, 2011.
- [49] Robert Azencott. Simulated annealing. *Seminaire Bourbaki*, Vol. 30, pp. 223–237, 1988.
- [50] R. Valencia, E.H. Teniente, E. Trulls, and J. Andrade-Cetto. 3d mapping for urban service robots. In *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3076–3081, 2009.
- [51] 近藤 修平, 塩沢 恵子, 坪内 孝司, 富村 周平, 望月 亜希子, 佐々木浩二, 速水 亨. 測域センサを用いた森林内立木群の三次元マップの構築. *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, Vol. 2010, pp. 1A1–D16, 2010.
- [52] Cang Ye. Mixed pixels removal of a laser rangefinder for mobile robot 3-d terrain mapping. In *Information and Automation, 2008. ICIA 2008. International Conference on*, pp. 1153–1158, 2008.
- [53] Jiaying Wu, J.A.N. Van Aardt, J. McGlinchy, and G.P. Asner. A robust signal preprocessing chain for small-footprint waveform lidar. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, Vol. 50, No. 8, pp. 3242–3255, aug. 2012.
- [54] Rong Zhu, Yong Pang, Zhongjun Zhang, and Guangcai Xu. Application of the deconvolution method in the processing of full-waveform lidar data. In *Image and Signal Processing (CISP), 2010 3rd International Congress on*, Vol. 6, pp. 2975–2979, oct. 2010.
- [55] B. Koetz, F. Morsdorf, G. Sun, K.J. Ranson, K. Itten, and B. Allgower. Inversion of a lidar waveform model for forest biophysical parameter estimation. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, Vol. 3, No. 1, pp. 49–53, jan. 2006.
- [56] 北陽電機株式会社, 森 利宏, 日野 政典. 測距装置. 公開特許公報 (A), 特開 2008-70270, , 2008.
- [57] Analog Devices. *AD8317 datasheet and product info — 1 MHz TO 10 GHz, 50 dB Log Detector/Controller — Log Amps/Detectors — Analog Devices*
. <http://www.analog.com/en/specialty-amplifiers/log-ampsdetectors/ad8317/products/product.html>.

研究業績

学術論文誌

1. 渡辺 敦志, 阪東 茂, 品田 和洋, 油田 信一, “方位検出と交差点認識を用いた道なり走行ベースの屋外自律ナビゲーション”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.3 pp.271-279, 2012

査読付き国際会議

1. Atsushi Watanabe, Akihisa Ohya, Shin'ichi Yuta, “Feedforward Current Control System Design for Efficient Drive Method of Small-sized Brushless DC Motor”, In Proc. of *The 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON2011)*, pp.523-528, November 7-11, 2011
2. Atsushi Watanabe, Shigeru Bando, Kazuhiro Shinada, Shin'ichi Yuta, “Road Following Based Navigation in Park and Pedestrian Street by Detecting Orientation and Finding Intersection”, In Proc. of *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2011)*, pp.1763-1767, August 7-10, 2011
3. Atsushi Watanabe, Akihisa Ohya, Shin'ichi Yuta, “Control Parameter Design for Robot Vehicle Based on Numerical Simulation and Heuristic Optimization - Feed-back Controller Design for Trajectory Tracking under Strict Physical Constraints in Wide Speed Range”, In Proc. of *IEEE Symposium Series in Computational Intelligence 2011 (SSCI2011)*, pp.137-142, April 11-15, 2011
4. Atsushi Watanabe, Shin'ichi Yuta, Akihisa Ohya, “A New Method for Efficient Drive and Current Control of Small-sized Brushless DC Motor - Experiments and its Evaluation”, In Proc. of *The 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON2010)*, pp.729-735, November 7-10, 2010
5. Atsushi Watanabe, Shin'ichi Yuta, “Efficient Feedforward Current Control Method of Brushless DC Motor By Using Non-Complementary Switching in Driver Circuit”, In Proc. of *The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2010)*, pp.768-773, March 21-24, 2010

査読無し国内会議 (口頭発表)

1. 渡辺 敦志, 大矢 晃久, “ロータリエンコーダのみを用いた移動ロボット組込みモータの逆起電力係数推定手法”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 14 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2013), pp.1312-1315, 2013
2. 渡辺 敦志, 阪東 茂, 辻 信行, 大矢 晃久, 油田 信一, “移動ロボット用二軸ブラシレスモータドライバの開発とオープンソースプラットフォームを用いた走行制御”, In Proc. of the 第 31 回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2013), 3H1-01, 2013
3. 渡辺 敦志, 山本 明人, 大矢 晃久, “非飽和なアナログ信号処理と受光信号の立ち上がり勾配検出による誤検出の少ない測域センサ信号処理系の検討”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 13 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2012), pp.2197-2200, 2012
4. 渡辺 敦志, 阪東 茂, 油田 信一, “道なり走行と交差点認識および方位検出に基づく移動ロボットの屋外自律ナビゲーション”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 12 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2011), pp.1773-1776, 2011
5. 渡辺 敦志, 大矢 晃久, 油田 信一, “小型ブラシレス DC モータの高効率なフィードフォワード電流制御系の設計”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 12 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2011), pp.1046-1049, 2011
6. 渡辺 敦志, 阪東 茂, 品田 和洋, 椎名 誠, 木下 和樹, 識名 拓, 小松原 浩二, 大矢 晃久, 油田 信一, “小型自律移動ロボットのバンパに貼りつける静電容量型帯状感圧センサ”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 11 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), pp.2221-2224, 2010
7. 渡辺 敦志, 品田 和洋, 阪東 茂, 油田 信一, “レーザー測域センサを用いた道の検出と道なり走行及び交差点認識に基づく移動ロボットの自律ナビゲーション”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 11 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), pp.1014-1017, 2010
8. 渡辺 敦志, 大矢 晃久, 油田 信一, “繰り返しシミュレーションとヒューリスティック最適化による移動ロボット制御系のパラメータ決定法 - 広い速度域に対応した直線追従フィードバックパラメータの自動生成”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 11 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), pp.971-974, 2010
9. 渡辺 敦志, 大矢 晃久, 油田 信一, “ブラシレス DC モータの高効率なフィードフォワード電流制御手法 - 実装と実験による評価”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 11 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2010), pp.911-914, 2010
10. 渡辺 敦志, 品田 和洋, 阪東 茂, 油田 信一, “つくばチャレンジ 2009 における走行制御アルゴリズム開発”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 10 回システムインテグレーション

ン部門講演会 (SI2009), pp.1005-1008, 2009

11. 渡辺 敦志, 油田 信一, “ブラシレス DC モータの高効率なフィードフォワード電流制御手法”, In Proc. of the 計測自動制御学会 第 10 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2009), pp.893-896, 2009

受賞

1. 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2011 優秀講演賞, 渡辺 敦志, 大矢 晃久, 油田 信一, “小型ブラシレス DC モータの高効率なフィードフォワード電流制御系の設計”, 平成 23 年 12 月 25 日
2. 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2011 優秀講演賞, 渡辺 敦志, 阪東 茂, 油田 信一, “道なり走行と交差点認識および方位検出に基づく移動ロボットの屋外自律ナビゲーション”, 平成 23 年 12 月 25 日