

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06409

研究課題名（和文）計算知能援用制御法の開発 - IoT時代の大規模複雑システムへの適用を目指して -

研究課題名（英文）Development of Computational Intelligence Aided Control Method -Toward Application to Large Scale Complex System in IoT Era-

研究代表者

河辺 徹（KAWABE, Tohru）

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40224844

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：深層学習を主体とする計算知能による補正機能を備えた新たな制御系設計手法の基盤として、モデル予測制御にPID制御やスライディングモード制御を組合せた制御法の拡張を行った。また、大量の動画データを解析した結果から構築した線形重回帰モデルとこれに基づく最適制御の逆問題の結果を応用した運動制御法の開発を行った。さらに、ポテンシャル関数を時空間に拡張するとともに障害物の予測軌道を学習に基づいて算出する自動運転車両の運動制御法を開発した。これらの開発手法を、スマートグリッド、歩車共存空間での次世代都市交通システムなどの大規模複雑システムを対象に実用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ビッグデータを学習し、その解析結果を活かした制御法を構築するための基盤理論を、モデル予測制御を各種制御法と組み合わせ、従来の制御法の枠組みを超えて拡張することで実用性を高めた点に学術的意義がある。また、再生可能エネルギー源と電気自動車を結んだ電力送電網の運用制御手法を開発したことにより、CO2排出量を削減し安定かつ耐久性に優れた次世代の電力網の実現や、次世代都市交通システムの一つであるパーソナルモビリティのための運動制御法を開発したことにより、新たな大規模交通システムへの実用化が期待できることに社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：As a basis of a new control system design method with a correction function based on computational intelligence mainly for deep learning, we extended the control method combining PID control and sliding mode control with model predictive control. A linear multiple regression model constructed from the results of analyzing a large amount of video data and a control method based on the inverse problem of optimal control based on this model are also developed. Furthermore, a motion control method for an autonomous vehicle that extends the potential function into space and time and calculates the predicted trajectory of obstacles based on data and learning is developed. The practicality of these development methods was verified for large-scale complex systems such as smart grids and next-generation urban transportation systems in pedestrian coexistence spaces.

研究分野：システム制御工学

キーワード：計算知能援用制御 IoT 大規模複雑システム モデル予測制御 機械学習 V2G パーソナルモビリティ

### 1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things) 時代の到来により、様々な機器がネットワーク上で接続され、これまでとは比較にならない大規模で複雑なシステムの取り扱いが重要となっていたが、従来の制御理論の枠組みだけでは十分な対応ができていないとはいえず、クラウドコンピューティング技術等により、各種のビッグデータを比較的容易に取り扱える利点を活かした制御法の構築が必要とされていた。

### 2. 研究の目的

クラウドコンピューティング技術等により比較的容易に取り扱えるようになったビッグデータを計算知能 (主として深層学習 (Deep Learning)) を活用した学習に基づいたモデルや制御器の補正を行う機能を付加することで、従来の制御技術では対応が困難であった大規模システムの非線形性や複雑性にも対応できる計算知能援用制御法開発のための基盤研究を行うことが目的である。

### 3. 研究の方法

- (1) 深層学習を基盤とする制御法開発のために、MP-PID (Model Predictive PID) 制御法の設計のための評価関数の重みの値と対象システムの非線形性や複雑性との定性的/定量的関係について検討し、汎用的で実用性を高めた MP-PID 制御系の構成方法の開発を行う。並行して、MP-SMC (Model Predictive Sliding Mode Control) 法における対象システムの非線形性や複雑性との定性的/定量的関係について解析し、その結果に基づく改良と拡張を行う。これらを、スマートグリッドである再生可能エネルギー源 (RES) と電気自動車 (EV) を結んだ電力送電網に対し、CO2 排出量を削減し安定かつ耐久性に優れた電力網運用のための実用性の高い手法に拡張する。
- (2) IoT 時代の道路交通システムへの適用を見据えて、自動車の走行データを制御ユニットからクラウドサービスを用いて収集/蓄積し、これを解析することで、運転特性モデルや乗り心地の良い運転特性の定量的評価基準に基づく運転支援システム構築や自動運転技術確立のための基盤技術開発を行う。
- (3) 自動運転技術を前提とする、次世代都市交通システム (ART: Advanced Rapid Transit) を対象とし、機械学習等のデータ解析を基礎とした制御法として、搭乗者の負荷を軽減しつつ、静止物や移動物等の障害物を安全に回避する運動制御法の開発を行う。
- (4) 鳥の飛行を撮影した大量の動画データを解析した結果から構築した線形重回帰モデルとこれに基づく最適制御の逆問題の結果を応用した制御則やポテンシャル関数、MPC を基礎とした、乗り心地が良く安全な人工移動体の運動制御法として開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) MP-SMC with approach angle 法

計算知能援用制御法の基礎となる制御法の一つとして開発した MP-SMC with approach angle 法について述べる。SMC 法では、一般にチャタリングと呼ばれる非線形特性に起因した振動特性が出力指令値に発生し、実システムの出力値が追従できない問題が生じる。このため、制御入力に付加的な入力を与える関数を導入することで、この振動特性を低減化することが行われている。そこで、チャタリング低減性能と制御性能とのトレードオフに基づく評価関数を定義し、これを用いて、理論面とシミュレーションの両面から解析した結果を簡単に述べる。

まず、チャタリング低減性能と制御性能をより高い次元で両立させるために、解析結果に基づき、Fig. 1 に示す Approach angle を導入する。Approach angle とは、状態量の軌跡の切替面に対する接近角である。また、候補となる関数として、飽和関数、平滑関数、バイポーラ関数、ゴンペルツ関数を用いた。これらの関数に Approach angle を導入して、制御入力 (u) の微分の最大値と偏差 (e) の累積値によって構成する評価関数

$$J = k_c C + k_e E$$

により性能評価を行った。ただし、

$$C = \max \left| \frac{du}{dt} \right|, E = \int_0^{t_f} |e| dt$$

であり、 $k_c$ 、 $k_e$  は設計変数である。各種条件や対象の異なるシミュレーションにより比較解析した結果、チャタリング低減性能と制御性能が平均してよかったのは Approach angle とともに、低域通過バタースフィルタを組合わせて導入した飽和関数であることがわかった。

#### (2) 自動車の走行データの収集と解析

Fig. 2 に示す通信機能付き OBD2 (Nexus 社製) を使用した車両情報蓄積システムを開発した。走行データをクラウド (AWS) へ常時送信し、走行データ解析の基盤として活用することで、一

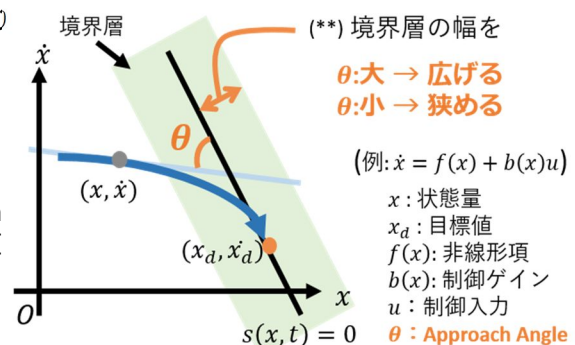


Fig.1 境界層へのApproach Angleの導入

例として、Fig.3 に示すような走行情報可視化システムを構築した。

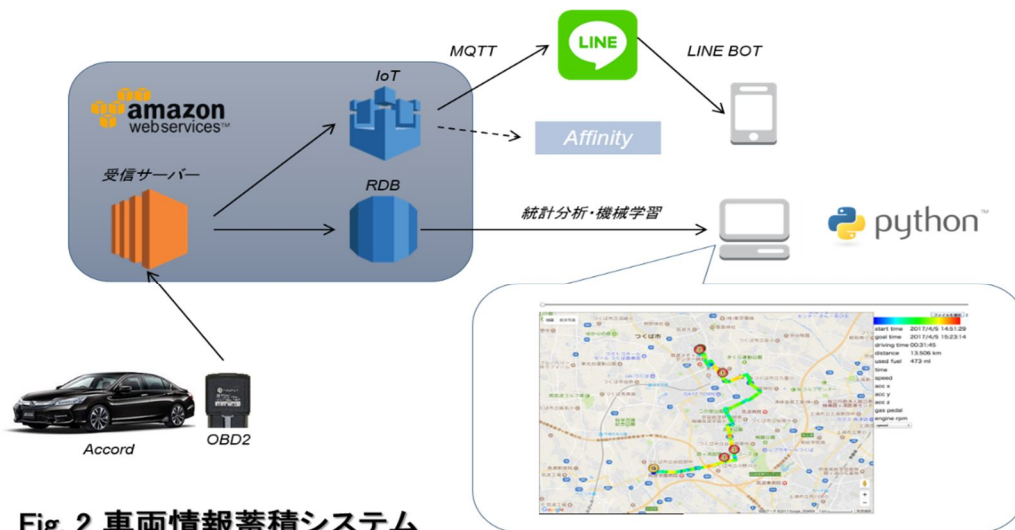


Fig. 2 車両情報蓄積システム



Fig. 3 走行情報可視化システム

(3) 次世代都市交通システムのための時空間ポテンシャル法

歩車共存空間での次世代都市交通システムを対象に、そこで用いられる自動運転のパーソナルモビリティ (PM) のための運動制御法として、障害物の運動特性や形状も考量した予測軌道を算出し、より柔軟で確実な回避を行う MPC を基礎とした時空間角度ポテンシャル法を開発した。ポテンシャル法とは、自車と目標位置、および自車と障害物との相対位置に基づくポテンシャルをフィールド上に仮想的に設定し、これに従い自車の進行方向を変化させることで、障害物を回避しつつ目標位置へ到達するように運動制御を行うものである。これを拡張し、Fig. 4 で示すように  $xy$  平面に時間軸  $t$  を追加した  $xyt$  三次元時空間を設定する。そのうえで、急な方向変化

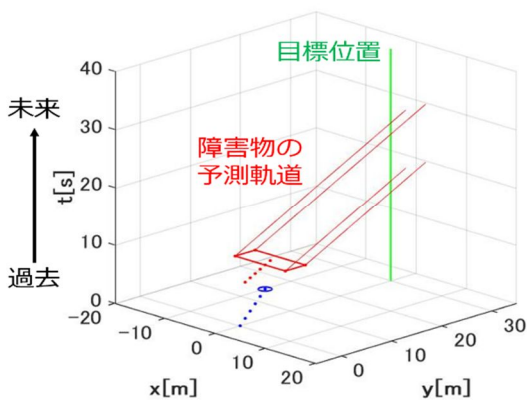


Fig. 4 3次元時空間

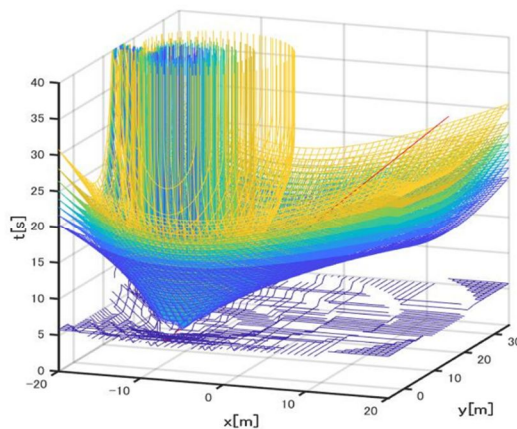


Fig.5 急な方向転換を行う障害物のポテンシャル場

や速度変化を行う障害物も含め、安全で効率的な回避制御を行うため、データに基づき、障害物の運動特性を解析し、これを考慮した新たなポテンシャル場の導出方法を開発した。なお、この場合の運動特性とは、最大速度・加速度、最小旋回半径、方向変化・速度変化を行う頻度など、運動に関してその物体に固有の性質である。一例として、急な方向転換を行う障害物のポテンシャル場を Fig.5 に示す。さらに、このような障害物のポテンシャル場に基づく新たな運動制御法を開発した。具体的には、まず PM が現在の状態から取りうる運動の中で、三次元時空間を広く探索するように、代表的ないくつかの標本運動(sampled motion)を設定する。つぎに、この標本運動に対し、障害物回避および目標位置到達に関して最も評価の高い標本運動に従って操舵角と速度を制御するものである。評価規範として、障害物との衝突危険性、目標位置への到達性規範、速度ならびに操舵角の大きさの規範を組合せたものと、それらの制約条件等を定義しこれらに基づいて、操舵角と速度を制御する方法である。シミュレーションにより、この制御法で、歩車共存空間で想定されるほとんどの状況において、安全に障害物を回避しつつ目標位置へ到達できることを確認した。また、障害物の種類に応じた運動データを蓄積し、これを学習等により解析することで、より詳細な運動特性が得られるため、それに基づいた障害物のクラスごとの詳細なポテンシャル場を導出することで、本運動制御法はさらに高性能化が期待できる。

#### (4) 鳥の着地動作の映像解析に基づく自動車の速度制御則

Fig.6 に示すように、羽ばたきの少ない鳥の着地動作に着目して、大量の動画データを解析した結果から構築した線形重回帰モデルとこれに基づく最適制御の逆問題の結果を応用した制御則やさらにこれを MPC の枠組みに拡張したアプローチを、人工移動体の乗り心地のよい運動制御法の第1段階として開発した。具体的には、カモメの着地動作を撮影した動画データから、水平面と鉛直面に分けてそれぞれ位置、速度、加速度、ジャーク(加速度の時間微分値)の時系列データを収集した。収集したデータを解析し、カモメの飛行軌跡を再現する線形重回帰モデルを構築するとともに、このモデルに基づいて、ILQ (Inverse Linear Quadratic) 設計法を基礎とした制御則を導出し、カモメの着地動作の制御メカニズムのうち、特に鉛直方向の運動は最適制御理論の枠組みで実現可能であることを示した。さらに、既存の自動車の速度制御法との比較シミュレーションを通して、提案手法を用いて設計した制御系は乗り心地に関して優れていることを示した。

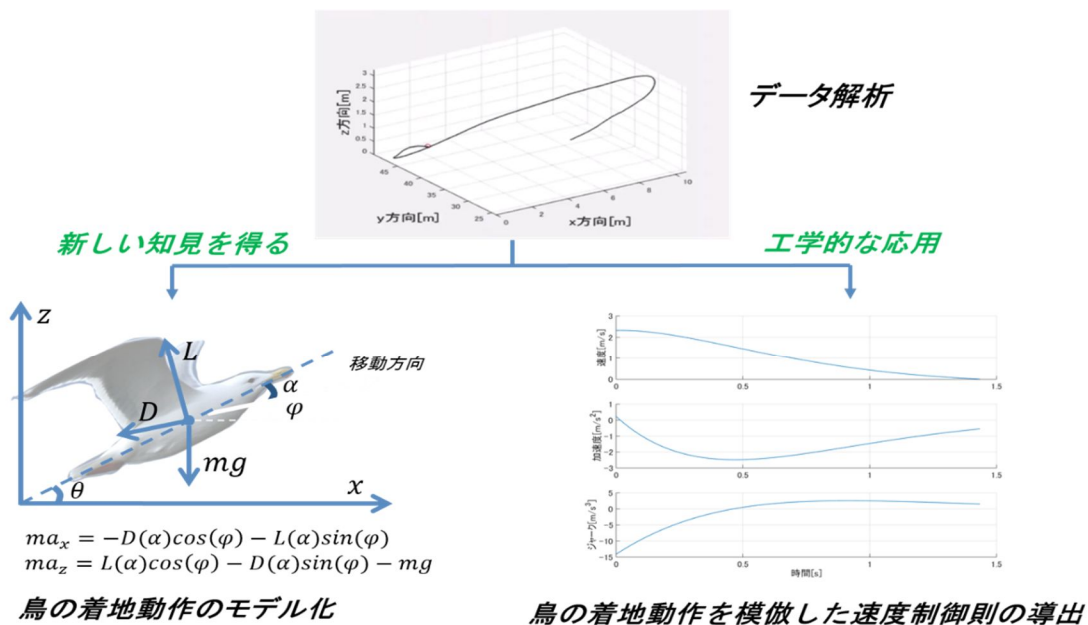


Fig.6 鳥の着地動作の映像解析に基づくモデル化/制御法の開発

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Y. Zhou, T. Kawabe	4. 巻 12
2. 論文標題 Improvement of Ride Comfort of Turning Electric Vehicle Using Optimal Speed Control	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences	6. 最初と最後の頁 541-548
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5281/zenodo.1340583	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Horikoshi Shun, Kawabe Tohru	4. 巻 4
2. 論文標題 SMC-I with Approach Angle Method for Slip Suppression of Electric Vehicles	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems	6. 最初と最後の頁 153503 ~ 153503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4108/eai.21-12-2017.153503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Horikoshi Shun, Kawabe Tohru	4. 巻 11
2. 論文標題 Slip Suppression Sliding Mode Control with Various Chattering Functions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering	6. 最初と最後の頁 942 ~ 948
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 中村 亘, 河辺 徹	4. 巻 83
2. 論文標題 モデル予測型PID 制御の一構成,	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1/15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.15-00617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hidetake Fuse, T. Kawabe, Masayuki Kawamoto	4. 巻 8
2. 論文標題 Speed Control Method of Electric Vehicle for Improving Passenger Ride Quality	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Intelligent Control and Automation	6. 最初と最後の頁 29/43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4236/ica.2017.81003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H.Fuse, T. Kawabe, M. Kawamoto	4. 巻 2
2. 論文標題 A Generation Method of Speed Pattern of Electric Vehicle for Improving Passenger Ride Comfort	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics	6. 最初と最後の頁 152/157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 HIKOSAKA Isamu, AIHARA Ikkyu, EISAKI Yuri, KAWABE Tohru	4. 巻 55
2. 論文標題 Proposal of Speed Control Method for Automobile Based on Video Analysis of Landing Motion of Seagulls	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 602 ~ 610
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.55.602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 K. Kirihara, I. Aihara, T. Kawabe
2. 発表標題 Incorporating Vehicle-to-Grid into Emission-constrained Dynamic Economic Dispatch with Model Predictive Control
3. 学会等名 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Zhou, T. Kawabe
2. 発表標題 Improvement of Ride Comfort of Turning Electric Vehicle Using Optimal Speed Control
3. 学会等名 20th International Conference on Robust Control and Variable Structure Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平澤敦基, 河辺徹, 合原一究
2. 発表標題 シェアドスペースにおける周辺移動物の軌道予測に基づく自律走行パーソナルモビリティの運動制御
3. 学会等名 第61回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 彦坂勇向, 永崎佑里, 合原一究, 河辺徹
2. 発表標題 鳥の着地動作に基づく自動車の速度制御法の構築
3. 学会等名 第61回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤松伸樹, 合原一究, 河辺徹
2. 発表標題 縦加速度と横加速度の時系列データに基づく乗り心地指標を用いた運転特性解析
3. 学会等名 第61回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Horikoshi Shun, Kawabe Tohru
2. 発表標題 Slip Suppression Sliding Mode Control with Various Chattering Functions
3. 学会等名 19th International Conference on Robust Control and Variable Structure Control (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hirata Ryo, Aihara Ikkyu, Kawabe Tohru
2. 発表標題 Mathematical Modeling and its Application of Collective Behavior in Echolocating Bats
3. 学会等名 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H.Fuse, T. Kawabe, M. Kawamoto
2. 発表標題 A Generation Method of Speed Pattern of Electric Vehicle for Improving Passenger Ride Comfort
3. 学会等名 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 加藤佑樹, 河辺徹, 合原一究
2. 発表標題 乗り心地向上を目指した電子連結車両の運動制御,
3. 学会等名 計測自動制御学会第4回 制御部門 マルチシンポジウム
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 平田諒, 合原一究, 河辺徹
2. 発表標題 コウモリの飛行ダイナミクスに基づく電子連結車両の追従制御手法
3. 学会等名 計測自動制御学会第4回 制御部門 マルチシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永崎佑里, 合原一究, 河辺, 徹
2. 発表標題 データ計測と数理モデリングによる ウミネコの着地動作メカニズムの解明
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 河辺 徹 (監修: 堀 洋一、横井 行雄)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 8
3. 書名 電気自動車のモーションコントロールと走行中ワイヤレス給電 : 第4章 第2節 電気自動車のトラクションコントロール技術	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	亀山 啓輔  (KAMEYAMA Keisuke)  (40242309)	       (12102)	