

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：15301
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2018～2021
課題番号：18K04205
研究課題名(和文)動的ダメージコントロール(DDS)技術の確立

研究課題名(英文)Studies on Dynamic Damage control System

研究代表者

平田 健太郎(Hirata, Kentaro)

岡山大学・自然科学学域・教授

研究者番号：00293902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ダメージコントロールとは、物理的な攻撃・衝撃に対する被害・損害を必要最小限に留めるための対応である。これを制御工学の問題として捉えるために、非定常現象のモデリングと、階層的な目標設定(意思決定)および、その制御則の実装方法についての検討をおこなった。
具体的には、ドリフト走行を含む高機動を用いた車両の危険回避、非線形モデル予測制御や非線形最適制御問題の数値解法のメカトロニクス応用、カメラ画像による計測システムの検討などがある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非定常現象のモデリングは、幅広い対象の自動制御を実現していくための必須技術である。今後、自動車の自動運転技術の進展が期待されているが、突発的な事態にも自動制御系が対応できるためには、ドリフト走行を含む高機動を用いた車両の危険回避などが重要なポイントとなってくるであろう。また意思決定の問題については、より広い動作範囲での動特性を記述する非線形モデルに基づいて、予め軌道計画することなしに最適軌道の生成と制御を行うことを検討した。介護における人の抱き起し動作、クランク発電時の疲労低減最適軌道生成などの研究は人間-機械系理論の福祉応用に活用できると考える。

研究成果の概要(英文)：Damage Control intends to minimize the effect of the damage caused by attack or disaster. To treat this issue as a control engineering problem, we focused on the modeling of non-stationary phenomena, hierarchical decision making and its implementation issues. The practical outcomes include the collision avoidance of vehicle high-maneuver including the drift driving, mechatronic applications of numerical solution of Nonlinear MPC or optimal control problem and the measurement system using the camera vision.

研究分野：制御工学

キーワード：ダメージコントロール 非線形最適制御 ビークル制御

1. 研究開始当初の背景

20 世紀生まれにとっては夢の世紀と思われた 21 世紀が始まって、研究開始当時既に 20 年近くが経過していたが、社会の状況はまだまだ理想とは程遠いものであった。各所での紛争や、頻発する自然災害、大規模事故を見るにつけ、むしろ地球はどんどん住みにくくなっているようにさえ思える。産業革命に端を発する制御工学は、これまで高精度・高効率な大量生産のための技術を提供してきており、この側面からの人類の発展に対する寄与は大きい。しかし、災害や事故に対する技術としての貢献は十分であろうか。「社会のための技術」としての認知は得られているか？これが最初の問いであった。近年ではその適用範囲を拡げつつあるものの、制御の基本はレギュレーションにある。すなわち、制御対象の平衡点近傍での近似を経て、制御器を設計し、平衡点まわりの動特性を安定化する。これによって制御対象の定常運転を実現するのである。必然的に、平衡状態から大きく逸脱したな振る舞いは、制御の対象外とみなされる傾向にある。しかるに、災害や事故の多くは突発的に発生する非定常な現象である。そのため、これらが制御工学のターゲットとして積極的に考えられてこなかったといえる。また通常、最適化においては、いったん問題が実行不可能 (infeasible) と判定されると求解は停止する。これに対してダメージコントロールでは、達成可能なゴールをリアルタイムに設定し、可能な限り損害を抑えることが要求される。これら非定常性と目的の時々刻々の変化をどのような数理問題として定式化し、解くか、これが本課題の学術的課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、前述のとおり、動的なダメージコントロールの概念と方法論を確立することであった。そのためには、1) 平衡点近傍以外の挙動も記述できる、非定常現象のモデル化技術の開発、2) 現在の状況下で所与の制御目的が達成可能かを見極め、段階的に目的を変更する制御系設計理論の開発、3) これらを実現可能とするための実装技術の開発、が求められる。項目 1 について具体的には、非線形動的システムを幅広い動作点で、一定の複雑度のもとで記述できるようなモデル化が求められる。もちろん気象予測などのように、正確性を追求した精緻かつ複雑なモデルが望まれる場合もあるが、処理の実時間性が要求されるダメージコントロールにおいては、問題の本質をすくい上げた Good model をいかに構成するかが重要である。項目 2 については、問題の可解性が直ちに判定できる、ある種の計画問題への帰着 (例えば、L1 制御における線形計画問題 (LP)、モデル予測制御 (MPC) における二次計画問題 (QP)、解析的な性能限界理論を用いた制御性能の切り分け、レベルセットを用いた分類、広い動作範囲を記述できる非線形状態空間モデルとその数値解法などが考えられる。項目 3 に関しては、凸最適化近似、並列処理 (マルチコア、GPGPU) の活用、オフライン MPC による table lookup 方式の採用等の高速化、視覚センサなどを用いた実環境計測技術開発が考えられる。

3. 研究の方法

具体的な取り組みにあたって、a) ビークル制御、b) 災害発生時の物流・交通流制御の 2 つの例を中心に考える。Phase 1 (研究期間の前半) では a) に取り組む。一般に運転者には 0.75 秒の反応時間遅れがあり、かつ衝突の直前まで冷静に回避操作を行うことは困難である。しかし自動制御系にとって 750 msec はかなり長い時間であり、しかも衝突直前にパニックを起こしたり、目を閉じてしまったりすることもない。そこでこの時間的余裕のなかで、1) 大操舵、急加減速によるドリフト走行などの通常とは異なる運転操作を用いても、衝突を回避する、2) 衝突が不可避と判断された場合、最もダメージの少ない衝突姿勢をとる、ことを目標とする。よく用いられる車両運動モデルは車速一定の仮定の下で導出されている。これを加減速を含むものに拡張したうえで、幅広い挙動に対応したタイヤの発生力モデルを採用する。通常 Fiala のモデルや magic formula が用いられるが、これらはスリップ角-横力間の関係をまず記述するものである。前後方向力との関係は摩擦円によって簡易的に説明されるが、本質的にはタイヤと路面の力学的な接触状態が直交方向に分解されるものと考えべきであり、検討の余地は大きい。得られた車両ダイナミクスモデルを LPV システムとして近似し、まずは MPC によって解く。問題が Infeasible と判定された場合は、事前に定めたシナリオに従って制御目的・評価関数を緩和・変更する。実時間処理の可否を計算シミュレーションによって検討し、処理の高速化を図る。タイヤの摩擦係数を軽減させ、簡単にドリフト状態を実現できる RC 模型自動車が市販されているので、これらを利用した実験室レベルでの検証も検討する (天井カメラによるモーションキャプチャシステムが必要となる)。研究期間後半は Phase 2 として b) に取り組む。近年、自律的な移動を想定したマルチエージェント系による交通流シミュレーションの研究もおこなわれているが、ここでは自動車の自動走行も念頭に、各エージェントの経路選択等は集中

管理されるものとする。平常時、目的地設定は可能であり、この場合は目的地までの時間最小化を評価関数とする。結果的に渋滞の回避が試みられる。一方、災害発生時には交通路の一部が通過不能となる(状況は時間的に変化する)。この場合には制御目的は域外への速やかな避難となり、出口を問わず域外へのスループット最大化が評価関数となる。組合せ爆発を生じないような問題設定が必要となるため、個々のエージェントの動作を決定するよりも、古典的な流体アプローチが有効と考えられる。平常時にそれぞれの流入点、流出点をいかに設定するかが課題であるが、例えば、全てのエージェントの意思決定を同時ではなくラウンドロビンで実施する(他のエージェントの経路は既定)、あるいは経路決定ではなく推奨ルートを提示するに留める、などの対策が考えられる。(前者の場合は循環が起こらない配慮が必要。) 通行不能状態は当該領域の流路の流量制約または制御対象の切り替えによって表現される。問題 a に比べて、サンプル周期、制御ホライズンとも比較的長い問題となり、リアルタイム性に関する要求も異なってくる。本問題に関しては、多少の計算負荷は許容できるものと考えられる。また少なからず関連する問題として、水害時の水自体の誘導(排水経路計画)についても考えたい。インフラとしてどのようなアクチュエーションを準備すべきかという問題はあるが、リアルタイムの適切な判断によって水没区画あるいは水没時間を最小化することは非常に意義のある課題である。

4. 研究成果

ビークル制御について、ドリフト状態を含む幅広い動作領域を表現可能なモデルの作成をおこなった。従来では車速一定の条件下でモデル化が行われることが一般的であったが、加減速・荷重移動も考慮したモデルを構築することによって、ナチュラルな車両の動作をシミュレートできるようになった。モデルを用いた走行性能の解析について国内会議で発表をおこなった。さらにモデル予測制御によって、状況に即した障害物回避動作が生成可能な制御アルゴリズムを構築することができた。この内容について、国内会議で発表した。ラジコン車両を用いた実験環境の構築、左右の荷重差を考慮した四輪モデルへの拡張も進めた。また、車両のサスペンションなどの受動メカニズムの最適設計に関する研究の一環として、エネルギー効率に優れた自転車の駆動系メカニズムの設計、とくにイナーターを用いたメカニカルネットワーク系の性能改善についての結果をまとめ、国際会議 IEEE CoDIT2019 で発表した。計測系(カメラシステム)については、視野角の広い魚眼レンズの歪みモデルについての検討を進め、光軸が計測平面の法線に一致しない場合を含めた計測実験を実施した。結果の一部(魚眼レンズを用いたキャリブレーションフリーなバランスタスク安定化)を国際会議 IEEE CoDIT2020 にて発表した。これを発展させた内容の論文が学術雑誌に採択された。複数の魚眼カメラ画像を統合した、いわゆるアラウンドビューシステムについても基礎検討をおこなった。カメラ自身の動きも考慮した画像計測系についての検討を国内会議で発表した。4輪車だけでなく、二輪車のダイナミカルモデル・最適速度パターン生成についても検討を行った。マルチボディダイナミクスシミュレータを用いた、二輪車のロール・操舵系モデルの解析も行った。

一方、制御系設計については、まず非線形最適制御問題を数値的に解く方法についての考察を進めた。具体的には、閉リンク系の最適動作軌道設計問題に対して、動的計画法、階層勾配法、微分動的計画法、逐次二次計画法を適用し、実用可能性についての検討をおこなった。これはアシスト技術の福祉応用にもつながる研究であるが、この結果について国際会議 IEEE ICM2019 にて発表をおこなった。非線形最適制御問題の数値解法については、人の抱き起し動作の最適化問題の発展形を考え、多閉リンク系への拡張を容易にするニュートン・オイラー法と単位ベクトル法による逆・順動力学の求解と逐次二次計画問題を組み合わせた手法を解発した。この内容について、国内会議で発表した。設計パラメータとの同時最適化を図る方法についても検討した。関連する人間の動作解析として、人のクランク回し運動と評価規範に関する問題を考え、自前の計算アルゴリズムを用いるこれまでのやり方とは別に、汎用ソルバーICLOCS2 を使って解く検討も進めた。所定のタスク下での疲労低減動作を非線形最適制御によって自動生成する問題に関する結果としてまとめ、国内会議で発表をおこなった。モデル予測制御系の実装に関する検討も進めており、台車振子系を用いた実機実験に成功した。L0 制御系設計については、近年注目されているスパス制御系設計の視点から古典的な月面軟着陸問題を捉え直し、ボール&ビーム系に対する適用を検討した。L1 制御系設計に関する基礎検討にも着手しており、プリンタ定着器温度制御系に対するヒータ予熱制御への適用を検討した。同問題を数理計画法(L1 最適化と等価な線形計画法)の立場から扱う方法について結果を国際会議 MTNS2020 に投稿し、採択されたが、コロナ禍のため会議は中止となった。危険回避時などで重要となる人間との協調に関して、HILS (Human In the Loop System) についての検討も行った。ビークル制御に関連するものとして、近い将来の目標軌道が既知である、予見制御についても考察した。先のヒータ予熱制御への適用を検討し、国際会議 IEEE ICIT2020 に投稿、採択され発表した。また、流体に関する動的システム解析と構造の最適設計に関連して、新方式チューブポンプの

設計・製作・実験を進めている。結果の一部を国際会議 ICS2021 に投稿し、採択、発表をおこなった。結果の一部を学術雑誌に投稿中である。さらに分布系である熱拡散系のモデリングと低次元化についても検討し、国際会議 ICS2022 へ投稿、採択され、発表をおこなった。結果を拡充したものを学術雑誌に投稿中である。また粘弾性脚を持つムレスホイールの歩行効率改善についても検討をおこない、国内会議で発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kazuyoshi Hatada, Masayuki Sato, Kentaro Hirata and Yoichiro Masui	4. 巻 -
2. 論文標題 Synthesis of a calibration-free visual feedback controller for an inverted pendulum using a fisheye lens	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2021.3127034	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 7件）

1. 発表者名 Weiqi Zhang, Kentaro Hirata, Yukinori Nakamura, Kunihisa Okano
2. 発表標題 PCA-Based Model Reduction of Diffusion Process and Its Application to MPC Problem
3. 学会等名 SICE ISCS 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀山直季, 平田健太郎, 中村幸紀
2. 発表標題 ビジュアルフィードバック制御のための仮想シミュレーション環境の構築
3. 学会等名 SICE中国支部学術講演会予稿集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuan Meng, Kentaro Hirata, Yukinori Nakamura and Kunihisa Okano
2. 発表標題 Lifting Movement Design for Care Worker by Nonlinear Optimal Control
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 夏井崇彰, 平田健太郎, 中村幸紀, 岡野訓尚
2. 発表標題 受動歩行の効率について -粘弾性脚リムレスホイールを用いた動力的検討-
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田健介, 平田健太郎, 中村幸紀, 岡野訓尚
2. 発表標題 非線形モデル予測制御を用いた自動車のドリフト走行による衝突回避の実現
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Shinpou, Kentaro Hirata, Yukinori Nakamura, Kuniyoshi Okano and Kazuyoshi Hatada
2. 発表標題 Energy-Efficient Bicycling with Passive Mechanical Network
3. 学会等名 IEEE International Conference on Control, Decision and Information Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Hirata, Ryo Murakawa, Kuniyoshi Okano, Masahiro Samei, Tomoya Adachi and Ryohei Sugiyama
2. 発表標題 Temperature Control for Fusing Process of Laser Printers with Preview Action
3. 学会等名 IEEE International Conference on Industrial Technology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Hirata, Kunihiisa Okano and Ryo Murakawa
2. 発表標題 Pre-Heating Pattern Optimization for Fusing Process of Laser Printers
3. 学会等名 24th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuyoshi Hatada, Kentaro Hirata and Yoichiro Masui
2. 発表標題 Synthesis of a Visual Feedback Stabilizing Controller for an Inverted Pendulum Using a Fisheye Lens
3. 学会等名 IEEE International Conference on Control, Decision and Information Technologies (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuma Kobayashi, Kentaro Hirata, Yukinori Nakamura and Kunihiisa Okano
2. 発表標題 Optimal design of cooperative standing-up motion for care worker and receiver
3. 学会等名 IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Shinpou, Kentaro Hirata, Yukinori Nakamura, Kunihiisa Okano and Kazuyoshi Hatada
2. 発表標題 Energy-Efficient Bicycling with Passive Mechanical Network
3. 学会等名 IEEE International Conference on Control, Decision and Information Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 定着装置の温度制御方法	発明者 醒井雅裕, 足立知哉, 平田健太郎	権利者 醒井雅裕, 足立 知哉
産業財産権の種類、番号 特許、202000924	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------