様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　２ 年　５ 月 １７ 日現在

機関番号：１７１０４
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2017～2019
課題番号：１７Ｋ０６４９９

研究課題名（和文）単調保存変換に基づく多次元非線形系の協和ダイナミクスの保証付設計論

研究課題名（英文）Design methodology for mutually complementary dynamics of multidimensional nonlinear systems based on monotone preserving transformation

研究代表者
伊藤　博（Ito, Hiroshi）

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：７０２７４５６１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,600,000円

研究成果の概要（和文）：多数の非線要素の和合によりダイナミクスを性能保証付きで設計する手法を開発した。積分入力状態安定性を拡張して多次元システムの単調表現を導出し、その単調保存変換の求解と解析を行った。モジュール追加やシステム結合で発現するダイナミクスを予測・防止するための指標として、「入力不在の収束性」と「入力に対する有界性」を融合し、単調保存変換によるリアプノフ関数の統一構成論の構築に成功した。その幾何学的方法は、非有界な要素を直感的に和合できる独創的なものとなった。大きさによらずスケーラブルに適用できる。応用として、測定ノイズ環境下で、オブザーバ型出力フィードバックの大域的保証付き設計を世界で初めて可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義
様々な機能と性質をもつ物事を組み合わせ、安全で期待通りの性能の統合システムを設計する数理手法を開発した。物事には空間と時間のスケール、物理単位があり、それらが異なる物事同士をIoT社会は気軽に接続する。接続は、個別では隠れていた破壊的な振る舞いや悪循環など、元の構成物事の組み合わせでは想像できない現象を発現させる。その対処には個別状態から潜在的な悪を除去する方法もあるが、自由な接続時代（ビックデータ）では意味をなさない。そこで、本研究は物事の長所と短所を釣り合わせた結び付けを追究し、ダイナミクスの単調表現とその保存変換という新着想で数学手法を開発した。適用範囲は人工、生命、環境、社会と幅広い。

研究成果の概要（英文）：In this project, a methodology to design dynamics with performance guarantees has been developed via balancing nonlinearities of a large number of components. The notion of integral input-to-state stability is extended to recast multi-dimensional systems as equations with useful monotonicity. Then monotonicity preserving transformation has been formulated. Undesirable behavior arising from adding and connecting components is predicted and prevented by combining notions of boundedness with and without inputs. The monotonicity preserving transformation has enabled unified construction of Lyapunov functions for dynamics design. This research has reached a geometric formulation which is completely unique and has formed a breakthrough to accomplish the planned goal and beyond. Scalable design methods and an observer-based output feedback design method in the presence of measurement noise have been given global guarantees which had not been achieved in the research field.

研究分野：システム制御理論

キーワード：制御理論　非線形システム　ダイナミクス　安定論

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

ダイナミクスとは、我々が生きる実世界、つまり、時空における、人工システム、生体システム、環境システム、社会システムが持つ状態（あるいはそれを計測したデータ）の遷移のことである。状態・データの時間方向のつながりを扱う「ダイナミクス」という学問は、産業革命の原動力となる設計書を与えた。21 世紀におけるダイナミクスの設計論の役割は、情報機器という「仮想空間」に次々とプログラムされていくシステムを、一方向に進む時間が入った「時空」で連携させて安全・便利に機能させることである。つまり IoT 革命の設計書を与えることである。産業革命の時代と IoT 時代の大きな違いは、物理的な結合だけではなく人間や社会という環境を介して異次元の大量の物事データが相互作用し、人工システム単体では隠れていた非線形性や遅れが、予期できないダイナミクスを発現させることにある（図１）。多数の物事の相互作用は、高次元システムとして数式記述され、20 世紀には分散構造化の研究が盛んに行われ、固定モード等の性能限界や設計の指針が開発された。しかし、対象は主に線形ダイナミクスであったことから、システムの次元拡大に依らず、現象は指数関数（複素数あるいは実数）であるという大前提の発想があった。実際は、小さな人工物以外では物事は非線形で遅れを持ち、それが発現する。その完全除去は極めて限られた状況でのみ可能である。除去というアプローチは IoT 時代では使い物にならない。そこで本研究は、多次元化による相互接続が生むダイナミクスを予期し、それを巧みに調和させるダイナミクスの設計数理手法を開発した(図 2)。

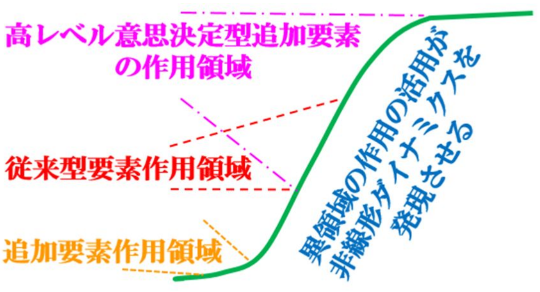

図 1

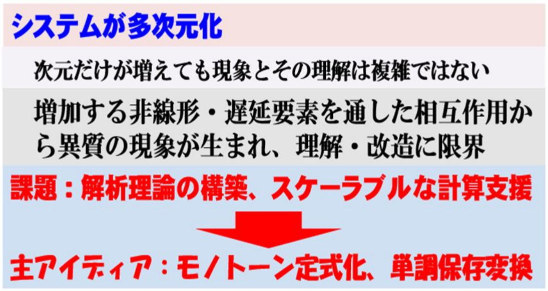

図 2

２．研究の目的

（１）非線形要素数に左右されない判断・達成力を確立するための解析解の導出

非線形要素や遅れ要素の除去は行わず、性能の誘導に都合が良い "順序" となるような和をとることでダイナミクスの設計を可能にする手法の開発に挑んだ。そのため、多次元化や空間の拡大に対処することを第一の目的にした。非線形要素や遅れ要素を含め、全てのダイナミクスを一般化エネルギーの収支不等式で表し、古典的リアプノフ関数ではなく、一般化エネルギーとして拡張したリアプノフ関数を採用した。これによってダイナミクスは単調性（モノトーン）を持つ結合系になると予想した。この結合系は線形という単純性はないため、強い非線形現象を発現させるが、次元を拡大しても現象の大小順序を保つ単調性がある(図 3)。この単調性を活用してダイナミクスを調和の可能性と限界を解析的に導き出し、「単調性保存変換」の設計の数理の枠組みを構築することを目的とした。

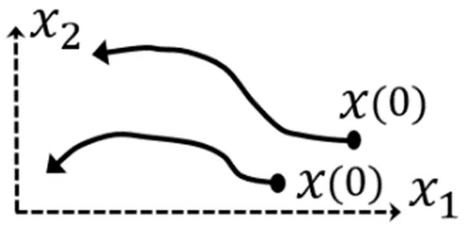

図 3

（２）システム次元にスケーラブルな計算機演算問題への定式化

エンジニアは時間応答の数値計算に頼って多次元システムを解析・設計を行い、数値目標の達成を重視することが多い。しかし、ICT を利用した単位・次元・速度の違う物事へのはらたきかけは物事の作用領域を拡大し、これにより現れる非線形性がシミュレーションの重ね合わせによる推論を無効にし、実際に予期せぬ現象の生起に悩まされる。状況毎の計算を大量にしても、近辺の状況を外挿できない。膨大な状況設定の計算を繰り返しは、何かを予測できる保証がないだけでなく、システムの次元が増えると計算量が

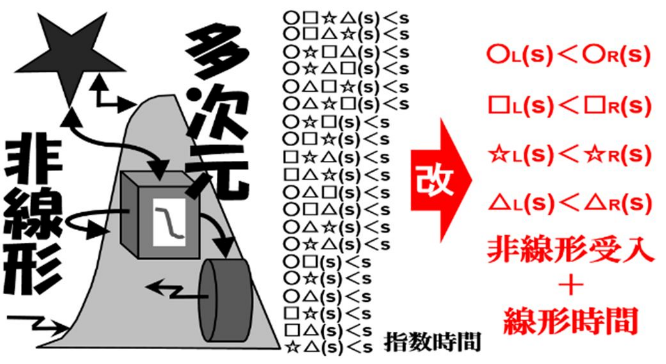

図 4

指数関数的に増大する。保証なしで非効率という絶望的な状況の回避を目的とし、単調保存変換の処理量がシステム次元に線形となるような分割法を目指した(図 4)。

（３）超直方体に制限されない本当のダイナミクスに沿った性能保証

不確かさの大きさが性能確保の限界に近い場合、リアプノフ関数の多項式次数を高くすれば性能確保、および、限界の検出ができる。しかし、極端な次数増加が起こり、収束保証領域は絶望的に長細い超直方体になってしまう (図 5)。この防止を目的とした。そのためには、ダイナミクス固有の形に合わせて単調性の座標をひねるような単調保存変換を開発すれば利用できるのではないかという独自の発想の下に、その可能性を追究した。また、変換を数値計算することを目標にした。

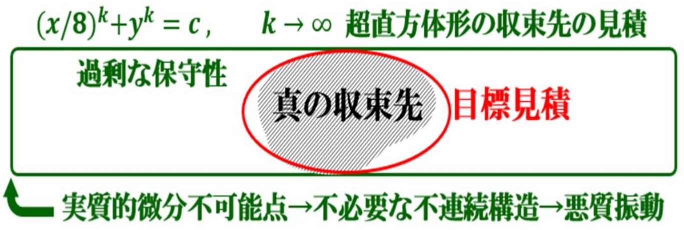

図 5

３．研究の方法

（１）非線形・遅れ要素のダイナミクスベースの分割

システムの空間次元の増加とは独立に、非線形・遅れ要素への対応力の視点でダイナミクスを分割した。この分割に単調保存変換という研究代表者の新着想を適用し、質的、および、量的に安全性や性能保証を導き出す方法をとった。つまり、分割が提供するスケーラビリティの下に、保証や可能性と限界を追及する解析数学による陽な解の導出と、数値を追及する計算機演算の両面の実用性を備えた基礎論の構築に取り組んだ。

（２）iISS リアプノフ関数の採用とその拡張

幅広い非線形・遅れ要素への対応においてる高いスケーラビリティを確保するために iISS（integral input-to-state stability）という概念を採用した。特に、飽和や双線形性を含むダイナミクスに対しても、大域的に挙動の調和を達成することを重視して、安全に機能するダイナミクスの解析手法の開発をした。このために、通常使われている古典的なリアプノフ関数ではなく、iISS リアプノフ関数を利用した。これには、研究代表者が 15 年程度世界を先導している安定論の知識を活用した。さらに、これを拡張し重み連結型 iISS リアプノフ関数という概念を新たに整備し、これにより幅広い飽和や双線形性の取り扱いを可能にする方策をとった。

（３）単調保存変換の幾何学的解釈

非線形・遅れ要素を持つ多次元システムを、iISS リアプノフ関数という概念を使ってダイナミクス分割した後、個々のモジュールに適応する単調保存変換法を開発した。これは、代表者の以前の成果の拡張となるもので、そのために本研究は幾何学的解釈に力を入れた。結果的にここに大きな進展と成果を生み出し、成果が大きく広がった。この方法は、平成 29 年 12 月のニューカッスル大学（オーストラリア）の Bjorn S. Ruffer 博士訪問における討論が発想のきっかけとなった。

（４）単調保存変換の数値計算における計算量の線形化

単調保存変換の一つの特殊解を公式化することで、システムの次元に指数的な計算量の問題を線形的な計算量に落とした。

（５）iISS リアプノフ関数の構成における陰関数の活用

単調保存変換の幾何学的解釈を拡張し、単調保存変換を使わない場合と統一した解釈を陰関数を使って行った。これにより広義の単調保存変換を定式化した。この方法は、平成 29 年 12 月のニューカッスル大学（オーストラリア）の Christopher M. Kellett 博士訪問における討論がきっかけとなった。

（６）連結型 iISS リアプノフ関数の制御器設計とインターバルオブザーバ設計への活用

大域的な性能保証を持った出力フィードバック制御器の設計法を導き出すため、開発した重み連結型 iISS リアプノフ関数による非線形性の調和理論を応用発展させた。本研究代表者が平成 29 年 10 月に開催した研究会に招待した Hyungbo Shim（韓国）の研究発表による交流からヒントを得てこの方法を始めた。定常的外乱がある場合は漸近的状態量推定の代わりに範囲推定を行う方法を採用し、設計手法を開発した。平成 31 年 2 月にフランス国立工芸院（フランス）の Tach Ngoc Dinh 博士の招聘の討論を参考にこの方法を始めた。

（７）確率外乱下のダイナミクスのサンプルパス毎の上界期待値の活用

多次元非線形系の協和ダイナミクスの設計おいて、ダイナミクスに不確かさがある場合に確率的に安全性と性能を保証するため、ダイナミクスの数式表現に確率微分方程式を導入した。、iISS、

および、単調保存変換を独自に拡張した。時刻毎の期待値ではなく、サンプルパス毎の上界の期待値特徴づけという新規着想の下、これをリアプノフ関数に類似の関数を定義・活用した。

４．研究成果

多次元非線形系の協和ダイナミクスを保証付きで設計する数理手法の開発に目標を置き、これを達成するために単調保存変換という独自の定式化を追究し、これに成功した。この研究の過程にたどり着いた幾何学的解釈は当初の計画にはなかったもので、大きな成果につながる発見となった。単調保存変換という定式化を用いたアプローチと、用いない場合の統一的解釈に成功し、それらを融合する広義単調変換というさらに新しい発想による手法の提案へと展開できたことは、予定を大きく超える驚くべき成果を生んだ。これにより、当初の想定より幅広い非線形ダイナミクの和合が、統一的に可能になった。また、この幾何学的手法は、システムの大きさによらずスケーラブルに適用できることも明らかに出来た。単なる結合ダイナミクスの設計だけでなく、その数理手法をシステム制御におけるフィードバック制御器の設計論の開発に導入し、オブザーバを用いた出力フィードバック制御の大域的保証付き設計理論を世界で初めて可能にすることができた。従来の設計理論では、計測外乱に対する保証が局所にとどまっていたことから、とても大きな成果となった。初期成果は世界最高の会議で報告した。これれを発展させてまとめた論文を世界最高雑誌に投稿した。掲載には通常数年かかる。さらには、持続外乱がある場合には、状態の区間を特定するアルゴリズムの開発にも取り組み、大域的な保証を与えるインターバルオブザーバ（状態モニター）の設計法の開発にも成功した。全ての成果の速報は、分野での世界最高およびトップクラスの国際会議で報告した。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計5件（うち査読付論文　5件／うち国際共著　1件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 Hiroshi Ito	４．巻 65
２．論文標題 A complete characterization of integral input-to-state stability and its small-gain theorem for stochastic systems	５．発行年 2020年
３．雑誌名 IEEE Trans. Automatic Control	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/TAC.2019.2946203	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 Hiroshi Ito	４．巻 113
２．論文標題 Interval observer of minimal error dynamics	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Automatica	６．最初と最後の頁 108794
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.automatica.2019.108794	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 Hiroshi Ito	４．巻 48
２．論文標題 A geometrical formulation to unify construction of Lyapunov functions for interconnected iISS system	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Annual Reviews in Control	６．最初と最後の頁 195-208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.arcontrol.2019.05.004	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 Hiroshi Ito	４．巻 107
２．論文標題 An intuitive modification of max-separable Lyapunov functions to cover non-ISS systems	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Automatica	６．最初と最後の頁 518-525
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.automatica.2019.06.020	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 Hiroshi Ito, Christopher M. Kellett	4．巻 64
2．論文標題 A small-gain theorem in the absence of strong iISS	5．発行年 2019年
3．雑誌名 IEEE Trans. Automatic Control	6．最初と最後の頁 3897- 3904

掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAC.2018.2886955	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 該当する

〔学会発表〕　計19件（うち招待講演　3件／うち国際学会　14件）

1．発表者名 Hiroshi Ito
2．発表標題 Smaller and negative exponents in Lyapunov functions for interconnected iISS systems
3．学会等名 The 21st IFAC World Congress,（国際学会）
4．発表年 2020年

1．発表者名 Hiroshi Ito, Thach Ngoc Dinh
2．発表標題 Asymptotic and tracking guarantees in interval observer design for systems with unmeasured polytopic nonlinearitiess
3．学会等名 The 21st IFAC World Congress,（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2020年

1．発表者名 Hiroshi Ito
2．発表標題 A fusion of max- and sum-separable Lyapunov functions capable of addressing iISS in networks
3．学会等名 The 58th IEEE Conf. Decision Control（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2019年

１．発表者名
Hiroshi Ito, Yuichi Miyagi

２．発表標題
A study on distance-based control of mobile agents for formation avoiding entire and partial reflection

３．学会等名
The 19th International Conference on Control, Automation and Systems（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Hiroshi Ito, Thach Ngoc Dinh

２．発表標題
An approach to interval observers for Takagi-Sugeno systems with attractiveness guarantees

３．学会等名
SICE Annual Conference 2019（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Hiroshi Ito

２．発表標題
A closed form expression of nonlinear scalings for Lyapunov functions of ISS networks

３．学会等名
The 11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Hiroshi Ito

２．発表標題
Chamfering max-separable Lyapunov functions to accept Non-ISS in interconnected systems

３．学会等名
2019 American Control Conference（国際学会）

４．発表年
2019年

１．発表者名
Hiroshi Ito, Hyungbo Shim

２．発表標題
Adaptable iISS small-gain formulation and its application to observer-based output feedback design

３．学会等名
The 57th IEEE Conf. Decision Control（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Hiroshi Ito

２．発表標題
A smooth construction of ISS Lyapunov functions for interconnected systems

３．学会等名
The 57th IEEE Conf. Decision Control（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Hiroshi Ito

２．発表標題
Bypassing disturbance separability in verifying integral input-to-state stability of cascade systems

３．学会等名
SICE Annual Conference 2018（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Hiroshi Ito

２．発表標題
Integral input-to-state stability of cascaded systems and observer-based feedback design

３．学会等名
2018 American Control Conference（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
Hiroshi Ito

２．発表標題
An implicit function approach to Lyapunov functions for interconnections containing non-ISS components

３．学会等名
The 2nd IFAC Conf. Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
伊藤 博

２．発表標題
面取りによるiISSとISS結合システムのリアプノフ関数の統合について

３．学会等名
第6回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム

４．発表年
2019年

１．発表者名
伊藤 博

２．発表標題
陰関数を使った結合iISSシステムのリアプノフ関数の新構成法について

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
伊藤 博

２．発表標題
結合システムのリアプノフ関数構成は最大分離型に傾斜を付ければiISSを包含

３．学会等名
第5回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム

４．発表年
2018年

1．発表者名 伊藤 博
2．発表標題 大域的非線形ゲインを持つシステムの結合は角の丸い角錐がリアプノフ関数
3．学会等名 第5回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4．発表年 2018年

1．発表者名 Hiroshi Ito, Christopher M. Kellett
2．発表標題 A new formulation of small-gain theorem without imposing strong iISS with respect to disturbances on components
3．学会等名 The 56th IEEE Conf. Decision Control（国際学会）
4．発表年 2017年

1．発表者名 Hiroshi Ito
2．発表標題 Relaxing growth rate assumption for integral input-to-state stability of cascade systems
3．学会等名 SICE Annual Conference 2017（国際学会）
4．発表年 2017年

1．発表者名 伊藤博
2．発表標題 非線形確率系の経路的積分入力状態安定性による収束と結合の解析について
3．学会等名 第60回自動制御連合講演会
4．発表年 2017年

〔図書〕　計1件

1．著者名	4．発行年
James Lam, Yun Chen, Xingwen Liu, Xudong Zhao, Junfeng Zhang, Maria E. Valcher, Hiroshi Ito, Bjoern S. Rueffer, Li-Juan Liu, Xi-Ming Sun, Yue Wang, Hongwei Wang, Jie Lian, Jinjin Liu, Shanen Yu, Zhiqiang Li, Ting Zhang, Shuai Li, Duyu Liu et al.	2019年
2．出版社	**5．総ページ数**
Springer	pp 247-268
3．書名	
Positive Systems: Theory and Applications (POSTA 2018)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

JSPS科研費17K06499に関わる成果報告
http://palm.ces.kyutech.ac.jp/~hiroshi/fsprojects/kakenmono17.html

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