

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560445

研究課題名（和文）

非線形制御のための新しいシステムモデル：ホロノミーの原理に基づく級数展開

研究課題名（英文）

New model for nonlinear control: series expansion based on principle of holonomy

研究代表者

石川 将人 (Masato ISHIKAWA)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20323826

研究成果の概要（和文）：本研究では、非線形システムの特性をさまざまな周期入力によって引き起こされる振る舞いの関係（ホロノミーの原理）によって規定される入出力モデルと捉え、その特性の解析方法およびそれに基づく制御系の設計方法を示した。またその検証用プラットフォームとしてキャスターボードロボット、円筒型移動ロボットなどの非線形システムを開発し、実験によりその性能を定量的に検証した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed an input-output model for nonlinear control systems focusing on the principle of holonomy which relates displacement of state variables to the applied periodic control inputs, associated with a method for analysis and synthesis of periodic controllers. We also examined this approach with experimental systems including casterboard mobile robot, cylindrical rolling robot and so on.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：非線形制御・ホロノミーの原理・非線形可制御性・周波数応答・級数展開

1. 研究開始当初の背景

(1) 制御理論の基礎である線形システムの解析では伝達関数と周波数応答がよく用いられるが、これは線形システムでは重ね合せの原理が成り立っていることに依拠している。すなわち、正弦波を入力すれば、同じ角周波数の正弦波が出力される。複数の周波数成分を含む場合、出力は各周波数成分に対する応答の和である。多入力の場合、出力は各入力に対する応答の和である。このおかげで、線形システムでは入出力の正弦波を比較する

ことでゲイン特性、位相特性によるシステムの特徴づけが可能であった。

(2) しかし、線形システムでは当たり前になり立つこの性質は、非線形システムでは成り立たない。周期入力に対する出力がそもそも周期的になるとは限らず、また一般に入力と入力の間にも順序への依存性などの非線形な干渉がある(図1)。

このために非線形システムには原則として伝達関数や周波数応答という概念がない。

(3) 一方で研究代表者は、これまで非線形システムの一つである非ホロノミックシステムの研究を集中的に行ってきた。その過程で

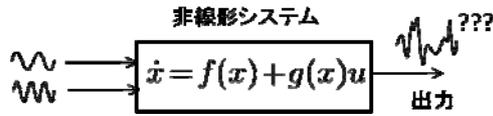


図1：非線形システムの入出力関係

得られた知見は、非線形システムの可制御性構造の解析とホロノミーの原理を活用することで、さまざまな周期信号を適切に組み合わせさせた制御入力によりシステムの状態を所望の方向へ遷移させる制御系設計が可能であること、また、非ホロノミックシステムに限らずあらゆる非線形システムにおいて、ホロノミーの原理は多かれ少なかれ影響していることである。そこで本研究ではこの原理そのものを非線形システムの入出力応答のモデルとして捉えるという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、非ホロノミックシステムの研究で蓄積された可制御性構造解析と制御系設計法を活用して、非線形システムに対する（線形システムの古典周波数応答に代わる役割を果たす）新しい入出力応答のモデルを提示する。このモデルはシステムの可制御性の構造を「ホロノミーの原理」に基づいて反映したもので、入力同士の非線形な干渉を陽に捉えているところに特徴がある。これをもとに基づきの研究を行う。

(1) 動特性の解析、システムの特性測定、モデル低次元化（入出力特性を有限項で打ち切る）といった基礎手法を確立し、典型的・特徴的な実例を用いてその誤差の範囲や有効性を検証する。

(2) 上記の解析手法とともに、低次元化されたモデルに基づいた簡潔な制御系の設計を行い、それを元のシステムに適用して有効性を検証する。

3. 研究の方法

(1) ホロノミーの原理に基づくシステム応答の解析

非線形システムシステムへの周期入力引き起こす状態の遷移を記述するホロノミーの原理（図2）に基づき、印加すべき制御入力を問題に応じてさまざまな形でパラメトライズし、それに対する応答を調べ定量的

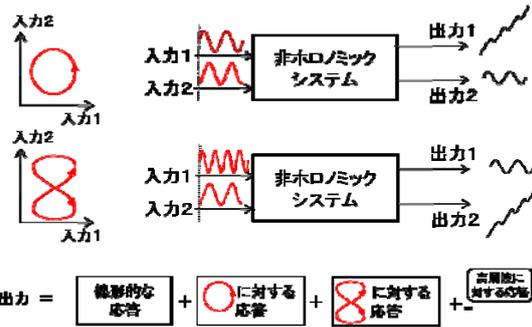


図2：ホロノミーの原理に基づく入出力応答モデル

に整理する。またこの結果に基づいて応答モデルの定式化を行い、所望の応答から制御入力を求める過程を経て制御系設計を行う。

(2) 非線形な動特性を有する入出力実験装置の開発と検証

提案するシステムモデルの実験検証プラットフォームを開発する。そのために必要な条件は「入出力間に非線形な動特性を有すること」「その動特性を自在に変更できること」「手動操作による検証も可能なこと」である。この観点から、主として移動ロボットシステム、干渉し合う多数のリンクを有する小型ロボットシステムなどを設計する。移動エージェントは、単体でも振動や遥動などの非線形な動特性をもたせることができ、さらに複数エージェントの同時制御を想定することで自在な問題設定が可能である。また、多数のリンクを持つロボットシステムはリンク系の持つ非線形性を自然に取り込むことができ、また比較的容易に多自由度（冗長性）のある問題設定を実現できるため、本研究を推進する方法論として採用する。

4. 研究成果

(1) ホロノミーの原理に基づくシステム応答モデルの可操作性による特徴付け

まず、周期入力下におけるシステムの非線形な振る舞いを記述するホロノミーの原理に基づく基礎検討を行った。特に、その入出力応答を一種のマススレーブシステムととらえて定式化し、マススレーブシステムの解析でよく用いられる指標である可操作性を一般化する形で基礎付けを行った。従来の可操作性は瞬間的な入出力の関係を捉える概念であるのに対し、本研究ではある程度の時間幅を考慮して周期入力の効果を扱えるようにした点が特徴である。

(2) 離散時間・離散状態型のシステムモデルとその解析

周期入力下におけるシステムの応答モデルの一つの極限として、振舞いの定性的な部分だけを残して可能な限り単純化した離散時間・離散状態型のシステムモデルを提案した。主にこれまで扱ってきた移動体システムを題材として、その振舞いを表現する整数型差分方程式を導くことに成功し、ホロノミーの原理の離散版に相当する周期矩形入力による状態変化のメカニズムについて考察した。また数値的手法により可制御性の解析を行い、システムが局所可到達になるために必要な最小のステップ数について検討した。これは離散システムモデルにおける「次数」に相当する概念と位置づけられる。さらに、ホロノミーの原理の離散版にあたる周期矩形入力とその応答について差分型 Lie 括弧積を用いた代数的特徴付けを行い、また 3 値論理演算を用いた論理式表現を提案した。

(3) 高階のホロノミー効果を陽に反映したフィードバック制御系の設計

周期入力の高次モーメントが影響する典型例である 2 入力 5 状態のベキ零システムについて、適切な高階のホロノミー効果を、現在の状態に応じて自動的かつ連続的に生成させることにより状態を目標に到達させる制御系を、切り替え型の非線形状態フィードバック制御則の形で完成させた。

(4) 揺動を用いた三脚歩行ロボット

三本足の躯体の上部に搭載したマストドライバーによる揺動と、床面との摩擦力・反力の相互作用によって移動するロボットシステム **Martian** を考案し、数理モデルの検討から数値シミュレーション、実機の開発、およびそれを用いた特性測定や制御実験を行った。その結果、適切な周期角度指令を与えることにより自在な推進・旋回歩行が実現できることを示した。この際に用いた周期入力は、この装置の挙動を滑らかな球面の揺動現象に近似したうえで、ホロノミーの原理より求めたものである。

本実験の成功により、構造近似によるアプローチの有効性と、級数展開による近似精度の向上の可能性が示唆された。また機体の力学特性の大幅な改良、また慣性センサやモーションキャプチャを用いた動特性解析環境の整備 (図 3) により、周期的な揺動入力に対する機体の振舞の詳細な解析をすすめ、安定した周期的歩行パターンの生成が可能となった。さらにこのような安定歩行が持続する吸引領域を発見したことにより、振幅・周

波数・位相に非線形に依存する周波数特性の解析も可能になった (図 4)。

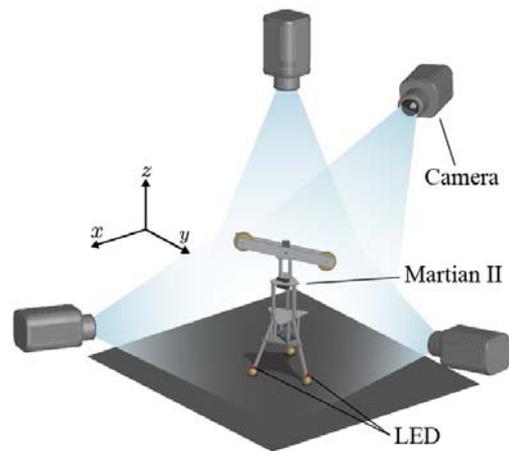


図 3 : 三脚歩行ロボットによる検証システム

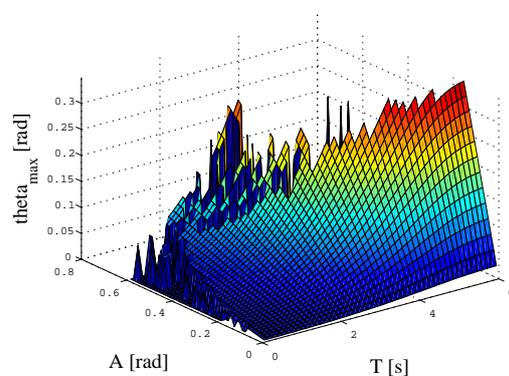


図 4 : 三脚歩行ロボットの周波数応答特性の解析

(5) 動力学特性が顕著に関与するシステムの応答モデルの解析と制御

これまで主として扱ってきたホロノミーの原理の幾何学的効果に加えて、状態方程式のドリフト項に起因する動力学効果が顕著に関与するシステムに着目し、周期入力の周波数・振幅・位相が出力に引き起こす非線形な影響、とくに共振現象について詳しく解析した。またこの結果を応用し、出力情報に基づいて入力の位相をフィードバック制御することにより所望の共振状態へ引き込む制御手法を提案した。

これらの考察結果は、搭載した質量の揺動と斜行軸を持つ車輪との干渉により推進するキャストボード型移動ロボット (図 5)、スネークボードロボット、および内部質量を有限の可動範囲内で揺動させることで平面上を転がり移動する円筒型ロボット (図 6) などの具体例を通して理論的・実験的な検証を行った。とりわけ、制御入力の周期構成比や位相差が異なると、非線形ダイナミクスを

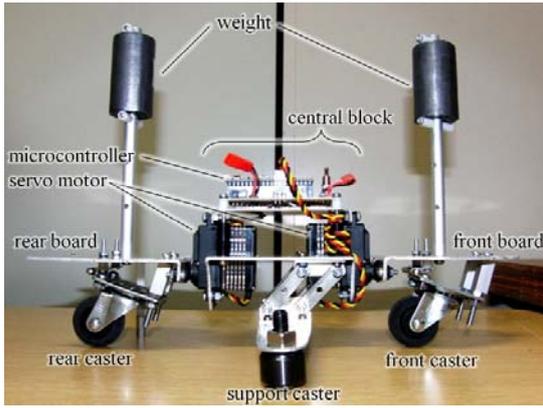


図5：キャスターボード型移動ロボット

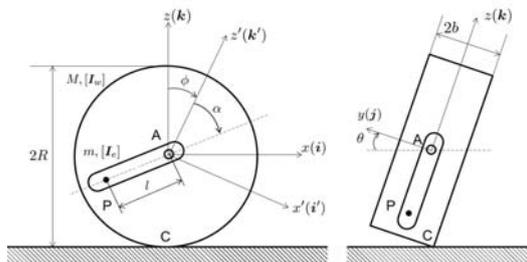


図6：円筒型移動ロボット

通過したときにそれぞれ質の異なる周期的な移動運動パターンに変換される現象を確認した。たとえば周期入力の前平均（零次モーメント）がロボットの進行方向に反映されることを見出し、その影響の定量的な解析、およびそれを利用した旋回方向の制御などを行った。

(6) 多数の入力の干渉が顕著に關与するシステムの解析と制御

ここまでに挙げた例よりも比較的多数の入力チャンネル間の干渉が顕著に現れる検証対象として、直動型三叉移動ロボット Trident Strider (3入力系) および非ホロミック空中泳動ロボット (4入力または6入力系) を開発し、その特徴的な可制御性構造の解明と入出力応答の解析を行うとともに、ホロミーの原理に基づく基礎的な制御実験を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計4件)

- ①衣笠一樹, 石川将人, 大須賀公一、キャスターボードロボットのモデリングと制御、計測自動制御学会論文集、査読有、49巻、(2013)、掲載決定。
- ②T. Hirano, M. Ishikawa and K. Osuka,

Control and Development of Cylindrical Rolling Robot, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 25, (2013), 392-399
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=ROBOT002500020014.xml>

③石川将人, 二次可制御な非ホロミック交差チェーンシステム切替フィードバック制御、計測自動制御学会論文集、査読有、48巻、(2012)、640-648

DOI: 10.9746/sicetr.48.640

④岸元邦充, 石川将人, 大須賀公一、一般化異構造マスタスレーブシステムの可操作性解析、システム制御情報学会論文誌、査読有、25巻、(2012)、196-203

〔学会発表〕 (計16件)

①平野哲郎, 石川将人, 大須賀公一、円筒型転動ロボットの非線形制御～側面転動における揺動周期フィードバックシステムの解析と制御～、計測自動制御学会第13回制御部門大会、2013.3.8、アクロス福岡

②南航司, 石川将人, 杉本靖博, 大須賀公一、直動リンク型三叉移動ロボット Trident Strider の解析と制御、計測自動制御学会第13回制御部門大会、2013.3.6、アクロス福岡

③沖賢太郎, 石川将人, 大須賀公一、四叉へび型空中移動ロボットの設計と制御、第55回自動制御連合講演会、2012.11.17、京都大学

④平野哲郎, 石川将人, 大須賀公一、円筒型移動ロボットの側面転動における可制御性について、第41回制御理論シンポジウム、IPC生産性国際交流センター

⑤平野哲郎, 石川将人, 大須賀公一、〇〇〇に関する研究第12回計測自動制御学会制御部門大会、2012.3.14、奈良県文化会館

⑥井上俊太郎, 石川将人, 大須賀公一、半球の揺動原理を利用した三脚歩行ロボットの開発、計測自動制御学会関西支部若手研究発表会、2011.1.17、毎日インテシオ、大阪

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 将人 (Masato ISHIKAWA)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20323826