

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560269

研究課題名(和文) 陰的ラグランジュ法に基づく複雑なマルチボディシステムの解析設計に関する研究

研究課題名(英文) A Study of Analysis and Design of Complex Multibody Systems by the Implicit Lagrangian Method

研究代表者

吉村 浩明 (YOSHIMURA, HIROAKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40247234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、非ホロノミック拘束やディラック拘束を許容する新たな力学形式である陰的なラグランジュ法を用いて、宇宙機、天体力学、ロボット、電気回路などの複雑なマルチボディシステムの解析設計手法を確立することである。そのために、本研究では

(1) 部分システムへの分解と接続によるシステムの構造化、(2) モジュール化された陰的ラグランジュ系のダイナミクスの定式化、(3) 離散化されたラグランジュ・ダランベール原理による変分的積分法の開発について検討を行った。さらに、非線形LC回路、ロボット、非ホロノミック系、さらに宇宙機を含む天体力学への応用について検討し、本解析設計手法の妥当性を示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a systematic method of analysis and design for complex multibody systems such as artificial satellite, robots, electric circuits and so on by the theory of implicit Lagrangian systems, which enables us to treat mechanical systems with nonholonomic constraints as well as with Dirac constraints. In this study, we have principally investigated the following items: (1) Decomposition into subsystems and interconnection for structuring systems, (2) Dynamical formalism for modulated implicit Lagrangian systems, (3) Development of discrete Lagrange-d'Alembert principle for structure preserving a numerical integration scheme. Finally, we have shown the validity of the proposed method by some illustrative examples of nonlinear L-C circuits, robots, nonholonomic mechanical systems and space mission design.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：陰的なラグランジュ系 ディラック構造 シンプレクティック構造 マルチボディシステム ネットワーク構造 ラグランジュ・ダランベール原理 ハミルトン・ポントリヤーギン原理 スパースタブロー法

### 1. 研究開始当初の背景

人工衛星やロボット等に代表される多くの要素から構成されるマルチボディシステムのダイナミクスに関する定式化法として、一般化されたダランベールの原理であるケインの方法やグラフ理論を用いたロバートソン・ウィッテンバーグによるニュートン・オイラー法がバイオニア的な方法として知られている。また、超 LSI 回路の解析では、スパースタブロー法に基づく SPICE コードが知られており、これを機械系に応用したものととして、チェイスとオーランダディアによる ADAMS やホーグ等の DADS が知られている。このように人工衛星やロボット、超 LSI 回路の解析を目的として個別の分野で定式化や数値解析の方法が提案されているが、様々なエネルギー場を介して要素が複合してネットワーク化して構成される複雑なマルチボディダイナミクスに関する統一的解析方法は未だ開発されていない。

### 2. 研究の目的

多剛体系などのマルチボディシステムは、多数の剛体がジョイント介して相互作用をしている。電気回路では、素子と素子の間に成立する並列及び直列接続によるネットワーク構造によって様々な形態のエネルギーの相互作用が与えられる。このようなエネルギーの接続構造のトポロジーは一つ一つは単純であっても、全体として膨大な数にのぼることから極めて複雑なものとなっており、ダイナミクスの定式化が極めて困難となっている。したがって、計算機援用による合理的なダイナミクスの解析設計が不可欠である。

また、マルチボディダイナミクスの数学モデルは、一般に、陰形式の非線形微分代数方程式によって記述されることが知られているが、流体中を運動する剛体などに現れる流体と剛体の連成がある場合の複雑なマルチ

ボディシステムの構造を組織的に把握し、複雑なダイナミクスを合理的に定式化する方法は開発されていない。さらに、導出された微分代数方程式の数値解析においても、ホロノミック拘束条件に関連するドリフト・オフ現象によって系の数値的な不安定性を招くばかりか、長時間に渡る数値解析ではエネルギー保存性が破れるなど、数値的安定性と精度の面で多くの困難を伴っているのが現状である。そこで、本研究では、現代的な解析力学理論の一つである陰的なラグランジュ法を用いて、複雑なマルチボディダイナミクスに対する合理的な定式化法を開発し、その上で、離散的なハミルトン・ポントリヤージン法に基づく変分的積分法と組み合わせることにより、安定かつ効率的な数値解析スキームを確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究の遂行に当たり、陰的なラグランジュ系として与えられる複数の異なる部分システムを考え、その複数の部分システム間のエネルギー伝達がどのような機構のもとでディラック構造によって把握できるかを明らかにする。複雑化したマルチボディシステムは複数の部分システムが内部で接続した構造になっている。すなわち、各部分システム間に現れる相互作用は、内部接続 (interconnection) と呼ばれるエネルギーの伝達機構を介してエネルギー・フローの調整が行われると考えられる。過去の研究により、単一の力学系におけるエネルギー伝達機構が数学的にディラック構造としてモデル化できること、さらに、その力学系のダイナミクスがディラック構造に付随する陰的なラグランジュ系によって定式化できることが研究代表者によって明らかにされており、この考えを複数の部分システムが結合する場合へ拡張し、システム全体を各部分システム

が大きなディラック構造によって内部接続されたものとして解析できることを示すことが目標となる．主要な考察項目は下記の4点である．

(1) 2つの異なるディラック構造の内部接続と合成

(2) ハミルトン・ポントリヤーギン原理とその合成

(3) 合成された陰的なラグランジュ系の定式化

(4) 上記の過程に基づく離散化変分法による定式化

上記の3つの項目について、以下に述べる方法により研究を実施する．まず、(1)の2つの異なるディラック構造の接続と合成については、ディラック構造間の作用素を定義し、これにより、接続されたディラック構造を定義する．その上で、内部接続を一つのブラックボックス化することにより、一つの合成されたディラック構造を定義する．数学的にはディラック写像と呼ばれる写像を用いて部分空間へ制限することで定義できると考えられる．(2)については、一旦、合成されたディラック構造を定義できれば、それに付随した変分形式としてハミルトン・ポントリヤーギン原理が定義できると考えられる．特に、各部分システムを接続する内部接続構造が変分形式においてどのような役割を担っているのかを明らかにする必要がある．(3)では、各部分システムに関する陰的なラグランジュ系を合成したのものとして、系全体のダイナミクスの定式化を行う．以上について、具体例として、非線形 LC 格子回路、ロボット、非ホロノミック系、宇宙機をとりあげ、系全体のダイナミクスを陰的なラグランジュ系によって定式化する．

#### 4．研究成果

本研究では、システム構造をディラック構造として捉え、特に、大規模系で有効なディラック接続の内部接続による構成法を開発し

た．これに基づき、マルチポートによってネットワーク化した力学系のダイナミクスを陰的なラグランジュ系の内部接続によって定式化する方法を開発した．特に、異なるディラック構造の内部接続をディラック構造のテンソル積を提案することで開発した．さらに、これに基づく、陰的なラグランジュ系の定式化及び、付随する変分構造を明らかにした．さらに、上記の方法を離散的な変分法に拡張して、離散的な陰的なラグランジュ系の定式化を行った．例として、非線形 LC 格子回路、ロボット、非ホロノミック系、宇宙機を例にとり、系の内部構造に注目して部分モジュールに分解してモデル化を行った．また、ラグランジアンに対する離散化されたダランベール・ラグランジュ原理と、ラグランジアンにホロノミック拘束を組み込んだ一般化ラグランジアンに対するハミルトンの原理の2つの原理から導かれる離散化方程式が、各々、半陰的な変分的積分法と陰的な変分的積分法を与えることを示し、長時間計算でのエネルギー保存性において優れた性能を有する事を示した．また、内部接続されたディラック構造から導かれるグラフポロジーを利用してスパースタブロー法を記号処理によって陽に解くアルゴリズムを開発し、大規模系の高速計算法を提案した．

#### 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11件)

Henry Jacobs and Hiroaki Yoshimura, Tensor Products of Dirac Structures and Interconnection in Lagrangian Mechanics, Journal of Geometric Mechanics, 査読有, Vol.6, No.1, pp.67-98, 2014.

Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Invariant Manifolds and Lagrangian

Coherent Structures in the Planar Circular Restricted Three-Body Problem, Proceeding of NCTAM , Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有 , Vol. 62, pp.119-128, 2014.

小野崎香織, 吉村浩明, 平面楕円制限3体問題における月への輸送軌道の設計, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.27, No.4, pp.160-165, 2014年.

Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Dirac Reduction of binary asteroid systems with symmetry and stability of relative equilibria, Theoretical & Applied Mechanics Letters, 査読有, 3, 130111-130118, 2013.

Hiroaki Yoshimura, A graph-theoretic approach to sparse matrix inversion for implicit differential algebraic equations, Mech. Sci., 査読有, 4, 243-250, 2013.

Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Lunar Capture Trajectories in the Four-Body Problem, Proc. Of AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, 査読有, Chapter DOI: 10.2514/6.2013-5425, pages 1-6. September 10-12, 2013.

Joris Vankerschaver, Hiroaki Yoshimura and Melvin Leok, The Hamilton-Pontryagin Principle and Multi-Dirac Structures for Classical Field Theories, Journal of Mathematical Physics, 査読有, 53, 072903, 2012.

Hiroaki Yoshimura and Henry Jacobs, Tensor Products of Dirac Structures and Interconnection of Implicit Lagrangian Systems, 査読有, Proc. of 20<sup>th</sup> International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems 2012.

吉村浩明, ディラック構造のテンソル積と力学への応用, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, 第1774巻, 2012年, pp.21-34, 2012-01.

Hiroaki Yoshimura and Henry Jacobs, Tensor Products of Dirac Structures and Interconnection of Implicit Lagrangian Systems, 査読有, Proc. of 20<sup>th</sup> International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, MTNS2012\_0288, 8 pages, 2012.

Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Dirac Reduction of Binary Asteroid Systems with Symmetry and Stability of Relative Equilibria, The 6<sup>th</sup> Asian Conference on Multibody Dynamics, 査読有, Vol.6, No.12300, pp.1-8, 2012.

〔学会発表〕(計15件)

Hiroaki Yoshimura, Discrete Lagrangian Systems and Variational Integrators for Interconnected Systems, Geometry and Physics XII -- Geometric Mechanics, Sanya in China, March 12, 2014.

Hiroaki Yoshimura, Dirac Structures in Vakonomic Mechanics, IRES Meeting on Differential Geometry and Mechanics, Ghent University, January 16, 2013.

Hiroaki Yoshimura and Francois Gay-Balmaz, The Hamilton-Pontryagin Principle and Lie-Dirac Reduction with Advective Parameters, SIAM Conference on Dynamical Systems. Snowbird, May 18-24, 2013.

Kaori Onozaki and Hiroaki Yoshimura, Lunar Capture Trajectories in the Coupled Restricted Three-Body Problem, Taiwan-Japan Symposium on Celestial Mechanics and N-Body Dynamics, Taiwan

National Tsing Hua University, Dec. 6-7, 2013.

Hiroaki Yoshimura and Satoshi Hanawa, Variational Integrators and Discrete Lagrangian Mechanics for Interconnected Systems, Scientific Computation and Differential Equations, Valladolid, Sep. 16-20, 2013.

小野崎 香織, 堀 恭暢, 吉村 浩明, 制限三体問題における FTLE と不変多様体の解析, 第 62 回理論応用力学講演会講演論文集, GS05-01, pages 5, 2013, 東京工業大学.

小野崎 香織, 吉村 浩明, 楕円制限三体問題における月への輸送軌道の設計, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, NO.216-5, pages 6, 2013 年, 兵庫県民会館.

小野崎 香織, 吉村 浩明, 制限 3 体問題に基づく宇宙機のミッションと月への輸送軌道の設計, 力学系理論の応用に関する研究会, 2013 年 3 月 26 日, 早稲田大学.

藤掛俊多, 山田修平, 吉村浩明, 倒立二輪移動ロボットの非ホロノミック軌道制御, 日本機械学会第 22 回交通物流部門講演会, No.1309, Pages 2, 2013 年, 東京大学.

長谷龍一, 田川悟, 吉村浩明, 陰的なラグランジュ系による柔軟多体系のダイナミクスの定式化, 日本機械学会, 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2012 講演論文集, No.12-844, pp.1-8, 2012, 慶応義塾大学.

小野崎香織, 吉村浩明, 剛体で構成された小惑星ペアの相対平衡と安定性, 日本機械学会 2012 年度年次大会, No.12-1, No.S192021, pp.1-4, 2012, 金沢大学.

埴 智史, 吉村 浩明, ホロノミック拘束を受けるラグランジュ系の幾何学的安定化法, 第 55 回 自動制御連合講演会, No.2 G106,

pages 1-6, 2012, 京都大学.

Hiroaki Yoshimura, Lie-Dirac Reduction and Applications to Mechanics, Seminar of Poisson Geometry, March 5, 2012, Keio University.

Hiroaki Yoshimura, Dirac Structures, Variational Principles and Reduction in Mechanics, Conference on Geometry, Symmetry, Dynamics, and Control: The Legacy of Jerry Marsden, Fields Institute, University of Toronto, July 27, 2012.

吉村浩明, 陰的なラグランジュ系による拘束力学系の定式化と DAE の数値解析, 計測自動制御学会, 2012 年度 第 2 回プラントモデリング部会研究会, 2012 年 12 月 3 日, サイバネットシステム本社, 東京.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.yoshimura.mech.waseda.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉村 浩明 (ヨシムラ ヒロアキ)

早稲田大学・大学院基幹理工学研究科・教授

研究者番号: 40247234