

機関番号：32689

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560229

研究課題名 (和文) 陰的なラグランジュ法に基づく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 on Implicit Lagrangian Systems and its Application to Multibody Dynamics

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

研究成果の概要 (和文)：本研究は、非ホロノミック拘束系や退化ラグランジュ系を扱うことの可能な陰的なラグランジュ形式に基づいてマルチボディシステムの解析設計法の開発を主目的として実施した。成果は以下の通りである。(1) 配位空間がリー群で与えられる場合のリー・ディラック簡約の手法を開発、(2) ディラック構造によるネットワーク構造化、(3) 高速かつ安定な数値積分法の開発。

研究成果の概要 (英文)：The main purpose of this research is to develop a method of design and analysis of multibody dynamics in the context of implicit Lagrangian systems. The results obtained in this research are as follows: (1) Development of Lie-Dirac reduction in which a configuration manifold is given by a Lie group; (2) Modeling of mechanical networks via interconnection of Dirac structures; (3) Development of fast and stable integration scheme for multibody dynamics.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：非線形力学

科研費の分科・細目：機械工学・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，ハミルトン・ポントリヤーギン原理，リー・ディラック簡約

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、陰的なラグランジュ系と呼ばれるラグランジュ力学の一般化理論を提案しており、とりわけ、非ホロノミック拘束を受ける退化ラグランジュ系の定式化に成功し、これまで十分に明らかにされていなかったディラック構造とラグランジュ力学の関係を解明したことで、マルチボディシステムだけでなく電気回路・機械システムなど広範囲

の工学系への応用を可能とする統一的な解析手法の確立を大きな目標として研究を行ってきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、この陰的なラグランジュ系の理論と方法を発展させて、ディラック簡約の理論による低次元の力学モデルを実現し、さらにボンドグラフ理論との融合によって、マルチ

ボディンシステムを回路網, すなわちメカニカル・ネットワークとしてモデル化する. これにより複雑な接続構造を有する大規模非線形力学系の数学モデルとして, 陰的ラグランジュ形式の微分代数方程式を導き, 安定かつ高速な数値積分までを可能とする統一的な解析法の開発を目的として計画された.

### 3. 研究の方法

本研究の実施にあたり, 以下の方法で研究を行った.

(1)配位空間がリー群で与えられる場合, どのように陰的なオイラー・ポアンカレ方程式が導かれるかを考察する. 特に, ハミルトン・ポントリヤーギン原理の簡約化とディラック構造の簡約化を同時に行う事が可能な簡約手法を開発する.

(2)力学系のネットワーク構造を把握するために, ディラック構造の内部接続について明らかにする. 複雑な力学系を分割, 切断し, さらに再接続するというダイアコプティクス概念がどのように幾何学的に理解できるかを考察する.

(3)陰的ラグランジュ形式の非線形微分代数方程式群を導き, 拘束安定性と計算効率の観点から検討を行う. 特に, ディラック構造とボンドグラフを用いて, ネットワーク構造化されたシステム方程式については, スパース行列処理による高速化がどのように可能であることを示し, 陰的ラグランジュ形式の微分代数方程式に関する安定かつ高速な数値積分法を提案する.

### 4. 研究成果

本研究で得られた成果は次の通りである.

(1)配位空間がリー群で与えられる場合のディラック構造の簡約化として, リー・ディラック簡約法を開発した. また, ラグランジュ力学及びハミルトン力学の変分構造との関係を明らかにした.

(2) 複雑な力学系を分割, 切断し, さらに再接続するというダイアコプティクス概念に関連して, 2つの異なるディラック構造が与えられたとき, それらを接続したディラック構造が新たに生成できることを示した. さらに, 個々のディラック構造に付随した陰的なラグランジュ系についても接続可能なことを示した.

(3)陰的ラグランジュ形式の非線形微分代数方程式群を導いた上で, ホロノミック拘束を

受ける場合, 幾何学的拘束安定の方法を開発した. さらに, 離散的なハミルトン変分原理に基づく数値積分法について調査を行い, 幾何学的拘束安定化法を組み込む事で, より数値的な安定性の高い数値スキームを提案した.

### 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 12 件)

- (1) Hiroaki Yoshimura and Azumi Yoshida, Discrete Constrained Lagrangian Systems and Geometric Constraint Stabilization, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, pp.1292-1295, 2010. (査読有)
- (2) Henry Jacobs, Hiroaki Yoshimura and Jerrold E. Marsden, Interconnection of Lagrange-Dirac Dynamical Systems, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, pp.566-569, 2010. (査読有)
- (3) Joris Vankerschaver, Hiroaki Yoshimura, Melvin Leok, Jerrold E. Marsden, Stokes-Dirac Structures through Reduction of Infinite-Dimensional Dirac Structures, Proc. 49th IEEE Conference on Decision and Control, pages 1-6, 2010. (査読有)
- (4) 吉村浩明, マルチボディダイナミクスのモデリングと定式化 — 陰的なラグランジュ形式へ向けて, 日本シミュレーション学会誌, pp.5-12, 第29巻第2号. (査読有)

- (5) 吉村浩明, ハミルトン・ポントリヤー  
ギン原理とリー・ディラック簡約 —  
非圧縮性理想流体への応用, 京都大学  
数理解析研究所講究録 1692,  
pp.145-164, 2010-06. (査読無)
- (6) Fumiya Matsumoto and Hiroaki  
Yoshimura, Dynamics and Trajectory  
Planning of a Space Robot with  
Control of the Base Attitude,  
Proceeding of Symposium on Dynamics  
Modeling and Interaction Control in  
Virtual and Real Environments, IUTAM,  
pp. 1-8, June 7-11, Budapest, 2010.  
(査読有)
- (7) Hiroaki Yoshimura, Henry Jacobs and  
Jerrold E. Marsden, Interconnection  
of Dirac Structures and Lagrange-  
Dirac Dynamical Systems, Proc. 19th  
Int. Symp. on Mathematical Theory of  
Networks and Systems, MTNS 2010 · 5  
-9 July, 2010 · Budapest, Hungary,  
pp. 247-252. (査読有)
- (8) Takashi Noguchi and Hiroaki  
Yoshimura, A Graph-Theoretic  
Approach to Large Scale, Proc. 5th  
Asian Conference on Multibody  
Dynamics, pp.1-8, 2010. (査読有)
- (9) Hiroaki Yoshimura and Jerrold E.  
Marsden, Dirac Cotangent Bundle  
Reduction, Journal of Geometric  
Mechanics, Vol.1, No.1, pp.87-158,  
2009. (査読有)
- (10) Hiroaki Yoshimura and Kenji Soya,  
On the Geometric Stabilization for  
Discrete Hamiltonian Systems with  
Holonomic Constraints, Proc. ASME  
2009 Int. Design Eng. Tech. Conf. &  
Comp. and Inform. Eng. Conf., ASME  
Paper-DETC2009-86354, pp. 1-5, 2009.  
(査読有)
- (11) Hiroaki Yoshimura, Induced  
Symplectic Structures and Holonomic  
Lagrangian Mechanical Systems,  
Journal of System Design and Dynamics,  
Vol.2, No.3, pp.684-693, 2008. (査読  
有)
- (12) Hiroaki Yoshimura and Jerrold E.  
Marsden, Representations of Dirac  
Structures and Implicit  
Port-controlled Lagrangian Systems,  
Proc. MTNS 2008, Blacksburg, Virginia,  
pp.1-12. (査読有)
- [学会発表] (計 16 件)
- (1) Hiroaki Yoshimura, Interconnection  
of Dirac Structures and  
Lagrange-Dirac Systems,  
Iberoamerican Meeting on Geometry,  
Mechanics and Control in honor of  
Hernán Cendra at Centro Atómico  
Bariloche. January 13, 2011.
- (2) Hiroaki Yoshimura, Henry Jacobs and  
Jerrold E. Marsden, Interconnection  
of Dirac Structures and  
Lagrange-Dirac Dynamical Systems,  
Ratiu Fest: Workshop on Geometry,  
Mechanics and Dynamics 2010, CIRM,  
Liminy, France, July 12-16, 2010.
- (3) Hiroaki Yoshimura, Dirac Structures  
and the Hamilton-Pontryagin  
Principle on Lie Groups,  
Workshop on Integrable Systems and  
Symmetries, University of Manchester,  
January 10, 2010.
- (4) Hiroaki Yoshimura, Hamilton-  
Pontryagin Principles and Multi-

- Dirac Structures for Field Theories, Workshop on Geometry, Mechanics and Control, Ghent University, January 11, 2010.
- (5) Hiroaki Yoshimura, Dirac Structures, the Hamilton-Pontryagin Principle on Lie groups and Applications to Incompressible Ideal Fluids, International Workshop on Mathematical Fluid Dynamics, March 12, 2010.
- (6) Hiroaki Yoshimura, Dirac Structures, Variational Principles and Reduction in Fluid Mechanics, Mathematical Fluid Dynamics Workshop, Waseda University, April 16, 2009.
- (7) Hiroaki Yoshimura, Dirac Cotangent Bundle Reduction, International Workshop on Applied Dynamics and Geometric Mechanics, Mathematical Institute at Oberwolfach, July 21, 2008.
- (8) Ryotaro Magoshi and Hiroaki Yoshimura, Automated Modeling of Complex Mechanical Systems Using Bond Graph, 5<sup>th</sup> European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2008.
- (9) 吉田 亜積, 吉村 浩明, 離散ラグランジュ系の変分的積分法と幾何学的拘束安定化, 日本応用数学会 2010 年度総会論文予稿集, pp. 1-2, 2010 年 9 月 6 日.
- (10) 本城 一樹, 吉村 浩明, 2 台送風機並列運転系における分岐現象の解析, 日本機械学会, 機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics & Design Conference, No. 09-479, pp. 1-6, 2009.
- (11) 祖家 健児, 吉村 浩明, 離散ハミルトン系に基づくホロノミック力学系の定式化と幾何学的拘束安定化, 日本機械学会, 機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics & Design Conference, No. 09-484, pp. 1-5, 2009.
- (12) 外川 浩之, 吉村 浩明, 陰的なポート・ラグランジュ系に基づく非ホロノミック系の力学と制御, 日本機械学会, 機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics & Design Conference, No. 09-111, pp. 1-6, 2009.
- (13) 赤井 佑史, 諸星 恭一, 岡 紘, 吉村 浩明, 陰的なポート制御ラグランジュ系による展開型トラス構造物の軌道安定化, 第 57 回理論応用力学講演会講演論文集, pp. 405-406, 2008.
- (14) 永見 充史, 本城 一樹, 笠井 淳, 吉村 浩明, 2 台送風機並列運転系に現れる分岐現象, 第 57 回理論応用力学講演会講演論文集, pp. 391-392, 2008.
- (15) 吉村 浩明, ディラック構造と陰的なポート制御ラグランジュ系, 日本機械学会, 機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics & Design Conference, pp. 1-5, 2008.
- (16) 吉村 浩明, 秋元 清克, 竹澤 昌宏, 柔軟なマルチボディダイナミクスのモデリングと数値シミュレーション, 日本機械学会, 機械力学・計測制御部門講演会 Dynamics & Design Conference, pp. 1-6, 2008.
- [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 (YOSHIMURA HIROAKI)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号: 40247234