

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19760285  
 研究課題名（和文） 可制御性構造に基づいた非線形制御-平衡点の制御からふるまいの制御へー  
 研究課題名（英文） Nonlinear Control based on Controllability Structure  
 - Towards behavior from equilibrium  
 研究代表者  
 石川 将人 (ISHIKAWA MASATO)  
 京都大学・情報学研究科・講師  
 研究者番号：20323826

## 研究成果の概要（和文）：

非線形システムの制御において、対象の性質および制御目的に応じて非線形の意味での可制御性を解析し、その構造を積極的に活かしたコントローラの構成アプローチを提案した。特にシステムが Lie 群および主ファイバー束の構造を持つものに対して有用なコントローラを導出した。またその特徴的な例として、ヘビ型ロボットおよび半球型移動ロボットを制作し実験によって有効性を検証した。

## 研究成果の概要（英文）：

In this work, we proposed a controller design approach for nonlinear systems which takes the system's controllability structure into account, based on mathematical analysis of the plant and the control objective. In particular, we presented a practical controller design for left-invariant systems on Lie groups and principal fiber bundles. We also developed experimental systems of snake-like robots and a hemispherical mobile robot, and examined the validity of the proposed approach.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	660,000	3,860,000

## 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, 非ホロノミック系, 可制御性, 周期運動, 移動ロボット

## 1. 研究開始当初の背景

非線形システムの制御は一般に困難な問題である。その最も根本的な原因は、非線形システムのとりうる構造、特に可制御性の構造が非常に多彩であり、線形システム等と本質的に異なるものをも含むところにある。その

典型例として知られるものが非ホロノミックシステムである。90年代にはこのうちいくつかの簡単なクラスのシステム（例えば Chained System）が盛んに研究され、その制御のためにはコントローラに不連続性（切替要素）や時変性（振動要素）とといった、従

来とは質的に異なる構造を要することが判明した。しかし、この他に多数存在する、より複雑な構造を持つシステムについては、球体操り問題や宇宙衛星の姿勢制御問題といった個別の例題を中心に 2000 年頃から研究され始めたものの満足な解決には至っていなかった。どのような不連続要素や時変要素を持たせればよいかが、もはや ad hoc に着想できるほど単純ではなくなったからである。

## 2. 研究の目的

本研究では、対象とする非線形システム及びその制御目的に応じて可制御性を解析し、その構造を積極的に生かしたコントローラを設計することを目的とする。特に可制御性構造のもつ Lie 群・Lie 代数という性質を利用して「理想的な場合」に対する解析的な解を与えるとともに、「現実の場合」に対応可能な近似的方法を提案する。また、従来主に行われていた平衡点の安定化だけではなく、周期軌道や定常推進といった「ふるまい」の制御を実現する。

## 3. 研究の方法

(1) システムの構造がそのまま表出した理想的なケース、すなわちベキ零システムや Lie 群上の左不変システムについての解析・設計問題を深く掘り下げる。従来 Chained System などの簡単なシステムに対して知られていた制御方法を拡張し、複雑な構造をもつシステムに対しての可制御性解析に基づいたよび不連続・周期変フィードバック束の構成法を求める（骨組みの部分）。

(2) 現実の多くのシステムは上記の理想的な場合にはそのままあてはまらない。そこで、非ベキ零なシステムのベキ零システムへの近似、および主ファイバー束上のシステムの Lie 群上のシステムへの近似を行い、適用範囲を広げる。さらに、近似に起因して生じる所望の振る舞いからの誤差を減殺するよう、反復的あるいは周期的な修正機構を構築する。（肉付けの部分）

(3) 提案するアプローチを、上記のような複雑な構造を有するさまざまな非線形システムに対して適用し、有用性を検証する。

## 4. 研究成果

(1) 理想的なケースの取り扱いに関しては、Cross-chained 型ベキ零システムの詳細な構造解析（学会 1）および切り替え型フィードバック制御による安定化（論文 5, 6, 学会 6, 8）などを行った。特筆すべきことは、単に制御系設計の成功例をひとつ与えただけでなく、「なぜそのような方法がうまくいくのか」と

いうことの徹底的な解明を行った点にある。特に論文 6 では First-Order 型のベキ零システム（宇宙衛星の 3 次元姿勢制御問題および後述する三叉ヘビ型ロボットを近似したものがこのクラスに含まれる）に対し、目標状態へ有限時間で到達させる静的な切り替え型状態フィードバック制御則を与えると同時に、状態空間において切り替え点の集合が形成する図形の位相幾何学的な構造を明らかにした。

(2) 現実的なケースの取り扱いとしては、ベキ零近似と反復フィードバックによる制御系設計（論文 2, 3, 4, 学会 7）を行った他、Lie 群上の左不変システムに近似することによって「コンパクト多様体上の非線形ダイナミクスを内包した動的フィードバック則」を用いた実用安定化の方法（学会 2）を提案した。この方法は、コントローラの内部に三次元特殊直交群  $SO(3)$  上で展開する仮想的なベキ零システムを持たせるというもので、大まかに述べれば対象とするシステムの構造の部分だけを抜き出したようなものになっている。したがって、「制御対象の構造を解析し、それを反映したコントローラを設計する」という本課題の目的の理想的な到達点の一つであるといえる。

この方法により、図 1 に示すような三叉ヘビ型移動ロボットを随時任意の方向に、かつ滑らかに推進させる制御を実現した。

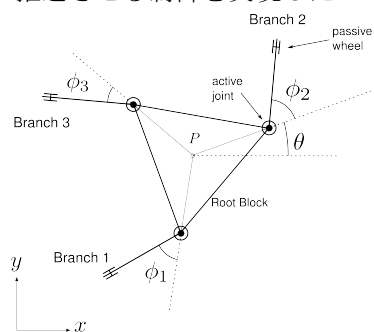


図 1：三叉ヘビ型ロボット

(3) (1) (2) で述べたアプローチを典型的な Cross-chained 型システムである 3 リンクヘビ型移動ロボット（図 2）に適用し、実機実験装置を制作して検証を行った。また、同様の構造を有することに加えて動力学的影響（運動量ダイナミクスの存在）が無視できないシステムとして、「半球型移動ロボット” Surface Walker”」（図 3）についても実機製作と検証を行った。なおこの研究の過程で、アクチュエータ（RC サーボモータ）の持つ動特性の影響も重視すべきであることがわかり、これを陽に考慮した実用的なモデリングとシステム同定の方法も提案した（論文 1）。さらに、この移動ロボットの問題において「球体」と「地面」の主客の役割を入れ替

えることで、平面側を駆動することで球体の姿勢を制御する多自由度アクチュエータ「球面型超音波モータ」(図4)への応用も可能である。この問題についても数値シミュレーションで検証を行い、モデリングと制御の妥当性を示すことに成功した。

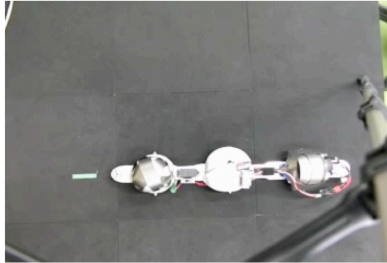


図2: 3リンクヘビ型移動ロボット  
(IEEE Multi-Conference on System and Control 2010にて成果公表予定)

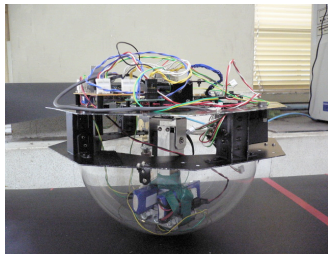


図3: 半球型移動ロボット

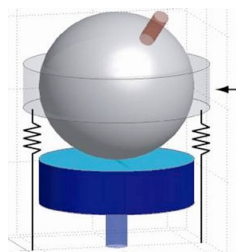


図4: 球面型超音波モータ

#### 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6件)

1. 石川将人, 北吉良平, 和田堯, 丸田一郎, 杉江俊治, R/C サーボモータのモデリングと劣駆動機械系への応用, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.46, 2010, 237-244
2. M. Ishikawa, Y. Minami, T. Sugie, Development and Control Experiment of the Trident Snake Robot, IEEE/ASME Journal on Mechatronic Systems, 査読有, Vol.15, 2010, 9-16

3. 石川将人, 木内裕介, 非ホロノミック力学に基づく球面型超音波モータのモデル化と制御, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, Vol.75, 2009, 640-647
4. Masato Ishikawa, Iterative Feedback Control of Snake-like Robot based on Principal Fiber Bundle Modeling, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 査読有, Vol.1, 2009, 175-182
5. 石川将人, 複数のジェネレータを持つ高階非ホロノミックシステムの切替フィードバック制御, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 22, 2009, pp. 280-286
6. 石川将人, 一次可制御な非ホロノミックシステムに対する有界な切り替えフィードバック制御, 査読有, Vol.44, 2008, 227-233 [学会発表] (計8件)
1. M. Ishikawa, T. Kuroiwa, Nilpotent Normal Form for Non-chained Driftless Systems, Proc. Of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2009, 4390-4395
2. M. Ishikawa, P. Morin and C. Samson: Tracking Control of the Trident Snake Robot with the Transverse Function Approach, Proc. of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2009, 4137-4143
3. M. Ishikawa, Y. Kobayashi, R. Kitayoshi and T. Sugie: The Surface Walker: a Hemispherical Mobile Robot with Rolling Contact Constraint, in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, 2009, 2446-2451
4. M. Ishikawa, T. Yamaguchi and T. Sugie: On Almost Orbital Equivalence of Nonlinear Systems, European Control Conference, 査読有, 2009, 886-891
5. T. Wada, M. Ishikawa, R. Kitayoshi, I. Maruta and T. Sugie: Practical Modeling and System Identification of R/C Servo Motors, 2009 IEEE International Conference on Control Applications, 査読有, 2009, 1378-1383
6. M. Ishikawa and A. Astolfi: Finite-time Control of Cross-chained Nonholonomic Systems by Switched State Feedback, 47th IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, 2008, 304-309
7. M. Ishikawa and Y. Kinouchi: Modeling and Control of Spherical Ultrasonic Motor based on Nonholonomic Mechanics, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, 2008, 125-130

8. Masato Ishikawa: Switched Feedback Control for a class of First-order Nonholonomic Driftless Systems, 17th IFAC world congress, 査読有, 2008, 4761-4766

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www-dsc.mech.eng.osaka-u.ac.jp/ishikawa>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石川 将人 (ISHIKAWA MASATO)

京都大学・情報学研究科・講師

研究者番号: 20323826