

平成 21 年 6 月 17 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560451

研究課題名 (和文) 進化論的フラットネスに基づく非線形制御系設計と実機実験

研究課題名 (英文) Control design for nonlinear systems and its application to the real world via evolutionary flat theory

研究代表者

井前 讓 (IMAE JOE)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30184807

研究成果の概要：

フラットネスの性質に基づく非線形制御系設計に関し、進化型計算(遺伝的プログラミング, GP)に基づく設計手法を構築した。具体的には、動的フィードバック構造を取り込むことにより多入力多出力(MIMO)システムのフラット出力の進化論的導出に成功したこと、フラット出力関数の進化論的導出アルゴリズムの有効性・実用性を数値シミュレーションにより確認したこと、そして標準的 GP 設計手法を実時間化し、実機実験によりその有効性・実用性を検証したことなどが挙げられる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：制御工学

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，制御系設計，フラットネス理論，進化型計算，実時間制御，ロバスト制御

## 1. 研究開始当初の背景

科学技術を支える技術の一つに制御技術がある。少子高齢化問題，環境問題など多くの地球的規模の複雑かつ解決困難な課題を考えると制御技術への期待はこれまで以上に大きいと言える。しかしながら，対象が線形システムの場合には制御技術は十分な研究がなされ，線形設計理論としてほぼ完全な形で体系化されているのに対し，対象が複

雑なもの，例えば非線形システムの場合にはその体系化は十分とはいえない。制御技術への大きな期待を考えると非線形制御系設計手法の充実は急務である。

およそ10年前，非線形システムを線形に見立てる理論，すなわちフラットネスの理論が制御技術の分野に登場した。非線形システムの殆どがフラットネスの性質を持っていること，また，フラットネスの性質を使えば線形設計理論の成果が非線形設計に利用で

きることなどから多くの研究者の注目を集めた。しかし、フラットネスの性質を利用するにはフラット出力と呼ばれる非線形関数およびその高階微分を求めなければならず、その導出の困難さは非線形安定理論のリアプノフ関数を見出すことに匹敵すると言われた。このため、フラットネスの考え方は非線形設計手法として大きな可能性を秘めながらも、その適用範囲はフラット出力が解析的に求まる簡単なシステムに限られた。

以上により、種々の非線形システムに対してフラット出力が導出可能な統一かつ実用的な設計手法が望まれていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、フラットネスの性質に基づく設計手法を非線形制御系設計手法の強力なツールとして構築することを目的とする。非線形システムの殆どがフラットネスの性質を持っていることから、非線形システムの殆どが線形設計理論の成果を享受することが可能となる。具体的には「高階微分機能を持つ進化論的制御系設計法の構築」、「数値シミュレーションおよび実機実験による本設計法の検証」の二つの課題から構成され、これらの課題を解決することを目的とする。なお、困難とされるフラット出力およびその高階微分の導出には進化型計算を用いる。

## 3. 研究の方法

2007年度は、以下の通りである。

(1) フラット出力関数の導出はリアプノフ関数導出と同じく極めて困難といわれる。その関数導出のために遺伝的プログラミング (GP) の強力化を試みた。GP は関数を直接に扱うため各個体が無限次元化され、個体間の近接度の算出には工夫が必要となる。GP において、ある種の 1 点比較を用いるならば、近接度の算出が遺伝的な意味で可能であることを明らかにした。また、フラット出力関数の導出にはその高階微分が必要なことから GP に高階微分機能を含めた。

(2) フラット出力を利用した設計において 1 入力 1 出力システムの設計は基本である。磁気浮上システムの 1 入力 1 出力設計問題に今回開発の GP を適用し、数値シミュレーションにより有効性を検証した。さらに、フラット出力の考え方は拘束条件を不得意とすることから、状態拘束条件を含む磁気浮上システムに対しても今回の GP を適用した。その結果、ある種の変数変換に留意するならば今回の GP が有効であることを確認した。さらに 2 入力 2 出力の移動ロボットに関する実

機システムを同定した。その同定モデルを用いて既存の制御手法に基づき今回の GP による制御系設計を行い、障害物回避問題の数値シミュレーションおよび実機実験において良好な結果を得た。これにより、2 入力 2 出力システムに対するフラットネスの性質を利用した設計法の構築に関しての準備を整えた

2008年度は以下の通りである。

(1) 1 入力 1 出力の成果を基礎にして、2007 年に開発の GP を発展させるとともに多入力多出力のフラット出力関数の進化論的な導出を試みた。多入力多出力システムではフラット出力は一般に動的フィードバック構造を含んだ形により与えられて取り扱いが困難となる。無干渉化アルゴリズムに着目することにより、動的フィードバック構造を取り込んだ。さらに、GP により 1 入力 1 出力を含む形で多入力多出力へと一般化した。

(2) 多入力多出力に対するフラット出力関数の進化論的導出アルゴリズムを、2 重スピン姿勢制御、倒立 2 輪ロボット制御、昇圧型 DC/DC コンバータ制御、垂直離着機の飛行制御、自立型無人潜水機の移動制御などに適用し、本アルゴリズムの有効性・実用性を数値シミュレーションにより確認した。

(3) 実機システムを制御する場合、予期しない種々の外乱により制御性能が劣化する。したがって、ロバストな機能を備えた制御系設計手法が必要となるが、GP は計算過程の複雑性から実時間制御によるロバスト化は不可能とされていた。本研究では、本設計手法のロバスト化に必要な標準的 GP 設計手法のロバスト化に成功した。すなわち、計算を極端に簡素化した不正確な情報を積極的に利用して計算時間を大幅に短縮し、標準的 GP 設計手法を実時間化した。実機実験により、その有効性・実用性を検証した。

## 4. 研究成果

フラットネスの性質に基づく非線形制御系設計に関し、進化型計算 (遺伝的プログラミング, GP) からの設計手法構築を目的とした。

(1) 多入力多出力 (MIMO) システムのフラット出力の進化論的導出:

1 入力 1 出力の成果を基礎にして多入力多出力のフラット出力関数の進化論的な導出を試みた。多入力多出力システムではフラット出力は一般に動的フィードバック構造を含んだ形により与えられ取り扱いが困難となる。無干渉化アルゴリズムに着目することにより、動的フィードバック構造を取り込むことに成功した。さらに、GP により 1 入

力1出力を含む形で多入力多出力へと一般化した。

(2) 数値シミュレーションによる本設計法の有効性の検証：

多入力多出力に対するフラット出力関数の進化論的導出アルゴリズムを、2重スピン姿勢制御、倒立2輪ロボット制御、昇圧型DC/DCコンバータ制御、垂直離着機の飛行制御、自立型無人潜水機の移動制御などに適用し、本アルゴリズムの有効性・実用性を数値シミュレーションにより確認した。

(3) 実機実験によるGP設計法のロバスト性の検証：

実機システムを制御する場合、予期しない種々の外乱により制御性能が劣化する。したがって、ロバストな機能を備えた制御系設計手法が必要となるが、一般にGPは計算過程の複雑性から実時間制御によるロバスト化は不可能とされていた。本研究では、本設計手法のロバスト化に必要な標準的GP設計手法のロバスト化に成功した。すなわち、計算を極端に簡素化した不正確な情報を積極的に利用して計算時間を大幅に短縮し、標準的GP設計手法を実時間化した。実機実験により、その有効性・実用性を検証した。

以下に、(1)、(2)、(3)について具体的に説明する。はじめに、上記(1)、(2)について述べる。

フラットネス理論に基づく制御系設計を扱うとき、システムがフラットであるならば、非線形システムは線形システムに変換可能である。したがって、非線形システムの制御系設計は線形システムの制御系設計に帰着することができるため、その設計は容易となる。しかし、その変換に関係するフラット出力の導出は、多入力システムの場合は特に困難とされ、その導出方法は未だに体系化されていない。

本研究では、GPと無干渉化アルゴリズムに基づいたフラット出力の探索アルゴリズムを提案した。また、いくつかの非線形システムを取り上げ、提案アルゴリズムの有効性を示すと同時に、得られたフラット出力によって制御系設計を行った。

次式であらわされる非線形システムを考える。

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m)$$

以下に示す出力  $y \in \mathbb{R}^m$  を見つけることができるとき、システムはフラットであるという。また、そのときの出力  $y$  をフラット出力とよぶ。ここで、 $p, q$  は正定数である。

$$\begin{cases} y = h(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(p)}) \\ x = \chi_1(y, \dot{y}, \dots, y^{(q)}) \\ u = \chi_2(y, \dot{y}, \dots, y^{(q)}) \end{cases}$$

単入力システムの場合には動的フィードバックを必要としない。しかし、多入力システムの場合には動的フィードバックの可能性を検討する必要がある。フラット出力探索問題は単入力システムの場合に比べて極めて困難となる。本研究において提案するアルゴリズムにより、フラット出力の導出が比較的容易であることを明らかにした。

提案アルゴリズムの基本的な考え方を述べる。フラット出力の探索問題は、動的フィードバックを用いた入出力線形化において、自明なゼロダイナミクスを持つある種の出力を求めることと等価である。提案アルゴリズムの大筋は以下の通りである。

- Step1: GPによるフラット出力候補の生成。
- Step2: 無干渉化による動的フィードバックの構成。
- Step3: 自明なゼロダイナミクスを持つとき、終了。そうでないとき、Step1へ。

具体的な制御問題に適用し有効性を検証した。単入力システムとして2重スピン姿勢制御モデル、倒立2輪ロボットを取上げ、動的フィードバックを必要としない場合に本手法が適用可能であることを明らかにした。次に多入力システムとして、昇圧型DC/DCコンバータ、非ホロノミック積分器、垂直離着陸機、自律型無人潜水機などを取上げ、フラット出力が導出できることを明らかにした。また、得られたフラット出力により制御系設計が容易であることを明らかにした。

次に上記(3)について述べる。

進化型計算を利用した非線形システムの制御系設計を取り扱うとき、一般に、進化型計算は計算負荷が大きいとされ、制御系設計においては解決すべき課題の一つとされる。ここでは、標準的なGPに焦点を当て、計算負荷の軽減を主な目的とする3種類のGP設計手法を新たに提案した。そして、いくつかの設計問題に対し適用し、オフライン制御およびオンライン制御のいずれにおいても有効であることを明らかにした。提案手法では、本来ならば用いられない不正確な情報を進化過程で積極的に利用することで計算負荷の軽減を行った。その結果、従来のGPに比べ進化計算が高速化されることを示した。この結果は、上記(1)、(2)における本設計手法のロバスト化に必要な。実験風景を図1に示す。

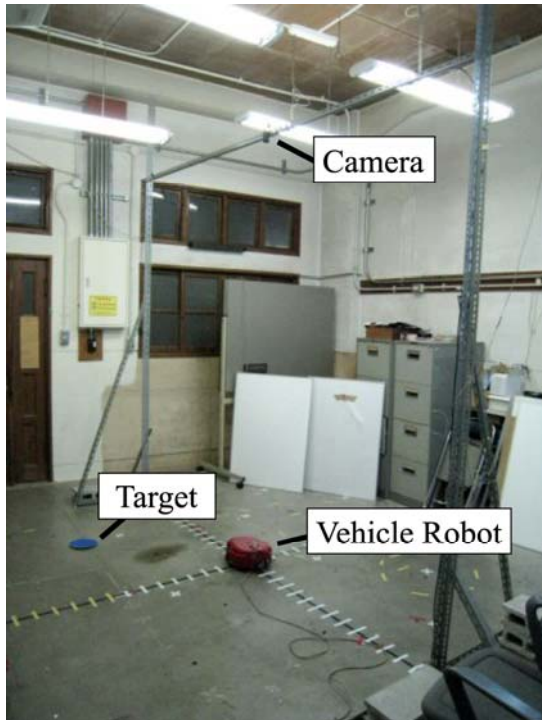


図1 実機実験

提案する3種類の設計手法をGP設計手法I, II, IIIとして以下に特徴を述べる。なお, GP設計手法I, IIはオフライン制御であり, GP設計手法IIIはオンライン制御である。また, GPはさらに発展させている。

GP設計手法I: 探索性能の向上を目的とした。突然変異は通常, ランダムにノードを変化させる操作であるのに対し, 本手法では文脈依存文法により突然変異に方向性を与えた。その際, 個体の多様性の問題が生じるが, 島モデルの導入により解決できることを明らかにした。

GP設計手法II: GPアルゴリズムIを基礎として機能を拡張し, 計算の高速化を目的とした。GPを制御系設計に用いる際の問題点は個体の評価に要する計算時間にある。その評価には評価関数を伴う軌道計算を必要とし, 微分・積分計算の負担は大きい。ここでは微分・積分計算の不正確な情報を用い, 個体を少ない計算負荷で評価することで個体評価の高速化を図った。なお, 優良な個体に対しては正確に再評価を行った。不正確な情報としては低精度の微分・積分計算の評価を, 正確な情報としては高精度の微分・積分計算の評価をそれぞれ利用することにより, 進化計算の高速化が可能であることを明らかにした。

GP設計手法III: GP設計手法IIの探索性能の向上と進化計算の高速化を活かし, 制御のオンライン化を目的とした。1世代ごとに制御器を生成し, 適用した。この繰り返しによりオンライン制御を実現した。このとき,

各世代の計算時間分だけ状態量に起因するある種の誤差が生じるが, 生成されたGP制御器により対処可能であることを明らかにした。

2次元非線形システムの設計問題を通して各設計手法の基本性能を比較・検証し, 次にオフライン制御, オンライン制御を通して設計手法II, IIIの有効性を明らかにした。

オフライン制御ではGP設計手法IIを使用した。Van der Pol問題, 2輪移動体制御, 倒立振り上げ問題の数値実験を行い, 2輪移動体制御では障害物回避軌道を生成できることを示した。

オンライン制御ではGP設計手法IIIを使用した。Van der Pol問題, 2輪移動体制御に関する数値実験, また, 2輪移動体制御の障害物回避問題に関する実機実験をそれぞれ行い, その有効性を明らかにした。

## 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)

[学会発表] (計 6件)

①佐藤亘, 井前讓, 翟貴生, 小林友明, 不正確な情報を利用した進化型計算に基づくオンライン制御, 日本機械学会関西支部第83期定時総会講演会, 2009年3月17日, 近畿大学

②井前讓, 森田康彦, 小林友明, 翟貴生, 遺伝的プログラミングを用いた多入力システムのフラット出力探索, 計測自動制御学会関西支部若手研究発表会, 2009年1月14日, 常翔学園大阪センター

③小林友明, 上田敦史, 井前讓, 翟貴生, 擬似空間に基づいた障害物回避の制御系設計, 第51回自動制御連合講演会, 2008年11月23日, 山形大学

④井前讓, 荻野淳, 小林友明, 翟貴生, 拘束条件を有する実時間制御への新たな接近, 計測自動制御学会関西支部若手研究発表会, 2008年1月16日, 大阪工大摂南大学大阪センター

⑤井前讓, 高橋尚史, 翟貴生, 小林友明, 拘束を考慮したフラットネス理論に基づく制御系設計, 計測自動制御学会関西支部若手研究発表会, 2008年1月16日, 大阪工大摂南大学大阪センター

⑥井前讓, 荻野淳, 翟貴生, 小林友明, 拘束条件付最適制御問題への新たな試み, 自動制御連合講演会, 2007年11月24日, 慶應義塾大学

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

井前讓 (IMAE JOE)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：30184807

(2) 研究分担者

小林 友明 ( KOBAYASHI TOMOAKI )  
大阪府立大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：70364023