

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06604

研究課題名(和文) 動的な分散遺伝的アルゴリズムによる多峰性最適軌道探索の研究とUAVによる飛行実証

研究課題名(英文) Research on Multimodal Optimal Trajectory Search Using Dynamically Distributed Genetic Algorithm and Its Flight Verification by UAV

研究代表者

米本 浩一 (Yonemoto, Koichi)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80404101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：階層的クラスタリングにより，母集団を進化過程で逐次相似性の高い個体の小集団に分割し，多峰性解の探索に適した「動的な分散遺伝的アルゴリズム」(Dynamically Distributed Genetic Algorithm: Dyn DGA)を開発し，そのFPGA(Field Programmable Gate Array)への実装を行った．また，小型無人航空機を用いた飛行実証実験により，リアルタイム最適軌道生成や誘導システムへの実用化計画を立案した．

研究成果の概要(英文)：Dynamically Distributed Genetic Algorithm named “Dyn DGA” has been developed, which is applicable to the search of multimodal optimal solution by dividing population successively into small islands during the process of evolution using hierarchal clustering of individuals, has been developed and implemented in a FPGA (Field Programmable Gate Array). A practical application plan to real-time optimal trajectory generation and guidance system is proposed by the flight verification test using small and unmanned aerial vehicles.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：遺伝的アルゴリズム 多峰性最適軌道探索 UAV飛行実証

1. 研究開始当初の背景

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) は、生命進化の工学的モデル化による最適計算手法の一つであり、近年様々な分野に応用されている。しかし、他の線形計画法や勾配法等の最適計算手法に比べて、探索解を比較的安定して得られるという利点の半面、個体の選択、遺伝子の交叉や突然変異という「偶然性」に依存するため、進化の速度は遅く、最適に近い探索解に収束させるには、世代交代に費やす計算コストが非常に大きいという欠点がある。

本研究の開始当初までに、従来から指摘されている GA の欠点を克服するため、以下のような先行研究を独自に進めてきた。

- ・動的な分散遺伝的アルゴリズム
- ・リアルタイム計算システム
- ・小型無人飛行機を用いた実証実験

(1) 動的な分散遺伝的アルゴリズム

従来の分散遺伝的アルゴリズム (DGA: Distributed GA) は、事前に母集団を複数の「島」と呼ばれる小集団に分割し、数世代毎に一定の割合で個体を入れ替える「移住」を行いながら進化させることで、集団遺伝学的に「島」特有の地域的種形成 (解の多峰性) を期待した進化計算である。

研究代表者らは、多峰性解の探索を期待した DGA においても、単なる無作為の分割では、母集団の特性を受け継ぎ、同一の局所解に陥り易いこと等の問題点を見出し、個体間の非類似度計算に基づく階層的クラスタリングによって、動的に進化の過程で適宜類似性の高い個体の集まりである小集団に分割、統合し、進化をさせるという独創的アイデアに基づき Dyn DGA を提案した (図 1) *1,*2。

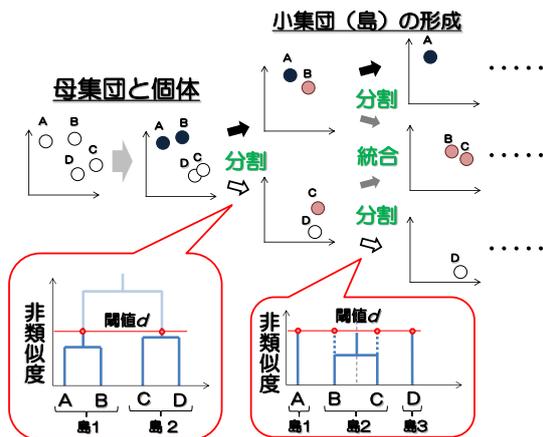


図1 動的な分散遺伝的アルゴリズム

提案手法の有効性を調べるため、サブオービタル有翼ロケットの最適帰還軌道生成問題への Dyn DGA の適用を試みた。計算時間短縮のため、制御入力 (迎角, バンク角, スピードブレーキ角) をフーリエ級数で表す工夫を行い、その係数を遺伝子とした。母集団を小集団への分割する指標は、軌道ダウンレンジとクロスレンジに関する高度プロファ

イルとした (図 2)。その結果、Dyn DGA により、800 世代まで進化計算を進めた結果、適応度が最も高い軌道を含めて 6 つの小集団それぞれについて特徴の異なる最適軌道群 (多峰性探索解) が得られた (図 3)。

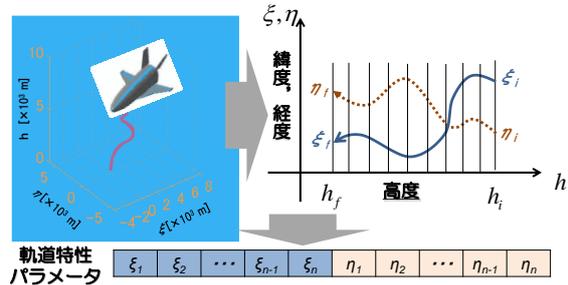


図2 サブオービタル有翼ロケットのダウンレンジとクロスレンジ

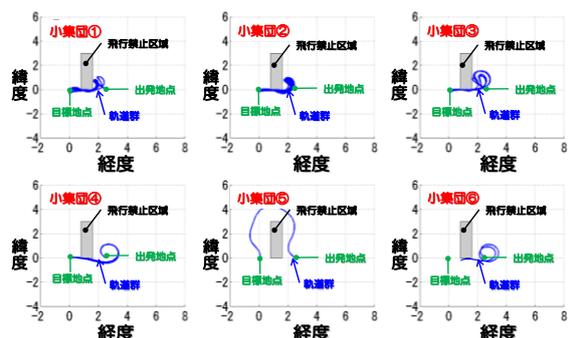


図3 小集団毎に収束した最適軌道群 (多峰性探索解)

(2) リアルタイム計算システム

FPGA とは、プログラム可能な集積回路 LSI (Large Scale Integration) である。Dyn DGA によるサブオービタル有翼ロケットの最適帰還軌道計算アルゴリズムについて、特に計算負荷の大きい運動計算の積分を並列計算で実行させる等のプログラミング研究を行い、FPGA への実装を試みた。飛行禁止区域のない比較的シンプルな最適軌道計算を 1 秒以内に行えるという試作成果が得られた (図 4)。

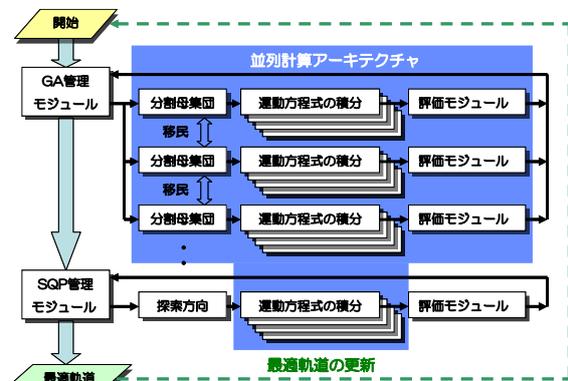


図4 FPGA リアルタイム計算システムのブロック図

(3) 小型無人飛行機を用いた実証実験

小型無人飛行機の試作と試験飛行を実施した。Dyn DGA の FPGA 実装により軽量

コンパクトなリアルタイム計算システムの実証実験に目途がついた (図 5)。



図 5 小型無人機 (先行研究プロトタイプ) と Dyn DGA を実装した FPGA ボード

*1 Miyamoto, S., Matsumoto, T. and Yonemoto, K., “Optimal Trajectory Generation Using a Distributed Genetic Algorithm That Can Divide and Merge Individuals Dynamically,” Trans. of JSASS, Aero. Tech. Japan, Vol. 12, pp37-46, 2014.

*2 Sasaki, G., Tatsukawa, T., Nonomura, T., Oyama, A., Matsumoto, T. and Yonemoto, K., “Multi-objective Optimization of Airfoil for Mars Exploration Aircraft Using Genetic Algorithm,” Trans. of JSASS, Aero. Tech. Japan, Vol.12, No.ists29, pp.Pk_59-Pk_64, December 26, 2014.

2. 研究の目的

本研究は、階層的クラスタリングにより、母集団を進化過程で逐次相似性の高い個体の小集団に分割し、多峰性解の探索に適した「動的な分散遺伝的アルゴリズム」(Dynamically Distributed Genetic Algorithm: Dyn DGA)の研究を完遂し、そのFPGA(Field Programmable Gate Array)への実装、ならびに小型無人航空機を用いた飛行実証実験により、リアルタイム最適軌道生成や誘導システムへの実用化を検証するものである。

3. 研究の方法

先行研究の成果に基づき、研究期間を3年(図6)として、以下の方針の下に本課題を完遂する。

- ・ 階層的クラスタリングを用いた「動的な分散遺伝的アルゴリズム」Dyn DGAの研究
- ・ Dyn DGAのFPGA実装によるリアルタイム計算システムの構築
- ・ 小型無人飛行機を用いた飛行実証実験によるリアルタイム計算システムの実用化検証



図 6 研究計画の年度展開

- (1) 階層的クラスタリングを用いた「動的な分散遺伝的アルゴリズム」Dyn DGAの研究

Dyn DGAの研究項目には、

- クラスタパラメータの選択方法
- 多様な非類似度計算手法の検証
- 最適クラスタリング数と非類似度レベルの決定問題
- 最適軌道パラメータと誘導コマンドの生成

を計画する。特に非類似度計算には、最短距離法、最長距離法、群平均法、重心法やWard法等があり、軌道探索問題に対する適合性の評価は十分と言えないことから、その非類似度レベルの決定方法も含めて重要課題の一つと考える。

- (2) Dyn DGAのFPGA実装によるリアルタイム計算システムの構築

FPGA実装の課題として

- FPGAの最適仕様設定
- FPGAのアビオニクスインターフェースとインテグレーション技術
- Dyn DGA運動計算部の並列計算技術の確立

があり。このなかで、計算コスト削減にはDyn DGAの運動計算部の並列計算化技術の確立が必須である。

- (3) 小型無人飛行機を用いた飛行実証実験によるリアルタイム計算システムの実用化検証

小型無人飛行機を開発し、

- 軌道生成と誘導計算サイクルの要求仕様設定
- 実証技術の検証方法の設定
- 評価基準のクライテリアの設定
- 飛行実験の実施
- データ解析と評価

の研究と課題解決を行い、Dyn DGAの実用化研究を完遂する。

4. 研究成果

- (1) 階層的クラスタリングを用いた「動的な分散遺伝的アルゴリズム」Dyn DGAの研究

従来のDyn DGAではデンドログラムを用いて、ユーザが事前に指定した非類似度を閾値とした分割を行っている。しかし分割基準となる非類似度を予め決定しておくのは困難である。こうした背景から、研究課題として掲げた最適クラスタリング数と非類似度レベルの決定問題については、サブ母集団の上下限数と適した数を適応的に設定する方法を提案した。その上下限内でCalinski-Harabasz基準、Davies-Bouldin基準、シルエット値の3つの基準を用いた多数決によって、サブ母集団数を決定できることが分かった。

次に、適応度計算に関する課題として、ε制約法および満足化トレードオフ法について、それぞれの特性を評価することができた。

ちなみに、 ϵ 制約法とは、複数の目的関数のうち任意に選択した1つを目的関数として残しつつ、残りの目的関数には上限値 ϵ を設けて、不等式制約とすることで単目的最適化問題に変換する手法である。また、満足化トレードオフ法とは、各目的関数に理想点 p_i^* と希求水準 $p_i^{\bar{}}$ を与え、理想点と希求水準の差に対して最も理想点に近い最適解を求める手法である。これらを Dyn DGA を用いた最適軌道生成アルゴリズムに適用した結果、目的地点へ到達する軌道が得られたものの、最終世代においても目的地点へ到達できないクラスが多く存在してしまう課題も残った。

こうした最適クラスタリングや適応度関数についての個別の研究成果に基づき、Dyn DGA を用いて小型の有翼ロケット実験機（図7：全長4.6m、初期質量1,000kg）の滑空フェーズにおける最適軌道生成と軌道誘導性能（図8）の評価を行った。

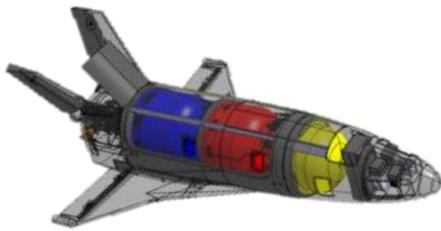


図7 小型有翼ロケット実験機 WIRES#015 の概要

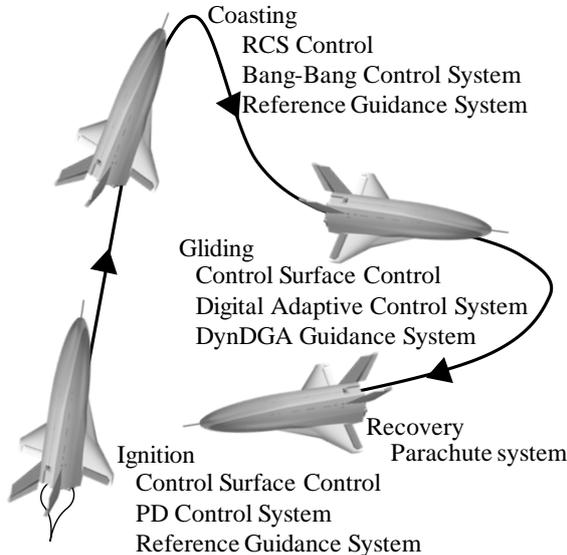


図8 小型有翼ロケット実験機の飛行フェーズ

最適軌道生成と軌道誘導方法として、飛行時間の5秒毎に初期個体を生成して十分適応度が成長したと判断できる800世代までの軌道探索を行う方法、あるいは5秒毎に最初に得られた最適軌道を初期個体として受け継ぎ50世代、100世代、800世代と進化させながら軌道探索する方法について比較評価した（図9）。その結果、初期の最適軌道を初期

個体として受け継ぐ場合には、少ない世代数でも、実用的な軌道誘導が可能な最適軌道が得られることが分かった（図10）。

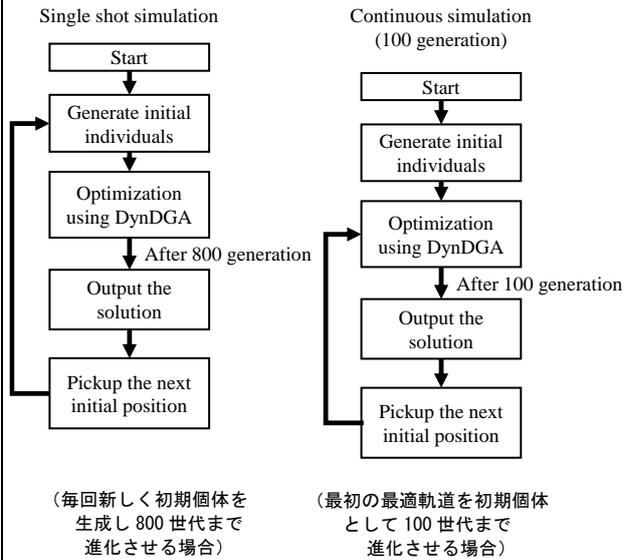


図9 最適軌道生成のフローチャート

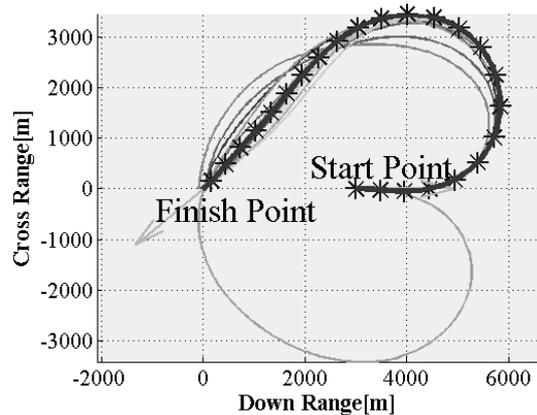


図10 小型有翼ロケット実験機の最適軌道生成の一例
(最初の最適軌道を初期個体として100世代まで進化させる場合)

(2) Dyn DGA のFPGA 実装によるリアルタイム計算システムの構築

階層的クラスタリングを用いた「動的な分散遺伝的アルゴリズム」Dyn DGA について、最適クラスタリングや適応度等のアルゴリズムに関する研究成果に基づき、FPGA 実装の研究を行った。

小型有翼ロケット実験機に搭載して実用的な最適軌道生成と軌道誘導を行う場合、3秒程度で200個体を800世代までの進化計算が完了することを条件とすると、最も負荷の大きな適応度計算（すなわち軌道計算）には、16の並列計算が必要であることが分かった。

FPGA の選定結果、1つあたり4並列計算が可能であることから、これらを統合管理する上位のFPGAを合わせて、合計5台のFPGAを用意することでリアルタイム計算システムが成立することが分かった（図11）。

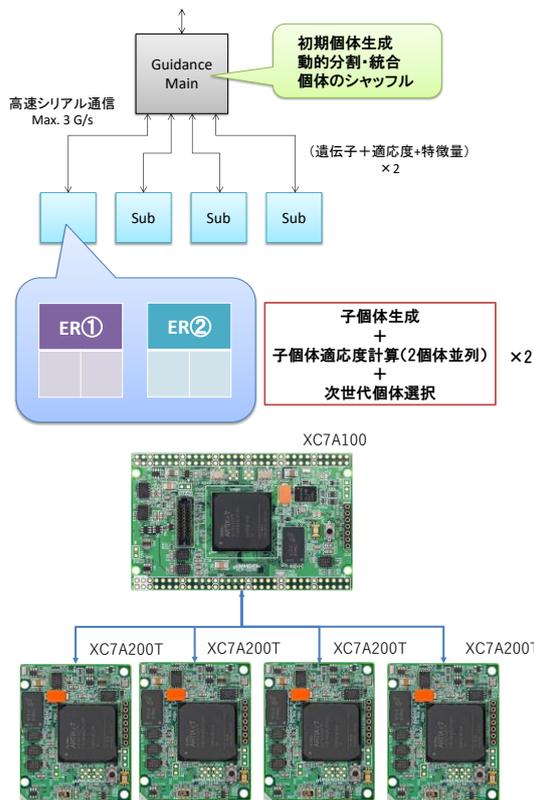


図 11 FPGA によるリアルタイム計算システム

(3) 小型無人飛行機を用いた飛行実証実験によるリアルタイム計算システムの実用化検証

九州工業大学の研究代表者らは、JAXA が将来の宇宙探査用液体エンジンとして開発中の LNG (Liquid Natural Gas: Methane) 研究用試作エンジンを搭載する小型有翼ロケット実験機 (図 7) を用いて、将来の再使用型ロケットの実現に必須の技術課題である誘導制御の実証を目的として、米国のモハベ砂漠での飛行実証実験計画を推進している (図 12)。

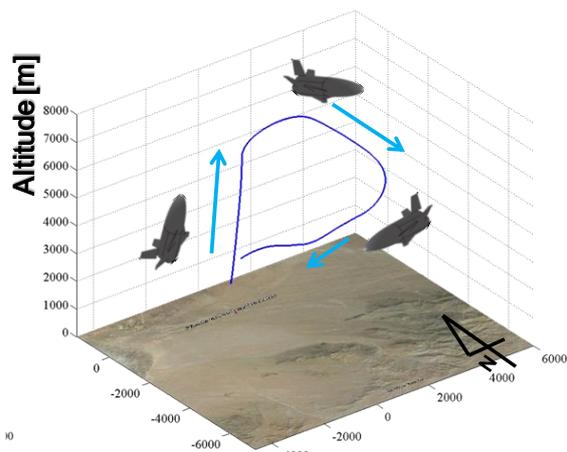


図 12 小型有翼ロケット実験機の飛行実験概要

当初の計画では、2017 年度に小型有翼ロケット実験機の飛行実験を予定していたが、機体本体や LNG エンジンの開発が遅れ、現時点

では 2019 年度以降に実施の予定である。

小型有翼ロケット実験機の搭載アビオニクス (図 12) は、7 つのコンピュータで構成され、民間航空機の民間航空機の通信バス規格 ARINC429 により通信を行っている。その誘導コンピュータ (Guidance Computer) に、本研究成果である Dyn DGA を FPGA に実装したリアルタイム最適軌道生成および軌道誘導計算システムを接続して、飛行実証を行う計画である。

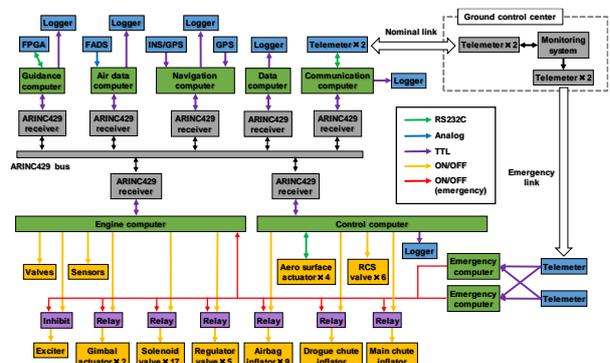


図 12 小型有翼ロケット実験機の搭載アビオニクス

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 2 件)

[1] Yonemoto, K., Fujikawa, T., Morito, T., Wang, J., and Choudhuri, A. R., "Progress of Subscale Winged Rocket Development and Its Application to Future Fully Reusable Space Transportation System," INCAS Bulletin (National Institute for Aerospace Research "Elie Carafoli"), Volume 10, Issue 1, pp.161-172, January-March, 2018. 【査読有】

[2] Yonemoto, K., Yamasaki, H., Ichige, M., Ura, Y., Gossamsetti, Guna S., Ohki, T., Shirakata, K., Choudhuri, Ahsan R., Ishimoto, S., Mugitani, T., Asakawa, H., Nanri, H., "Winged Test Rocket with Fully Autonomous Guidance and Control for Realizing Reusable Suborbital Vehicle," International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, Vol.10, No. 1, pp.96-107, 2016. 【査読有】

[学会発表] (計 4 件)

[1] Ichige, M., Yonemoto, K., Fujikawa, T., Hirakida, S., Ura, Y., Gossamsetti, G. S. and Ohki, T., "Preliminary Design of Dynamically Distributed Genetic Algorithm Onboard Guidance System for

Experimental Winged Rocket,”
Asia-Pacific International Symposium
on Aerospace Technology (APISAT) 2017,
Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea,
Oct. 16-18, 2017.

- [2] 開田悟史, 米本浩一, 藤川貴弘, 市毛優智: 動的分散遺伝的アルゴリズムを用いたリアルタイム最適軌道生成の性能向上, 日本機械学会九州支部第 70 期総会・講演会, 佐賀大学理工学部, 佐賀, 2017 年 3 月 14 日.
- [3] 蓑手勇人, 米本浩一, 伊多倉京士朗, 市毛優智, 大木巧: 動的分散遺伝的アルゴリズムを使用した軌道生成におけるフーリエ級数正規化による姿勢コマンドの改善, 日本機械学会九州支部第 69 期総会・講演会, 熊本大学, 熊本, 2016 年 3 月 15 日.
- [4] Ichige, M., Yonemoto, K., Yamasaki, H., and Itakura, K., “Development and Evaluation of Guidance Methodology Using Dynamically Distributed Genetic Algorithm for Sub-orbital Winged Rocket,” the 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe Convention Center, Kobe, Japan, July 4-10, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

米本 浩一 (YONEMOTO, Koichi)
九州工業大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 80404101

(2) 研究分担者

藤川 貴弘 (FUJIKAWA, Takahiro)
九州工業大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 40781795