

令和元年6月7日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2016～2018

課題番号：16KT0103

研究課題名(和文) ビット反転を用いた宇宙機コンピュータシステム強化：プログラム進化による持続可能性

研究課題名(英文) Reinforcing Spacecraft Computer System by Bit Inversion: Towards Sustainability Through Program Evolution

研究代表者

高玉 圭樹 (Takadama, Keiki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20345367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、予期せぬ外的要因(センサ故障や環境変化など)及び内的要因(プログラムバグなど)に対して宇宙機に搭載されたコンピュータシステムを強化するために、宇宙線によるビット反転を利用したプログラム進化を考案した。また、提案手法の有効性を検証するために、宇宙探査ローバに着目し、進化したローバの制御プログラムを評価するとともに、システム強化のための機能設計を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

・学術的意義：従来のプログラム進化の研究は最適化に着目しているが、本研究では最適性に加え、ヒューマンエラーやセンサ故障などへのロバスト性にも着目しており、新しい研究を生み出すことに貢献する。
・社会的意義：宇宙線がコンピュータに当たると情報のビットが反転してデータ破壊や誤作動が起こるため、従来は高額で低速な宇宙用CPUを採用しているが、本研究の成果を用いると現在のハイスpekCPUを利用可能となり、安く、小さく、速いシステムが実現できる。

研究成果の概要(英文)：This project proposes the program evolution method based on bit inversion caused by space radiation in order to reinforce spacecraft computer systems against unexpected external incidents (such as sensor trouble or environmental change) and internal incidents (such as program bug). To investigate an effectiveness of the proposed method, this project focuses on the space rover and builds the design method for reinforcing the functions in the computer systems through an evaluation of the evolved programs that controls the rover.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：進化計算 プログラム ビット反転 ローバ

1. 研究開始当初の背景

人工衛星やロケットをはじめ、宇宙探査ローバや国際宇宙ステーションに搭載されるコンピュータシステムは、予期せぬ事態や故障などに依らず、与えられたミッションを達成できる**持続可能性**を持つシステムでなければならない。しかし、宇宙空間では地上よりも多くの宇宙線(放射線を含む)が絶えず飛び交っており、それらがメモリなど半導体デバイスに衝突すると、電荷の変化から 0/1 で記憶されている**情報のビット**が**反転**し、データの破壊や誤作動、最悪の場合はシステムの停止を引き起こす。このようなビット反転は入射エネルギーが半導体デバイスに蓄えられる量を超えたときに生じる。ビット反転の問題は宇宙機のコンピュータシステムを運用する上で避けられず、あらゆる宇宙機の根源的な問題となっているだけでなく、乗組員の安全保護の観点から見てもシステムの信頼性が保障できないために大きな課題となっている(例えば、国際宇宙ステーションに持ち込んだノート PC では約 15 時間に 1 回、スペースシャトルの制御 PC では 1 日あたり 4~7 回のビット反転が起こっている)。特に、この問題は**時間の経過**に伴って宇宙線を受ける率が高まることで深刻になる一方で、コンピュータ数やメモリサイズの増加による**空間の拡大**に伴っても宇宙線を受ける率が高まり、宇宙機の高度化・高性能化の妨げとなっている。

この問題に対し、従来では(1)オンボードコンピュータに金属のシールドを張る、(2)論理回路を多重化する、(3)(ビット反転の影響を受けにくい)配線幅の広い低性能 CPU の利用等による対策がとられてきた。しかし、(1)に関しては衛星の重量が増加し、莫大な燃料(=コスト)がかかり、(2)に関しては回路面積が増加するだけでなく、多重化を制御する部分が故障するとシステムが機能しなくなる。また、(3)に関しては計算能力が現在の CPU に比べ低く、高度な処理に限界がある。

そこで、我々は図 1 に示すように宇宙線による**ビット反転**を悪者と捉えるのではなく、「進化における遺伝子の**突然変異**」と捉え、積極的に利用することで**プログラムを進化**させるオンボードコンピュータ(On-Board Computer: OBC)を考案し、四則演算(加算/減算/乗算/除算)のプログラムをシミュレーション上で進化させることに成功した[1]。これにより、ビット反転を防ぐシールドも論理回路の多重化も必要なく、現在の CPU の利用も可能になった。その後、条件分岐やループ構造を含む複雑なプログラムを扱えるように拡張し、簡単な PIC マイコンでのプログラム進化を可能にする**進化型 OBC**の構築に成功した。



図 1 ビット反転によるプログラム進化

しかし、上記の成果は**1 ビット反転のみ**しか対応できないことに加えて、宇宙でのミッションは予期できないことが多いため、適切に設計した進化型 OBC であっても**外的要因**(センサ故障や環境変化など)及び**内的要因**(プログラムバグなど)により不具合が生じ、実ミッションへの展開には限界がある。

<引用文献>

- [1] Harada, T., Otani, M., Ichikawa, Y., Hattori, K., Sato, H., and Takadama, K.: “Robustness to Bit Inversion in Registers and Acceleration of Program Evolution in On-Board Computer”, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.15, No.8, pp.1175-1185, 2011.

2. 研究の目的

本研究では外的及び内的要因に対応できるように、(1)乱れに耐える頑健性強化、(2)影響を和らげてやりすぎ柔軟性強化、(3)大きく状態を変えつつも目的を達成する強靭性強化、(4)環境変動に対応して変化する可塑性強化の 4 つのシステム強化に取り組み、システム(ここでは進化型 OBC)を強化するとともに、その強化を実現する機能の確立と有効性の検証を目的とする。

3. 研究の方法

上記の目的達成に向け、本研究では**宇宙探査ローバ**に着目し、ローバの制御プログラムを以下の 4 つの機能強化で進化させ、図 2 に示す外的及び内的要因に対応できるローバを構築する。

(1) 頑健性強化: MBU(Multiple-Bit Upset)に頑健なプログラム進化

ビット反転が起こってもプログラムが壊れない**頑健性**を「乱れに耐える頑健性」の 1 つとして捉え、その機能を探究する。具体的には、プログラムサイズを小さく(プログラムをコンパクトに)進化させることで、(プログラムに対して乱れとなる)ビット反転を受ける可能性を下げることで、我々が今まで対応してきた**1 ビット反転**の Single-Bit Upset(SBU)に加え、宇宙で実際に起こる困難な**複数ビット反転**の Multiple-Bit Upset(MBU)に対応する。

- (2) **柔軟性強化：ヒューマンエラーに柔軟なプログラム進化**
 プログラムに内在するヒューマンエラーに対応可能な**柔軟性**を「影響を和らげてやりやすさ柔軟性」の1つとして捉え、その機能を探究する。具体的には、プログラムは完全にヒューマンエラーを取り除けないため、プログラム進化を通して(プログラムバグを含む)不完全なものを修正させることを実現する。
- (3) **強靱性強化：故障に対して強靱なプログラム進化**
 センサ類が故障しても目的を達成するプログラムを維持する**強靱性**を「大きく状態を変えつつも目的を達成する強靱性」の1つとして捉え、その機能を探究する。具体的には、あるセンサが故障したときに、他のセンサを用いて元の目的を達成できるプログラムを進化させる。
- (4) **可塑性強化：目的を変更する可塑的プログラム進化**
 異なる目的を持つプログラムへと進化する**可塑性**を「環境変動に対応して変化する可塑性」の1つとして捉え、その機能を探究する。具体的には、何らかの外的要因によってミッションが達成できないと判断された場合、新しく設定された目的を達成できるようにプログラムを進化させる。

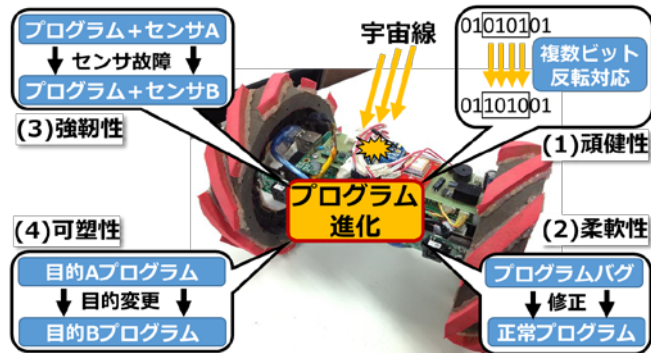


図2 進化型 OBC 搭載宇宙探査ローバ

さらに、上記の4つのシステム強化の機能を評価するために、それらを統合した進化型 OBC を構築し、それを組み込んだローバをロケットに搭載してサブオービタル(大気圏内)打ち上げ実証実験を行う。また、これらの評価を通してシステム強化のための機能有効性の範囲を明確化する。

4. 研究成果

以下、4つに分けた機能強化に対して得られた成果をまとめる。

(1) 頑健性強化：MBU(Multiple-Bit Upset)に頑健なプログラム進化

MBUが発生する状況ではプログラムは常に変化し続けることから、プログラムごとに実行時間は異なり、全てのプログラムの終了まで待つという従来の同期型のプログラム進化では対処できない。そこで、各プログラムを非同期に進化させ、MBUに強い非同期型プログラム進化を考案した。特に、MBUの影響を受ける可能性を減らすためには、元のプログラムの目的は達成しつつ、プログラムサイズを小さく進化させることが大事であるため、そのような機構を組み入れている。

提案手法の有効性を検証するために、MBUを擬似的に再現した環境下でアセンブリ言語を用いた4種類の数値計算プログラムと4種類の論理演算プログラムを進化させる実験を行ったところ、表1に示す結果を得た。具体的には、表1は提案手法と従来手法で目的を達成可能なプログラムの維持割合、および初期プログラムからのプログラムサイズの削減割合を示す。実験の結果、ビット反転が生じるMBU環境において、提案手法が目的を達成可能なプログラムを100%維持しつつ、従来手法よりもプログラムサイズを削減できることに成功した。

表1 非同期型プログラム進化を用いたプログラム維持とプログラムサイズ削減

	従来手法		提案手法	
	維持割合	削減割合	維持割合	削減割合
数値計算 1	100%	26.6%	100%	29.1%
数値計算 2	100%	19.5%	100%	24.7%
数値計算 3	100%	25.2%	100%	27.9%
数値計算 4	100%	5.9%	100%	30.7%
論理演算 1	100%	23.6%	100%	29.3%
論理演算 2	100%	14.7%	100%	14.9%
論理演算 3	100%	7.4%	100%	10.7%
論理演算 4	100%	4.4%	100%	6.0%

(2) 柔軟性強化：ヒューマンエラーに柔軟なプログラム進化

宇宙という未知環境に対応可能なプログラムを構築することは限界があるだけでなく、不完全な情報でのプログラム構築にはヒューマンエラー(プログラムバグ)が内在しやすい。そこで、人間が事前に考慮できなかった不足の事態に対処できるプログラムを自律的に構

築する機構を考案した。具体的には、惑星を調査する宇宙探査ローバがスタックしたときに脱出させるプログラム(人間が事前に構築したプログラム)に着目し、そのプログラムではスタックから脱出できなかったとき(事前に考慮できなかった場合や、プログラムバグが含まれていた場合に相当)、オリジナルのプログラムを進化させる方法を考案した。

提案手法の有効性を検証するために、図3に示すローバのスタビライザの角度を変更することでスタック脱出を試みた。具体的には、スタック脱出行動として図4に示す5個の動作を考え、ローバがスタックした際に、1から順番に動作を実行する。1から4の動作は事前実験を基にスタック脱出に有効な動作を人間がプログラムしたもので、5の動作は提案手法を用いてオンラインでスタック脱出行動を学習して実行する。その結果、1から4の動作で脱出できなかったスタックに対して、人間では思いつかなかったスタビライザの動かし方を進化させ、脱出に成功した。

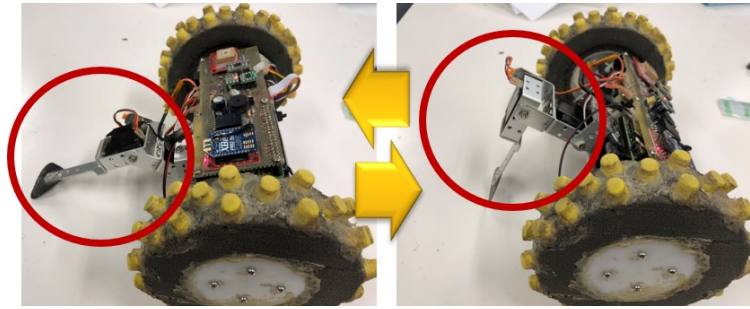


図3 ローバのスタビライザの動作

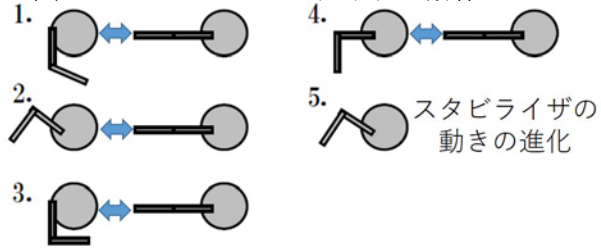


図4 スタビライザの動きの種類

(3) 強靭性強化：故障に対して強靭なプログラム進化

センサ類が故障しても目的を達成可能なプログラムを維持するために、使用予定のセンサ情報を用いて目的を達成する“最適プログラム”を獲得するだけでなく、異なるセンサ情報を用いて目的を達成する“準最適プログラム”を同時に複数獲得する手法の考案した。

提案手法の有効性を示すために、ローバ制御プログラムの最適化を対象とした実験を行った。具体的には、図5左に示すように12個の距離センサと4つの移動制御(前進、後進、右旋回、左旋回)を組み合わせて部屋の壁に沿ってローバを移動させるプログラムを最適化した。その結果、図5右に示す最適プログラム(赤線)と準最適プログラム(青線)の移動経路が得られた。特に、最適プログラムは短い移動距離で部屋の壁に沿って移動できる一方で、準最適プログラムは最適プログラムより移動距離は長いものの、異なるセンサ情報を用いて部屋の壁に沿って移動でき、提案手法はそれらを同時に獲得している。

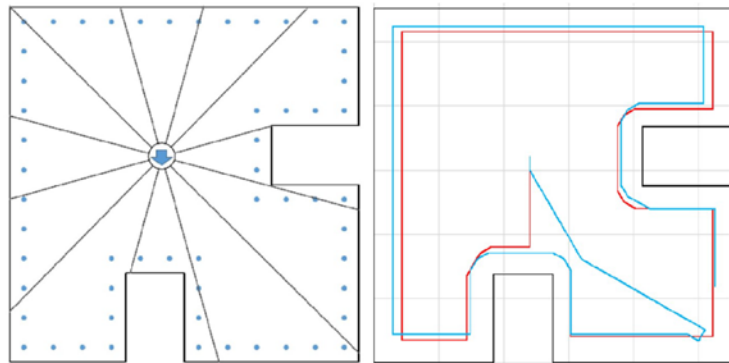


図5 ローバ制御問題

```
(IFLTE F EDG (PROGN2 (IFLTE (IFLTE R R S3
(PROGN2 B (PROGN2 B R))) R S5 (PROGN2 S8 S9))
(PROGN2 MSD S6)) (IFLTE S0 EDG S0 (IFLTE
(IFLTE S6 S1 S3 S5) (PROGN2 S8 S11) S0 L)))
```

(a) 進化後の最適プログラム

```
(IFLTE F EDG (PROGN2 (IFLTE (IFLTE R R S3
(PROGN2 B R)) R S5 (IFLTE F EDG (PROGN2 B
(IFLTE R B (PROGN2 B EDG) S8)) S0)) (PROGN2 S8
S11)) (IFLTE S0 EDG S0 (IFLTE S4 (PROGN2 S8
S11) S0, L)))
```

(b) 進化後の準最適プログラム

図6 ローバ制御プログラムの最適化

また、図6に上記の2つプログラムの内容を示すと、同図(b)に示す準最適プログラムでは、同図(a)に示す最適プログラムで用いられるS1, S6, S9のセンサを用いずに、代わりにS4のセンサを用いることで壁に沿った移動を可能としており、S1, S6, S9のセンサが故障した場合でも目的を達成できるプログラムであることが示された。

(4) 可塑性強化：目的を変更する可塑的プログラム進化

環境変動を含む何らかの外的要因によってミッションが達成できないと判断された場合、他の目的を達成できるようにプログラムを進化させるために、ローバによる月面の探査領域を探索する問題を例に、それぞれ異なる目的を達成するのに適した探査候補領域を複数選定する多目的進化的アルゴリズムを考案した。

提案手法の有効性を示すために、探査領域の傾斜角の小ささ、通信可能日時間の長さ、連続日陰日数の少なさを評価尺度とし、それぞれの尺度に適した候補領域を選定する問題に適用したところ、図7に示す結果を得た。この図において、縦軸と横軸はそれぞれ緯度と経度を表し、各点は最適化によって選定された探査候補領域である。同図の左から傾斜角が最小の領域、通信可能時間最大の領域、連続日陰日数が最少の領域を表している。このように目的に応じた探査領域を複数見出すことで、例えば、傾斜角が最小と思われた領域が環境変動の影響で予想以上の傾斜であり、その領域での探査が不可能となった場合、別の目的(通信可能時間最大の領域での探査や連続日陰日数が最少の領域での探査)に変更することが可能となる。

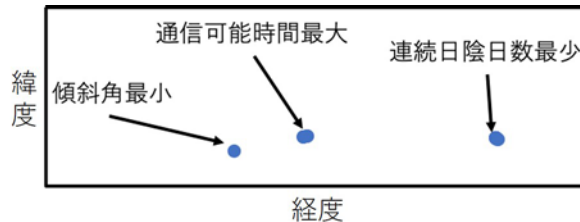


図7 月面における複数探査領域

最後に、図8に示すように、今まで考案してきた4つの機能強化を組み込んだローバをロケットに搭載してサブオービタル(大気圏内)打ち上げ実験を行い、実環境においても4つの機能は問題なく動作していることを検証した。また、A Rocket Launch for International Student Satellites 2018に参加したところ、悪環境におけるコントロールの正確性に関する Accuracy Award, 高度な地上移動技術に関する Technology Comeback Award, ミッションの新規性に関する Mission Award を同時に受賞しただけなく、ローバの完成度(特に、システム強化に関連)と将来性が評価され、大学宇宙工学コンソーシアムから最優秀賞である UNISEC Award を受賞した。



図8 サブオービタル打ち上げ実験

5. 主な発表論文等

以下に、主な雑誌論文、学会発表、図書、産業財産権についてまとめる。なお、研究代表者、研究分担者には下線を引いている。

[雑誌論文] (計7件)

- ① 石井 晴之, 村田 暁紀, 上野 史, 辰巳 嵩豊, 梅内 祐太, 高玉 圭樹, 原田 智広, 鎌田 弘之, 石田 貴行, 福田 盛介, 澤井 秀次郎, 坂井 真一郎: 相似な三角形に基づくクレータマッチングによる SLIM 探査機の自己位置推定とその精度向上, 日本航空宇宙学会, 航空宇宙技術, 査読有, Vol. 17, pp. 69-78, 2018.
DOI: 10.2322/astj.jsass-d-17-00011
- ② 吉田 修武, 原田 智広, ターウォンマット ラック: 木構造類似度を用いる多峰性遺伝的プログラミング, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 54, No. 8, pp. 640-649, 2018.
DOI: 10.9746/sicetr.54.640
- ③ Uwano, F., Tajima, Y., Murata, A., and Takadama, K.: Recovery System Based on Exploration-Biased Genetic Algorithm for Stuck Rover in Planetary Exploration, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol. 29, No. 5, pp. 877-886, 2017.
DOI: 10.20965/jrm.2017.p0877
- ④ Harada, H., and Takadama, K.: Machine-Code Program Evolution by Genetic Programming Using Asynchronous Reference-Based Evaluation through Single-Event Upset in On-Board Computer, Journal of Robotics and Mechatronics (JRM), 査読有, Vol. 29, No. 5, pp. 808-818, 2017.
DOI: 10.20965/jrm.2017.p0808
- ⑤ Hattori, K., Tanabe, N., Kagawa, T., Owaga, Y., Shan, L., Temma, K., Hamaguchi, K., and Takadama, K.: Deployment of Wireless Mesh Network Using RSSI-Based Swarm Robots Passing Narrow Corridor by Movement Function along Walls, Journal Artificial Life and Robotics, 査読有, Vol. 21, No. 4, pp. 434-442, 2016.
DOI: 10.1007/s10015-016-0300-y

- ⑥ 原田 智広：非同期進化的アルゴリズムにおける解の性質と評価時間の関係性による影響の分析，進化計算学会論文誌，査読有，Vol. 7, No. 2, pp. 46-55, 2016.
DOI: 10.11394/tjpnsec.7.46

[学会発表] (計 41 件)

- ① Yoshida, S., Harada, T., Thawonmas, R.: Multimodal Genetic Programming Using Program Similarity Measurement and Its Application to Wall-Following Problem, Genetic and Evolutionary Computation Conference 2019 (GECCO2019), 2019, to appear.
- ② Murano, K., Yoshida, S., Harada, T., Thawonmas, R.: A Study on Multimodal Genetic Programming Introducing Program Simplification, Joint 10th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 19th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2018), pp. 109-114, 2018.
- ③ Harada, T. and Takadama, K.: A Study of Self-Adaptive Semi-Asynchronous Evolutionary Algorithm on Multi-Objective Optimization Problem, Workshop on Parallel and Distributed Evolutionary Inspired Method in Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO2017), pp. 1812-1819, 2017.
- ④ 高玉 圭樹, 原田 智広：宇宙機コンピュータシステムの強化に向けたプログラム創発，第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI2017) pp. 43-48, 2017. (招待講演)
- ⑤ Yoshida, S., Harada, T., Thawonmas, R.: Multimodal Genetic Programming by Using Tree Structure Similarity Clustering, IEEE 10th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA2017), pp. 85-90, 2017.
- ⑥ Harada, T. and Takadama, K.: Performance Comparison of Parallel Asynchronous Multi-Objective Evolutionary Algorithm with Different Asynchrony, IEEE Congress on Evolutionary Computation 2017, pp. 1215-1222, 2017.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

- ① 名称：点群マッチング装置，点群マッチング方法及びプログラム
発明者：高玉 圭樹，石井 晴之，上野 史
権利者：国立大学法人 電気通信大学
種類：特許
番号：特願 2018-106820
出願年：2018
国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

- ① 研究分担者氏名：原田 智弘
ローマ字氏名：Tomohiro Harada
所属研究機関名：立命館大学
部局名：情報理工学部
職名：助教
研究者番号 (8 桁)：40755518

(2) 研究協力者

なし