

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540109

研究課題名(和文)宇宙機オンボードコンピュータのビット反転によるプログラム進化

研究課題名(英文)Program evolution by bit inversion in spacecraft on-board computer

研究代表者

高玉 圭樹(Takadama, Keiki)

電気通信大学・情報理工学(系)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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、宇宙線によるビット反転を利用して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)を構築し、その有効性を検証することを目的とする。その目的に向け、命令語のビット反転に加えてCPU内でのレジスタのビット反転に対処でき、かつ、条件分岐やループ構造を含む複雑なプログラムの進化を可能にする手法を考案し、Microchip Technology社のPIC10に組み込まれている33命令のアセンブリ言語を用いたプログラム進化に成功した。この成果により、「安く」「小さく」「速い」CPUの実現可能性が高まった。

研究成果の概要(英文)：This research developed the on-board computer (OBC) which can evolve programs by making use of the bit inversion occurred by space radiation, and validates its effectiveness through both intensive computer simulations from the software viewpoint and the actual OBC from the hardware viewpoint. For this purpose, this research explored the evolutionary method that can evolve complex programs including the condition branch and the loop structure under the situation where the bit inversion is occurred not only in the commands but also in the registers in CPU. The intensive simulations and experiments have revealed that the proposed evolutionary method succeeded to evolve programs composed of the 33 commands of assembly language in PIC 10 developed by Microchip Technology Inc. This result increases the possibility of employing cheap, small, and fast CPU for many space applications.

研究分野：知能情報学

キーワード：ソフトコンピューティング 進化計算 プログラム進化 ビット反転 Single-Bit Upset

1. 研究開始当初の背景

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、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。この問題に対し、従来では図1(上)に示すように、(1)金属のシールドを張る、(2)論理回路の多重化、(3)配線幅の広い一昔前の低性能 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。

上記の問題解決のため、本研究では図2の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」ととらえ、それを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)を構築する。これらの技術によって、**シールド不要、多重化不要、現在のハイスpek CPU**をそのまま利用可能となり、図1(下)に示すように「安く」「小さく」「速い」CPU の実現が可能となる。

このように、プログラム進化のトリガーとしてビット反転を採用する点は他に類をみない研究であり、**宇宙線に当たれば当たるほどプログラムが進化する**という試みは世界初である。

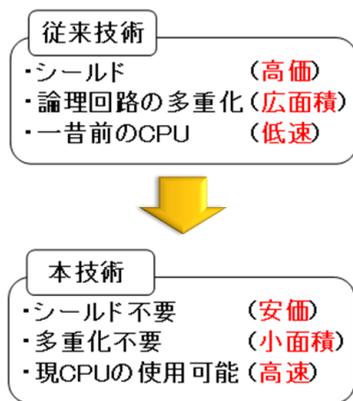


図1 本研究の特徴

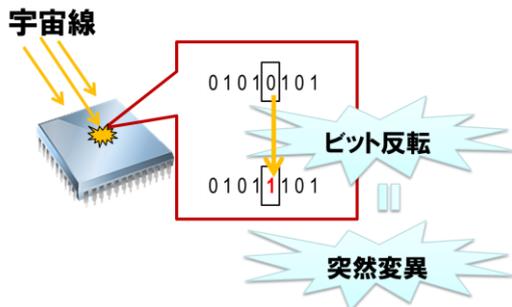


図2 ビット反転によるプログラム進化

2. 研究の目的

本研究は、宇宙線による**ビット反転**を利用して**プログラムを進化**させるオンボードコンピュータ(OBC)の構築とその有効性の検証を目的とする。具体的には、実用的な OBC に向けて、(1)**メモリ(プログラム)**に対するビット反転のみだけでなく、CPU 内の**レジスタ**でのビット反転にも考慮する。次に、(2)四則演算(+,-1,×2,÷2)を用いたプログラムにとどまらず、**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する。

3. 研究の方法

2章で述べた目的を達成するために、本研究では、初年度に命令数が少ない状態(4~6命令語)において、レジスタのビット反転はじめ、条件分岐やループ構造を含むプログラム進化に取り組み、次年度に実応用に向けて命令数を増やし(16命令語)、最終的にはアセンブリ言語(33命令語)でプログラム進化を探究するという方法をとる。

特に、最終的な評価はソフトウェアでのシミュレーション実験だけでなく、ハードウェアの OBC 上でのビット反転の実験を実施し、両側面から評価するというアプローチをとる。これらの実施に向け、本研究では次に示す課題に分けて取り組む。

・[課題1]レジスタに対するビット反転に耐性のあるプログラム進化(4命令語)

プログラムを構成する命令語へのビット反転に加え、プログラムで使われる変数(計算結果など)を保持したレジスタへのビット反転に耐性のある方法を探究する。

・[課題2]条件分岐やループ構造を含むプログラム進化(6命令語)

より複雑なプログラムを扱うために、四則演算とは本質的に異なる条件分岐やループ構造を導入した上で、プログラム進化に取り組む。

・[課題3]レジスタ同士の計算を含むプログラム進化(16命令語)

課題1で用いた1つの計算用レジスタを使用する四則演算に加えて、計算結果用レジスタを2つ使用し、それらを引数として用いる add(足し算), and(論理和), sub(引き算), mul(掛け算)の命令語を追加した上で、プログラム進化に取り組む。

・[課題4]アセンブリ言語でのプログラム進化(33命令語)

本研究のアプローチの実応用可能性を検証するために、Microchip Technology社の PIC10 に組み込まれている12ビット、33命令のアセンブリ言語の命令語を扱えるように拡張し、プログラム進化の可能性を明確化する。

#### 4. 研究成果

##### ・[成果1]レジスタに対するビット反転に耐性のあるプログラム進化(4命令語)

命令語へのビット反転に加え、レジスタへのビット反転に耐性のあるプログラム進化を可能にする手法を考案した。ここで重要なことは、レジスタにはプログラムで使われる変数以外に、プログラムサイズなどのプログラム属性が記憶されており、このサイズにビット反転が起こるとプログラムの終了位置がずれてプログラムを正しく実行できなくなるが、その問題にも対処したことである。

提案手法の有効性を検証するために、一つの変数の四則演算を行う命令語( $inc(+1)$ ,  $dec(-1)$ ,  $shl(\times 2)$ ,  $shr(\div 2)$ )のみで構成されたプログラムを対象とし、初期値0からある目標値Zに近づけるプログラムの進化を試みた。具体的には、レジスタDXを変数とし、 $inc\ DX$  (DXの値に1を足すという命令)などの4種類の命令語を用いてDXの値をZに近づけることを目的とする。例えばZ=126の場合、図3(a)に示すように $inc$ を126回繰り返す単純なプログラムを与えると、図3(b)に示すように9個の命令で計算結果を126にする効率的なプログラムへと進化した(図3の括弧内の数字はDXの値を示している)。これらの進化は、計算結果となるレジスタDXやプログラムサイズ(命令語の合計値)を記憶する他のレジスタにビット反転が起きても実現できている。

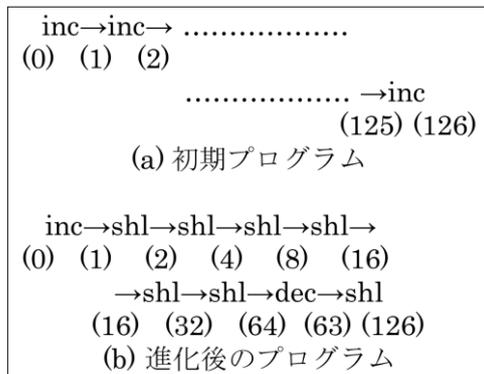


図3 プログラム進化の例

##### ・[成果2]条件分岐やループ構造を含むプログラム進化(6命令語)

複雑なプログラムを扱うために条件分岐やループ構造を組み入れたプログラム進化を可能にする手法に改良した。具体的には、アセンブリ言語で用いられている0判定命令(JNZなど)やループ構造に必要なジャンプ命令(JMPなど)を導入した。

提案手法の有効性を検証するために、四則演算の命令語にJNZとJMPを含んだ6つの命令語から構成されたプログラム進化に取り組んだところ、それらを含むプ

ログラム進化に成功した。

##### ・[成果3]レジスタ同士の計算を含むプログラム進化(16命令語)

課題1で用いた1つの計算用レジスタを使用する四則演算に加えて、計算結果用レジスタを2つ使用し、それらを引数として用いる $add$ (足し算),  $and$ (論理和),  $sub$ (引き算),  $mul$ (掛け算)の命令語を追加した上で、プログラム進化を可能にする手法を考案した。具体的には、表1に示すレジスタCXとDXを用いた16種類の命令語から構成されるプログラム進化を試みた(例えば、 $addCD$ はレジスタCXとレジスタDXを足した値をレジスタCXに代入するという命令語となる)。ここで重要なことは、レジスタ数が増えたことにより、レジスタのビット反転の可能性が高まるため、プログラム進化が難しくなることである。

提案手法の有効性を検証するために、表1に示す命令語を用いて実験したところ、提案手法はレジスタのビット反転が起こる可能性が倍になってもプログラム進化を実現した。

表1 レジスタ同士の計算も含む命令語

命令	処理
$incCX$	$CX \leftarrow CX + 1$
$decCX$	$CX \leftarrow CX - 1$
$shlCX$	$CX \leftarrow CX \times 2$
$shrCX$	$CX \leftarrow CX \div 2$
$movCD$	$CX \leftarrow DX$
$addCD$	$CX \leftarrow CX + DX$
$subCCD$	$CX \leftarrow CX - DX$
$mulCD$	$CX \leftarrow CX \times DX$
命令	処理
$incDX$	$DX \leftarrow DX + 1$
$decDX$	$DX \leftarrow DX - 1$
$shlDX$	$DX \leftarrow DX \times 2$
$shrDX$	$DX \leftarrow DX \div 2$
$movDC$	$DX \leftarrow CX$
$addDC$	$DX \leftarrow DX + CX$
$subDDC$	$DX \leftarrow DX - CX$
$mulDC$	$DX \leftarrow DX \times CX$

##### ・[成果4]アセンブリ言語でのプログラム進化(33命令語)

本アプローチの実応用可能性を検証するために、実際のアセンブリ言語(Microchip Technology社のPIC10)のプログラム進化を可能にする手法に展開した。なお、PIC10における各命令は16個の汎用レジスタと1個のワーキングレジスタと呼ばれる一時レジスタを持ち、それぞれ32ビットの符号なし整数値を持つ。

提案手法の有効性を検証するために、PIC10のアセンブリ言語を用いた実験をしたところ、提案システムは16命令と同

様にプログラム進化に成功した。それだけでなく、提案手法は(a)正常プログラムにビット反転が起こっても元に戻れること、(b)バグを含むプログラムが正常プログラムに変化すること、(c)予期せぬときに、その状況にあわせてプログラムを修正できることが明らかになった。これらの機能は実問題において重要な役割を果たすため、工学的に意義の高い成果と言える。

さらに、ソフトウェアでのシミュレーション実験だけでなく、図4に示すようなハードウェアのOBCを実装し、実機上でのOBCでも同様に結果を確認した。



図4 プログラム進化を可能にするOBC

#### ・得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望

本研究により、シールドを張った特注のCPUが必要なくなり、また多重化のように大きなスペースを必要としないので小型化・軽量化の可能性が高まった。さらに、この成果に伴い、1kg数百万円という打ち上げコストを削減できるだけでなく、低コストで短期間に衛星開発が可能となるため宇宙分野への参入が容易になり、宇宙開発技術の発展に貢献できる。また、現在市販されている高性能なCPUが利用可能になるため、現在よりも高度な宇宙ミッション(高い計算量が必要な画像処理や故障診断など)の実現が可能になる。特に、地上で行っていた多くの処理をオンボードで処理可能となり、リアルタイム性が要求されるミッションにも展開可能となる。

このような提案アプローチは、国内外において他に類をみないものであり、宇宙線に当たれば当たるほどプログラムが進化するという試みは世界初である。

#### 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 Tajima, Y., Nakata, M., Matsushima, H., Sato, H., Hattori, K., and Takadama, K.: New Mathematics and Natural Computation, Evolutionary algorithms for uncertain evaluation functions, 査読有, World Scientific, 2015, 掲載決定。

- ② 中田 雅也, ピエール・ルカ・ランチ, 田島 友祐, 高玉 圭樹: Compact Genetic Algorithm を導入した学習分類子システムによる分類子数の削減, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol. 7, No. 2, pp. 1-16, 2014.

[学会発表] (計 22 件)

- ① Usui, K., Harada, T., Takadama, K., Kamata, H., Fukuda, S., Sawai, S., and Sakai, S.: Adjusting SLIM Spacecraft Location Estimation to Crater Detection for High Precision and Computational Time Reduction, The 30th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS2015), 査読有, 2015. 7. 4-10, 神戸国際会議場(兵庫).
- ② 坂井 真一郎, 澤井 秀次郎, 福田 盛介, 佐藤 英一, 鎌田 弘之, 北菌 幸一, 高玉 圭樹, 能見 公博, 樋口 丈浩, SLIM WG: 小型月着陸技術実証機‘SLIM’の提案概要, 第15回宇宙科学シンポジウム (SSS 2015), 査読無, 2015. 1. 6-7, 宇宙科学研究所(神奈川).
- ③ 澤井 秀次郎, 坂井 真一郎, 福田 盛介, 佐藤 英一, 北菌 幸一, 河野 太郎, 佐伯 孝尚, 樋口 丈浩, 高玉 圭樹, SLIM WG: SLIM システム概要, 第15回宇宙科学シンポジウム (SSS 2015), 査読無, 2015. 1. 6-7, 宇宙科学研究所(神奈川).
- ④ 福田 盛介, 鎌田 弘之, 高玉 圭樹, 野村 出, 滝野 達也, 入江 順也, 永田 心, 原田 智広, 臼居 浩太郎, 坂井 真一郎, 澤井 秀次郎, SLIM WG: SLIM 画像航法の検討, 第15回宇宙科学シンポジウム (SSS 2015), 査読無, 2015. 1. 6-7, 宇宙科学研究所(神奈川).
- ⑤ 臼居 浩太郎, 原田 智広, 高玉 圭樹, 鎌田 弘之, 福田 盛介, 澤井 秀次郎: ピンポイント着陸に向けた SLIM 探査機の自己位置推定とその展開, 日本航空宇宙学会, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 査読有, 2014. 11. 13, 長崎ブリックホール(長崎).
- ⑥ 野村 出, 滝野 達也, 入江 順也, 永田 心, 鎌田 弘之, 高玉 圭樹, 福田 盛介, 澤井 秀次郎, 坂井 真一郎: 主成分分析によるクレータ検出の特性評価と改善について, 日本航空宇宙学会, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 査読有, 2014. 11. 13, 長崎ブリックホール(長崎).
- ⑦ 野村 出, 滝野 達也, 永田 心, 入江 順也, 鎌田 弘之, 高玉 圭樹, 福田 盛介, 澤井 秀次郎, 坂井 真一郎: 主成分分析を用いたクレータ検出法の特性評価に関する研究, 第24回アストロダイナミクスシンポジウム, A-11, 査読無, 2014. 7. 29, 宇宙科学研究所(神奈川).
- ⑧ Nakata, M., Lanzi, P. L., Kovacs, T.

- and Takadama, K.: Complete Action Map or Best Action Map in Accuracy-based Reinforcement Learning Classifier Systems, Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2014), 査読有, pp. 557-564, 2014.7.16, Vancouver (Canada).
- ⑨ Nakata, M., Kovacs, T. and Takadama, K.: A Modified XCS Classifier System for Sequence Labeling, Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2014), 査読有, pp. 565-572, 2014.7.16, Vancouver (Canada).
- ⑩ Harada, T. and Takadama, K.: Asynchronously Evolving Solutions with Excessively Different Crater Detection: Toward Smart Lander for Investigating Moon, Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2014), 査読有, pp. 911-918, 2014.7.15, Vancouver (Canada).
- ⑪ 高玉 圭樹, 原田 智広, 鎌田 弘之, 福田 盛介, 澤井 秀次郎: システム統合におけるシステム間の関係性とその妥当性証: SLIM(Smart Lander for Investigating Moon)における自己位置推定システムを例として, 計測自動制御学会, システム・情報部門, 第7回関係論的システム科学調査研究会, 査読無, 2014.7.5, 同志社びわこリトリートセンター(滋賀).
- ⑫ 原田 智広, 高玉 圭樹: 非同期評価に基づく遺伝的プログラミングによる機械語プログラムの進化, 計測自動制御学会, システム・情報部門, 第7回関係論的システム科学調査研究会, 査読無, 2014.7.5, 同志社びわこリトリートセンター(滋賀).
- ⑬ Takadama, K., Harada, T., Kamata, H., Ozawa, S., Fukuda, S., and Sawai, S.: Evaluating an Integration of Spacecraft Location Estimation with Crater Detection: Toward Smart Lander for Investigating Moon, The 12th International Symposium on Artificial Intelligence, 査読有, 2014.6.18, Montreal (Canada).
- ⑭ Harada, T. and Takadama, K.: Maintaining, Minimizing, and Recovering Machine Language Program through SEU in On-Board Computer, The 12th International Symposium on Artificial Intelligence, 査読有, 2014.6.18, Montreal (Canada).
- ⑮ Harada, T. and Takadama, K.: Asynchronous Evolution by Reference-based Evaluation: Tertiary Parent Selection and its Archive, The 17th European Conference on Genetic Programming (EuroGP 2014), 査読有, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8599, Springer-Verlag, pp. 198-209, 2014.4.23, Granada (Spain).
- ⑯ Takadama, K., Harada, T., Sato, H., and Hattori, K.: What is Needed to Promote an Asynchronous Program Evolution in Genetic Programming?, Learning and Intelligent Optimization Conference (LION 8), 査読有, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8426, Springer-Verlag, pp. 227-241, 2014.2.20, Florida (USA).
- ⑰ 高玉 圭樹, 原田 智広, 臼居 浩太郎, 鎌田 弘之, 小沢 慎治, 福田 盛介, 澤井 秀次郎: SLIM 画像航法の研究開発状況 (その2: クレータマッチングアルゴリズム), 第14回宇宙科学シンポジウム (SSS 2014), 査読無, 2014.1.9-10, 宇宙科学研究所(神奈川).
- ⑱ 原田 智広, 杉本 悠太, 高玉 圭樹, 鎌田 弘之, 小沢 慎治, 福田 盛介, 澤井 秀次郎: SLIMにおける実撮影画像のクレータ検出からの自己位置推定 - クレータ誤検出にロバストな自己位置推定アルゴリズムの評価, 日本航空宇宙学会, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 査読有, 2013.10.11, 米子コンベンションセンター(鳥取).
- ⑲ 中田 雅也, Pier Luca Lanzi, 松島 裕康, 高玉 圭樹: Compact Genetic Algorithmを導入した学習分類子システムによる分類子数の削減, 情報処理学会, 第95回数理解モデル化と問題解決研究発表会, 査読有, 2013.9.26, 熊本県立大学 (熊本).
- ⑳ Nakata, M., Lanzi, P. L., and Takadama, K.: Selection Strategy for XCS with Adaptive Action Mapping, Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2013), 査読有, 2013.7.9, Amsterdam (Holland).
- ㉑ Nakata, M., Lanzi, P. L., and Takadama, K.: Simple Compact Genetic Algorithm for XCS, 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2013), 査読有, 2013.6.22, Cancun (Mexico).
- ㉒ 高玉 圭樹, 原田 智広: Tierra 型オンボードコンピュータにおけるプログラム進化とその可能性, 計測自動制御学会, システム・情報部門, 第6回関係論的システム科学, 査読無, 2013.6.14, 同志社びわこリトリートセンター(滋賀).

## 6. 研究組織

### (1) 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所・教授  
研究者番号: 20345367