

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21300090

研究課題名（和文）

遺伝的プログラミングを用いた確率文法に基づくプログラム進化に関する研究

研究課題名（英文）

Program evolution of genetic programming based on probabilistic grammar

研究代表者

伊庭 斉志（IBA HITOSHI）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：40302773

研究成果の概要（和文）：本研究では、「確率文法に基づくプログラム進化」という考えを提案し、遺伝的プログラミングを拡張した自動プログラミング法を構築した。これは、集団探索ではあるが交叉と突然変異を用いず、プログラムを生成する確率文法の確率分布を推定することによりプログラム進化を行う手法である。さらに、提案する手法を、創造支援、ロボット工学、金融工学、Web インテリジェンスなどの実際的な問題を対象にして検証し、その有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have proposed the “program evolution based on the probabilistic grammar” and constructed the automatic programming method by extending Genetic Programming (GP). In this population-based method, we do not employ genetic operators, such as crossovers or mutations. Instead, we estimate the probabilistic distribution of a probabilistic grammar, according to which a program is generated. We have validated the proposed method by applying to real-world problems, e. g., design automation, robotics, financial engineering, and Web intelligence etc.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2010 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	11,300,000	3,390,000	14,690,000

研究分野：進化計算

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：遺伝的プログラミング、進化計算、対話型進化計算、遺伝的アルゴリズム、EDA アルゴリズム

## 1. 研究開始当初の背景

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, GA) などの進化論的手法は、生物の進化のメ

カニズムをまねてデータ構造を変形、合成、選択し、これにより最適化問題の解法や有益な構造の生成を目指すアプローチである。そ

の1つである遺伝的プログラミング (Genetic Programming, GP) は, GA の遺伝子型を構造的な表現が扱えるように拡張し, プログラム生成や学習, 推論, 概念形成などに応用することを目標としている. GP は多くの分野, ロボティクス, 回路設計, 芸術, デザイン, 金融工学など, さまざまな実際的な領域に応用され, その有用性が確認されている.

しかしながら遺伝的プログラミングにおいては, (1) 探索が必ずしも効率的でない, (2) 探索過程でのプログラム (木構造) が膨大になる, (3) 進化の結果として得られたプログラムの頑強性が高いとは限らない, などの点も指摘されている. これらは, GP の探索過程でプログラム (遺伝子型) の長さが不必要に増大することに原因がある. この現象はブloat (bloat), あるいは構造的複雑さの増大と呼ばれており, GP の効率的な探索を阻害する厄介な問題の1つである. ブloat は, プログラムのイントロン (全体のプログラムの動作に無関係なコード) や冗長部分が成長することに起因すると言われている.

これらの背景をふまえて, 本研究では GP と確率文法モデルを統合し, GP とは異なる新たなメカニズムでプログラム進化を行う手法を提案する.

## 2. 研究の目的

本研究では, 「確率文法に基づくプログラム進化」という考えを提案し, 遺伝的プログラミングを拡張した自動プログラミング法を構築する. より詳細には, 集団探索ではあるが交叉と突然変異を用いず, プログラムを生成する確率文法の確率分布を推定することにより進化を行い, 頑強で効率のよい手法を実現する. 提案手法では確率変数の依存関係を表す確率分布モデルを複数の候補で組み合わせ, プログラム集団の確率分布を推定

することによりプログラム進化を実行する. この手法は以下で述べる従来の最適化アルゴリズム (EDA) や研究代表者らがすでに提案した分布推定型プログラミング (EDP) の考え方を拡張したものである. さらに本研究では, 提案する手法に基づいて構築した進化システムの有効性を, ヒューマノイド・ロボットの動作生成, 金融工学におけるデータマイニングと予測, バイオインフォマティクスにおける遺伝子因果関係の解析などの実際的な問題領域を対象にして検証する.

以上を要するに, GP の理論的基礎研究を遂行するのみならず, 構築した進化システムの実領域での有効性を示すことが本研究の目的である

## 3. 研究の方法

本研究では, 遺伝的プログラミングとは異なる創発のメカニズムである進化的プログラミングという枠組みを提案する. さらに, 提案する進化的プログラミングの有効性を, (1) 探索の効率性, (2) スケーラビリティ, (3) 実領域問題への適用可能性, の3点を重視して検証する.

遺伝的プログラミングには, 空間計算量, プログラム実行時の負荷, 及び進化の停滞現象などの問題があることが明らかになっている. そこで, 提案するプログラム推定法が従来の方法よりも高速に探索可能であり, かつ空間計算量も少ないという点について検証する. 具体的にはベンチマーク問題を利用して比較実験を行い, 探索効率の解析と評価を行う. 提案手法に基づいて空間的/時間的効率を改善することにより, 遺伝的プログラミングにおける進化速度を数倍のオーダーで向上させることを目指す.

さらに, 提案手法による GP システムを構築し, いくつかの問題領域に応用可能なプロ

グラム進化の枠組を実現する。本研究では、提案する手法の有効性を、創造支援、ロボット工学、金融工学、Web インテリジェンスなどの実際的な問題を対象にして検証し、広範な実領域に適用可能な頑強性のある進化システムを実現する。

#### 4. 研究成果

以下の項目について研究を実施した。

- (1) 確率文法に基づく遺伝的プログラミングの基本部分の設計を行った。特に確率文法の分布を効率的に推定するためのプログラム内の変数と部分構造に関する因果関係モデルの開発、及び分布モデル推定方法の効率的実装を実現した。
- (2) 構築したモデル推定アルゴリズムの基本的な探索能力の検証をした。具体的には様々なベンチマーク問題に対して空間/時間計算量を従来の遺伝的プログラミングと比較し、探索能力を解析した。
- (3) 確率文法に基づく遺伝的プログラミングによる進化システムを構築し、工学的応用に適用可能なプログラム進化の枠組を実現した。具体的な応用例として、ヒューマノイド・ロボットの動作生成、金融工学におけるデータマイニングと予測、バイオインフォマティクスにおける遺伝子因果関係の解析において有効性を確認した。

とくに、基本部分の設計のために、プログラム進化に寄与する確率文法モデルを考察して推定手法を実装した。さらに、部分構造推定に適した推定手法を開発し、従来の遺伝的プログラミングと比較して非常に高い探索性能を示すことを実験的に検証した。

実際的な応用として、Web インテリジェンスの代表である WWW 情報検索の課題に対して実装し提案した枠組を検証を行った。そ

の結果本手法による進化計算を用いた検索エンジンを構築し、ランキング関数の評価に用いられている LETOR (Learning To Rank) データセットを用いたベンチマーク比較において先行研究の性能を上回る結果を得ている。この研究は国際的にも高く評価され、進化計算におけるもっとも権威のある国際会議 GECCO2011 (Genetic and Evolutionary Computation Conference 2011) において最優秀論文賞を受賞した。

また、ヒューマノイド・ロボットの動作設計に応用し、提案手法の頑強性と汎用性を検証した。想定するタスクは、与えられた条件を満たすヒューマノイド・ロボットの動作をロボットの安定性（転ばないこと）と制御可能性（過度な負担がサーボにかからないこと）を考慮して設計するというものである。このタスクの遂行には複雑な動力学的数値計算が必要であり、汎用的な解法の構築は難しい。これに対して確率文法の推定による的確なプログラムの生成を試みた。実際の検証実験には、実機ロボット（富士通社製 HOAP-1,2 および enon）とロボットシミュレータ（OpenHRP）を使用した。その結果実機とシミュレーションの両方において、提案する手法の有効性を確認した。

さらに、ENON を用いた実験においては、サービスロボットの応用例として、博物館や商業施設等における案内ロボットの実現を試みた。より詳細には、遺伝的プログラミングを用いて、観覧者の満足度を最大化するようなロボット案内コントローラを作成することを目指した。観覧者が展示物間を自由に動くという状況下で、シミュレータ上で遺伝的プログラミングを用いた案内ロボットの行動学習を行い、単純なコントローラよりも有効なコントローラを作成することができた。また、enon を用いて実機実験を行い、

シミュレータ上だけでなく実機上でも GP によるコントローラが有効であることを示すことができた。実機上で人間の操作を手本とした教師あり学習を行うことで、特定の状況に対して従来の GP よりも有効であるコントローラを作成することができた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Hasegawa, Y., Iba, H.,  
"Latent Variable Model for Estimation of Distribution Algorithm Based on a Probabilistic Context-Free Grammar", IEEE/ACM Transcriptions on Evolutionary Computation, vol.13, pp.858-878, 2009.
- ② Aranha, C., Iba, H.,  
"The Memetic Tree-based Genetic Algorithm and its application to Portfolio Optimization", Memetic Computing, vol.13, pp.139-151, 2009
- ③ Aranha, C., Azevedo, C., Iba, H.,  
"Money in trees: How memes, trees, and isolation can optimize financial portfolios", Information Sciences, Vol.182, pp.184-198, 2011.
- ④ Noman, N., Iba, H.,  
" $\epsilon$  constrained differential evolution for economic dispatch with valve-point effect", International Journal of Bio-inspired Computation, vol.3, pp.346-357, 2011.
- ⑤ Watanabe, A., Iba, H.,  
"Creating singing vocal expressions by means of interactive evolutionary computation", International Journal of Knowledge Engineering and Soft Data Paradigms, vol.3, no.1, pp.40-56, 2011.
- ⑥ 長谷川禎彦, 伊庭斉志,  
"PCFG-LA 混合モデルに基づく分布推定アルゴリズム", 人工知能学会論文誌, vol.24, no.1SP-H, pp.80-91, 2009.
- ⑦ 柳瀬利彦, 長谷川禎彦, 伊庭斉志,  
"確率モデル GP のための二分岐化プロトタイプ木", 人工知能学会論文誌, vol.25, no.2, pp.340-350, 2010.
- ⑧ 丹治信, 伊庭斉志,  
"木構造のランダムサンプリングによる GP の個体生成手法の提案と評価", 電気学会論文誌 C, vol.130, no.5, pp.775-781, 2010.
- ⑨ 渡辺晃生, 伊庭斉志,  
"対話的パラメータ最適化のための集団探索打ち切り型探索アルゴリズムの提案", 進化計算学会論文誌, vol.2, pp.47-62, 2012.

- ⑩ 安藤大地, 伊庭斉志,  
"音楽創作支援 IEC のための買い物フロー型インタフェース", 進化計算学会論文誌, vol.3, pp.73-84, 2012.

[学会発表] (計 18 件)

- ① Yanase, T., Hasegawa, Y., Iba, H.,  
"Binary encoding for prototype tree of probabilistic model building GP", The Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO2009), 2009, July 8 - 12, カナダ・モントリオール.
  - ② Hirabayashi, A., Aranha, C., Iba, H.,  
"Optimization of the trading rule in foreign exchange using genetic algorithm", The Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO2009), 2009, July 8 - 12, カナダ・モントリオール
  - ③ Noman, N., Bollegala, D., Iba, H.,  
"Differential evolution with self adaptive local search", The 13th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2011年7月12-16日, Dublin, Ireland
  - ④ Vatanutanon, J., Noman, N., Iba, H.,  
"Polynomial selection scheme with dynamic parameter estimation in cellular genetic algorithm", 13th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2011年7月12-16日 Dublin, Ireland
  - ⑤ Bollegala, D., Noman, N., Iba, H.,  
"RankDE: learning a ranking function for information retrieval using differential evolution", Proc. of GECCO 2011, pp.1771-1778, 2011 (**GECCO Best paper 受賞**).
  - ⑥ Palafox, L., Iba, H.,  
"On the use of Population Based Incremental Learning to do Reverse Engineering on Gene Regulatory Networks", IEEE Congress on Evolutionary Computation 2012 (CEC2012), 2012年06月10日~2012年06月15日, Australia, Brisbane
  - ⑦ Sato, H., Hasegawa, Y., Bollegala, D., Iba, H.,  
"Probabilistic model building GP with Belief propagation", IEEE Congress on Evolutionary Computation 2012 (CEC2012), 2012年06月10日~2012年06月15日, Australia, Brisbane
- [図書] (計 3 件)
- ① Iba, H., Paul, T.-K., Hasegawa, Y., Applied Genetic Programming and Machine Learning, 349p, CRC Press, 2009.
  - ② Iba, H., Noman, N.,

New Frontiers in Evolutionary Algorithms:  
Theory and Applications, p.304, World  
Scientific Publishing Company, 2011.

③ Iba, H., Aranha, C,

“Practical Applications of Evolutionary  
Computation to Financial Engineering:  
Robust Techniques for Forecasting,  
Trading and Hedging”, Springer-Verlag  
New York Inc., ISBN-10: 3642276474, 2012.

④ 伊庭 齊志,

金融工学と遺伝的アルゴリズム, オーム社,  
216p, 2011.

[その他]

ホームページ等

<http://www.iba.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊庭 齊志 (IBA HITOSHI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教  
授

研究者番号 : 40302773