

令和元年6月20日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00349

研究課題名(和文)分散/多様/事例ベース型進化知能方式とその適用性評価

研究課題名(英文) Distributed/diversified/case-based evolutionary intelligence and its evaluation of applicability to industry and medical apparatus

研究代表者

鶴田 節夫 (Tsuruta, Setsuo)

明治大学・研究・知財戦略機構・研究推進員(客員研究員)

研究者番号：00366395

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：機械学習器等の局所解法を統御する遺伝的アルゴリズムGAに事例(前例：問題+解)を融合した進化計算型知能方式CBGALOを研究開発した。配送ルート最適化、太陽フレア(黒点)による磁気嵐等の災害予測、ひざ骨関節の識別等に適用・汎用化し、有用性を確認した。その後、GAのリスタート概念を導入した上、学習方法に加え学習データもGAで最適化可能とし、ハミング距離を測度とする多様性の導入等により高性能化した。太陽フレアの災害予測精度で世界レベルを凌駕した。査読付の一流国際会議であるIEEEのSMCやSSCI等に8件の論文を成果発表した。更に一流国際ジャーナル等に投稿中/予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1) 事例や学習データの進化活用により、災害予測などクラス不均衡問題の解精度でも学術的に世界最高水準を凌駕した。2) 専門家が作成/修正した部分を事例として破壊せず利用することで、社会的条件が絡む実用の問題も解決可能とした。3) 物流・防災を含む産業、医工学の複雑な最適化問題の解決が可能となり、進化的最適化技術利用の促進につながる。4) 本提案による最適化は、1兆円以上かつ増加傾向にある物流市場の配送コスト低減に寄与する。5) 鉄道の5倍以上の配送用トラックの温室効果ガスCO<sub>2</sub>排出の削減にも貢献する。6) 医工・防災産業を含めると10兆円以上の市場となり、経済効果・社会的意義は更に高い。

研究成果の概要(英文)：Case-based evolutionary intelligence was developed. It is called CBGALO: Case Based (CB) Genetic Algorithm (GA) integrated with Local Optimizer (LO). Local optimizers were such as Support Vector Machine (SVM) or heuristics. The generic applicability to industry and medical apparatus was evaluated.

After evaluation in delivery route scheduling, it was applied to class imbalanced problems such as prediction of solar flare causing serious problems on the human. CBGALO was elaborated to be case based automatically restart-able GA searching both learning features and learning data. Even Deep Learning (DL) cannot search the latter. Further, diversity was maintained by hamming distance to elite individuals. The precision reached over 90%, surpassing the conventional world top level. For automated knee bone segmentation in MR images, CBGALO was applied to find an appropriate cell set by evolutionary multiple classifiers dependent on location. Precision rapidly reached over 65%.

研究分野：情報工学、人工知能

キーワード：遺伝的アルゴリズム 局所解法 産業応用 事例

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

1) 物流・産業、医用から政治経営関連に至るまで、人間・社会の難問の多くがスーパーコンピュータや何万何億台のコンピュータでも解けない組合せ問題である。人間は事例やそれを改良する(漸次進化させる)方法でこれらに対応することが多い。事例と GA など進化知能の融合に関しては過去に幾つかの研究はあった。しかし、小規模の巡回セールスマン問題 TSP (Travelling Salesman Problem) / 配送スケジューリング問題においてしか研究されていなかった。1つ2つの配送拠点を追加した類似問題に対して優良事例の解を修正したものを初期解とした GA (Genetic-Algorithm)の解法など単純な場合でしかなかった<sup>1</sup>。もちろん事例をデータベースとして管理・活用するまでには至ってなかった。個体の多様性保持の考えを取り入れたものに関しては、Xuらが群知能最適化(fish swarm optimization)においてタブー(禁忌)を考慮して、事例検索効率の向上を図っている<sup>2</sup>。しかし、優良形質を示す遺伝子パターンに関連付けたり、最適性との両立を論じたりしたわけでもなかった。また、小規模の解探索に数十分以上かかり性能的にも問題があった。

2) 具体的には、配送スケジューリングに関し、GAの多数かつ多様な最適化パラメータの自動設定の為の強化学習方式を提案してきたが、この研究過程で上記の類似事例活用の着想を得た。これをGAに組合せることにより、世界最高水準の最短経路探索ヒューリスティクス LKH でさえ性能不十分な大規模 TSP の幾つかの問題パターンに対して LKH を凌ぐ対話時間高精度解法を実現していた<sup>3</sup>。情報交換を行う複数計算機で実現することにより最適精度のさらなる向上を確認してきた<sup>4</sup>。一方、より多様な問題に対処するため、GAの個体の多様化状態を表現する多様化パターンを定義し、多様化による理論的な最適化方式を提案していた<sup>5</sup>。また、配送ルート最適化だけでなく災害予知システムを含む IT 産業や病状認識機器等の工学に関しても、上記の事例や多様化に対する GA など AI(人工知能)のニーズを確認していた<sup>6</sup>。

## 2. 研究の目的

1) 進化的手法などの最適化技術の進展は顕著だが、問題パターンにより性能が不十分であった。また、社会的条件の絡みや人間的・文化的多様性の配慮が欠けている場合も多く、実用の障害となっている。我々は、この研究過程で「人類は1からとかランダム(偶然)だけでなく、多種優良事例を漸進的かつ分散並列的に改良し、多様な最適尺度で選択し文化として引継ぎ進歩する」という漸進的だが効率的で多様最適・文化遺伝子的な進化の着想を得た。

2) 本研究は、この着想の下、社会的側面を含む現実の多様な問題に対して、進化論的手法の多角的な最適化性能の改善を図る。このため、事例(=問題+解)を尊重・活用する方向でGAに融合し、漸進的・文化遺伝子的でかつ多様・高効率な進化のメカニズムを汎用化する。配送ルート最適化だけでなく災害予知や病状認識などへの適用効果を確認する。こうして産業・医療等への最適化技術、AI技術の利用を促進する。

## 3. 研究の方法

1) 上記目的達成のため、平成27年度は、前回の科研費で研究開発した配送スケジュール関係のシステムやプログラムを修正/拡張し他の産業や医療への適用を考えながらAI(人工知能)型進化知能方式として汎用化・一般化した。こうして以下の方式提案と基本部分の開発を行った。配送スケジュール以外に災害予測および病状識別などに関し、事例などの多様最適パターンを抽出し、進化操作や淘汰・選択に活用する多様最適進化計算方式に、サポートベクターマシン SVM や位置依存型局所学習器 LDIC(Location Dependent Image Classifier)などの基本的に線形・局所型の学習器/近似最適解法を融合した。

2) 平成28年以降は、産業、医用、特に太陽フレア(黒点)による磁気嵐などの災害予測への適用を中心に、上記提案方式の試作と評価・改良を行った。

## 4. 研究成果

1) 本研究課題では、産業・医用へのより広範囲の適用を目的に事例とGAを融合するCBGA(Case-Based Genetic-Algorithm)を研究した。配送ルート最適化で有用性を確認したメカニズムを再構成し、CBGALO(Case-Based Genetic-Algorithm integrated Local Optimizer)として汎用化・高性能化した。汎用化には、災害予測などビッグデータ解析や不均衡クラス問題(class imbalanced problem)にも適用可能なように、局所解法には、最近傍挿入法 NI などの近似解法以外に統計的な機械学習器が組み込めるようにした。サポートベクターマシン SVM、ニューラルネット NN や正規分布を用いた局所依存型画像識別器 LDIC 等の基本的には線形の機械学習器である。高性能化には、GAの再実行(リスタート)メカニズムなどを導入した。即ち局所解法(Local Optimizer)を統御(integrate)する遺伝的アルゴリズム GA(Genetic-Algorithm)に事例(データ)ベース CB(Case Base)を融合し、その再実行を繰り返して解の精度や求解効率・速度を上げた。事例(Case)は問題+解で一種の前例である。

2) 平成27年度は、太陽フレア(黒点)による磁気嵐等の災害予測やひざ骨関節の識別等へ適用しながら、この方式をCBGALOに汎用化・具体化した。28年にはGAのリスタート概念を新規導入したCBRS GALO(CBReStart GALO)を提案した。29年度はCBRS GALOを洗練化し、学習方法(特徴パラメータ)だけでなく、これにフィットした学習データ(入力データ)をもGAで最適化可能とするCBRstrtdGs GALO(CBRestart Gooddatasearch GALO)を開発した。平成30

年度は、特に最優良事例の解との Hamming 距離を測度とする diversity(多様性)の導入などにより更に改良した。太陽フレアの災害予測精度において、後述の通り、3 クラス中 2 クラスで世界レベルを凌駕した。

研究結果は医療・災害予知・物流への応用で評価した。平成 27 年(2015 年)度から 29 年前半迄の成果は、査読付の一流国際会議である IEEE の SMC2015・SMC 2016 等に論文 5 件、SMC2017 等に論文 2 件を発表した。29 年後半以降の成果は IEEE の SSCI2018 に論文発表し、30 年後半の成果は SSCI2019 に投稿準備中である。配送ルート最適化に適用し、有用性を確認し国際会議などに発表した成果は Springer Journal など一流国際ジャーナルに投稿中である。

3) 図 1 に本課題研究の成果である CBGALO のシステム構成を示す。これは GA 部分を反復実行(リスタート)可能にしたもので CBRSGALO と呼ぶ。以下に、このシステムを、太陽フレアの災害予測への適用を例に説明する。

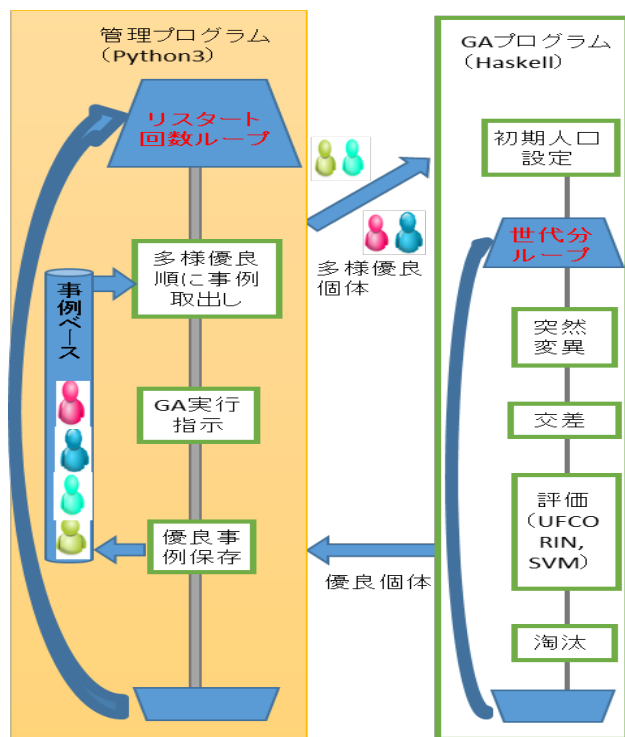


図 1 の右側の箱は GA プログラムを示す。太陽画像入力とウェーブレット変換など画像処理用のモジュールである UFCORIN を持つ。UFCORIN は個体の評価・(進化)改良のための SVM(サポートベクターマシン)などの局所学習器・推論器を持つ。これら右側の GA プログラムの部分は、CBGALO の核あるいは土台であり信頼性が要求される。また、各個体の学習・評価は UFCORIN や SVM により行うが、処理に時間がかかる。そこで並列分散処理を可能にしている。従って GA プログラムは、論理的信頼性が高い上、分散並列処理の表現が容易な関数型言語 Haskell で記述した。優良事例の解を初期設定された後、指定世代数だけ突然変異、交差、評価、評価結果に基づく淘汰を繰り返して実行する。終了時には優良個体を左側の管理プログラムに渡す。各個体の評価にはその予測精度を計算する。これは太陽フレアの災害予測において学術的に適切と認められた後述の TSS 値により行う。

図 1. CBGALO(リスタート型)のシステム構成

図 1 の左側の箱に示す通り、GA はリスタート(再実行)や事例としての知識/データを管理するためのプログラムによって制御される。この(GA 実行/事例)管理プログラムは外側にあり、CBGALO の柔軟性・拡張性の基となる。従って、比較的平易で記述/変更効率の良い計算機言語(Python3)を用いた。このプログラムは GA の(再)実行時に、(特徴量や学習用データに関する)優良事例を検索し、その解を初期個体として設定する。優良事例は手動設定も自動設定も可能である。優良事例を自動選択・設定できるように、GA プログラムはその最終世代の結果を(GA 再実行/事例)管理プログラムに渡す。これを管理プログラムが事例ベースに保存する。多様性は GA の突然変異率などによって制御し、対応する遺伝子の違い即ちハミング距離によって計測する。(GA 実行/事例)管理プログラムは、流れとして、事例ベースから、問題の類似度が高く、評価値が高く多様性の大きい解を持つ優良事例を取り出す。取り出した事例の解を、GA の初期個体に設定し、GA プログラムにその(再)実行を指示する。実行が終了すれば、最終世代の結果を事例として保存し、最初に戻る。

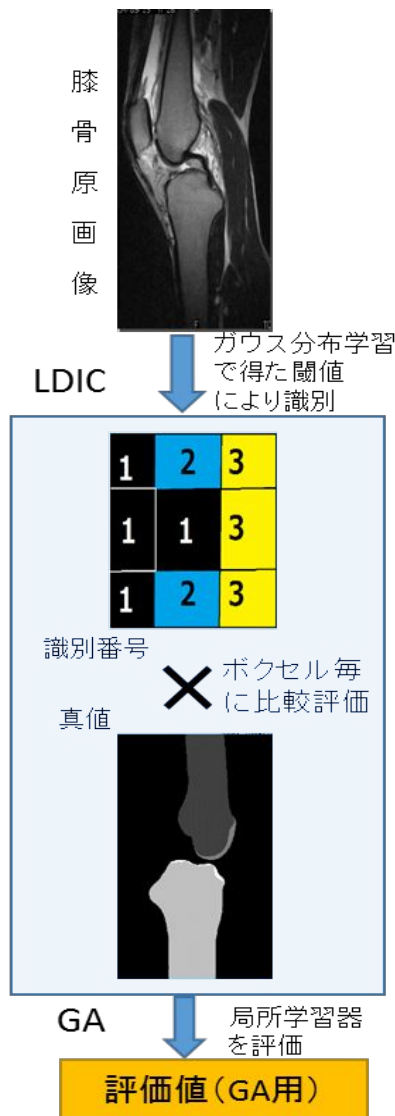
4) 最新(平成 29 年以降)の CBGALO (CBRsGcmbGA) では事例ベース中で解の評価値が最大の最優良事例の解との Hamming 距離を測度とする diversity(多様性)の導入などにより更に改良した。

表 1. CBGALO と関連研究との予測精度比較結果

TSS	X	≥ M	≥ C
Song et al., 2009	0.693	0.621	0.650
Bloomfield et al., 2012	0.740	0.539	0.456
Bobra & Couvidat, 2014	-	0.761	-
UFCORIN, 2015	0.692	0.470	0.566
CBGALO (CBRsGcmbGA)	0.912	0.599	0.662

表 1 に示したとおり、太陽フレアの災害予測精度において 3 クラス中 2 クラス(X クラスと ≥C クラス)で世界レベル(Bloomfield らや Song ら)を凌駕した。すなわち、TSS 値で X クラスにおいて 0.912 で、Bloomfield らの 0.740 を凌駕した。≥C クラスでは 0.662 で Song らの 0.650 を凌駕した。≥M クラス

でも Bloomfield らや本研究開始前の UFCORIN (GA や CB が統合されていない)を凌駕した。



ここで、TSS (True Skill Statistics)は、Bloomfield らの提唱する<sup>7</sup>予測精度の評価尺度で

$$TSS = \frac{TP}{TP + FN} - \frac{FP}{FP + TN}$$

**TP (true positive: 真陽性、真の正予測数)、**  
**TN (true negative: 真陰性、真の誤予測数)、**  
**FP (false positive: 第一種過誤 / 偽陽性数)、**  
**FN (false negative: 第二種過誤 / 偽陰性)、** また、  
 Xクラスは直近のX線フラックスの強度が  $10^{-4} \text{ W/m}^2$  以上  
 Mクラスは直近のX線フラックスの強度が  $10^{-5} \text{ W/m}^2$  以上  
 $10^{-4} \text{ W/m}^2$  未満  
 CクラスはX線フラックスの強度が  $10^{-6} \text{ W/m}^2$  以上  $10^{-5} \text{ W/m}^2$  未満  
 $\text{W/m}^2$  は1平方メートル中の宇宙放射線(X線)フラックスの強度を表す単位。

5) 医用では MR(Magnetic Resonance)画像からのひざ骨識別において、まず、複数の(局所/線形学習型)位置依存画像分類器 LDIC (Location Dependent Image Classifier)をGAと融合した。

すなわち、図2に示した通り:

膝骨 MR 画像の識別・評価

図3のグラフのように、上記の局所分類器 LDIC は、三次元の大量ビッグデータから骨の部位などの閾値を統計的にガウス分布(正規分布)として学習する。

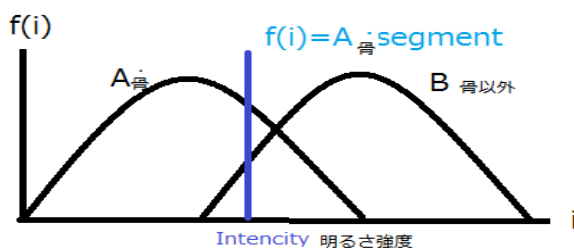
位置依存の局所識別子 LDIC は、この閾値を利用して膝骨 MR 画像のポクセルにラベル(骨の部位)を付与する。

ポクセル毎に正解のラベル値と比較して「評価値」を決める。

GA による選択・改良

評価値の良い個体、すなわち良い識別子(分類器、学習器)が得られる特徴量ベクトルをGAで選択することにより識別子(局所学習器)を評価・改良する。

図2. 医用局所学習器とGAの融合



これをベースに CBGALO(リスタート型: CBRSGALO)を適用して事例ベースを融合、局所学習識別器 LDIC のひざ骨識別能力を2~3日で進化させ高精度化した。

図3. ガウス分布の学習によるラベル付け

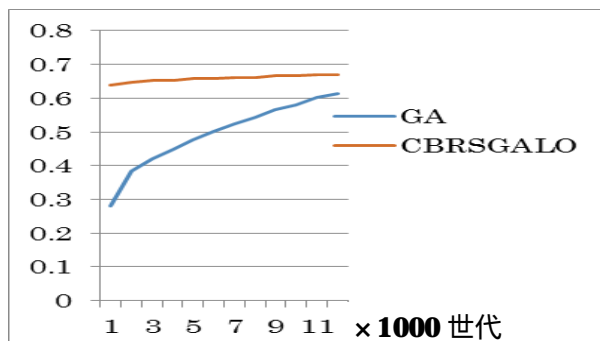


図4のCBGALOの医用効果が示す通り、局所識別器 LDIC だけでは30%程度の精度であるのに対し、図2の方法でGAを融合すると12000世代、約10日で60%以上の精度に達した。さらに、CB(事例ベース)を融合する本提案のCBGALO(リスタート型: CBRSGALO)では、迅速に3000世代、3日弱(人間の専門家は5日かけて実用に耐えるものとする)で65%以上の精度に達する比較的良好な結果を得た。

図4. CBGALO(リスタート型)の医用での効果

6) 物流すなわち配送スケジュールリングへの適用では、局所学習器だけではなく、より一般的にヒューリスティクスも局所解法・局所最適化器(LO: LocalOptimizer)として汎化した。これを評価した研究結果には以下の表 2 がある。表 2 から、事例を活用する CBGALO の適用により実時間で、従来方式より更に最適度の高い解が類似問題に対して得られることが分かる。

表 2. 実時間(3 秒)最悪誤差率(%)の比較

TSP ライブラリの問題	p654		fl1400		fl1577	
類似問題(拠点数)	634	624	1350	1300	1477	1477
LKH 手法	4.91	6.79	0.92	0.71	5.41	5.12
CBNI 手法	1.99	2.42	0.25	0.13	1.67	1.33
CBHOGA	0.68	1.23	0.19	0.10	0.61	0.47

配送スケジュールリング(配送ルート最適化)への適用では、人間が修正した実用の事例を活用して進化させることにより、表 2 の様な実時間での性能(最短巡回距離からの誤差率)だけでなく、定式化できない人間的・社会的条件も含めた最適化が容易になった。局所解法として挿入前の順序を変えない最近傍挿入法 NI を局所解法とする CBGALO (詳細には、配送ルート最適化向けの CBHOGA :

Case-based Human-Oriented Genetic Algorithm) により、これが可能となることを確認し、論文にまとめてきた。国際学術論文(国際ジャーナル)として投稿した。

7) 結論として、以上の成果を IEEE など一流国際学術会議の 8 編の査読付き論文として発表した。さらに、下記着想概念を含めて、まとめ、Springer-Nature 誌などの一流国際ジャーナルに投稿した。

DL (深層学習)は基本的には線形学習/局所推論器である NN(ニューラルネット)を拡張し、急増した計算機の演算能力の活用により認識精度などを飛躍的に向上させた。それに伴い、DL は急速に複雑化しており、これ以上の性能向上のための制御が難しくなっている。DL とは違い本研究課題の方式は、線形学習/局所推論器の外側に進化型大局学習器 GA を、さらに外側には飛躍的に増大しているストレージやメモリを有効活用する CB(事例ベース)を階層的にモジュール化し統合するものである。この階層モジュール化は柔軟性・拡張性の効果を持つことが、本研究課題で見えてきた。これらの着想は、物流つまり配送スケジュールリングへの適用結果を上記国際ジャーナル投稿のためにまとめながら明確にした。

今後、これら階層モジュール化の柔軟性・拡張性の効果をさらに活用するための具体的方法を研究提案・評価する。この具体化提案・評価は 2020 年度からの科研費の研究課題に申請するなど、より一層の研究展開・深度化を図る予定である。

#### < 引用文献 >

S. J. Louis et al.: Case injected genetic algorithms for traveling salesman problems”, *Information Science*, ELSEVIER, vol. 122, issues 2–4, 2000, pp. 201–225.

Longqin Xu, shuangyin liu: Case Retrieval Strategies of Tabu based Artificial Fish Swarm Algorithm, CINC2010, 2010, pp. 365–3694.

Takashi Kawabe, Takaaki Motomura, Masaki Suzuki, Yukiko Yamamoto, Yoshitaka Sakurai, Rainer Knauf, Setsuo Tsuruta : A Case Based Approach for an Intelligent Route Optimization Technology. SITIS 2014: Nov. 2014, 141-146

Masaki Suzuki, Taro Matsumaru, Setsuo Tsuruta, Rainer Knauf, Takaaki Motomura, Yoshitaka Sakurai: Distributed GAs with Case-Based Initial Populations for Real-Time Solution of Combinatorial Problems, IEEE Symposium on Evolving and Autonomous Learning Systems (EALS) in IEEE Symposium Series on Computational Intelligence SSCI2014, Dec. 2014, Page(s): 95 – 101

Masaki Suzuki, Setsuo Tsuruta, Rainer Knauf: Structural diversity for genetic algorithms and its use for creating individuals. IEEE Congress on Evolutionary Computation 2013: 783-788.

S. Kobashi, K. Kondo and Y. Hata: "Computer-Aided Diagnosis of Intracranial Aneurysms in MRA Images with Case-Based Reasoning", IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.E89-D, No.1, Jan. 2006, pp.340-350

**D.S. Bloomfield, P.A. Higgins, R.J. McAteer, P.T. Gallagher, “Toward reliable benchmarking of solar flare forecasting methods”, The Astrophysical Journal Letters, 747 (2), L41, 2012.**

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 8 件 )

Setsuo Tsuruta, Syoji Kobashi, Yoshitaka Sakurai, Rainer Knauf, Andrea Kutics et al: A SVM integrated Case Based Learning Data GA for Solar Flare Prediction, Proc. of the 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2018), Bengaluru, India, pp.2131-2138, (2018.11). DOI:10.1109/SSCI.2018.8628778 査読有

Yoshihiko Kubota, Setsuo Tsuruta, Yoshitaka Sakurai, Syoji Kobashi, Rainer Knauf: Evaluation of a Classification Method for MR Image Segmentation. IEEE SMC2017. Banf, CA, Oct. 5-8 査読有

Setsuo Tsuruta, Yoshitaka Sakurai, et al: Extending the SVM Integration with Case Based

ReStarting GA to Predict Solar Flare. IEEE SMC2017. Banf, CA, Oct. 5-8, 査読有  
Setsuo Tsuruta; Syoji Kobashi; et al: Solar flare prediction by SVM integrated GA. IEEE CEC 2016, Pages: 4127 - 4134, DOI: 10.1109/CEC.2016.7744314, Referenced in: IEEE Conference Publications 査読有  
Setsuo Tsuruta; Syoji Kobashi, et al; SVM integrated case based restarting GA for further improving solar flare prediction. 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). 2016, Pages: 004716 - 004723, DOI: 10.1109/SMC.2016.7844976 Referenced in: IEEE Conference Publications 査読有  
Setsuo Tsuruta; Syoji Kobashi; Yoshitaka Sakurai, et al; An Efficient Classification Method for Knee MR Image Segmentation. 12th SITIS, pp.36-41, DOI:10.1109 /SITIS.2016.15, IEEE Conference Publications 査読有  
Setsuo Tsuruta, Syoji Kobashi, et al; Improvement of Sun Flare Prediction by SVM Integrated GA. 11th SITIS, 2015, pp. 719-724,DOI:10.1109/SITIS.2015.37, IEEE Conference Publications 査読有  
Takashi Kawabe, Setsuo Tsuruta, Yoshitaka Sakurai, et al: Case based human oriented delivery route optimization. IEEE CEC 2015: 2368-2375. 査読有

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：櫻井 義尚

ローマ字氏名：SAKURAI YOSHITAKA

所属研究機関名：明治大学

部局名：総合数理学部

職名：専任准教授

研究者番号 ( **8** 桁 ): 30408653

研究分担者氏名：八槿 博史

ローマ字氏名：YAMAKI HIROFUMI

所属研究機関名：東京電機大学

部局名：システムデザイン工学部

職名：教授

研究者番号 ( **8** 桁 ): 10322166

研究分担者氏名：川邊 孝

ローマ字氏名：KAWABE TAKASHI

所属研究機関名：東京電機大学

部局名：システムデザイン工学部

職名：教授

研究者番号 ( **8** 桁 ): **40339081**

研究分担者氏名：小橋 昌司

ローマ字氏名：KOBASHI SYOUJI

所属研究機関名：兵庫県立大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号 ( **8** 桁 ): 00332966