

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23500288

研究課題名(和文) 配送ルートを最適化する遺伝的アルゴリズムのパラメータ自動制御

研究課題名(英文) Parameter control of genetic algorithm for delivery route optimization

研究代表者

鶴田 節夫 (Setsuo, Tsuruta)

東京電機大学・情報環境学部・教授

研究者番号：00366395

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：多点探索特性を利用して長期的に得られる報酬を最大化するのが特徴の強化学習GA(GA：遺伝的アルゴリズム)を提案した。それでも、パラメータが多すぎ完全な解決にいたらなかった。このため、最適性だけでなく多様性も考慮して並列分散処理を行う自律協調GA方式および事例とGAを結合し且つ遺伝子操作を順路保存の容易な最近挿入型に限定して文化遺伝子的な仕組みを実現する事例ベース人間中心GA方式を提案した。これらにより、世界トップの効率を誇るLKHでさえ弱い問題に対しても、要求する最適性・応答性が確保できた。また、順路の大幅な変更は好まない等の人間的・文化的要素も考慮した実用的な配送ルート最適化を可能とした。

研究成果の概要(英文)：To control huge amount of parameters in Genetic Algorithm (GA) for delivery route optimization, GA introducing the reinforcement learning was proposed. This maximizes the long-range rewards using GA's characteristic of multiple points for search. However, the performance was not sufficient. Thus cases with local but human orient adjustment heuristics NI (Nearest Insertion) were introduced into GA, due to the insight that real problems are similar to former problems. Solutions can be derived from similar former solutions, considering human oriented factors (e.g. inheriting most of delivery routes). Experimental evaluation revealed remarkable results. Even though the fastest effective TSP solving method LKH needed more than 3 seconds, the proposed method yielded results within 3% of the worst error rate and in less than 3 seconds. Furthermore, the proposed method can inherit many delivery route orders, while LKH tends to make reverse order of routes in delivery route optimization.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：遺伝的アルゴリズム 強化学習 自律協調 事例ベース 人間中心 GA 文化遺伝子

1. 研究開始当初の背景

(1) 経済のグローバル化により、製造業、卸売業、小売業では、今まで以上に物流の効率化が要求される。物流の効率化は燃料や人員・労働コストから輸送時間の削減など経済面だけではなく、環境面から見て排気ガスの削減にも繋がる重要な問題である。これらの問題を解決するには配送ルート(巡回順路)の最適化が必要となる。巡回順路の最適化は、距離の最短化だけに関するものなら巡回セールスマン問題(Traveling Salesman Problems, TSP)としてモデル化できる。TSPの規模は巡回する都市数あるいは拠点数で決まる。例えば、地方では最大、数日かけていくつかの村落内の各拠点を最小1箇所1分程度で回るため、例えば、3日、25時間(1500分)かけて巡回すると1500拠点程度のTSPとなる。TSPは計算複雑性理論において、NP困難と呼ばれる問題やNP完全問題クラスに属する組み合わせ最適化問題である。n都市のTSPを解くためにはn!オーダー(15都市でも15の階乗だから1兆以上)の組み合わせを処理する必要がある、組合せ爆発を引き起こす。このためTSPの最適化つまり距離最短の巡回順路を求めるのさえ難しく、近似解しか得られない。しかも、定式化が困難な人間的/社会的/文化的な条件がからむため、現場での実用には、TSPの求解結果を人間が確認する必要がある。すなわち、距離だけを考えた最適解(近似解)が実用できるかを人間のユーザが即座にチェックし、時には手動修正をしたり、代替案を選択したりしなければならない。つまり実用上、TSPの解法には人間の介入をスムーズに行うための対話(リアルタイム)応答性が要求される。解の精度については、配送領域の専門家によって生成された近似解(巡回順路)は、数学上の最適解(最短順路)と比較すると、3%程度の誤差を含む事はあるが、それ以上に精度の悪い解を出して、実用上の問題を引き起こすようなことはない。従来の近似TSP解法は、この点に問題がある。つまり、厳密解が必要なわけではないが、3%程度以下の誤差の範囲内での解が必要になる。実際の配送などの利用現場では、誤差の大きい近似解を出力するとユーザからの信頼を失い、実用性を失う。従来の世界最高速・最高精度の解法であるLKHでさえ、実時間(たとえば3秒)内に専門家レベルである3%程度以下の誤差の範囲内での解が得られない、問題もある。

(2) さて実用では最適といっても距離最短あるいは巡回時間最少など、数値化容易なものだけではなく、定式化が困難さらには明示化すら憚られる人間的/社会的/文化的な条件がからむ。最適化手法の配送スケジューリングへの応用を促進するには、このような条件に対するユーザの手動修正は最小限に

とどめるべきである。配送業者にとって親しみやすい、慣れた/安全な順路をシステムが最初から提供することが望ましい。頻繁に順路を変更することは問題を引き起こしやすく、そのためシステムが提供する順路は、大幅な配送距離増加を招く場合などを除いて可能な限り以前に提供した順路を継承している必要がある。従って配送スケジューリング向けのTSPを解くにあたっては、以前に使用された巡回順路を継承することが非常に重要である。また実際の配送でも訪問や配達する拠点は毎回10~20%程度の変化しかない。

2. 研究の目的

本研究では、数十か所から千数百か所を巡回する中大規模であるが、人間的・文化的な配慮も含めるため実用向けに変形した巡回セールスマン問題の最適化を扱う。このため、進化的手法などの先端的な最適化手法の産業応用への障害となっている「最適パラメータ設定の困難」を解決する。最終的には、これらを通して配送ルートの最適化を行う遺伝的アルゴリズム(GA)の最適化性能の改善を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

上記目的達成のため、強化学習によるパラメータ制御の自動学習問題パターンの判別による最適方策(パラメータ制御)の選択クラウド、グリッドなどによる分散・並列型の進化パラメータ自動設定システムなどパラメータ自動制御システム技術の開発をおこなう。もちろん、これらの方法の開発・検証中にその限界を打破するさらに効果的な方法が見つかればこれを探求する。また当然ながら、比較すべき従来のGAや進化知能技術、特にTSPの解法として世界で最も効率の良いLKHとその性能限界や問題点に関し詳細に調査/実験評価する。具体的には、まず提案しようとする強化学習を用いたGAのパラメータ制御手法の様々な設定における効果を検証する。この結果を基にリアルタイム最適化に適したパラメータ制御を確立する。次に、配送ルート最適化問題パターンの解析を行い、各問題パターンに適したパラメータ制御ルールを獲得する事により、効率的な探索を実現する。一方、パラメータ制御ルールの獲得・検証に必要な実験データをクラウドなど複数コンピュータにより効率的に収集・分析するための自律協調方式の有用性を実験検証する。検証の結果これらの限界を打破する効果的な方法が見つかれば、試作・実験によりその効果を検証する。

4. 研究成果

(1) 平成 23 年度は、強化学習による遺伝的アルゴリズムのパラメータ制御の自動学習手法を提案し、その論理的解析を行った。従来の GA や進化知能技術、特に TSP の解法として世界で最も効率の良い LKH の問題点に関し調査した。パラメータ設定手法は、パラメータを固定するパラメータ調律と動的に値を変える事により効率的な探索が可能になるパラメータ制御の 2 つに分類される。後者の中でも特に適応的手法は実行時に適応的にパラメータを設定するため、制御ルールを自動で獲得する事ができる。しかし、これまでに提案されている手法は、良い個体を生成した探索オペレータの選択確率を上げていくといった方法で、即時的な探索結果だけをパラメータ制御に反映させるため、近視眼的な最適化になる可能性がある。また、直接評価するための指標が必要なため、GA のパラメータ制御としては、交叉や突然変異など探索点の生成に直接関係するパラメータにし適用できない。そこで、長期的に得られる報酬を最大化することを目的として方策を学習するアルゴリズム、強化学習を用いる事により長期的に最適なパラメータ制御の方策を適応的に獲得できる手法を提案した。

(2) 平成 24 年度は探索オペレータの効率を考慮した上で、多点探索特性を利用して長期的に得られる報酬を最大化する強化学習型の GA 方式を明確化した。また、この強化学習 GA などに用いる各個体の進化・多様化やその停滞の状態を数理的に表現するためにエントロピーを定義した。これにより、GA の進化に必要な各個体の多様性維持の計測方法に関し理論的に整理した。以上、2 件の研究成果を IEEE などの国際講演論文にした。

(3) 平成 25 年度は高効率探索オペレータ下で長期的報酬を最大化する強化学習型 GA 方式などに用いることを目的に個体の進化・多様化状態を数理表現するエントロピー定義を改良した。これにより、GA の進化に必要な個体の多様性の効率的計測を可能にした。問題パターンの判別による最適方策の分析の結果、問題パターンのドラスティックな変更は、実用上、無視して良いことに気づき、既作成の実用可能あるいは高精度な配送ルート事例として活用することにより最適な解を対話応答時間内に探索できる進化型知能化方式や CBGA (Case Based GA) の提案に至った。実験評価により、その効果を確認した。

分散化に関しては、この CBGA を複数の分散コンピュータ上で実現した場合をシミュレーション評価し、この知能化方式の分散並列性の効果を確認した。すなわち、表 1 のとおり単純な並列化の倍程度の精度を達成できた。例えば表 1 で、Fitness(適応度)と Diversity(多様性)に関する情報交換・活用ル

ルを入れた場合と入れない場合で、2 台の CPU を用いた時はそれぞれ 5.28%、1.91%、10 台の CPU を用いた時は、それぞれ 3.56%、1.87% の結果を得た。並列性だけでは CPU 台数が 2 台から 10 台と 5 倍に増えても精度は $5.28 \div 3.56$ と 1.5 倍にも達しないが、 $5.28 \div 1.87$ とほぼ 3 倍に達し、対話可能な応答時間の 3 秒以内に目標とする 3% 以下の誤差の解を得ることができた。こうして、多数の研究成果を IEEE などの一流国際学会に講演論文として発表した。

表 1. 事例ベース分散 GA の分散方式 / CPU 数と精度

TSP: u1432	The worst error rate by optimization in 3 seconds [%]			
	1Br-GA	2Br-GA	5Br-GA	10Br-GA
1 individual (non case based)	5.77%	5.28%	4.82%	3.56%
Fitness (good fitness case base)	2.30%	2.28%	2.24%	2.18%
fitness & diversity case base	1.93%	1.91%	1.89%	1.87%

(4) 配送先の配置など問題パターンは現場によって異なる。高度に洗練された先端的最適化手法は却ってこれらに柔軟に対応できない。TSPLIB による距離最小の最適化性能の評価でも、世界トップの LKH でさえ弱い問題パターンがある。この解決のため多点探索特性を利用して長期的に得られる報酬を最大化する強化学習型の遺伝的アルゴリズム (GA) を明確化してきた。また、これらの GA の各個体の多様性や進化・停滞状態を数理的に表現するためにエントロピーを定義し、GA の進化に必要な各個体の多様性の計測方法を理論的に整理してきた。しかしパラメータが多過ぎるなど制御に限界があり専門家レベルの精度に達しなかった。

一方、配送毎の巡回先の変動は 1 - 2 割程度以下のため、前例・事例の活用により探索効率が向上、および進化の停滞の解決が可能なが平成 25 年度から 26 年度にかけて分ってきた。しかも、実用上は人間的制約 (順路の大幅 / 頻繁な変更は好まれず、数値化・明示化が難しいプライベートで質的な制約も少なくない) や社会的制約 (同じ町・丁目・村が先など) の考慮も不可欠なことが更に明確になった。

以上、遺伝的アルゴリズム (GA) や LKH など最適化技術の進展は顕著だが、問題パターンにより性能不十分かつ人間・社会的絡みや文化的多様性の配慮も困難で実用の障害となっている。しかし、本課題の上述のような研究過程を通し、最終年度の平成 26 年度の後半には、「人類は一からとかランダム (偶然) だけでなく、多種優良事例を漸進的かつ自律的分散的に改良し、多様な最適尺度で選択し文化として引継ぎ進化する」という分散多様最適・漸進的・文化遺伝子的進化の着想を得

た。問題パターンによるが LKH と比べ距離最短だけでなく巡回順の破壊率を約半減等その効果を一部実証した。

すなわち、最適性と応答時間に関しては、表 2 のように、世界最高レベルの最適化方法である LKH でさえ、応答時間が 4.4 秒から 63.6 秒かかるうえに 4.9%以上のエラーを出す。一方、事例ベース人間尊重 GA(CBHOGA) は、3 秒以内の応答時間で 3%以下のエラーに抑えることができた。尚、p654-120+30 は 120 か所は今回は巡回しないが、これとは異なる 30 か所を新たに巡回する問題であることを示す。他のケースも同様である。

表 2. 毎日の配送ルートの最適化結果

solved TSP	worst error Rate within 3 sec		
	LKH (max time)	CBNI	CBHOGA
P654-120+30	4.91% (4.4sec)	1.99%	0.68%
P654-50+25	6.79%(14.1sec)	2.42%	1.23%
F11577-150+50	5.41%(63.6sec)	1.67%	0.61%
RI1889-200+100	0.92% (6.6sec)	0.25%	0.19%
RI1889-150+50	0.71% (5.8sec)	0.13%	0.10%

巡回順序保存つまり人間的・文化的制約を具体的にどう反映したかは表 3 の比較実験結果が示すように、配達先の変化が 20%の場合、P654 や f11577 では LKH が 30%程度しか順序を保存しない(エラー率も f11577 は 3%を越える)のに CBHOGA では 2 倍以上の 70%前後を保存している(エラー率も 0.5%前後である)ことなどからわかる。

表 3. 巡回順序保存度・最適精度の比較結果

solved TSP (20% delete/ insert)	LKH		CBNI		CBGA	
	tour order keep rate	error rate	tour order keep rate	error rate	tour order keep rate	error rate
P654	31%	2.67%	90%	2.65%	66%	0.37%
f11400	66%	0.25%	92%	2.21%	74%	1.62%
f11577	34%	3.41%	95%	0.73%	71%	0.55%

以上の成果を IEEE など一流国際学会議の 5 編の査読付き論文として発表した。本着想は 27 年度からの科研費の研究課題に採択されており、さらなる研究展開を図る。

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・国際学会講演論文](計 13 件)

Takashi Kawabe, Yuuta Kobayashi, Yukiko Yamamoto, Yoshitaka Sakurai, Rainer Knauf,

Setsuo Tsuruta : Case Based Human Oriented Delivery Route Optimization, IEEE CEC2015: Accepted, 査読有

Setsuo Tsuruta, et al.: Distributed GAs with Case-Based Initial Populations for Real-Time Solution of Combinatorial Problems, IEEE Symposium Series on Computational Intelligence SSCI2014: 査読有

Takashi Kawabe, Rainer Knauf, Setsuo Tsuruta, et al. : A Case Based Approach for an Intelligent Route Optimization Technology. SITIS 2014 : 141-146 査読有

Masaki Suzuki, Takaaki Motomura, Taro Matsumaru, Setsuo Tsuruta, Rainer Knauf, Yoshitaka Sakurai: A case based approach for an intelligent route optimization technology. GECCO 2014: 1069-1072. 査読有

Masaki Suzuki, Setsuo Tsuruta, Rainer Knauf, Yoshitaka Sakurai: Knowledge Acquisition issues for intelligent route optimization by evolutionary computation. IEEE CEC2014: 3252-3257. 査読有

Takaaki Motomura, Masaki Suzuki, Setsuo Tsuruta, Yoshitaka Sakurai: Intelligent Route Optimization Technology by Case Based GA. SITIS 2013: 351- 357. 査読有

Yuuta Kobayashi Masaki Suzuki, Setsuo Tsuruta, Yoshitaka Sakurai: Autonomous Distributed GA for Solving Real-Time Combinatorial Problems. SITIS 2013: 330-336. 査読有

Masaki Suzuki, Takaaki Motomura, Setsuo Tsuruta, Yoshitaka Sakurai, Rainer Knauf: An Approach to Consider Diversity Issues from a Semantic Point of View. SMC 2013: 1696-1701. 査読有 Masaki Suzuki, Setsuo Tsuruta,

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. 査読有

Yoshitaka Sakurai, Setsuo Tsuruta: A Population Based Rewarding for Reinforcement Learning to Control Genetic Algorithms. SITIS 2012: 686-691. 査読有

Yoshitaka Sakurai, Kouhei Takada, Natsuki Tsukamoto, Takashi Onoyama, Rainer Knauf, Setsuo Tsuruta : A simple optimization method based on Backtrack and GA for delivery schedule. IEEE CEC 2011: 2790-2797. 査読有

Yoshitaka Sakurai, Kouhei Takada, Natsuki Tsukamoto, Takashi Onoyama, Rainer Knauf, Setsuo Tsuruta: Ensuring Diversity in a

Backtrack and GA Optimization Method for Delivery Schedule. SITIS 2011: 201-208. 査読有

櫻井義尚, 高田考平, 小野山隆, 塚本奈津貴, 鶴田節夫: "配送ルート最適化向けランダムリスタート融合 GA 方式", 電気学会論文誌 C, Vol. 131, No. 8, pp. 1485-1494, (2011). DOI: 10.1541/ieejciss.131.1485, 査読有

6 . 研究組織

(1)研究代表者

鶴田 節夫 (TSURUTA SETSUO)
東京電機大学・情報環境学部・教授
研究者番号 : 00366395

(2)研究分担者

櫻井 義尚 (SAKURAI YOSHITAKA)
明治大学・総合数理学部・准教授
研究者番号 : 30408653

(3)連携研究者

寺野 隆雄 (TERANO TAKAO)
東京工業大学・総合理工学研究科 (研究院)・教授
研究者番号 : 20227523

喜多 一 (KITA HAJIME)
東京工業大学・学術情報メディアセンター・教授
研究者番号 : 20195241

池田 心 (IKEDA KOKORO)
北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号 : 80362416