

令和元年6月27日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02758

研究課題名(和文) 分野横断的な最適化を可能とする適応型共進化法と電子透かし用符号化開口設計への応用

研究課題名(英文) Self-adaptive Coevolutionary Algorithm Enabling Cross-disciplinary Optimization and its Application to Coded Aperture Design for Watermark Extraction

研究代表者

小野 智司 (Ono, Satoshi)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：90363605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：分野が異なるがそれぞれ関連する複数の問題を同時に最適化する技術を実現した。関連する問題を1つの問題として定式化するのではなく、共進化の形で独立性の高い部分問題として扱い、個々の分野で既に確立している最適化法を利用しつつ、安定的局所解を避けて最適化を行うことができる。上記の方式を応用し、2次元コードの真贋判定を行うための電子透かしの設計において、透かしとそれを抽出する符号化開口のパターンとを同時に設計することで、透かし抽出の被写界深度を拡大できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分野が異なるが互いに関連する複数の問題を同時に最適化することにより、従来は発見できなかった新たな解を発見することが可能となる。本研究では、上記の技術を利用できる具体的な実問題の一つとして電子透かしと符号化開口の同時設計を試みた。近年、電子決済の手段として広く使われている2次元コードは、不正に複製されることにより不適切な決済を引き起こす危険がある。このため、電子透かし技術を利用して真贋判定を行うことが重要となる。一方、スマートフォン等で撮影する際に焦点ズレなどが生じると電子透かしの適切に撮影できない。本研究により、2次元コードを認証できる奥行の範囲を約3倍に拡大することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：This study has developed a technology to simultaneously optimize multiple problems in different fields but related to each other. The proposed method treats problems as independent subproblems and optimizes using existing methods and/or heuristics of the problems in the form of coevolution, rather than formulating them as one big problem. Unlike the conventional method, the proposed method avoids local optima. This study has also applied the above method to design of digital watermark for authentication of two-dimensional code. Simultaneously designing watermarking scheme and coded aperture pattern for watermark extraction, the depth of field of watermark extraction was successfully extended.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：ブラックボックス最適化 ショナルフォトグラフィ メタヒューリスティクス 電子透かし 符号化開口 進化計算 画像処理 コンピュータビジョン コンピューター

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

### 1. 研究開始当初の背景

近年の計算機や最適化アルゴリズムの性能が向上するにつれて、各分野内の問題を個別に解くだけでなく、分野横断的に関連問題を同時に最適化する要望が高まっている。このとき、関連する2つ以上の問題を1つの問題として定式化するのではなく、共進化の形で独立性の高い部分問題として扱うことが有効な場合がある。これは、部分問題間での変数間の依存性が低いことや、既に個々の分野の問題で最適化法が確立している場合が多いことが理由である。しかし、実問題へ共進化を応用する際、最適解ではなく安定的な局所解に陥りがちである点が問題となる。また、制御パラメータ調整の労力が増大する点も問題である。

一方、上記の技術により解決の可能性がある重要な実問題として、本研究では、2次元コードの複製の問題に着目する。2次元コードは、航空機や列車の搭乗券認証、電子決済等の認証の用途で利用されているが、2次元コードの不正な複製が懸念されている。事実、The People's Bank of Chinaは、2014年にQRコードの検証方法の欠如を理由に、QRコード等を用いた決済の停止を発表している。携帯電話同士を用いた手軽な複製を検出できるだけでも抑止効果は高いとされており、その実現が望まれている。

上記の課題を解決することを目的として、応募者らは、離散ウェーブレット変換(DWT)を用いた電子透かしの進化的多目的最適化を用いた自動設計を行い、携帯電話上に表示された2次元コードの真贋判定を実現した。しかし、携帯電話に表示された2次元コードから透かしを抽出する際、手ぶれや焦点ずれなどにより画像がぼけると、高周波成分である透かしを適切に抽出できない問題がある。符号化開口をカメラに装着することで、焦点ボケが生じる際に高周波の情報の欠落を抑制できることが期待できるが、電子透かしの特性に応じた符号化開口を適切に設計する必要があり、これらの最適な組み合わせを決定することは、従来の最適化技術では困難であった。

### 2. 研究の目的

特性の異なる2つ以上の部分問題を同時に最適化する共進化型最適化において、安定的局所解への収束を避け、かつ、制御パラメータの事前調整が不要な疎同期型共進化法を提案する。

本研究では特に、上記アルゴリズムの具体的な応用として、認証用2次元コードの真贋判定を安定的に行える技術の開発に応用する。すなわち、従来はマルチメディア分野とコンピュータショナルフォトグラフィ分野で個別に研究が行われていた電子透かしと符号化開口とを同時に設計を行い、焦点ずれに頑健な電子透かしと電子透かしの復号に特化した符号化開口との最適な組合せを実現する。

### 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、共進化型最適化アルゴリズムの性能解析を可能にするベンチマーク問題の設計、疎同期型共進化アルゴリズムの設計、シミュレーションによる符号化開口最適化システムの構築、および、実機ベースの符号化開口最適化システムの構築を行った。以下では、具体的に研究方法の説明を行う。

#### (1) 共進化アルゴリズムの性能解析を目的としたベンチマーク問題の設計

分野が異なるが関連する2問題(部分問題)を同時に最適化することを想定したベンチマーク問題を設計する。部分問題内に含まれる変数の間、および、異なる部分問題の変数の間における依存性を任意に調整が可能である。これにより、共進化に型最適化アルゴリズムにとって脱出が困難な局所最適解を発生させることが可能となり、局所解への陥りやすさや脱出の困難さを調整することが可能となる。本問題を用いて(2)のアルゴリズムの設計を実施する。

#### (2) 疎同期型共進化アルゴリズムの設計

対象とする部分問題毎に個別の最適化アルゴリズム(部分解法)を持ち、各部分問題の部分解を定期的に交換する非同期型の共進化アルゴリズムを提案する。これにより、構造や特性が異なるが互いに関係する2問題を同時に最適化することが可能となる。各部分問題を解くアルゴリズムは任意のメタヒューリスティクス型のアルゴリズムの組合せを利用可能であり、2問題間の特性が大きく異なる場合に、アルゴリズム間の同期をとる頻度を抑えて同時最適化を行うことができる。このため、2問題を異なる計算資源上で実行することが可能となる。

#### (3) 電子透かしと符号化開口の同時最適化

焦点ボケが生じて電子透かしの抽出が困難となる撮影距離においても、電子透かしの抽出を可能とする符号化開口の設計を行う。同時に、電子透かしの埋め込みスキーム自体も、符号化開口による抽出に適するよう設計を行う。

具体的にはまず、電子透かし用符号化開口設計の問題について考察を行い、開口パターン

設計問題の特性について理解する．次に，(2)を利用することで，符号化開口は能動絞りカメラを用いた実機による最適化を行い，電子透かしの埋め込みスキームは GPU 等を用いたシミュレーションにより最適化を行うように，異なる計算資源を利用して符号化開口と電子透かしの同時最適化を行う方式を実現する．

#### 4. 研究成果

主な研究成果を以下に示す．

##### (1) 共進化アルゴリズムの性能解析を目的としたベンチマーク問題の設計

依存性を付与する変数の組の総数と，依存性の種類（リンク関数）の 2 種類の組合せにより，部分問題内および部分問題間の依存性を任意に調整可能なベンチマーク問題を設計した．本問題は，連続 NK ランドスケープ問題をもとに設計されており，実数変数を持つ協調型共進化向けのベンチマーク問題である点に特徴がある．本問題では，部分問題内および部分問題間の依存性を，関連する変数の個数，および，関連性を定義する関数の定義の 2 種類のパラメータにより調整が可能である．変数の個数による関連性の定義は二値の変数を持つ一般的な NL ランドスケープ問題と同様である．関連性を定義する関数は連続 NK ランドスケープ問題の特徴であり，2 変数の間の関連性を，線形の関数とすることで比較的解決が容易な依存性を実現でき，非線形の関数とすることで，いったん局所解に陥ると大域的最適解の発見が困難な問題インスタンスを作り出すことができる．実験により，共進化型最適化に特有の局所解を含むベンチマーク問題を生成できることを確認した．これらの成果についてまとめた論文が国際会議 SSCI に採録された．また，(2)のを検討する上でのベンチマーク問題として活用された．

##### (2) 疎同期型共進化アルゴリズムの設計

構造や特性が異なるが互いに関係する 2 問題を同時に最適化できる疎同期型共進化アルゴリズムを設計した．各部分問題を解くアルゴリズムとして，適応型多目的差分進化，分布推定アルゴリズム，遺伝的アルゴリズム等を実装し，部分問題の特性に応じたメタヒューリスティクスの組み合わせを利用可能であることを確認した．特に，適応型差分進化を用いることで，局所解に陥りにくい自己適応型アルゴリズムを実現できることを確認した．また，本アルゴリズムに組み込むことが可能な，最適化の処理時間の大半を占める解候補の評価に要する時間を削減するため，目的関数の近似関数を動的に構築し，近似的に解候補の評価を行う代替モデルを考案した．本方式は，近似評価と実評価を適応的に切り替える適応的世代ベース代替モデルである点に特徴があり，順序ベースの相互相関に基づく判断を行うことで，ごく少ないオーバーヘッドで適応的な切り替えを行うことができる．これらの成果は論文誌 ASoC, ACIS 等に採録された．クラウド側とエッジ側の計算資源を同時に活用する等，特性の異なる複数の計算機環境を併用するケースは今後増えるものと考えられ，本アルゴリズムの応用場面が今後増えると期待される．

##### (3) 電子透かし抽出用符号化開口設計問題についての考察

電子透かしの抽出に適した符号化開口の要件について考察を行い，その設計における要件を明らかにした．すなわち，焦点ボケの発生による電子透かしの成分の破壊を抑制するためには，電子透かしの周波数特性と符号化開口の周波数特性が合致すること（電子透かしが持つ周波数帯において符号化開口の周波数特性がゼロ交差を生じていないこと）が重要である．ここで難しい点は，撮影対象との距離が変化する場合において，電子透かし，および，符号化開口の双方の周波数特性が変化する点にある．図 1 に例を示す．撮影対象と

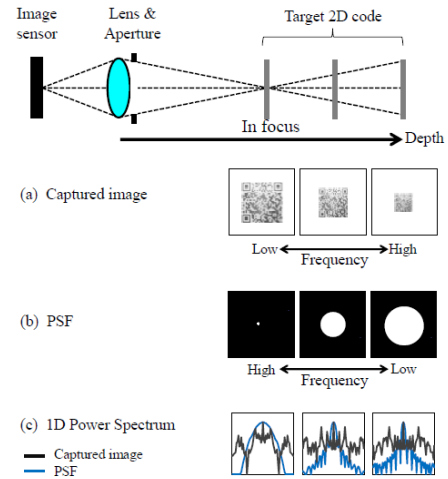


図 1 電子透かし抽出用符号化開口設計問題における難しさ．撮影対象が焦点距離から離れるにつれて，電子透かしと符号化開口の周波数特性が逆方向に変化する．

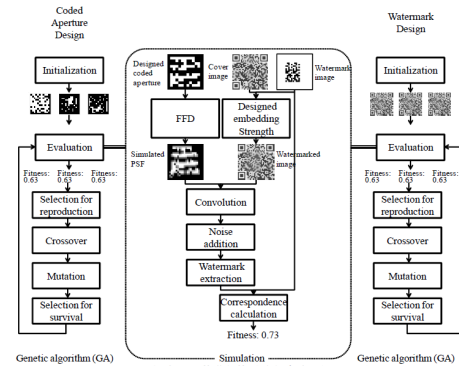


図 2 電子透かし抽出用符号化開口設計問題における難しさ．撮影対象が焦点距離から離れるにつれて，電子透かしと符号化開口の周波数特性が逆方向に変化する．

なる電子透かしを含む2次元コードが焦点距離から遠ざかるにつれて、撮影対象の画角内での相対的なサイズが減少し、電子透かしの周波数帯がより高い帯域に移動する。一方で、対象が焦点距離から遠ざかるにつれて、符号化開口のボケが大きくなり、より低周波の帯域に移動する。このように、2つの周波数帯域が真逆に移動するため、広い深度範囲で有効な符号化開口の形状を設計することは難しい。

また、撮影対象が回転し、電子透かしと符号化開口の間の位相にずれが生じる場合も、電子透かしの成分の維持が困難となる。

以上2点の難しさを明らかにし、(4)において電子透かしと符号化開口の同時設計を行う際の目的関数を設計する際の要点とした。

#### (4) 電子透かしと符号化開口の同時最適化の実現

上記(3)の考察で明らかにした特性を持つ符号化開口設計問題を解決するために、複数箇所の深度において、撮影対象の回転角度を変えながら透かしの抽出率を調査し、その平均を目的関数と定義した。

また、開発した同時最適化方式は、まず、光学シミュレーションにおいて複数の有望な透かし埋め込みスキームと符号化開口パターンを設計し、次に、能動開口カメラを用いて最適な符号化機構パターンの設計を行う構成とした。提案する方式のアルゴリズムを図2に示す。図2に示すように、電子透かし埋め込みスキームの設計と、符号化開口パターンの設計とが、別のメタヒューリスティクスによって最適化され、候補の評価を行う際に、両者の解を組み合わせることでシミュレーションまたは実機を用いた撮影を行うことで目的関数の計算を行う。本方式を用いて設計された電子透かしは、水平方向および斜め方向の高周波成分の組み合わせから構成されている。光学シミュレーションを用いた段階で設計された符号化開口と実機撮影を用いた段階で設計された符号化開口とを比較すると、前者は比較的高周波成分を多く含んでいたが、後者の段階で開口部が拡大され、より低周波のパターンが多く含まれるパターンが生成された。

設計された符号化開口と、一般的な円形開口、および、ボケ除去用の符号化開口との比較を行った結果を図3に示す。提案手法により設計された開口は50mmから90mmまでの範囲で0.7を超える抽出率を維持しており、円形開口と比較して2.6倍の被写界深度を実現することができた。

以上のように、提案する方式を用いることで、電子透かしの抽出を行える深度を拡大することが可能な符号化開口の設計に成功した。上記の成果についてまとめた論文が国際会議 (ACCV)、査読付論文誌 (情報処理学会論文誌 TOM) に採録され、また、信学会 IMQ 研究会、MIRU2019 等の招待講演の依頼を受けた。

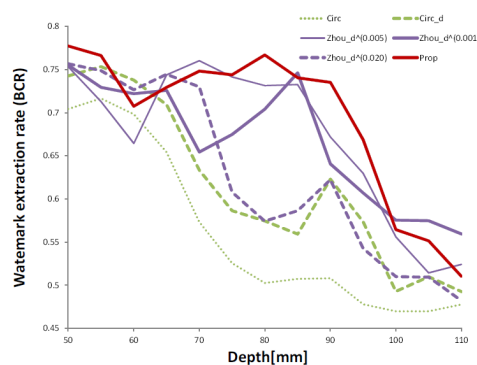


図3 撮影距離ごとの電子透かしの抽出率の比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- [1] Yudai Kuwahata, Jun-ichi Kushida, Satoshi Ono: "A Preliminary Study on Adaptive Evolution Control Using Rank Correlation for Surrogate-assisted Evolutionary Computation", International Journal of Software Innovation (IJSI), Vol.6, No.4, pp.59-72 (2018).
- [2] 竹下 真悟, 前原 武, 神薗 誠, 小野 智司: "光学シミュレーションと進化型多目的最適化に基づく2次元コード真贋判定用電子透かしの設計", 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol.11, No.2, pp.75-86 (2018).
- [3] 堀田 祐樹, 芝 優希, 小野 智司, 古川 亮, 日浦 慎作, 川崎 洋: "プロジェクト用符号化開口と階層的復元を用いた Depth from Defocus", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J99-D, No.5, pp.559-570 (2016).
- [4] Satoshi Ono, Takeru Maehara, Kazunari Minami: "Coevolutionary Design of a Watermark Embedding Scheme and an Extraction Algorithm for Detecting Replicated Two-dimensional Barcodes", Applied Soft Computing (ASoC), Vol.46, No.C, pp.991-1007

(2016).

- [5] 小野 智司: "ユーザシステム協調型進化計算-人間の知識や嗜好を活用した最適化の実現", システム制御情報学会誌, Vol.60, No.7, pp.284-291 (2016).
- [6] 前原 武, 中居 謙太郎, 池田 亮, 谷口 康太郎, 小野 智司: "進化型多目的最適化を用いた2次元コード真贋判定用電子透かしの設計", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J98-D, No.5, pp.835-846 (2015).

[学会発表](計 45 件)

- [1] Asuka Hisatomi, Hitomi Koba, Kazunori Mizuno, Satoshi Ono: "Escher-like Tiling Design Using Estimation of distribution algorithm", 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2019), pp.262-265 (2019).
- [2] 小野 智司: "進化計算を用いた様々なパターン最適化", 電子情報通信学会イメージ・メディア・クオリティ研究会 (IMQ)(招待講演), (2019).
- [3] Hiroki Hamasaki, Shingo Takeshita, Kentaro Nakai, Toshiki Sonoda, Hiroshi Kawasaki, Hajime Nagahara, Satoshi Ono: "A Coded Aperture for Watermark Extraction from Defocused Images", The 14th Asian Conference on Computer Vision (ACCV 2018) (2018).
- [4] Takuto Shigenobu, Takuya Ushinohama, Hiroshi Kawasaki, Satoshi Ono: "Silhouette-based three dimensional image registration using CMA-ES with joint scheme of partial restart and variable fixing", Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO), Vol.companion, pp.133-134 (2018).
- [5] Yuki Nakashima, Jun-ichi Matsuoka, Asuka Hisatomi, and Satoshi Ono: "A Preliminary Study on Collaboration Model of Sparsely-Synchronized Heterogeneous Coevolution", 2018 JPNSEC International Workshop on Evolutionary Computation, Vol., No., pp.105-105 (2018).
- [6] Asuka Hisatomi, Hitomi Koba, Makoto Kamizono, Kazunori Mizuno, Satoshi Ono: "Escher-like Tiling Design Using Hierarchical Optimization", Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO), Vol.companion, pp.89-90 (2017).
- [7] Jun-ichi Matsuoka, Yuki Nakashima, Satoshi Ono: "A Preliminary Study on Designing a Benchmark Problem for Analysis of Sparsely-Synchronized Heterogeneous Coevolution", 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2017), pp.922-929 (2017).
- [8] Kazunari Minami, Masaki Maezono, Satoshi Ono: "A Preliminary Study on Evolutionary Design of Image Processing Pipeline Using Hierarchical Graph Structure", 2nd International Symposium on Expertise of Engineering Design, (Invited talk), (2017).
- [9] Shingo Takeshita, Takeru Maehara, Satoshi Ono: "Digital Watermark Design for Two-dimensional Codes Displayed on Smart Phone Screen Using Multi-objective Optimization and Optical Simulation", 18th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD2017) (2017).
- [10] Yudai Kuwahata, Jun-ichi Kushida, Satoshi Ono: "A Fundamental Study on Adaptive Surrogate-assisted Evolutionary Computation Using Rank Correlation", 18th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD2017) (2017).
- [11] Yuki Shiba, Satoshi Ono, Ryo Furukawa, Shinsaku Hiura, Hiroshi Kawasaki: "Temporal shape super-resolution by intra-frame motion encoding using high-fps structured light", The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp.115-123 (2017).
- [12] Makoto Kamizono, Kigo Shimomura, Masayuki Tajiri, Satoshi Ono: "Two-Dimensional Barcode Decoration Using Module-wise Non-systematic Coding and Cooperative Evolution by User and System", Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO), pp.245-252 (2016).
- [13] Hiroshi Kawasaki, Yuki Horita, Yuki Shiba, Satoshi Ono, Ryo Furukawa, Shinsaku Hiura: "Active oneshot scan for wide depth range using a light-field projector based on coded aperture", International Conference on Computer Vision (ICCV) (2015).
- [14] Hiroshi Nakamura, Satoshi Ono: "Suggestion-based Interactive Video Digest Design by User-System Cooperative Evolution", IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), pp.2207-2214 (2015).
- [15] Takeru Maehara, Ryo Ikeda, Satoshi Ono: "Digital Video Watermark Optimization for

Detecting Replicated Two-Dimensional Barcodes", The 14th International Workshop on Digital-forensics and Watermarking (IWDW), Digital-Forensics and Watermarking, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9569 2016 (2015).

[16]Yudai Mido, Yuki Horita, Kentaro Nakai, Taishi Megano, Satoshi Ono and Hiroshi Kawasaki: "A Fundamental Study on Coded Aperture Design for Depth from Projector Defocus based on Evolutionary Multi-Objective Optimization", The 7-th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS), pp.223-227 (2015).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 2 件)

名称：撮像装置、電子透かしの抽出方法、電子透かし及び開閉パターンの最適化方法

発明者：小野智司，前原武，川崎洋，堀田祐樹

権利者：鹿児島大学

種類：特許

番号：特許第 6443982 号

取得年：2018 年

国内外の別：国内

名称：透かし情報埋込装置、透かし情報処理システム、透かし情報埋込方法、及びプログラム

発明者：小野智司，中山茂，津々見誠

権利者：鹿児島大学，A・T コミュニケーションズ株式会社

種類：特許(EPO)

番号：2439921

取得年：2015 年

国内外の別：国外

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：川崎 洋

ローマ字氏名：Hiroshi Kawasaki

所属研究機関名：九州大学

部局名：システム情報科学研究院

職名：教授

研究者番号(8桁): 80361393

研究分担者氏名：長原 一

ローマ字氏名：Hajime Nagahara

所属研究機関名：大阪大学

部局名：データビリティフロンティア

機構

職名：教授

研究者番号(8桁): 80362648

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：辻村 誠一

ローマ字氏名：Seiichi Tsujimura

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。