

論文の内容の要旨

論文題目 ヒューリスティック手法による宇宙探査機の
機体構成と惑星間軌道の複合領域最適化

氏 名 今野 友和

本論文では最適化計算アルゴリズムにおいて、既存の手法にはない探索ルーチンを採用した最適化手法を提案する。提案手法は自然現象を模擬したヒューリスティックな手法である。自然界の現象を最適化手法に応用したものは多数提案されており、遺伝的アルゴリズム (GA)、粒子群最適化手法 (PSO) などである。提案する本手法はこのメタヒューリスティクスによる最適化手法に位置し、本手法の着想としては銀河の形成過程と地球上での台風の発生を模擬している。銀河と台風の形が似ていることをヒントにしており、詳細は下記に各パートについて説明している。本手法はより大域的な探索を可能にした手法であり、有効性を示すために複数のテスト問題と宇宙探査機の複合領域最適化問題へと適用した。

ここで提案する最適化手法について述べる。既存の手法にはないヒューリスティックな法則によって多探索点を移動させる最適化手法を提案する。この提案手法は銀河の渦と台風の渦が似ていることからアナロジーの着想を得たものである。本手法の特徴となるポイントは4つあり、このポイントを基に本手法のアルゴリズムを構築している。1つ目のポイントは局所探索アルゴリズムである。初期創生の天体や銀河は質量分布がガス状態から一点の質量状態へと重力収縮によって成長をする。本手法はこの重力による収縮を模擬している。手法上は多探索点を用いて、集合アルゴリズムに重力の方程式を採用する。多探索点が重力により一点に収束するアルゴリズムである。2つ目は局所解脱出アルゴリズムである。本手法は局所解脱出アルゴリズムも備えている。天体の質量が巨大になるとジェットを噴出する実際の物理現象があり、これを再現する。最適化計算上では多探索点が局所解に収束した場合に2個の探索点を探索空間のランダム方向に噴出させる。3つ目は大域探索アルゴリズムである。台風の渦を再現するアルゴリズムについて説明する。探索空間を強制的に回転させ、探索点が移動した場合にコリオリ力を発生させる。本手法では探索空間を評価関数値軸と設計変数値軸によって構成された空間であるとし、評価関数値軸を強制的に回転させる。探索点はコリオリ力を受けることで渦を巻くように移動する。これはわざと探索点群を渦状に遠回りに移動させることで大域的な最適解の発見確率を上げることを目的としている。4つ目は大域的移動アルゴリズムである。最後のポイントは地球が球状であることを再現したアルゴリズムを導入していることである。プログラム計算上で設計

変数空間の端を連結する。工学的な最適化問題では設計変数に制約条件が掛かり、変数に上限下限が存在する。この上限を下限に連結することでループする構造をとることができる。構造上はトーラス面になり、探索点が面上を移動する。トーラス面構造とすることで探索点の移動の自由度が飛躍的に上がり、台風の渦を再現することと相性が良い。以上のポイントを定式化しアルゴリズム構築した。また、類似するヒューリスティクス最適化手法との比較を行うために、粒子群最適化法（PSO）と遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて下記の問題を同様に解き結果を比較した。

本提案手法を用いて、3つの分野でのシンプルな最適化問題を解き提案手法の有効性を示す。まずは不静定トラス問題。三部材から成るトラスの断面積を決定する問題である。座屈限界などの制約条件が付き、解析解が存在するので簡単な工学的最適化問題として解く。提案手法を適用し、解析解を得ることが出来た。提案手法の計算アルゴリズムが有効に働いたことが分かった。次に経済学におけるポートフォリオ問題。金融工学においても最適化手法は活用があり、提案手法を簡単な資産運用問題へと適用した。元金100万円を複数の投資下へ最適に分配する問題である。シンプルな問題設定なので解析解がある。提案手法を適用した結果は解析解を得ることが出来た。最後に数学的多峰性問題。最適化手法の性能評価によく用いられる数学関数の最適化問題を解く。8つの関数について、変数空間を10次元、100次元、1000次元にした場合の最適化結果を示す。適用結果は1000次元について述べると、6つのテスト関数で10の-4乗以上の精度で解析解を得ることが出来た。また、本手法の特徴であるコリオリ力に関するアルゴリズムを導入した場合としない場合について解析解への到達率を調査している。結果はコリオリ力を導入した場合がしない場合より、到達率が10%近く上昇した。本提案手法において、コリオリ力のアルゴリズムは大域探索において重要な要素であることを示した。

次に応用問題として宇宙探査機の機体構成と惑星間軌道の同時最適化問題に適用した。電気推進機を搭載した宇宙機が地球-火星間を往復するミッションとした。電気推進はイオンエンジンとMPDスラスターの2種類を適宜使い、電力の確保は太陽電池パネルによる。機体重量と電力の各サブシステムへの分配は簡易推算式を用いる。さらにミッションを無人と有人の2つのバージョンについて問題を設定した。宇宙機の機体構成について述べる。機体を構成する各サブシステムの質量と電力の大きさを簡易推算式を用いて決定する。サブシステムは通信系、姿勢制御系、電気推進系、バッテリー系、太陽電池系、構造系などがある。電気推進を含めたサブシステムの質量や電力特性を用いて軌道設計を行えば、より具体的な宇宙機概念設計が実施できる。また、電気推進と不可分な電源システムの発生電力と質量の関係を導入すれば、簡易推算式を用いて、具体的な最適比推力を算定できる。次に軌道計画について述べる。ミッションは地球と火星の往復するものである。軌道計画は大きく分けて3つのフェーズから成る。1つ目は地球から火星へ向けて電気推進機を用いて宇宙機を増速させるフェーズ、本研究では太陽と宇宙機の2体問題として最適化問題設定を行っているので、地球と火星の重力による影響は考慮していない。2つ目は火星でのランデブー

を行うフェーズである。火星へ到達した時に化学推進を噴射することで火星と宇宙機の相対速度をゼロとする。その後、スラスターは停止状態で宇宙機は火星と同じ軌道をとるものとする。有人宇宙探査機においてはランデブー時においても、水食料空気的生活廃棄物は放出し続けるものとする。このランデブー期間を最適化問題上の設計変数とすることで宇宙機は帰還のタイミングを計ることになる。3つ目は火星から地球へ帰還するために電気推進機を用いて減速させるフェーズである。帰還においては電気推進機を逆噴射して減速させる。火星軌道から徐々に減速させ、地球に帰還させる。帰還軌道については相対位置ゼロとする条件で最適化の数値計算を行う。無人宇宙探査機の問題設定について述べる。電気推進はイオンエンジンを使用するものとし、機体構成における電力の大きさなどは「はやぶさ」と同等の値を用いた。最適化問題としての設計変数は地球出発日時とランデブー期間の2つとなる。目的関数はミッション期間を最小化する問題とした。問題設定を簡素にすることで提案手法を適用した結果から有効性を示すことが出来る。この問題設定の探索空間では実行不可能領域が広く飛び飛びに分布しているので、多点探索手法では探索点群が島を形成し局所解に収束してしまう。本手法を適用した結果では、島を形成するが局所解脱出プログラムである宇宙ジェットのアプローチが働き新しい実行可能領域へジャンプすることが出来たので、最適解へと到達することが出来た。次に有人宇宙探査機の問題設定について述べる。電気推進はMPDスラスターを用いるものとし、スラスターのノズル形状も最適化対象とする。探査機の構造はスピン型の円柱構造物とし、壁面に太陽電池パネルを搭載する。最適化問題上の設計変数は地球出発日時、火星でのランデブー期間、初期全電力、推力の方向角、スラスターのノズル形状がある。目的関数は機体重量とミッション期間の2つあり、多目的最適化とした。有人宇宙探査機では、宇宙飛行士を2人搭乗させて地球-火星間を往復する。無人探査機と比べて居住モジュールや食料水空気などを搭載する項目を追加している。最適化計算手法は提案手法とGA、PSOを用いた。3つの最適化手法を比較して本提案手法の優位性を述べている。問題設定を複雑にした場合および多目的最適化問題について提案手法を適用したときの有効性を示した。また、最適化計算結果から機体重量とミッション期間の相関関係を得ることが出来た。このような結果を得ることが出来れば、ミッション立案者や宇宙機の初期設計段階での計画指針にすることが出来る。

最後に結論を述べる。本論文では自然現象である銀河形成と台風の渦の中心を求めるアルゴリズムを有する新しいヒューリスティック最適化手法の提案を行った。有効性を検証するための様々な種類の問題に適用し、実装可能なアルゴリズムを有していることを示した。本論文から得られた知見について、本提案手法は多峰性を持つ解空間においても、コリオリ力による探索点の強制回転によって大域的最適解に到達しやすいことが分かった。ただし、実行不可能領域が広域に亘る場合には本手法が持つ局所解脱出アルゴリズムだけでは不十分であると考えており、問題設定に応じて工夫が必要である。これは今後の課題としたい。また宇宙工学の複合領域最適化問題にも応用可能であることを示しており、航空宇宙工学上に存在する最適化問題の解決に貢献できると考えている。