

論文の内容の要旨

論文題目 多衛星における地球観測プランニングと軌道配置の
学習を利用した最適化に関する研究

氏 名 細沼 貴之

近年の超小型衛星の発展に伴い、多衛星（コンステレーション）を利用した地球観測ミッションが盛んに検討されるようになってきている。コンステレーションを利用することによって、観測の時間的・空間的分解能が単機の衛星と比較して飛躍的に向上することは従来から指摘されてきた。しかし一方で、コンステレーションを実現するための衛星開発・打ち上げ費用が問題となり、コンステレーションを利用した観測網はこれまで殆ど実現されて来なかった。しかし近年、安価な費用で実用に供しうる性能の小型衛星が開発可能となった経緯に伴い、コンステレーションを利用したミッションの検討が盛んに行われるようになりつつある。

従来のコンステレーション設計プロセスでは、まず、観測地域に対する要求を洗い出した後、衛星の軌道配置の最適化が行われる。その際、観測地域に対する要求は、特定地域の被覆率、回帰日数などの大域的・静的な観点からまとめられる。軌道配置の最適化は、先述の大域的・静的な観点からまとめられた要求を評価関数とし、軌道要素を最適変数とした数値探索手法に基づいて行われることが多い。また、コンステレーションを用いて実際にどのような観測を行うかを定める観測計画の立案（プランニング）は、軌道の設計プロセスが完了した後に、軌道設計とは独立に行われることが多い。このような従来プロセスに基づく設計法には、以下に述べる3点の問題点がある。

1つ目の問題点は、動的な要求に対応することが困難であるという点である。衛星観測を実際に利用することを検討した場合、ある地域の観測データに対するニーズが時間と共に変化するという状況が起こりうる。また、ある地域を撮影した際に、天候によっては望ましい画像が得られないことも起こりえるであろうし、天候の時間変化に伴い、望ましい画像が得られる確率が変化することも考えられる。従って、ある地域の観測に対するニーズや、その地域を観測した際の成功確率が時間変化することを考慮したプラ

ンニングが必要となるが、従来の設計プロセスでは、このような動的事象を加味したプランニングに対応することは困難である。

2つ目の問題点は、プランニング結果から得られた改善点が軌道設計に反映されにくいという点である。従来の設計プロセスでは、プランニングと軌道設計が独立に行われているため、軌道に起因する原因によってプランニング結果に問題が生じたとしても、軌道設計の改善を行うことは困難である。一方で、コンステレーションにおけるプランニング問題の制約条件は各衛星の軌道配置によって特徴づけられるため、軌道配置そのものを改善することによってプランニング結果を改善できる可能性は否定できない。従って、プランニング結果の考察から軌道配置を改善するという軌道設計のアプローチが考えられるが、従来の設計プロセスではこのようなアプローチを適用することが困難である。

3つ目の問題点は、軌道要素の修正と評価関数との対応関係が不明瞭であるため、最適化結果として得られた軌道配置の妥当性評価が困難であるという点である。遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) に代表されるメタヒューリスティクスを用いて最適化を行う場合、軌道要素をパラメータとして変更しつつ、評価関数の最大値(あるいは最小値)を盲目的に探索するため、軌道要素と評価関数の対応関係を把握することが困難である。そのため、得られた結果がどのような因果関係から導かれたのか、得られた解は本当に改善の余地がないのか、といった解の吟味に多大な労力を要する。従って、実際には解を改善できる余地が残されている可能性があったとしても、その可能性に気付くことは疎か、どの様にすれば解を改善できる可能性があるかに関する知見を得ることも困難となる。

本研究では、従来のコンステレーション設計における以上の3点の問題点を解決するため、設計プロセスに学習という観点を導入し、軌道設計とプランニングを相互に改善していく設計方法を提案する。

具体的には、1つ目の問題点に対応するため、各地域の画像に対するニーズと撮影の成功確率を時間変化する環境変数として表現した上で、強化学習の枠組みを用いて定式化し、その解法を提案した。提案手法によって得られた結果は、評価関数の理論上の限界値に対して8割から9割程度の値となっているため、実用上十分といえるレベルでユーザニーズに対応可能であると考えられる。

また、2つ目の問題点に対応するために、プランニング結果から遡及して軌道配置を修正する軌道設計手法を提案した。具体的には、幾つかの軌道配置に対するプランニ

ング結果を利用して、ある軌道配置の下でどのようなプランニング結果が得られるかを予測するための学習器を構築し、最適な軌道配置を予測するという手法を用いて軌道設計を行う。提案手法では、プランニングと軌道設計が交互に繰り返される過程を経て軌道設計が行われるため、プランニング結果に基づいた軌道配置の改善が可能となる。

以上の様に、本研究では従来のコンステレーション設計プロセスにおける3つの問題点を解消するため、学習を導入した新しいコンステレーション設計手法を提案した。具体的な仮想ミッションを想定した上で、提案手法による設計プロセスによって得られた軌道配置での観測結果と、従来手法による設計プロセスによって得られた軌道配置での観測結果をそれぞれシミュレーションし、比較した。その結果、提案手法によって得られた軌道配置は、従来手法による設計結果と比較して、問題の統計的な性質や、観測対象地点の分布に対してより好ましい軌道配置となっていることが確認できた。