

人工衛星運用スケジューリングへの遺伝的アルゴリズムの適用

青山功†, 中島克人‡, 佐藤裕幸†

†三菱電機(株) 情報技術総合研究所, ‡三菱電機(株) 本社開発業務部

大規模な組合せ最適化問題である人工衛星の運用スケジューリング問題に MGG 法と CHC 法の 2 種類の遺伝的アルゴリズムを適用し, 比較を行った。実験の結果, CHC 法の方が適応度の改善が早く, 実行時間を 30 分とした場合, CHC 法の方が 1.08 倍 ~ 1.68 倍適応度の良い解を得ることができた。また, パレート最適解が求まるよう適応度計算には希求水準法を適用し, さらに希求水準を探索の進行状況に合わせて徐々に減少させることで, どの目的関数値も均等に改善することができた。

A Genetic Algorithm Approach for Satellite Maintenance Scheduling

Isao Aoyama†, Katsuto Nakajima‡, Hiroyuki Sato†

†Mitsubishi Electric Corp. Information Technology R&D Center

‡Mitsubishi Electric Corp. Planning & Administration Dept.

We applied two GA methods to Satellite Maintenance Scheduling which is one of large-scale combinatorial optimization problems. One is MGG and another is CHC. In the result of comparison between these methods, an average fitness of CHC's solutions was 1.08 – 1.68 times better than that of MGG's ones. And we employed aspiration level method in a fitness calculation to get pareto optimum solutions, and reduced aspiration level values when objectives were less than them. In our experimental result, all objectives were improved equally.

1 はじめに

人工衛星の運用スケジューリング問題は人工衛星のメンテナンス用スケジュールの立案問題であり, 各衛星から出される“通信要求”に基づき, 各衛星に対して通信を行う管制局や通信日時などを割り当てる。各通信要求には, 管制局や通信日時に対してそれぞれ優先順位をつけた複数の候補が示され, その組み合わせ数は, 衛星の種類や運用形態にも依るが, 衛星数が 10, 管制局数が 5 程度であっても, 10^{50} のオーダーを越える場合もある。

このような大規模な組合せ最適化問題である人工衛星の運用スケジューリングに対して, 限られた時間内で最適解でなくとも有意な解を求めるには, 同時多点探索が行える遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) が有効な手法であると考えられる。

本稿では, 人工衛星の運用スケジューリング問題に対して, MGG (Minimal Generation Gap) 法 [1] と CHC 法 [2] の 2 つの GA 手法を適用しその比較を行う。さらに, 運用スケジューリング問題は相反する 2 つの目的関数を持つ多目的な最適化問題であり, “パレート (Pareto) 最適解” が求まるように, 適応

度計算に希求水準法を適用し [3], 希求水準を固定する場合と, 探索の進行状況に合わせて徐々に減少させる場合の比較を行う。

2 人工衛星運用スケジューリング

図 1 に運用スケジュールの例を示す。

メンテナンスを行うために各衛星から出される通信要求の内容は衛星の種類によって異なる。

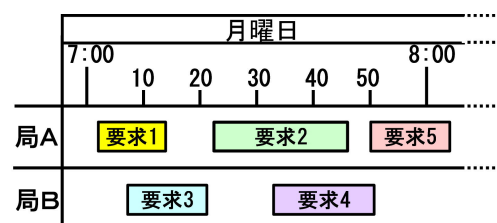


図 1: 運用スケジュール例

本稿では, “静止衛星”, “長楕円軌道衛星”, “準帰軌道衛星” の 3 種類の衛星を想定しており, 以下にそれぞれの衛星における通信要求の内容を示す。

2.1 静止衛星の通信要求

静止衛星は1週間に1度メンテナンスのための通信を行う。従って、1つの静止衛星から出される通信要求は1週間に1つである。通信要求が指定する主な項目(“要求項目”と呼ぶ)は、(1)通信曜日、(2)通信開始時刻、(3)管制局、(4)管制局数の4つである。このうち、通信曜日、通信開始時刻、管制局に優先順位をつけた複数の候補が指定される。

2.2 長楕円軌道衛星の通信要求

長楕円軌道衛星は1日に1回メンテナンスのための通信を行う。従って、1つの長楕円軌道衛星から出される通信要求は1日に1つである。主な要求項目は、(1)通信開始時刻、(2)管制局、(3)管制局数の3つである。このうち、通信開始時刻と管制局に優先順位をつけた複数の候補が指定される。

2.3 準回帰軌道衛星の通信要求

準回帰軌道衛星は1日に複数回地球を周回し(1周回を“パス”と呼ぶ)、1つ以上の連続したパスのいくつかを用いて管制局と通信を行う(例えば、連続した3つのパスの1番目と3番目のパスを用いるなど)。要求項目は、(1)パス、(2)パス毎の管制局、(3)通信を行うパス数、(4)通信を行うパス毎の管制局数の4つである。このうち、パス、パス毎の管制局に優先順位をつけた複数の候補が指定される。

2.4 競合と保留

各通信要求には優先順位の高い候補を割り当てることが望ましい。しかし、全ての通信要求に優先順位が最も高い候補を割り当てると、複数の衛星が同じ時間帯に同じ管制局と通信を行うという、実行不可能なスケジュールとなる場合がある。このような、複数の衛星が同じ時間帯に同じ管制局と通信を行う割り当てが行われることを“競合”と呼ぶことにする。

競合が発生した場合、各衛星に与えられているいくつかの優先基準に基づいて1つの通信要求を残し、残りを“保留”とする。保留となった通信要求は“割り当て候補が未定”という扱いとする。

2.5 運用スケジュールリングの立案目的

以上に示した人工衛星運用スケジュールリングの立案目的は、(1)各通信要求に対して可能な限り優先順位の高い候補を割り付けることと、(2)保留となる通信要求の数を最小にすることである。これら2つの立案目的は互いに相反する場合が多いと考えられる。

3 GAの適用

我々は、まず世代交代モデルとしてMGG法の適用検討を行った[4]。MGG法は初期収束を防ぎ多様性を保った世代交代ができるという特徴を持つが、1世代で入れ替わる個体数が高々2つと少なく、収束が遅くなると考えられる。そこで1世代でより多くの個体が入れ替わる可能性があるCHC法との比較を行う。

3.1 個体表現

各通信要求において、割り当て候補が示されている要求項目にどの候補が割り付けられたかを示すことでスケジュールを表現する。1つの通信要求の1つの要求項目を遺伝子座と対応させ、各遺伝子座の値(遺伝子値)は割り当てた候補の優先順位を表すものとする。図2に個体表現の例を示す。

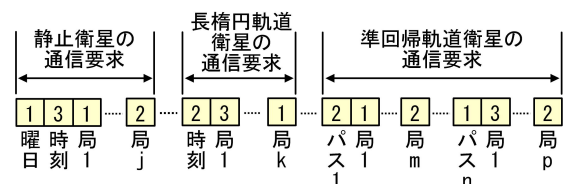


図2: 個体表現例

図2において、遺伝子値が優先順位そのものを表すと、交叉によって実行不可能なスケジュールが生成されてしまう場合がある。例えば、ある通信要求に2つの異なる管制局を割り当てる場合、交叉によってその通信要求に割り当てる2つの管制局を表す遺伝子値に同じ値が設定されることがありうる。

そこで、遺伝子値は“順序表現”を用いることにする。順序表現とは、候補リストの中の何番目かを表すものである。上記例の場合、局候補が優先度順に{A, B, C, D}で与えられ、2つの遺伝子値が両方とも2であるとする。1つ目の遺伝子値は{A, B, C, D}の4つの候補の中の2番目であるBを意味する。

2つ目の遺伝子値は、Bを除いた{A, C, D}の3つの候補の中の2番目であるCを意味する。

3.2 MGG 法概要

MGG法は世代交代モデルの1つであり、複製選択ではランダムに親個体ペアを1組選び、生存選択では親個体ペアと、交叉、突然変異により生成された子個体の中から最も適応度の良い個体とルーレット選択により選んだ1個体を親個体ペアと入れ替えるというものである。

MGG法と組み合わせる交叉および突然変異の方法は以下の通りである。

- 交叉 多点交叉を採用し、交叉点の数が解の改善に与える影響を見る。
- 突然変異 1つの遺伝子座をランダムに選択し、その遺伝子値をランダムに変更する。

3.3 CHC 法概要

CHC法は、交叉、突然変異、世代交代を全て定めたモデルである。複製選択では、複数組の親個体ペアをつくり、そのうち個体間の距離が閾値以上のペアのみ交叉対象とする(距離の近い個体同士を交叉させないことで個体集団の多様性を維持している)。生存選択は、適応度の良い順に集団サイズ分の個体を選ぶ。交叉は一様交叉で、値の異なる遺伝子座の半分を入れ替える。突然変異は、個体集団が変化しなくなった場合にのみ行い、集団サイズを N とすると、個体集団中最も適応度の良い個体(最良個体)の一部をランダムに変更して $N-1$ 個の新規個体を生成し、最良個体と $N-1$ 個の新規個体を新たな個体集団とする。

3.4 適応度計算

衛星運用スケジューリング問題の2つの目的関数は、先に述べたように相反する場合がある。そこで、複数の目的関数をこれ以上同時に改善できないパレート(Pareto)最適解を求めることができる“希求水準法”を適応度計算に用いる。目的関数の最小化を図る場合の希求水準法による解 x の適応度 $F(x)$ を式(1)で定義する。ここで定義した適応度 $F(x)$ は、値が小さいほど良い解であることを示す。なお、 $f_i(x)$ は、解 x の i 番目の目的関数値、 \bar{f}_i は i 番目の目的関

数の希求水準、 f_i^* は i 番目の目的関数の理想値(例えば、最小値よりも小さな値)である。また、 α は十分小さな係数で 10^{-6} 程度の値とする。

$$F(x) = \max_{i=1,2} \frac{f_i(x) - \bar{f}_i}{\bar{f}_i - f_i^*} + \alpha \sum_{i=1}^2 \frac{f_i(x)}{\bar{f}_i - f_i^*} \quad (1)$$

適応度計算に希求水準法を用いた場合、設定する希求水準と目的関数値との差が大きい目的関数ほど適応度の変化に与える影響が大きく、値の改善が優先されてしまう傾向にあると考えられる。

そこで、立案の進行状況に合わせて希求水準を徐々に減少させることで特定の目的関数が優先して改善されることを防ぐことを試みる。以下、希求水準の更新手順を簡単に示す。

- 初期個体群における最良解の目的関数値に一定の割合をかけた値を各目的関数の希求水準とする。
- 順次得られる最良解の目的関数値が全て希求水準以下となったら、現希求水準を一定割合減じた値を新たな希求水準とする。

4 評価実験

(1)MGG法とCHC法の比較、(2)希求水準値を固定した場合と可変とした場合の比較の2つ評価実験を行った。

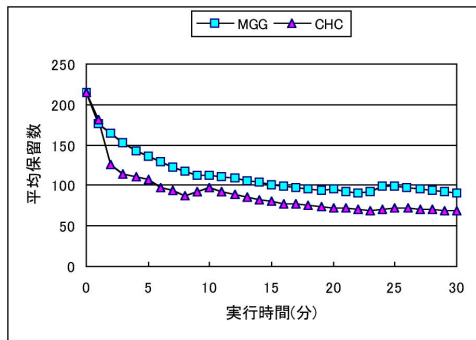
4.1 MGG と CHC の比較

MGG法とCHC法それぞれにおいて、初期個体をランダムに生成し、実行時間を30分として、目的関数の変化を5回測定した。図3に各目的関数の平均値の変化を示す。CHC法の方が立案当初での適応度の改善率が大きく、最終的な適応度も良い値となっていることが分かる。

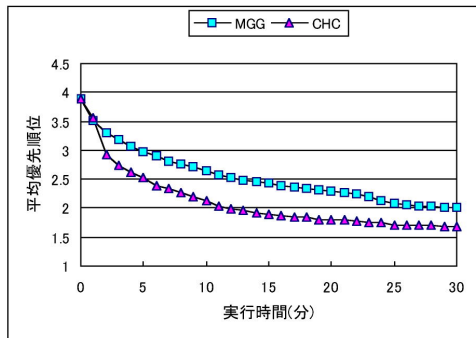
4.2 固定希求水準と可変希求水準の比較

希求水準を固定する場合と、スケジュールの改善に合わせて減少させる場合の比較を行った。それぞれの場合の希求水準は以下のように設定する。なお、本実験はMGG法を用いている。

- 希求水準を固定する場合: 各目的関数の最小値を希求水準とする



(a) 保留数の変化



(b) 優先順位の変化

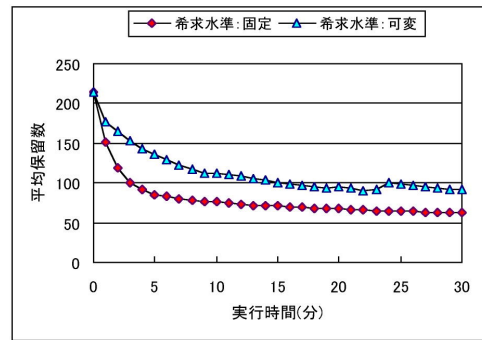
図 3: MGG と CHC の比較

- 保留数: 0
- 優先順位: 1
- 希求水準を可変とする場合
 - 初期値: 初期個体集団における最良個体の目的関数値の 80% を希求水準とする。
 - 更新: 集団内の最良個体の目的関数値が 2 つとも希求水準以下となったら、現在の希求水準の 80% を新たな希求水準とする。

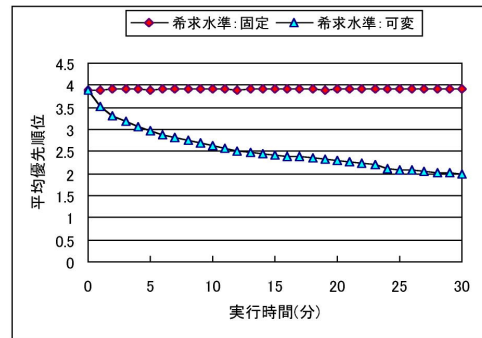
それぞれの場合に対して、初期個体をランダムに生成し、実行時間を 30 分として、目的関数の変化を 5 回測定した。図 4 に各目的関数の平均値の変化を示す。希求水準を変化させた法が、両方の目的関数を改善できていることが分かる。

5 まとめ

人工衛星の運用スケジューリング問題に MGG 法と CHC 法の 2 種類の GA 手法を適用し、比較を行った。MGG 法と CHC 法はどちらも多様性を保った探索が行えるが、より多くの個体を入れ替える CHC 法がより早く適応度の改善を行えることが期待された。



(a) 保留数の変化



(b) 優先順位の変化

図 4: 希求水準の固定/可変の比較

実験の結果、期待した通り、CHC 法の方が適応度の改善が早く、1.08 倍～1.68 倍適応度の良い解を得ることができた。

また、パレート最適解が求まるよう適応度計算には希求水準法を適用し、さらに希求水準を探索の進行状況に合わせて徐々に減少させることで、どの目的関数値も均等に改善することができた。

参考文献

- [1] 佐藤浩, 小野功, 小林重信, “遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価”, 人工知能学会誌, Vol.12, No.5, pp.734-744 (1997).
- [2] 坂和政敏, 田中雅博, “遺伝的アルゴリズム”, 浅倉書店, (1995).
- [3] 中山 弘隆, “あれもこれもよくしたい多目的計画法”, オペレーションズ・リサーチ, Vol.41 No.6, pp.343-348 (1996).
- [4] 青山功, 中島克人, “人工衛星運用スケジュール立案問題への GA の適用”, 第 62 会情報処理学会全国大会, 7K-01, (2001).