二段階最適化法による人工衛星の機器配置設計支援*

(ピギーバック型人工衛星を対象とした初期的検討)

泉井 一 浩^{*1}, 西 脇 眞 二^{*1}, 村 瀬 や よ い^{*2}
吉 村 允 孝^{*3}, 大 庭 英 雄^{*4}
森 谷 周 行^{*4}, 橋 本 英 一^{*4}A Design Support Method for Component Arrangement of
Space Satellites Using Bi-level Optimization

(Preliminary Study on a Piggyback Satellite Design Case)

Kazuhiro IZUI^{*5}, Shinji NISHIWAKI, Yayoi MURASE,

Masataka YOSHIMURA, Hideo OHBA,

Shuko MORIYA, Hidekazu HASHIMOTO

^{*5} Department of Aeronautics and Astronautics, Kyoto University,

Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

Component arrangement in space satellites is an important design process at the conceptual design stage, since component location influences a range of fundamental characteristics of a satellite, and design change in the latter detailed design stage is quite difficult. In this research, a preliminary study for development of systematic design methods for such component arrangement based on optimization techniques is conducted. The component arrangement design problem is formulated as a two-objective optimization problem, and this optimization problem is solved using a bi-level optimization procedure. At the first optimization step, the genetic algorithm is applied to obtain the approximate location of components, and the second step uses the successive quadratic programming to determine the detailed positions of the components. Furthermore, this paper proposes a competent genotype representation technique for handling a variety of component arrangement patterns during the genetic algorithm optimization process. Finally, the proposed method is applied to component arrangement design of a practical small piggyback satellite in order to illustrate effectiveness of the proposed method.

Key Words: Design Engineering, Engineering Optimization, System Design, Mixed Continuous/Discrete Design Variables, Space Satellite Design, Component Arrangement, Bi-level Optimization

1. 結 言

人工衛星を構成するバッテリー, 計算機, 姿勢制御機器などの主要搭載機器の配置は, 人工衛星の質量特性等の基本性能に大きく影響を与える。そして, 一度その配置を決定して詳細設計を行えば, 詳細設計後に変更することが難しいため, 構想設計段階において十分に検討, 評価をしなければならない。しかしながら, 配置を適切に決定するには, 機器やパネルの強度や熱に対する耐性などの満足すべき設計要件が多いうえ, 配置可能な領域がごく限られている。このような理由から, 設計者の経験と勘のみに基づいて適切な機器の配置を決定することは非常に難しいため, 最適化等の数理的な手法により合理的に決定する方法が必要とされている。

このような配置最適化問題を解く方法は, これまでに数多く提案されており, 特に詰込み型問題の研究に関して多くの報告がある。ここで, 詰込み型問題とは,

定められた大きさや形状をもつ複数の材料をできるだけ小さな面積の板から, むだなく取出すという板取り問題に代表される問題⁽¹⁾⁻⁽³⁾や, 三次元の大きさをもった複数の機器をできるだけ小さな容器に納める問題⁽⁴⁾⁽⁵⁾である。この種の問題では, 配置物の座標を設計変数とすると, 機器の重複配置の制約を取扱うことが非常に煩雑になるが, 機器の相対位置関係を設計変数にしたり⁽¹⁾⁽³⁾, 配置方法はあらかじめ定めた規則に従い配置順序のみを設計変数とする⁽²⁾などの方法をとることにより, 非常に効率良く解を求めることが可能であり, VLSI の設計に応用されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかしながら, これらの方法は詰込み型問題に特化しているため, 配置機器をすきまなく埋めることを前提にしており, 本研究で対象としている機器配置問題に適用することは難しい。

これに対して, Michalek らは各部屋の位置を設計変数として取扱い建築物の間取りの最適化を行っている⁽⁸⁾。また, 人工衛星の機器配置問題においては, Grignon らは, 機器座標を設計変数として, 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を用いた最適化法を提案している⁽⁹⁾。これらの方法では配置物の位置を設計変数としていることで, 詰込み型問題に限らない一般的な配置最適化を行うことができる。しか

* 原稿受付 2007 年 1 月 22 日。

^{*1} 正員, 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)。^{*2} 京都大学大学院工学研究科。^{*3} 正員, フェロー, 京都大学大学院工学研究科。^{*4} 宇宙航空研究開発機構 (〒305-8505 つくば市千現 2-1-1)。

E-mail: izui@prec.kyoto-u.ac.jp

し、Langer ら⁽¹⁰⁾が指摘しているように、人工衛星の機器配置問題は、ミッション遂行のための諸条件を満たす必要性や、衛星の構造的な問題から、機器の取り付け可能な位置が離散化された特定の場所に限定されていることが多く、離散変数と連続変数が混在する問題となり、実行可能領域が数多くの部分領域に分離する傾向にある。その結果、機器座標を設計変数とする場合、最適化中に多くの実行不能解が生じやすく、その結果、解探索の効率が非常に悪くなる。このような問題に対処するため、Langer らは、GA の個体集団を分割することや、交叉や突然変異オペレータを自動的に調整する方法を提案している⁽¹⁰⁾が、これらのパラメータの適切な調整は非常に難しく、また、その方法論の有効性について、数理的な実証もなされていない。

そこで本論文では、構想設計段階において、以上の人工衛星の機器配置特有の問題を合理的に取扱い配置を決定するため、最適化手法を用いた新しい設計支援の方法を構築する。なお本研究の課題は、人工衛星の機器配置に特化した設計手法の開発にあるため、ここでは、実際に開発が行われたビギーバック型の小型人工衛星マイクロラブサット1号機⁽¹¹⁾を対象として、その質量特性を最適化手法を用いて設計するための方法論を構築する。以下、2章では、検討対象としたマイクロラブサット1号機の機器配置問題の詳細を説明し、3章で、二段階の手続きを用いた最適化手法を提案する。さらに、提案法の適用結果を4章に示し、有用性を確認する。

2. 設 計 対 象

2・1 マイクロラブサット1号機の基本構造 本論文では、小型衛星の代表的な姿勢制御方式であるス

Fig. 1 Component panels of Micro-LabSat

ピン制御方式を採用した人工衛星、マイクロラブサット1号機を対象に方法論を構築する。図1に示すように、対象とする人工衛星の直径は約0.7m、高さは約0.5mで、八角柱状に置かれた8枚のサイドパネルに周囲を覆われ、上下のパネルで閉じる構造となっている。ミッション遂行上重要な機器は、内部のY型に配置された3枚の機器搭載パネルに搭載される。これらのパネルは、衛星の組立性を考慮し、かつ、機器配置可能領域が十分確保できるように設置されたものである。なお、これらのY型パネルの表裏六つの面の寸法は、縦0.468m、幅0.270mである。

ここで、下部のパネルを xy 平面とし、それに垂直でY形パネルの中心を通る軸を z 軸と座標系を設定する。なお、以下では、混乱を避けるために、Y型の3枚の機器搭載盤を「パネル」と呼び、パネルの表裏のいずれか一方を指す際には「パネル面」と記述することとする。

2・2 設計変数 本衛星の質量特性は、衛星に搭載される多数の機器の配置によって大きく左右される。このうち、下部デッキに搭載される機器は、ミッション遂行上の動作温度が限定されており、下部デッキに搭載されているヒータによる加熱が必要であり、その配置位置は自ずと決定されている。そこで、本問題では、表1に示すY型パネルに搭載する九つの機器の位置に関する決定を行う。設計変数は、これら九つの機器を配置するために選択するパネル面と設置方向、およびその座標である。この中で、選択するパネル面と設置方向は離散設計変数となり、設置座標は、

Table 1 Mass and dimensions of the 9 components

Components	Mass (kg)	Width (m)	Height (m)	Depth (m)
Attitude Control Equipment (ACE)	2.470	0.240	0.160	0.120
Power Control Electronics (PCE)	2.997	0.224	0.184	0.140
Communication Control Electronics (CCE)	2.810	0.240	0.160	0.120
Magnetic Torquer (MTQ)	0.746	0.340	0.023	0.030
Mission Onboard Computer (MOBC)	1.450	0.190	0.145	0.078
Wheel (WHL)	2.348	0.150	0.150	0.091
Transmitter/ Receiver and Diplexer (TRX_DIP)	2.324	0.170	0.115	0.074
Magnetic Sensor (MS)	0.167	0.156	0.036	0.037
Fiber Optical Gyro (FOG)	0.138	0.077	0.036	0.026

パネル面上の局所座標系を用いた連続設計変数となる。なお、緒言でも述べたように、本機器配置問題も人工衛星の機器配置問題特有の離散変数と連続変数の取扱いが難しい問題を有しているうえ、配置可能領域の狭さにより、機器どうしの重なり合いなどの制約条件の違反が発生しやすい難しさをもつ。

2.3 評価特性 人工衛星の姿勢を安定化させるためには、衛星全体の慣性性能率ができるだけ適切な値となるように、機器を配置しなければならない。すなわち、いま、回転中心を z 軸とすると、安定な回転を得るためには、以下の2種類の慣性性能率比 I_1 、 I_2 がそれぞれ十分大きな値となる必要となる。

$$I_1 = \frac{I_{zz}}{I_{xx}} \dots\dots\dots (1)$$

$$I_2 = \frac{I_{zz}}{I_{yy}} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{zz} はそれぞれ x 軸、 y 軸、 z 軸まわりの慣性性能率である。

他方、機器配置を決定する際には、機器間の干渉を避けなければならない。すなわち、機器間に配線のスペースや接続端子を差し込む余地を確保するため、機器間の間隔は規定値 L_1 の長さを確保し、パネルの端から機器までの距離は、規定値 L_2 以上の長さを確保する。パネル面上の局所座標の原点を、そのパネル面の左下角とし、パネルの高さを H 、幅を W とすると、この配置制約関係は、

$$\begin{aligned} s_i + w_i + L_1 &\leq s_j \\ t_i + h_i + L_1 &\leq t_j \quad (i, j=1, 2, \dots, 9, i \neq j) \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} s_i &\geq L_2, \quad s_i + w_i + L_2 \leq W \\ t_i &\geq L_2, \quad t_i + h_i + L_2 \leq H \quad (i=1, 2, \dots, 9) \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

と表される。ここで、 (s_i, t_i) は、各パネル面の左下角を原点とする局所座標系における、機器 i の左下角の座標であり、 h_i, w_i はそれぞれ機器 i の高さおよび幅である。

さらに、 z 軸まわりのスピンを安定的に維持するために、慣性主軸の z 軸からの傾き ϕ が許容角度 ϕ_a 以下とする必要がある。ここで、慣性主軸の z 軸からの傾きは、慣性性能率と慣性乗積の値によって構成される以下のマトリックス M の固有ベクトルを計算することによって算出される。

$$M = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

以上から、本論文では、二つの慣性性能率比 I_1 、 I_2 の

最大化を目的関数とし、機器間の干渉、慣性主軸の傾きを制約条件とした、最適化問題を取扱う。

3. 機器配置問題の最適化手法

3.1 二段階最適化 以上のような人工衛星の機器配置問題を解くうえで最も困難な課題は、離散変数と連続変数の取扱いである。すなわち、本問題では、それぞれのパネル面のように個別に隔離された部分領域から機器を配置する領域を選択し、かつ、その詳細な座標を決定する必要がある。本研究では離散変数と連続変数の取扱いを分離し、第一段階で、離散変数のみを設計変数とする最適化を行い、第二段階では連続変数のみを設計変数とする最適化を行う、二段階の最適化法を提案する。

ここで、第一段階では、各機器を配置するパネル面と、パネル面内での機器の位置関係、および機器の設置方向という離散変数に関する最適化を行う。そのため、組合せ最適化問題において優れた探索性能をもち、遺伝子のコーディングを工夫することで、多様な配置問題に適用可能なGAを用いる。そして、最適化の第二段階では、GAで得られた解を初期点として、局所探索法に基づき、各機器の詳細な配置座標を決定する。本問題の最適化では、機器が重なり合うなどの制約条件の違反を回避しなければならないが、上述のようにGAを適用することで、GAのステップで得られる候補は、重なり合い等の制約条件を満たすことができる。その結果、第二段階の局所探索法を容易に適用することが可能になる。以下にその具体的な手順を述べる。

3.2 GAによる最適化

3.2.1 コード化の概要 GAを適用する段階での設計変数は、各機器を搭載する部分領域、同一部分領域に搭載される機器どうしの上下左右の関係、各機器の設置方向である。これらについて、以下の手順ののちで設計変数のコード化を行う。

(1) ミッション遂行のために配置位置が限定されている機器を優先的にコード化する。例えば、機能的に配置位置が限定される機器や、質量や寸法が特に大きい機器がこれに相当する。

(2) 二つの配置位置候補から一つの機器の配置位置を選ぶ場合、あるいは、機器を縦置きにするか横置きにするかを決めたい場合、配置位置候補の遺伝子を2進数で表現し、 $\{0, 1\}$ のいずれかの値をとることとする。

(3) 三つ以上、 n 個の配置位置候補から一つの機器の配置位置を選びたい場合、配置位置候補を整数の

遺伝子で表現する。配置位置候補に 0 から $n-1$ までの値を割当て、遺伝子が $\{0, 1, \dots, n-1\}$ のいずれかの値をとることとする。

(4) 多数の配置位置に多数の機器を配置する場合、順列の遺伝子で表現する。 m 個の配置位置候補があり、その中から k 個の機器の配置位置を選びたい場合 ($k \leq m$)、遺伝子は m けたとなり、順列のけたは配置位置を表し、順列の数字はそれぞれの機器を表す。例えば、五つの機器配置候補に二つの機器を配置する際に、順列の遺伝子が $[5, 1, 3, 4, 2]$ となった場合、1 番めの機器を 2 番めの位置に、2 番めの機器を 5 番めの位置に配置する。1, 3, 4 番めの位置は空白とする。

人工衛星の配置設計では、上述のように配置可能空間の狭さや機器の機能的条件が存在することから、考慮すべき制約条件は多い。GA による最適化では、制約条件の違反などによって極端に目的関数が悪くなることによる致死遺伝子の発生が頻発すると、探索効率が低下する。そこで、上のように(1)の手順をとることにより、致死遺伝子が発生することを防ぐ。また、(2)から(4)のいずれのコード化に基づき、統一的な方法を構築することは、種々の人工衛星の機器搭載に柔軟に対応することが難しくなり、必ずしも得策とはいえない。

そこで、本研究では、このコード化を、おのおの人工衛星の機器搭載条件に基づき、(2)から(4)のコード化法を適切に組合わせ設定することにした。以下の項では、マイクロブサット 1 号機の場合について、コード化の詳細を説明する。

3・2・2 配置パネルの選択 図2のように、機器の配置部分領域であるパネル面に番号を付ける。ここではパネル面 6 と 1、そして 2 と 3、さらに 4 と 5 がそれぞれ同一パネルの表裏を表している。はじめに、パネルの強度上の制約から、パネルへの質量配分ができるだけ均等になるように、最も重い三つの機器、ACE, PCE, CCE を図 2(a) のように別々のパネルに搭載する。いま、 120° ごとに配置された 3 枚のパネルから搭載するパネルを選択するが、下部デッキに搭載される機器の位置が固定されているため、衛星は対称ではなく、3 枚のパネルを区別して選択する必要がある。そこで遺伝子列では、搭載パネルを決定するために ACE は $\{0, 1, 2\}$ の整数の遺伝子を用い、三つのパネルのうちから配置するパネルを表現する。PCE については $\{0, 1\}$ の 2 進数の遺伝子で表し、残り二つの各パネルのうちのどちらのパネルに搭載されるかを決定する。CCE は最後に残ったパネルに搭載する。またパ

ネルの表裏のうち、搭載する面を表現するために、ACE, PCE, CCE のそれぞれに $\{0, 1\}$ の 2 進数の遺伝子を用いる。なお、これら三つの機器は、寸法が大きいため、他の機器を同じパネルに搭載することはできない。

次に、寸法上の理由により、同一のパネル面に搭載することができない MTQ と MOBC の搭載パネル面

(a) Allocation of ACE, PCE and CCE

(b) Allocation of MTQ and MOBC

(c) Allocation of small components

Fig. 2 Component arrangement procedure

を決定する。これには、図2(b)のように、残る三つのパネル面から搭載する場所を決定する必要があるため、MTQは{0, 1, 2}の整数の遺伝子、MOBCは{0, 1}の2進数の遺伝子を用いて搭載パネル面を表現する。なお、以上の五つの機器は、寸法的制限から、縦横の向きは縦置きの一方向に限定される。

この時点で残っている機器配置可能領域は、機器が一つも搭載されていないパネル面と、すでにMOBCが置かれたパネル面の余白領域、そして、すでにMTQが置かれたパネル面の余白領域である。これらの領域に残りの四つの機器を配置する。図2(c)に示されるように、一つのパネル面に、二つまたは三つの機器が配置可能であるため、ここでは計八つの配置可能な領域が存在する。したがって、この八つの領域に四つの機器を配置することになるため、遺伝子のコード化法の(4)を適用する。さらに、縦横の長さが等しいWHLを除く三つの機器については、配置する縦横の向きを{0, 1}の2進数の遺伝子で表す。

3・2・3 同一パネル面上の位置関係 一つのパネル面上に機器が一つしか搭載されていない場合、GAを適用する段階では、パネル面の中央にその機器を配置し、質量特性を評価する。しかし、もし、一つのパネル面に二つ以上の機器が搭載された場合は、機器どうしの上下左右の関係を決定する必要がある。

まずMOBCとMTQのパネル面上の位置について考える。MOBCはパネル面の上部または下部、MTQは、左側または右側に寄せて配置することができる。この寄せる方向を決めるために、それぞれ{0, 1}の2進数の遺伝子を用いる。次に、空白を含めた八つの空間に配置された四つの機器の位置関係を決定する。例えば、図2では、説明の便宜上、パネル面に配置され

Fig. 3 Small component arrangement patterns

た二つまたは三つの機器を縦に並べているが、必ずしも機器がそのまま縦に搭載しなければならないわけではなく、機器の数とスペースの広さによって、図3のようにさまざまな配置パターンが考えられる。

そこで、図3の三つの配置パターンの候補の中から、そのパネル面の余白領域の縦横の長さ、その場所に搭載される機器の設置する向き、機器の縦・横の幅を考慮して、配置可能なパターンを選び出し、そのパネル面における機器どうしの上下左右の関係を決定する。

この操作では配置候補となる機器によって異なる処理が必要である。例えば、図2(c)のように、MTQが搭載されたパネル面の1, 2, 3の空間に、TRX_DIPとMS, FOGの三つの機器が、上から順に配置される場合、図4のようにTRX_DIPとMS, FOGをすべて縦向きに配置しなければ、遺伝子で指定したすべての機器を搭載することができなくなる。したがって、この場合には、配置パターンを決めるための遺伝子を設定しない。これに対し、配置する機器が2個の場合は、上下の配置位置関係を決定するために2進数の遺伝子を用いる。

以上のように、遺伝子と配置の関係を設定することで、個体の遺伝子の値が決定された際に、それに応じた各機器が搭載されるパネル面、そのパネル面での機器どうしの上下左右の関係、機器の置かれる方向が確定する。このような方法によりコード化を行うことで、すべての可能な遺伝子の組合せにおいても、機器どうしの重なり合いが起こらないため、致死遺伝子の発生を防ぐことができる。

3・2・4 交叉オペレータ 3・2・1項で述べたように、本手法の機器配置表現では、遺伝子列に2進数、整数、順列の遺伝子が混在しているため、これらの遺伝子に応じた交叉を行う必要がある。したがって、2進数の遺伝子および整数遺伝子にはそれぞれ2進数交叉、整数交叉を一様交叉的に行い、順列遺伝子には周

Fig. 4 Arrangement example

期交叉⁽¹²⁾を適用する。このようにすべての遺伝子の部位に対して、何らかの交叉を実行する。表2に本例題における交叉方法の適用対象を示す。突然変異も遺伝子の種類に応じて、異なる方法を適用する。すなわち、2進数の遺伝子では遺伝子を反転させ、整数遺伝子では、ランダムで遺伝子の値を決定し、順列遺伝子に対しては、順序の入れ替えを行う。

3・2・5 目的関数 式(1)、(2)に示したようにマイクロサブセット1号機の機器配置問題では z 軸まわりの慣性性能率に対する x 軸、 y 軸まわりの慣性性能率の比を十分大きな値とする必要がある。このとき、 xy 平面内の任意の軸まわりの z 軸に対する慣性性能率のうち、最小のものを最大化し、一目的問題として定式化する方法と、式(1)、(2)の慣性性能率比それぞれを最大化するという二目的最適化として定式化する方法がある。人工衛星の構想設計段階では、一つの厳密な最適解を得るよりも、複数の設計解候補を比較検討対象として得ることが望ましいため、ここでは、後者の二目的最適化として定式化する。そして、多目的GAの一つであるNSGA-II(Non-dominated Sorting Algorithm II)⁽¹³⁾による個体選択方式を採用し、最適化結果として非劣解集合を得る。

3・3 局所探索法を用いた詳細座標の決定 二段階めの局所探索法による最適化では、GAにより得られた解を初期点として、各機器の詳細な座標を決定する。目的関数はGAと同様に、式(1)、(2)の二つの慣性性能率比の最大化であり、次式のように重み付けをして単一目的に変換する。

$$f = wI_1 + (1-w)I_2 \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

$$0 \leq w \leq 1 \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

ここで、 w は重み係数であり、適宜設定する。また、制約条件には、式(3)、(4)を設定する。

Table 2 Crossover selected according to gene types

Crossover types	Gene types
Cycle crossover	Placement of WHL, TRX_DIP, MS, FOG
Binary crossover	Panel of PCE
	Panel of MOBC
	Panel face of ACE
	Panel face of PCE
	Panel face of CCE
	Location (top or bottom) of MOBC
	Location (left or right) of MTQ
Integer crossover	Placement direction of TRX_DIP, MS, FOG
	Panel of ACE
	Panel of MTQ

一段階めのGAによる最適化により、機器間の間隔、パネルからの距離の制約を満たさないものは自動的に除外されているため、式(3)および式(4)の制約条件を自動的に満足した初期点から局所探索法による探索を開始することができる。また、GAは、設置座標のような連続変数や、式(3)および式(4)のような制約条件が存在する問題は取扱いが困難であるが、局所探索法を利用することで、制約条件を考慮した最適化を効率良く行うことができる。

4. 最適化結果

以上に述べた手法をコンピュータ上に実装し、マイクロサブセット1号機の機器配置問題を解いた。本章では、その詳細と結果について述べる。

まず、制約条件である慣性主軸の傾きの上限 ϕ_a を 5° 、機器間の最小間隔 L_1 と、機器とパネルの端との最小距離 L_2 をいずれも0.040 mに設定し、一段階めのGAによる最適化を行った。前もって行ったパラメータスタディから、ここではGAの世代人口を100、世代数を100、交叉率を0.8、突然変異率を0.05と設定した。この結果、23個のパレート最適解が得られた。これを図5の○印で示している。そして、それぞれの解を初期点として、二段階めの最適化である局所探索法を適用した。ここでは局所探索法として、逐次二次計画法(Successive Quadratic Programming: SQP)を利用した。また重み係数 w は例として0.5とした。この結果を×印で示している。GAで得られた

Fig.5 Optimal solutions for component arrangement optimization problem

(a) Top view

(b) Side view (Panel 1 and 2)

(c) Side view (Panel 3 and 4)

(d) Side view (Panel 5 and 6)

Fig. 6 9 components allocated on the component panels in solution A

解と、その解に対して SQP を適用して得た解の対応関係を示すために、両者を直線で結んでいる。

二段階最適化によって得られた最終的な解のうち、慣性性能率比 I_z が最も大きい解を解 A とし、その解における機器配置を図 6 に示す。図 6(a) の x, y 軸はそれぞれの慣性主軸の方向を示している。GA の解を初期点として SQP を用いて最適化を行った結果得られた解は、機器間の干渉がなく、パネル面の端から機器までの間隔も保たれ、式 (3) と式 (4) の配置制約を完全に満たしている。また、大型の機器が下方に集中する傾向があることがわかる。これは、2・2 節でも述べたように、下部デッキに配置設計対象外の機器が搭載されており、衛星全体の重心が z 軸の下方にあるためである。この重心近くに機器が集中することによって、 I_{xx} と I_{yy} の値を小さくし、慣性性能率比を向上させている。また図 6(a) から、衛星の回転軸である z 軸からなるべく遠いパネルの外側の端に機器を配置する傾向があることがわかる。これは、機器の設置座標が z 軸から遠いほど I_{zz} の値が大きくなるためであり、慣性性能率比が大きくなるように最適化されている様子が確認できる。

次に、得られた解の中で、 I_1 が最も大きい解を解 B とし、解 A と比較する。解 A, B のそれぞれの慣性性能率比を表 3 に、そして解 B の機器配置を z 軸方向から見た様子を図 7 に示し、図 6 の解 A と比較する。

Table 3 Design criteria of solutions A and B

Solutions	$I_x(\text{kgm}^2)$	$I_y(\text{kgm}^2)$	$I_z(\text{kgm}^2)$	I_z/I_x	I_z/I_y
A	219	228	208	0.949	0.911
B	213	234	207	0.974	0.888

Fig. 7 9 components allocated on the component panels in solution B (top view)

図7の x , y 軸も、それぞれの慣性主軸の方向を示している。

解Bの配置において、機器を z 軸から遠いパネルの外側の端に配置して、 I_{zz} の値を大きくしている傾向は、解Aの場合と同様である。しかし、解Aでは、質量が最大の機器であるPCEの質量中心を、 y 軸に近い位置に配置することで I_{yy} の値を低減させているのに対し、解Bでは、PCEの質量中心を x 軸に近い位置に配置しており、 I_{xx} が小さい値となっている。以上の検討から、二段階最適化が機能していると考えられる。

また、最終的に得られた解においても、多様な配置候補を得られたことを確認することができた。これは本手法の一段階めのGAで、多目的最適化を採用しているためであり、複数の非劣解に基づき二段階めの最適化を行うことで多様な解を得ることができたものである。

また、いずれの解においても、慣性性能率比の向上のために、多くの機器間の距離や機器のパネルからの距離が規定値まで縮められ、また慣性主軸の傾きが 5° となっており、多数の制約条件がアクティブになっていることが確認された。GAはこのような制約条件の厳密な取扱いが困難な場合が多いが、局所探索法による最適化を行うことで、効率良く制約条件を取扱う探索が可能となった。この点からも、提案した二段階最適化法が有効であるといえる。

5. 結 言

人工衛星の機器配置最適化問題では、設計可能領域の複雑さからくる離散変数と連続変数の混在と、多数の制約条件の存在を考慮しなければならない。このような人工衛星特有の問題を扱うために、本論文では実際に打上げられたビギーバック型の小型人工衛星を設計対象として取上げ、GAと局所探索法を段階的に用いることによる機器配置の構想設計支援法を提案した。

GAを適用する際に配置問題のコード化を工夫することにより、機器の干渉を発生させずに最適化が実行できるため、効率の良い最適化が可能となった。さらに、GAで得られた解を初期点として局所探索法を適用することにより、配置範囲や慣性主軸の方向など、詳細な制約条件を考慮した機器座標を最適化することができた。

本手法を用いることにより、制約条件が多く、複雑な配置領域をもつような人工衛星の機器配置問題において、最適化手法を用いた合理的な意思決定を行うこ

とが可能であることが示された。また、一段階めの最適化で多目的GAを用いることで、非劣解集合を得ることができると、二段階最適化の結果としても複数の設計候補を得ることができた。

ただし、さらに大規模な衛星へ本手法を発展させるうえで、広いパネル上での複数の機器を配置する問題が含まれる場合がある。このような問題に対しては柔軟な遺伝子表現法の開発の必要性も考えられる。また、本問題では、 z 軸まわりの慣性性能率を高めるために、各機器が衛星の中心軸からできるだけ離れた位置に移動し、空間的な干渉条件が必ず満足されるが、一般的な衛星を扱う場合にはその考慮は不可欠となる。これらは本手法を拡張する際の検討課題である。

文 献

- (1) Fujita, K. et al., Approach for Optimal Nesting Using Genetic Algorithm and Local Minimization Algorithm, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 59, No. 564 (1993), pp. 2576-2583.
- (2) Jakobs, S., On Genetic Algorithms for the Packing of Polygons, *European Journal of Operational Research*, Vol. 88, No. 1 (1996), pp. 165-181.
- (3) Chen, T.-C. and Chang, Y.-W., Modern Floorplanning Based on B*-Tree and Fast Simulated Annealing, *IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol. 25, No. 4 (2006), pp. 637-650.
- (4) Corcoran, A. L. and Wainwright, R. L. (Berghel, H. et al. eds.), A Genetic Algorithm for Packing in Three Dimensions, *Proceedings of the 1992 ACM/SIGAPP Symposium*, (1992-3), pp. 1021-1030, Kansas City, ACM Press, New York.
- (5) Martello, S. et al., The Three-Dimensional Bin Packing Problem, *Operations Research*, Vol. 48, No. 1 (2000), pp. 256-267.
- (6) Murata, H. et al., VLSI Module Placement Based on Rectangle-Packing by the Sequence-Pair, *IEEE Transactions on Computer Aided Design*, Vol. 15, No. 12 (1996), pp. 1518-1524.
- (7) Murata, H. et al., VLSI/PCB Placement with Obstacles based on Sequence Pair, *IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Vol. 17, No. 1 (1998), pp. 60-68.
- (8) Michalek, J. J. et al., Architectural layout design optimization, *Engineering Optimization*, Vol. 34, No. 5 (2002), pp. 461-484.
- (9) Grignon, P. M. and Fadel, G. M., A GA Based Configuration Design Optimization Method, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 126, No. 1 (2004), pp. 6-15.
- (10) Langer, H. et al., A Multi-objective Evolutionary Algorithm with Integrated Response Surface Functionalities for Configuration Optimization with Discrete Variables, *Proceedings of the 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, AIAA 2004-4326, (2004-8), Albany, New York.
- (11) Micro-LabSat, URL: <http://www.ista.jaxa.jp/aet/ste/microlabsat/0index.html>, (in Japanese).
- (12) Oliver, I. M. et al., A study of permutation crossover

operators on the traveling salesman problem, *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*, (1987-7), pp. 224-230, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.

- (13) Deb, K. et al., A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2 (2002), pp. 182-197.
-