



空間デザイン支援のための適応成長型形状表現

長坂, 一郎
田浦, 俊春

(Citation)

精密工学会誌, 65(4):525-531

(Issue Date)

1999-04-05

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001547>





空間デザイン支援のための適応成長型形状表現*

長坂 一郎**

田浦 俊春***

Adaptive-Growth-Type 3D Representation for Spatial Design

Ichiro NAGASAKA and Toshiharu TAURA

In this paper, the design of spatial shapes of function carriers and the spatial layout is called a spatial design. In it such design processes as constraint satisfaction are considered. In general, since the constraint satisfaction problem in spatial design can often be very difficult to solve because of a lack of constraints and countless combinations of the layout, a variety of solutions which satisfy constraints should be allowed. Therefore, in order to allow such variety, the notion of developmental processes in biology was applied and adaptive-growth-type 3D geometric representation based on evolutionary algorithms was proposed. Here, the adaptive-growth type means the shape expressed in the process, which develops through interaction with an outside environment, like shape generation of a living organism in the natural world. Finally, the representation was verified by applying it to the component layout problem in the early stage of satellite design.

Key words: geometric representation spatial design, genetic algorithm, classifier system

1. はじめに

我々を取り巻いている様々な人工物は、何らかの機能を実現すべく設計されるものであり、多くの機能要素——実体として形状を有する、機械的な意味での構成要素——を持つシステムとしての構造を有している。そして、人工物は、それらの構成要素の機能が実現することで、全体としての機能を発揮すると考えられる。こうした人工物の中で、特に機械や建築の設計では、機能はその構成要素の形状と配置を介して生じることが多く、その内容を決定する設計プロセスは、このような人工物の設計における本質的な部分の一つである。例を挙げれば、機械の機構設計において、有限の空間の中に機械の構成部材の形状を決定し配置することや、建築設計において建設可能な敷地空間に要求された機能の部屋などの空間を配置するプロセスなどである。本研究では、このような設計対象の要求された機能要素の3次元形状とその空間的配置を決定することを空間デザインと呼ぶこととし、このような設計プロセスを、制約を発見し設定する行為と、その制約を充足させる行為の繰返しとして、制約充足プロセスの枠組みの中でとらえる。

一方、従来このようなプロセスは、設計解が得られるまでスケッチを重ねたり物理的にプロトタイプを作成することによって進められることが多く、人工物の構成が複雑になるに従って非常に時間や費用がかかり、困難なものであった。そこで、空間デザインを支援するため、計算機を用いて機能要素の3次元形状を、求める機能を生じるように最適化する研究（例えば、Smithら¹⁾）や、与えられた形状の空間的配置を生成する研究（例えば、Caganら²⁾）などが行われている。そして、これらの研究の多くは、空間デザインの2つの側面である3次元形状とその空間的配置の決定問題を別々の枠組みの中で取り扱っており、各機能要素の形状とそれらの配置を同じ枠組みの中で求めることは困難であった。また、そこではそれぞれの問題を制約最適化問題（COP: constraint optimization problem）ととらえ、ただ一つの充足解を発見することを目指としている。しかし、空間デザインのように複数の機能要素がある場合、機能要素のとり得る形状や、その空間的配置の組合せは無数にあ

り、またその制約も簡単なパラメータや数式表現でその特性を表現することができないことが多く、これに加えて空間デザインを行う上での制約、つまり機能要素の形状とその空間的配置に関する具体的な条件が不足しているため、上述したような制約最適化問題とならない場合が多い。

そこで、本研究では空間デザインの支援のためには、各機能要素の形状とそれらの配置を同じ枠組みの中で求めることと同時に、ある仮定された制約のもとに計算機が多様な解を設計者に提示することで設計者に解の選択の余地を残し、曖昧な制約を順次決定しながらデザインを進めるということが重要であるという立場をとる。そして、自然界における生物の形状生成の多様性に着目し、最近注目を浴びている進化的計算手法を用いた適応成長型3次元形状表現方法を構築する。ここで、適応成長性とは自然界の生物の形状生成のように、成長する過程において外部の環境との相互作用を通じて表現する形状を決定していくことを意味する。このような形状表現により、空間デザインにおける制約を環境として、その環境との相互作用から形状を生成することにより、形状とその空間的配置を同じ枠組みの中で求めることが可能となる。そして、環境としての制約を変化させることや、進化的計算手法における遺伝的操作によって形状の代替案を生成することによって、空間デザインに求められる解の多様性が実現される。ここで、本形状表現における多様性とは、形状の特徴を保存しつつ、形状のバリエーションを示すことができることを意味している。

このようなアプローチが、自然界の生物におけるように、各機能要素の形状が自律的に環境に適応するレベルにまで実現されれば、従来まで別々にしか取り扱えなかった、形状とその配置問題を一気に解くことが可能となると考えられるが、本論文においては、そのようなアプローチへの第一歩として、配置とその形状に対する制約を少なくし、制約密度を低くすることによって、多数の中間解を生成し、その中間解を適応成長させることによって多様な解を生成することを試みる。

2. 空間デザイン

2.1 本方法論の対象とする空間デザインの内容

本論文が支援の対象とする空間デザインとは、実体設計フェーズの上流段階において、要求された機能要素の3次元形状とその空間的配置を決定することである。そして、Pahlらの実

* 原稿受付 平成10年4月1日

** 学生会員 東京大学大学院（東京都目黒区駒場 4-6-1）

*** 正会員 東京大学人工物工学研究センター

体設計における一般的な設計手順⁴⁾を参考にしてその作業内容を挙げると以下になる。

- (1) 実体の設計要件を決める。
- (2) 空間内の制約条件を縮尺図面化する。
- (3) 実体を決定する主要機能要素を決める。
- (4) 実体を決定する主要機能要素の初期レイアウトと形状設計を展開する。
- (5) 適切な初期レイアウトを選択する。

2.2 空間デザインにおける制約

一般に、制約とは問題の構成要素間に成り立つべき性質を記述したものであるが、ここで問題を空間デザインに限定した場合、その構成要素とは機能要素のことであることは明らかである。そして、この機能要素間に成り立つ性質を記述する場合に考慮すべき項目、つまり制約の種類として、本研究では機能要素の種類、概略形状、体積、位置（方向・距離）、寸法および数を取り上げる。これは本研究では、より一般的な空間デザインの支援方法を考察の対象としているため、必然的に考慮する項目があまり対象に依存しない一般的なものとなるためである。

ここで、これらの項目を空間デザインの2つの側面である、「機能要素の3次元形状」と「機能要素の空間的配置」に従って分類すると以下になる。

1. 機能要素の3次元形状に関する制約

- 種類
- 概略形状
- 体積
- 高さ、幅、奥行きなどの寸法

2. 機能要素の空間的配置に関する制約

- (相対的な) 位置（方向・距離）
- 数
- 干渉しないこと

この中で、2つの機能要素が干渉しないことは、空間デザインにおける制約を考慮する上で明らかな項目として加えている。また、本論文では以降、この2つの空間デザインに関する制約を、それぞれ「幾何学的制約 (geometrical constraints)」と「空間配置制約 (spatial layout constraints)」と呼ぶこととする。

3. 適応成長型形状表現法

前述した通り、空間デザインにおける制約充足問題は極めて困難な問題となる場合が多い。このため制約充足解には、局所最適解を許容し、設計者の選択の余地を残すような多様性を確保する必要がある。そこで、本研究ではこのような形状表現のヒントとして自然界における生物の形状生成の多様性に着目する。一般に自然界における生物では、遺伝情報にその形状が直接的に記述されているわけではなく、形状の生成プロセスが記述されており、以下に示すようにその遺伝情報（遺伝子型）と環境との相互作用によって形態（表現型）が決定される。そして、このことが生物界の形状の多様性をもたらしている。

$$\text{形態} = f(\text{遺伝情報} \times \text{環境})$$

しかし従来のCADでは、その支援する設計活動のさまざまな側面のうち、製造に関する側面や機能的側面を重視してきた結果、これまでのCADにおける形状表現は、いかにその形状を正確に表現するかを追求するものとなっており、その記述は形状をダイレクトに表現しているものであるため、生物と比較して形状生成の多様性において貧しいのが現状である（図1）。

そこで、本研究ではこのような生物の形状表現の豊かさに注目し、形状をダイレクトに記述するのではなく、形状を間接的

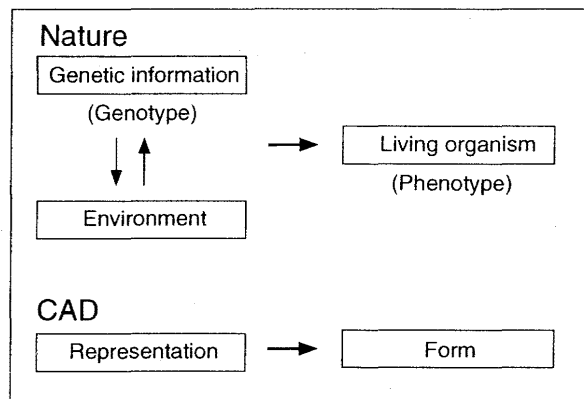


Fig. 1 Shape generation in nature and CAD

に記述するコードとその環境を参照することによって形状を表現する適応成長型形状表現法を、空間デザインに求められる形状表現として採用する。この表現法は、空間デザインにおける制約に柔軟に対応し、多様な設計解を生成することを目的としているため、従来のCADにおいて求められていたような正確な形状の表現を目指すものではない。

筆者らは文献³⁾において生成ルールに注目した形状表現法を提案したが、この表現法も上記のような考えを背景として開発されたものである。この形状表現法においては、一つの形状表現として独立させるため、その形状の内部環境を適応すべき環境として与えていた。しかし、空間デザインにおけるように、複数の機能要素の中において求められる制約に適応する場合を考えると、形状の外部環境に適応するメカニズムを考える必要がある。そこで、本論文では生成ルールの注目した形状表現法を、適応成長型形状表現として外部環境に適応できるように拡張する。

3.1 生成ルールに注目した形状表現の概要

生成ルールに注目した形状特徴の表現法とは、生成される形状の状態を条件として、形状の生成過程によって記述することを試みるものである。具体的には、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms: GA) をもとにした進化的計算手法の一つであり、適応システムであるクラシファイアシステム (Classifier System: CS)⁶⁾を応用することによって、比較的自由的な形状を成長させながら、その周囲の状況に適応させることを試みるものである（詳しくは文献³⁾を参照）。以下に、その基本となる手法である細胞モデル、および形状生成のプロセスについて簡単に説明する。

3.1.1 細胞モデル

自由曲面形状を生成ルールを用いて間接的に表現するための準備として細胞モデルを採用した。具体的には、まず立体形状の重心から形状の表面までの距離によって立体形状を表現する Well tessellated sphere 表現（モザイク状球面表現）⁷⁾を応用し、自由曲面形状を一旦球面上の細胞の密度に変換し、球面上の細胞の密度分布に対応付ける。次に、細胞分裂の仕方を複数のルールによって制御することでこの細胞の分布を表現する。この細胞分裂を制御するルールの集まりをここでは細胞分裂型生成ルール群と呼んでいる（図2, 3）。

3.1.2 形状生成プロセス

この細胞分裂は細胞分裂型生成ルール群によって制御される。ここで、すべてのルールを球面上のすべての細胞について適用することは、ある部分的形状特徴を生み出したルールをルール群の中から特定することをより困難なものとするのが考えられる。そこで、球面上の細胞の位置と細胞密度の情報により、ある細胞についてルール群の内どのルールを細胞分裂に適用させるかを特定できるようにしている。これは、発生生物学において、一般にある細胞の周りの化学物質の濃度などの環境情報

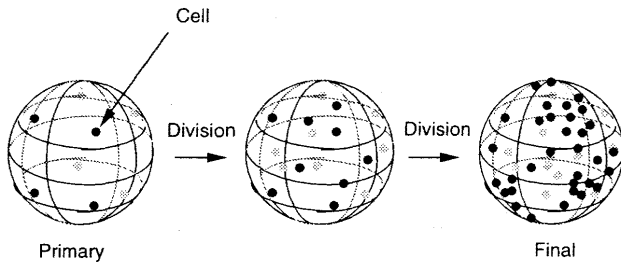
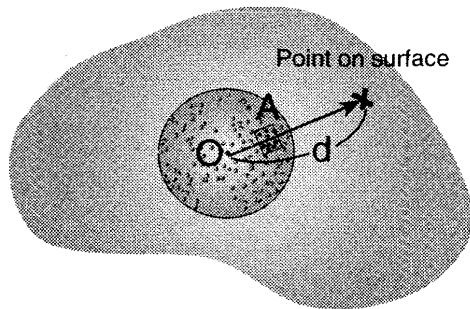


Fig. 2 Cell division model



d = density of cells near point A

Fig. 3 Correspondence between shape and distribution of density in cell division model

およびこの情報から判断される細胞の位置によって遺伝子全体の中でその細胞に必要な遺伝情報を特定していることのアナロジーである。

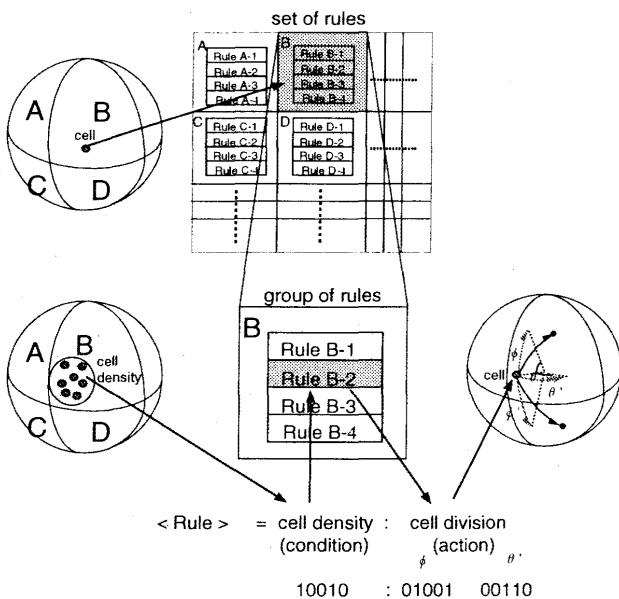


Fig. 4 Rules applying to cell division

図4に示すように、球面を任意の数に分割する。次に、その分割された球面のどの部分に細胞が存在するかによって適用するルール群の範囲を限定する。さらに、その細胞の周辺の細胞密度を、CSの条件部 - < condition > - と比較し、ルール群からさらに1つのルールを特定する。そして、< action >の結果として分裂した細胞群の球面上の密度の差が、球の中心から形状の表面までの距離に換算されることによって形状が生成される。つまり、この細胞モデルにおける細胞分裂の生成ルール群が生物学における遺伝子型 (genotype) にあたり、これが適応され実行された後の細胞密度の分布を形状に変換し間接的に形状という表現型 (phenotype) を生成する。図5にこの関

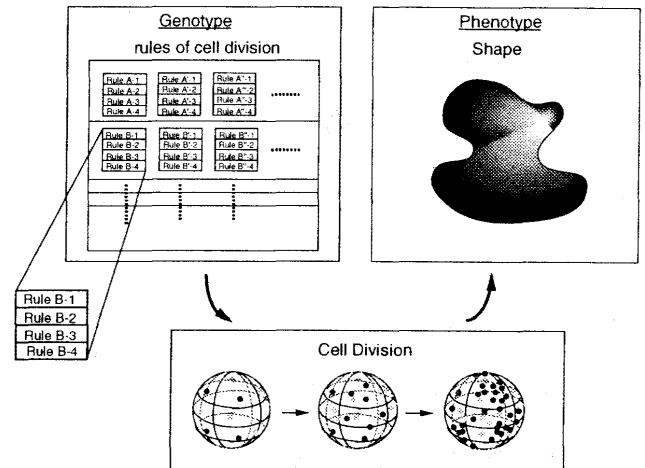


Fig. 5 Genotype and phenotype

parameters	value
don't care percentage	0.0
number of population	32
mutation probability of GA	0.003
crossover probability of GA	1.0

Table 1 CS Parameters

係を示す。

なお、本形状表現において用いられたCSは、ピッツ・アプローチと呼ばれるものでSmith⁸⁾によって開発されたものである。これにより、ルール1個ずつについてCSにおける信用賦与システムを適用する必要がなくなり、複雑な手続きが必要であるバケット・ブリゲート・アルゴリズムが不要となる。なお、表1に用いられたCSの主なパラメータを示す。

3.2 生成ルールに注目した形状表現の拡張

上記の形状表現を、空間デザインにおける他の形状や制約などの外部環境に適応できるように拡張する。

各機能要素の形状が配置すべき空間内において環境に適応する方法は、空間デザインの2つの側面から考えると以下のようものが挙げられる。

- (1) 形状を環境に適応させる
- (2) 環境の状況から、形状の位置を移動させる

ここで本論文では、生成ルールに注目した形状表現を、まず上記の(1)の側面について拡張を試みる。

まず第一に、環境を構成する一つの要素である、空間デザインにおける制約に適応できるように拡張する必要がある。制約を充足させるアルゴリズムには、生成ルールに注目した形状表現における、生成ルールの発見プロセスが直接的に応用することができる。つまり、生成ルールに注目した形状表現では、設計者が入力した既存の形状との類似性を評価関数として、求める3D形状を生成するルール群を発見するものであったが、本システムでは上述した機能要素の形状に対する幾何学的制約を評価関数とする。

第二に、他の形状との関係、つまり複数の機能要素間における制約に適応できるように、形状表現を拡張する。複数の機能要素間の制約とは、第2節の空間デザインの制約における空間配置制約にあたる。このうち、(1)において問題となる制約は、2つの機能要素は互いに干渉しないということである。例えば、図6の左に示すように2つの形状が干渉している場合、その干渉している部分を図右に示すように形状の成長の過程で変化させることが出来れば、干渉が解消される。

そこで、生成ルールに注目した形状表現における部分的形状特徴を生成した細胞分裂型生成ルール群を特定できる特性を利用して、機能要素の形状の内、干渉している部分の生成ルール

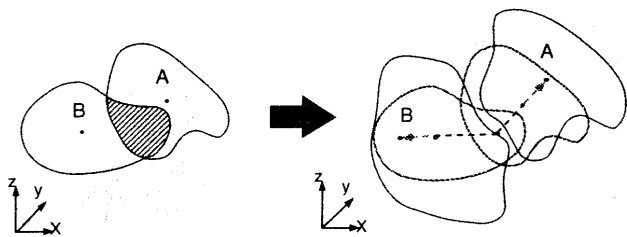


Fig. 6 Shape adaptation

を置き換える。具体的には、以下の3つを順番に試み、干渉を解消したものうち、それぞれの機能要素における幾何学的制約を満たすものを選択することによって干渉を解消する。

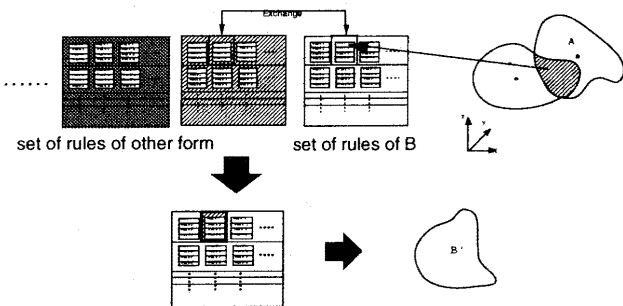


Fig. 7 Partial replacement of rule

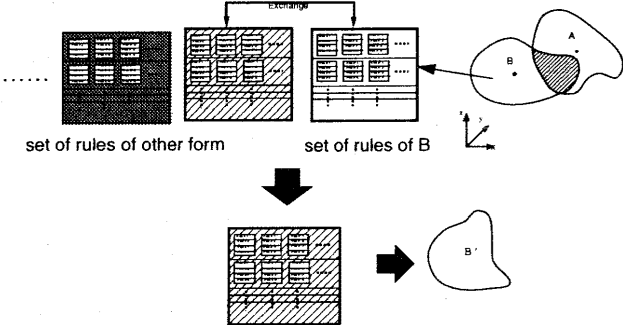


Fig. 8 Replacement of overall rule

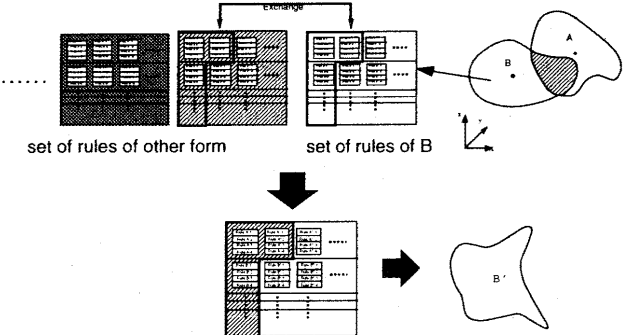


Fig. 9 Generation of new rule

- (1) 干渉した部分に対応する生成ルールを、同じ評価値を持つ他の生成ルールに部分的に置き換える (図7)。
- (2) 同じ評価値を持つ他の生成ルールに全体的に置き換える (図8)。
- (3) 干渉した形状と同じ評価値を持つ他の生成ルールから、新たにルールを生成する (図9)。

このような戦略によって、形状についての適応が実現される。しかし、環境の状況から、形状の位置を移動させることは、現時点においては形状表現自体にはそのメカニズムが実現されておらず、次章に述べるように、外部のアルゴリズムによって適応させる方法を採用している。

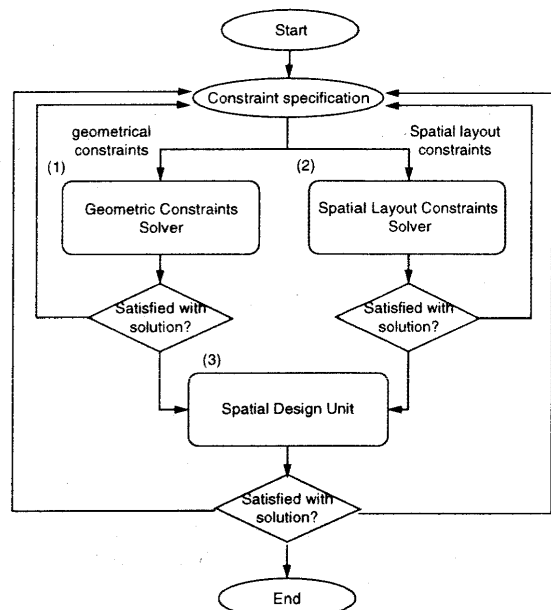


Fig. 10 Flowchart of system

4. 空間デザインの支援方法

4.1 支援システムの全体像

基本的戦略は適応システムであるCSを用いて形状を段階的に生成し、空間的配置の状況に適応させながら空間デザイン解を探索することである。図10に示すように、この支援システムは大きく分けて幾何学的制約ソルバ、空間配置制約ソルバおよび空間デザインソルバの3つの部分からなり、それぞれのソルバは設計者に多様な解を示しながら対話的に制約を決定していくことで空間デザイン解を求めていくものである。全体としては、幾何学的制約ソルバと空間配置制約ソルバによって、それぞれの制約充足解の概要を求めておき、最終的に空間デザインユニットにおいて形状と配置を同じ枠組の中で求めるという流れになっている。つまり、ここでは機能要素の3次元形状とその配置を同時に直接生成するのではなく、空間配置制約に対してはGAを用いた空間配置制約ソルバによって配置問題の概略解を求めておき、それとは別に、幾何学的制約ソルバにおいて適応成長型3次元形状表現を用いて概略形状を求める。そして、その後に空間デザインユニットにおいて2つの制約ソルバの概略解の矛盾点を適応成長型3次元形状表現が持つ形状生成の多様性を応用して、同じ枠組の中で調整するのである。このようなアプローチは、既に決定された形状を取り扱ったり、部分的形状変更に対応する従来の形状表現では扱えず、適応成長型3次元形状表現が、形状を成長させながら環境に適応させるメカニズムを、その形状表現の中に内蔵しているため、初めて可能となったものである。

4.2 空間デザイン解生成アルゴリズム

以下に、この支援システムの3つのソルバについて、その具体的な役割と解生成のアルゴリズムについて、本支援方法の中心的役割を担う空間デザインユニットを中心に説明する。

4.4.1 幾何学的制約ソルバ (Geometric Constraints Solver)
幾何学的制約ソルバは、空間デザインユニットが設計解を生成する前に、機能要素の形状に対する制約を充足させ、その概略形状を求めることを目的としている。ここでは、前節において説明した通り幾何学的制約を充足させるアルゴリズムには、生成ルールに注目した形状表現における、生成ルールの発見プロセスを直接的に応用している。

4.4.2 空間配置制約ソルバ (Spatial Layout Constraints Solver)

空間配置制約ソルバは、空間デザイン解を求めるにあたって、

機能要素間に成り立つ位置関係についての制約を充足させるものである。このソルバにおいては、空間デザインユニットが設計解を生成する前に、機能要素の位置の概略を求めることを目的としている。そのため、ここでは機能要素の中心座標のみを取り扱う。この空間配置制約ソルバによって求められた中心座標から、上述した幾何学的制約ソルバによって求められた形状が生成することになる。具体的には、このソルバは実数表現の染色体をもつ GA を応用しており、VLSI (Very Large Scale Integrated) チップのレイアウト設計 (例えば⁹⁾) において用いられているものと基本的に同様の手法を 3 次元に拡張した手法を採用している。

上述した 2 つのソルバによって、それぞれ機能要素の概略形状と概略の位置を得た後に、この空間デザインユニットによって空間デザイン解を生成する。空間デザインユニットにおけるアルゴリズムは、制約を充足するプロセスではなく、幾何学的制約ソルバと空間配置ソルバが生成した制約充足解を統合し、機能要素の 3 次元形状とその空間的配置を同じ枠組の中で求めることが目的である。ここで、「同じ枠組の中で」求めることは、幾何学的制約ソルバと空間配置制約ソルバが生成した設計解の矛盾する部分について、それぞれに対して「同じ枠組の中で」修正を加え、幾何学的制約と空間配置制約によって生成された 2 つの空間デザインに関する設計解の妥協点を探索し、空間デザイン解を生成することを意味している。以下に、図中の番号に沿いながら、各段階について説明する。

図 11(1) において、空間配置制約ソルバによって生成された、機能要素の座標を得る (図 12 の 1)。次に、図 12 の 2 に示すように、(1) において得られた座標を中心に、形状を生成する。この段階では、機能要素間に干渉はないため、更に形状は段階的に生成される (図 11(2),(3))。図 12 の 3 に示すように、形状が生成されていくに従って、隣接する機能要素が干渉し、共有部分が発生する。この場合、図 11(4),(5),(6) に示すように、形状生成の中心位置と干渉した形状のルールについての調整が同じ枠組の中で行われる。

形状の中心位置の調整は、図 13 に示すように、干渉した機能要素 A, B は、それぞれの形状の生成の中心を $\vec{N}_A, \vec{N}_B$ 方向に移動する。その移動距離は、その共有部分の体積を V_i とすると、以下のように定義する (図 13: 左)。

$$|\vec{N}_A| = |\vec{N}_B| = \sqrt[3]{V_i} \quad (1)$$

空間配置制約ソルバによって生成された形状生成の中心位置を $\vec{N}_A, \vec{N}_B$ 方向に移動させた場合、調整前の中心位置は空間配置制約ソルバによって最適化されているため、調整後はその評価値はほとんどの場合減少することとなる。そこで、形状生成の中心の空間的配置を空間配置制約ソルバによって、全体として空間配置制約に対する評価値を一定の範囲以下に下げないよ

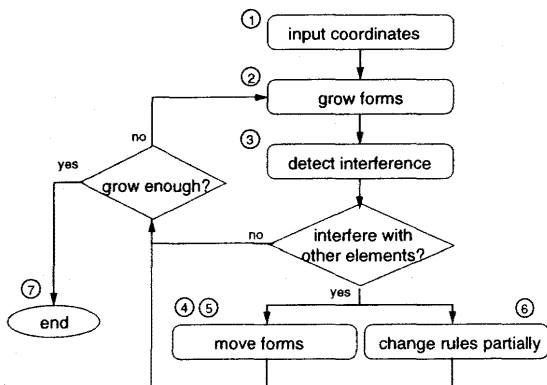


Fig. 11 Flowchart of spatial design unit

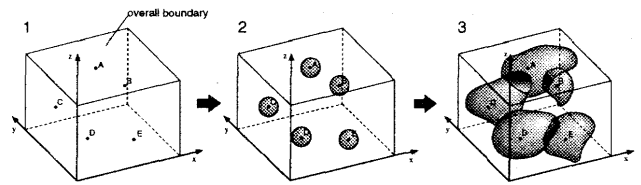


Fig. 12 Growing shapes of function carriers group

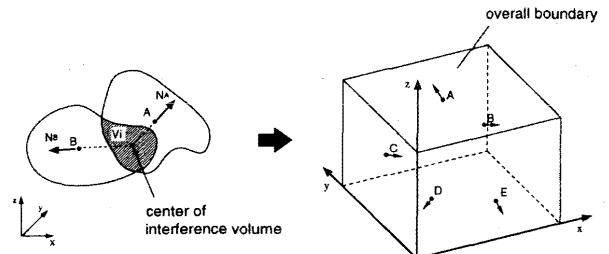


Fig. 13 Movement of function carriers shape

うに形状の中心位置を再調整する (図 11(4),(5), 図 13: 右)。形状生成の中心位置の再調整と同時に、上述したように干渉した形状のルールについての調整も行われる (図 11(6))。このルールの調整については、前節の生成ルールに注目した形状表現の拡張において述べた通りである。

こうして、機能要素の形状の生成と調整が終了した時に、空間デザインユニットにおいて、空間配置と 3 次元形状の矛盾点を同じ枠組で解消しながら、それぞれの制約に対する評価値を全体として保った空間デザイン解を得、設計者に提示する。設計者は、これを観察し、気に入れば空間デザインのプロセスが終わり、気に入らなければもう一度制約を変更し、幾何学的制約ソルバもしくは空間配置制約ソルバに与え、制約充足プロセスを再度行う。このようにして、支援システムと対話的に空間デザインを行い、最終的に求める空間デザインを得る。

5. 空間デザイン支援システムの試作

5.1 システムの構成

前章で示した空間デザイン支援方法論に基づいて、システムを試作した。システムの全体構成を図 14 に示す。

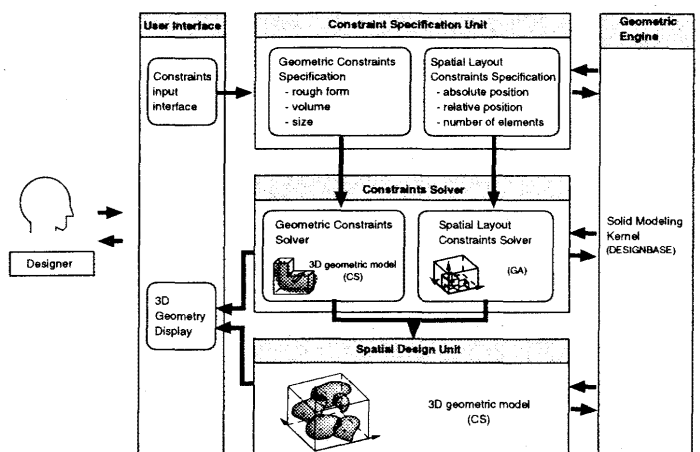


Fig. 14 System configuration

本システムは、Sun Workstation 上で C++ を用いて作成されており、大きく分けて制約設定ユニット、空間デザインユニット、制約ソルバ、ユーザインタフェース、幾何エンジンの 5 つの部分から構成されている。

5.2 人工衛星設計事例への適用

5.2.1 人工衛星設計における空間デザイン

本研究の対象としている空間デザインでは、設計対象に対するタスクや仕様などは、この段階以前に決定されている場合がほとんどである。具体的に人工衛星設計においては、それらはミッションと呼ばれるもので、その人工衛星の目的（例えば気象観測や通信など）であり、またペイロード（打ち上げに用いるロケットに格納できる大きさ）であり、コストなどである。そして、こうした事項が決定された後の空間デザインの作業は、以下の通りである。

1. ミッションによって決められる搭載ミッション機器に依存して、衛星の外形を仮定する。
2. ミッション遂行に必要な機能を配分して、各コンポーネントの仕様を決定し、機器寸法を仮定する。
3. 各コンポーネントのうち、全体の配置に影響を与えるものを特定する。
4. 3で述べられた機器以外の機器搭載位置を概略決定する。
5. 検討の結果、最も適していると思われる初期レイアウト案を選択する。

こうして、空間デザイン解が得られた後には、各機器への配線設計を実施し、組立て順序、推進系統管との干渉や各コンポーネントへの作業者の接近性を確認などの詳細設計に移っていく。

5.2.2 実施例

信頼性が最も重要な項目である人工衛星における空間デザインの特徴としては、搭載ミッション機器以外のコンポーネントは、ほとんど既に使用された実績のある機器をカタログの中から選択する場合が多いことが挙げられる。しかし、こうした特徴を持つ人工衛星の設計であるが、そのコンポーネントのうちでも比較的形状の自由度の高い、つまり新規に形状の設計を行う場合が多いものとして燃料タンクがある。これは、各人工衛星を新規に設計する場合にその都度設計することが多く、このことによる信頼性への影響が比較的少ないものである。よって、ここでは各コンポーネントの配置スペースの概形とその配置を求め、これらのコンポーネントの配置スペースと要求されている燃料の容量から搭載する燃料タンクの概略形状を求める場合の空間デザインを実施例とする。また、ミッションおよび打ち上げロケットのペイロードにより仮定された衛星の外形は図15に示すとおりである。

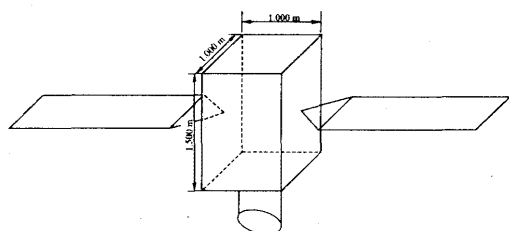


Fig. 15 Externals of satellite

幾何学的制約

この実施例における幾何学的制約は、具体的には11個の主要コンポーネントについては各必要設置スペースであり、燃料タンクについては体積（燃料の容量）である。以下に、例として燃料タンク、電圧安定装置およびバッテリーについての制約を示す。

燃料タンク（容量）	10l
電圧安定装置	40.0 × 30.0 × 30.0cm
バッテリー	50.0 × 30.0 × 40.0cm

空間配置制約

空間配置制約は、以下に示すような主要コンポーネント間に求められる、配置に関する制約である。

- 通信系 ↔ 電源系は近くに（コードはなるべく短くする）
- 電源系 ↔ 燃料タンクは近くに（電源系が発する熱による燃料の凍結防止のため）
- 同じ系統のものは近くに（接続ケーブルを短くするため）
- 人工衛星の地球面およびミッション機器を搭載する面には、電源系および姿勢制御系などの発熱する機器は配置できない（放熱面として適していないため）

以上の条件を与えられた後、上述した空間デザインの作業内容に従って空間デザインを進める。

初期レイアウト案を選択する

幾何学的制約ソルバによって、機能要素の概略形状を求めた後、空間配置制約ソルバによって、要求されたコンポーネントの空間配置の概略を生成する。図16はその空間配置ソルバの出力解の具体例である。直線で結ばれている機能要素はそれぞれに相対的位置の制約関係があることを示している。

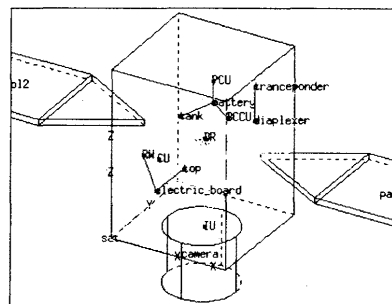


Fig. 16 Example of output of spatial layout constraints solver

続いて、幾何学的制約ソルバと空間配置ソルバによる概略の設計解の矛盾点を調整することによって空間デザイン解の生成を試みる。図17にその過程を示す。この間に、干渉したコンポーネントの配置スペースの形状生成ルールが変更され、それと同時に形状の中心位置の移動が行われる。具体的には、3.2節において述べた生成ルールの置き換えによる干渉解消の戦略を(1),(2),(3)の順にすべて試み、同時に干渉した部分の体積に従って中心位置が移動された。

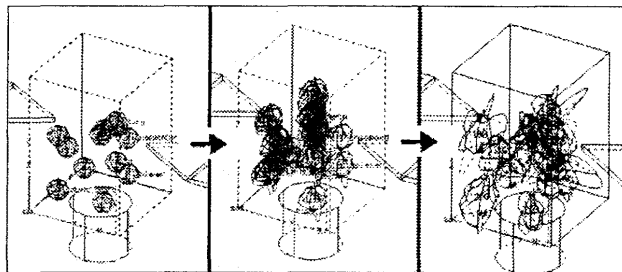


Fig. 17 Adjustment of shape and layout of components

このようにして、空間デザインの2つの側面について同時に調整しながら形状を生成させ、その生成が終了した段階で空間デザイン解を得る。図18に、その生成解の水平方向の断面と垂直方向の断面を示し、求める燃料タンクの概形を図19に示す。

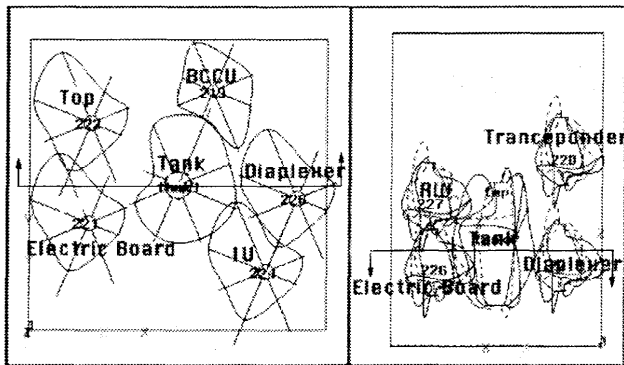


Fig. 18 Horizontal and vertical section (solution 0)

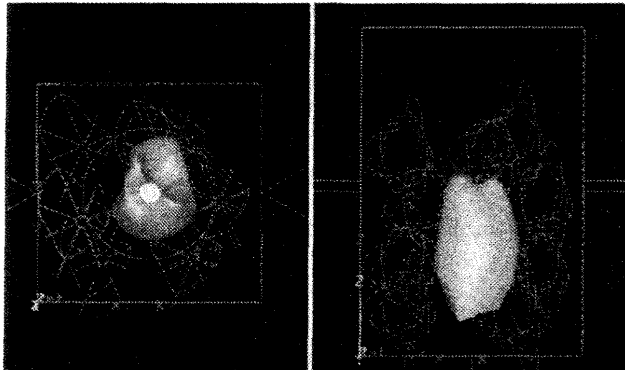


Fig. 19 Outline shape of fuel tank (solution 0)

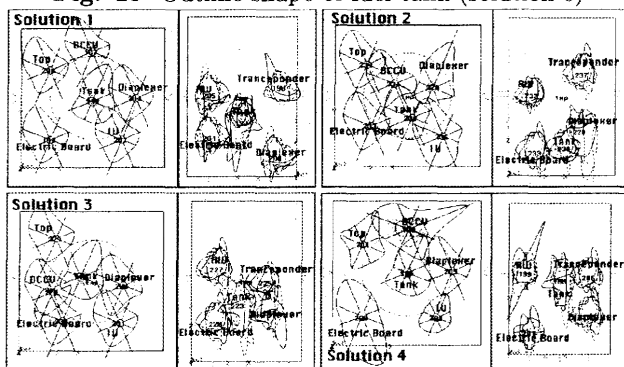


Fig. 20 Variation of generated solutions (solution 1, 2, 3, 4)

次に、空間デザインユニットが示した、他の空間デザイン解のバリエーションについて、図 20 に断面図を示す。ここで比較のため、各空間デザイン解におけるそれぞれの制約に対する評価値、および燃料タンクの縦、横、高さの最大値に関する数値を表 2 に示す。

このようにして得られた空間デザイン案は、図に示したように、多様な初期レイアウト案を生成していることが観察される。また、燃料タンクの形状においても、要求された容量を持ち、他のコンポーネントの配置スペースと干渉しない形状が求められている。そして、生成された燃料タンクは制約として与えられた容量をおおむね満たし、かつ多様な形状をしていることが確認できる。しかし、一方で燃料タンクの内部圧力を考慮した場合に適当でないような形状も生成されている。

設計者は、こうした多様な空間デザイン解を検討した後、他の制約などを考慮に入れ、適当なものと考えられる解を選択し、詳細設計へと移行する。

Table 2 Generated spatial design solution

solutions (No.)	評価値 (配置)	評価値 (形状)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	容量 (l)
solution 0	2.310	1.786	39	51	5.5	9.882
solution 1	1.891	1.525	34	44	6.0	10.820
solution 2	1.824	1.623	34	42	3.7	8.876
solution 3	1.624	1.735	35	45	6.0	9.257
solution 4	2.016	1.488	37	47	5.6	10.660

6. 結論と展望

本論文では、空間デザインの 2 つの側面である、機能要素の 3 次元形状と、その空間的配置を同じ枠組の中で決定するために、形状表現に多様性を持たせた適応成長型形状表現方法を提案した。そして、本形状表現を応用した空間デザインの支援システムを作成し、人工衛星設計における空間デザインを行い、機能要素の 3 次元形状と、その空間的配置を同じ枠組の中で決定する方法の実施例を示した。その結果、3 次元形状と空間的配置が同じ枠組の中で取り扱え、また多様な空間デザイン解が得られることを可能としたため、本方法論の有効性が示された。

また、今後の研究の課題としては以下のことが考えられる。

- 生物に比較した場合の、さらなる適応成長型形状表現の適応性
- 自律的に形状の位置を移動させることによる、3 つの空間デザインソルバの統合
- 本方法論の理論的立場からの詳細な検討

参考文献

- 1) R. Smith, S. Warrington and F. Mill: Shape Representation for Optimization, Proc. 1st IEE/IEEE Int. Conf. Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications GALESIA '95, Sheffield, England, (1995)112.
- 2) S. Szykman and J. Cagan: Automated Generation of Optimally Directed Three Dimensional Component Layouts, DE-Vol.65-1, In *Advances in Design Automation* - vol. 1, ASME, (1993).
- 3) 長坂一郎, 山岸 淳, 田浦俊春: 意匠デザインのための 3D 形状モデル (第 2 報) —生成ルールに注目した形状特徴の表現法—, 精密工学会誌, 63, 2, (1997)193.
- 4) G. Pahl and W. Beitz: Engineering Design: A Systematic Approach, Springer-Verlag, London, (1988).
- 5) A. C. Thornton and A. L. Johnson: CADET: A Software Support Tool for Constraint Processes in Embodiment Design, Res. Eng. Design, 8, (1996)1.
- 6) D. E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley, Reading, MA, (1989).
- 7) C. Brown: Fast Display of Well-tessellated Surfaces, Computer and Graphics, 4, 4, (1979)77.
- 8) S. F. Smith: A Learning System Based on Genetic Algorithms, PhD Dissertation, University of Pittsburgh, (1980).
- 9) V. Schnecke and O. Vornberger: A Genetic Algorithm for VLSI Physical Design Automation, Proc. 2nd Int. Conf. Adaptive Computing in Engineering Design and Control, ACEDC '96, University of Plymouth, I. C. Parmee (ed.), (1996)53.