遺伝的手続きによるゆらぎを導入した知識/事例に基づく 構造物概念設計アシスタント*

平 俊 男^{*1}, 田 中 正 夫^{*2}

Rule- and Case-Based Assistant for Conceptual Structural Design Associated with Genetic Operations

Toshio HIRA and Masao TANAKA

In the conceptual stage of structural design, the specified requirements are not sufficient for determining a unique solution, and subjective decisions based on a designer's preference play an important role similarly to the case of objective ones. Suggestions of various possibilities of design could assist the designer at this stage. In the conventional rule-based approach, the attributes of a design object are sequentially determined by referring to the design rules. Once the attribute values are determined, they work as absolute assumptions in subsequent decisions as long as backtracking is not activated. This is not beneficial in keeping the attention of the designer free from the tentative decisions made previously. In this study, the design case is considered as a phenotype of a chromosome that contains redundant information in morphogenesis. This enables us to reproduce the design candidates that have geometries/topologies varying from those of slightly different chromosomes. The past design cases are organized as the genetic case-base population and this population is modulated by referring to each of the design criteria and to the similarity to the candidate in terms of the design rules. The resultant population has heterogeneous individuals in this context, and the individuals generated from the population by genetic operations are delivered to the designer as suggestions. The preference of each design criterion is represented by the presence of the population corresponding to the criterion through interactions with the designer. In this framework, the possibility, that is left behind on the conventional rule-based process, can be emerged by the genetic case-based approach, and a diversity of candidates is retrieved. The proposed idea is exemplified by a skeletal design of a bridge structure and the relaxation of determinacy in the rule-based approach is demonstrated.

Key Words: Design Engineering, Structural Design, Conceptual Design, Design Assistant, Design Cases, Genetic Algorithm, Genetic Case-Base, Candidate Generation

1. 緒 言

典型的な悪構造問題となる設計問題に対して、設計者の持つ設計知識に着目した知識工学的手法によるシステム化が図られ、定着しつつある⁽¹⁾。その一方で、設計者から設計知識を獲得することの困難さが指摘されており、それを補う意味で、過去になされた設計事例を活用する事例指向のアプローチが有望視されている⁽²⁾。しかしながら、後者のアプローチで得られる設計解は、過去の設計事例に強く影響をうける傾向にある。

設計の予備的段階である概念設計では、与えられる要求の多くは、設計解を一意に定める程に強いものではなく、その選択にあたっては客観的・定量的評価のみならず、設計者自身の価値観に基づく主観的判断も重要な役割を果たしている。このため設計支援にあたっては、設計者が幅広い可能性を検討できるような枠組が重要であり、概念設計の支援システムには、設計知識や事例に基づく候補生成機能に加え、多様な設計案を提示する機能が求められる。

本報では、構造物の概念設計支援を目的とし、知識

と事例とに基づき対話的に設計候補を提示する設計アシスタントを提案する。まず、遺伝的アルゴリズム⁽³⁾における個体形質の遺伝子的表現の考え方をを用いた遺伝子的事例ベースを構築する。設計候補の生成は、基本的に知識ベース推論に基づくが、構築した遺伝子的事例ベースを参照し、遺伝的手法によるゆらぎを有する個体発生として行う。この候補生成は、設計者との対話において知識ベース推論の流れからは見出せないような可能性をも示唆するものである。システム構築の例には橋梁構造物の概念設計を取りあげる。

2. 構造物の概念設計アシスタント

2.1 概念設計と設計アシスタント 与えられた設計要求を満たす実体を設計案として具体化する概念設計の段階では、設計者の創造的活動が主となる⁽⁴⁾。従って、その活動をコンピュータで支援するにあたっては、設計者が行うべき判断の自動化よりも、設計者の刺激となる役割⁽⁵⁾に重点がおかれるべきである。このような考え方のもとに、意外性をもつ新規設計や、未知の知識による新たな設計⁽⁶⁾が提案され、著者らも確率的なゆらぎを許容する候補生成⁽⁷⁾の方法を提出してきた。これらは、設

* 原稿受付 1995年12月21日。

^{*1} 正員、奈良工業高等専門学校 (〒639-11 大和郡山市矢田町22)。

^{*2} 正員、大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町1-3)。

$$s = \{ \underbrace{s_1^*, s_2^*, s_3^*, s_4^*, s_5^*, \dots, s_{I_J}}_{s_i^{(r)}}, \underbrace{s_1^{(1)}, s_2^{(1)}, s_3^{(1)}, s_4^{(1)}, s_5^{(1)}, \dots, s_{I_J}^{(1)}}_{s_i^{(1)}}, \dots, \underbrace{s_1^{(J)}, s_2^{(J)}, s_3^{(J)}, s_4^{(J)}, s_5^{(J)}, \dots, s_{I_J}^{(J)}}_{s_i^{(J)}} \}$$

$$\begin{aligned} & \text{if}(s_i^{(r)} = s_i^*, s_i^{(j)} = s_i^*, j = 1, \dots, J-1) \\ & \text{then}(s_i^{(J)} = s_i^*) \quad J = 1, \dots, J_s \end{aligned}$$

Fig. 1 Subproblem decomposition of design problem

計支援の過程において、多くの可能性を示唆しながらも、その決定は設計者に委ねるとの基本姿勢に基づくものである。

ここでは、設計対象物を設計要求と設計変数とを表す属性によって特徴付け、要求を満たす属性値を定める過程を設計ととらえ、各属性値は他の属性値との関連で制約付けられている。この属性間の関連には値を一意に定め得ないものも多く、競合がみられるので、関連を表す設計知識に基づいた可能属性値の生成を基本的機能とし、設計者にその選択を委ねる設計アシスタントシステム⁽⁸⁾の立場をとる。このとき、設計者の判断は競合候補に対する経済性などの様々な側面からの評価を、自身の持つ価値観を基に考慮することで行われる。概念設計の段階では、感覚的デザイン性などの定性的にしか取扱えない面も考慮の対象であり、設計者の価値観は主観的なものとなる。従って、システムには、予め価値観をつくりこんでおく固定的なものではなく、支援の対象となる個々の設計者に応じて変化していく動的な枠組が求められる。

2.2 候補生成とそのゆらぎの考え方 設計対象物は属性値 $s_i (i = 1, \dots, I_s)$ の集合 s として表し、全ての属性値が定められれば、一つの設計案が生成されたことになる。ただし、全ての属性値に関する競合を同時に設計者に判断させることは負担となるので、より少数の J_s 個 ($J_s < I_s$) の主要な属性を選び、設計者が直接に意思決定を行う注目属性 $s_{I_J} (I_J \in s, J = 1, \dots, J_s)$ とする。原問題をこの注目属性毎の部分設計問題 $P_J (J = 1, \dots, J_s)$ へと分割し ($s = \{\hat{s}^{(r)}, \hat{s}^{(1)}, \dots, \hat{s}^{(J_s)}\}$)、段階的に属性値を決めていくとする。ここで $\hat{s}^{(r)}$ は設計要求を表す属性であり、また、上添字 (J) は部分問題 P_J を表し、記号 ($\hat{\cdot}$) は部分属性であることを示す ($\hat{s}^{(J)} \subset s$)。部分属性 $\hat{s}^{(J)}$ に含まれる属性 s_i は、上添字 (J) を用いて $s_i^{(J)}$ と表す ($\hat{s}^{(J)} = \{s_i^{(J)}\}$)。第 J 番目の部分問題では、 $J-1$ 番目までの段階で設計者によって属性値 s_i^* が定められており、問題 P_J に属する $s_i^{(J)}$ の可能値は、属性値 s_i^* と設計要求の値 $s_i^{(r)}$ を基に知識ベース推論から求められる (図1)。属性 $s_i^{(J)}$ の可能値 s_i は一般に複数存在し、これらの採否は設計者に判断が委ねられる。

この枠組では属性値の決定が以降の意思決定に支配的になる。例えば、橋梁構造物では橋長などの仕様から、まず、つり構造、斜張構造などの橋梁形式の決定が

Fig. 2 Example of design process of bridge structure

なされ⁽⁹⁾、その形式のもとで以降の属性値を決定する木構造の過程となる (図2)。従って、分岐の方向がいったん決定されたならば、他の可能性は無視されてしまう。もちろん、推論に非決定性を持たせたバック・トラックによる意思決定の後戻りも可能であるが、多くの属性に対する推論が必要となる設計問題では、組合せ数の問題から現実的ではない。

ここでは、部分問題 P_J において知識ベース推論で得られた属性値 ($s_i^{(r)} (= s_i^*), s_i^{(j)} (= s_i^*, j = 1, \dots, J-1), s_i^{(J)} (= s_i)$) をもとに、過去になされた設計事例から類似の属性値を持つものも提示可能とし、設計者が既に決定した属性値 s_i^* が異なっても候補となり得る枠組をとる。従って、部分問題 P_J での知識ベース推論の流れからは見えない属性値 s_i^* を定めた段階で切捨てられた設計可能性も、後戻りなしに提示可能となる (図3)。このような決定木の飛移りともみなせる候補提示のゆらぎによって、多くの可能性が示唆され得る。

3. 構造物の遺伝的事例ベース

構造物の設計において、過去になされた設計事例は重要な手がかりであり、類似事例の検索による設計支援のアプローチがなされている⁽¹⁰⁾。ここで対象とする概念設計の段階では、構造物の位相と幾何とが同時に検討され、位相が異なる場合にはその属性空間は大きく異なる。ここでは、位相の異なる構造物に対しても、その機能的類似性を考慮した設計事例表現を行う遺伝的事例ベース⁽¹¹⁾を考える。

また、実際に収集され得る事例は、設計空間の一部を表すものにすぎないので、事例群の特徴として構造型質の頻度分布を考える。遺伝的事例ベースは、この頻度分布を個体分布に反映することで本来の設計空間を表現するものである。

Fig. 3 Framework of candidates suggestion with snap-through on decision-tree

3.1 構造物の遺伝子的表現と事例頻度 設計対象物の構造属性 $s = \{s_1, \dots, s_L\}$ は、構造型態の幾何的特徴や位相的特徴を表し、固定長 L のビット列として表される染色体 $c = \{c_1 \dots c_L\}$ ($c_i \in \{0, 1\}$) の表現型であると考え、以後、染色体 c から構造型態 s への発現を、記号 $\Rightarrow$ を用いて $c \Rightarrow s$ と記す。構造型態の位相の差異は、染色体に含まれる発現支配遺伝子の値によって、表現型に発現される部分 c_{exp} と発現されない部分 c_{imp} ($c_{\text{exp}} \cup c_{\text{imp}} = c$, $c_{\text{exp}} \cap c_{\text{imp}} = \phi$) とが変化することで表現する。また、位相が異なる構造型態であっても構造機能としての類似性を表現するために、構造に対する寄与が類似の属性は同じ遺伝子座から発現されるものとし、この関係を $s_i \approx s'_i$ と表現する。

設計事例群の特徴量には事例頻度を考えるが、属性が完全に一致する事例の数ではなく、類似の構造型態が事例群に存在する比率を用いる。ただし、位相の異なる構造型態では、比較すべき属性が必ずしも一対一に対応しない。ここでは構造機能に対して類似の働きを持つ属性は同じ遺伝子座から発現するとしたことを利用し、非常に単純ではあるが、類似度を染色体間のビットパターンの一致をもとに定義するものとする。すなわち、それぞれの遺伝子表現 c_i, c_j にみられる K 個の一致パターンのそれぞれの長さ λ_k を用いて、

$$\rho(c_i, c_j) = \sum_{k=1}^K \lambda_k^2 / L^2, \quad (0 \leq \rho \leq 1) \quad (1)$$

と定義する。ただし、パターン長を自乗することで、2つの染色体のビットの一致数だけではなく、ビットの連なりの長さも評価することになる。個体群 $C = \{c_1, \dots, c_I\}$ における個体 c の頻度 $p(c, C)$ は、類似度 ρ の個体群における総和を個体数 I で除した

$$p(c, C) = \sum_{i=1}^I \rho(c, c_i) / I, \quad (0 \leq p \leq 1) \quad (2)$$

と定義する。このとき、個体群 C が設計事例群を表す場合には事例頻度となる。

3.2 遺伝的操作による事例ベースの形成 事例ベースは収集された設計事例をもとに形成されるが、それらは設計空間の一部を表すに過ぎない。従って、収集された事例数 M に対して、事例ベースを構成する個体群はこれよりも多くの N 個 ($N \gg M$) の個体からなるものとする。まず、収集された M 個の設計事例 $s_1^c, \dots, s_M^c$ を遺伝子表現し、これを設計事例群 $C^c = \{c_1^c, \dots, c_M^c\}$ とする。このとき、収集事例 s_m^c を発現形態とする遺伝子表現 c_m^c は、 $c_{\text{imp}}(C^c, c_m^c)$ の部分の値が不定であるので、その部分の遺伝子座には、ランダムに0か1を与えるものとする。遺伝的操作の対象とする初期個体群 $C^{(0)}$ には、まず事例群 C^c から M 個の個体を複写する。次に、全くランダムなビット列を $N - M$ 個の個体に与え、初期個体群 $C^{(0)} = \{c_1^{(0)}, \dots, c_N^{(0)}\}$ とする。

第 t 世代の操作個体群 $C^{(t)}$ に対して遺伝的アルゴリズムの操作、交叉、突然変異、選択を繰返し行うことで事例ベースを形成する。交叉は、個体群からランダムに抽出した $p_c N$ 個 (p_c : 交叉率) の個体について親ペアをつくり、ランダムに定めた遺伝子座以降の部分染色体を交換する一点交叉とする。突然変異は、個体群からランダムに抽出した $p_m N$ 個 (p_m : 突然変異率) の個体で、それぞれランダムに選んだ一つの遺伝子座のビット反転の操作とする。

事例ベースを構成する個体群では、事例群における構造型態の頻度分布を反映することが求められる。従って、個体適合度 f_n には個体 $c_n^{(t)}$ の事例群 C^c での事例頻度 $p(c_n^{(t)}, C^c)$ と、自身の属する個体群 $C^{(t)}$ での個体頻度 $p(c_n^{(t)}, C^{(t)})$ との比

$$f_n(c_n^{(t)}) = \frac{p(c_n^{(t)}, C^c)}{p(c_n^{(t)}, C^{(t)})} \quad (3)$$

を用いる。ただし、表現型での属性値が実現可能範囲を越える個体は致死遺伝子として適合度を0とする。各個体に対して、個体適合度の相対値 $f'_n = f_n / (f_1 + f_2 + \dots + f_N)$ を選択確率としたルーレット選択を行い、次世代 $C^{(t+1)}$ へと更新する。このとき、式(3)の定義より、個体群 $C^{(t)}$ 中のそれぞれの個体 $c_n^{(t)}$ は、個体頻度 $p(c_n^{(t)}, C^{(t)})$ が事例頻度 $p(c_n^{(t)}, C^c)$ より大きい場合、選択確率 $f'_n < 1/N$ となり淘汰、逆に、 $p(c_n^{(t)}, C^{(t)})$ が $p(c_n^{(t)}, C^c)$ より小さい場合には $f'_n > 1/N$ となり増殖が生じる。すなわち、世代更新毎に、その世代の個体群での頻度分布が各個体の適合度に反映され、式(3)の分母、分子が等しくなる方向へと選択が進み、結果として個体群での頻度分布が事例群における事例頻度を表すことになる。

個体群 $C^{(t)}$ の事例ベースとしての適合の度合は、各事例 c_m^c 毎の個体頻度差の平均、

$$\bar{e} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{|p(c_m^c, C^c) - p(c_m^c, C^{(i)})|}{p(c_m^c, C^c)} \dots\dots\dots (4)$$

を尺度とする。ここでは個体群 $C^{(i)}$ を収集されたサンプル事例群 C^c そのものに一致させることが目的ではなく、頻度分布によって本来の設計空間の反映を考えている。従って、平均差 $\bar{e}$ が十分小さい場合に遺伝的操作を打ち切り、このときの個体群 $C^{(i)}$ を遺伝的事例ベース C^b とみなす。この個体群には構造形態へそのまま発現可能でないものの含まれるが、後の候補提示段階においてその実現可能性を知識ベース推論により改めて確認するので、ここではそのまま残しておく。これら直接発現可能でないものであっても、ビットパターン中に部分的な事例特徴は含まれており、その特徴は、後の候補生成で潜在的に利用可能なものである。

4. 知識と事例に基づく候補生成

システムが設計対象物の主要属性ごとに候補を生成、提示し、設計者に採否をたずねることで設計過程が進捗されていく。候補提示には、2.1節に述べたように、設計者に多くの可能性を示唆する多様性が求められ、そこへの設計者の価値観の反映が求められる。ここでは、設計者の価値観は、複数の価値基準に対する重視の度合いに表出されると考える。まず、前章の遺伝的事例ベース個体群を価値基準毎に準備し、それらを単一の価値基準を持つ候補集団と呼ぶ。提示候補の設計者による採否を観察し、候補提示への候補集団の反映の度合いが調整されていくことで、設計者の価値観をシステム上に形成していくことを考える。

4.1 候補集団の生成 部分問題 P_j では属性 $s_i^{(j)}$ について、設計仕様を表す属性 $s_i^{(r)}$ と、問題 P_{j-1} までに決定された属性値 s_i^* とから知識ベース推論

$$\begin{aligned} & \text{if}(s_i^{(r)} = s_i^*, s_i^{(j)} = s_i^*, j = 1, \dots, J-1) \dots (5) \\ & \text{then}(s_i^{(j)} = s_i^*) \end{aligned}$$

がなされる。このとき、部分属性 $\hat{s}_{(z)}^{(j)}$ に関して、 Z 個の値が可能となり、それぞれを識別番号 z を用いて $\hat{s}_{(z)}^{(j)} = \{s_i^{(j)} = s_{i(z)}\}$ ($z = 1, \dots, Z$) と表す。この段階で表される競合候補 $s_{(1)}, \dots, s_{(Z)}$ は、設計要求 $s_i^{(r)}$ と部分問題 P_1 から P_{j-1} までに決定した属性値 s_i^* からなる共通部分と、各々異なる競合 $\hat{s}_{(z)}^{(j)}$ の部分、および未決定の属性 $s_i^{(j)}$ ($j = J+1, \dots, J_s$) によって表現される。

競合候補 $s_{(z)}$ は、 K 個の価値基準 γ_k ($k = 1, \dots, K$) からそれぞれ評価され $v_{k(z)}$ と表す。価値基準ごとに準備した初期個体群 $C_k^{[0]}$ に事例ベース個体群 C^b を複写し、個々の個体に対する評価をもとに候補集団を生成していく。個体 $c_{nk}^{[i]} (\in C_k^{[i]}, n = 1, \dots, N)$ の適合度は、それと最も類似している競合候補 $s_{(z^*)}$ との類似度 $\rho(c_{nk}^{[i]}, c_{(z^*)})$ (ただし $\rho(c_{nk}^{[i]}, c_{(z^*)}) = \max(\rho(c_{nk}^{[i]}, c_{(1)}), \dots,$

Fig. 4 Flow of candidate suggestion

$\rho(c_{nk}^{[i]}, c_{(z)})$), $c_{(z)} \Rightarrow s_{(z)}$ と、価値基準 γ_k に対する評価 $v_{k(z^*)}$ とから

$$g_n(c_{nk}^{[i]}) = \rho(c_{nk}^{[i]}, c_{(z^*)}) v_{k(z^*)} \dots\dots\dots (6)$$

として求める。このとき、類似度 $\rho(c_{nk}^{[i]}, c_{(z^*)})$ は、3.1節に述べたように構造属性の遺伝子表現に基づいている構造機能性からの類似も加味したものである。

個体群 $C_k^{[i]}$ では、事例ベースの形成と同様に、一点交叉 (交叉率 $q_c, 0 \leq q_c \leq 1$)、突然変異はビット反転 (突然変異率 $q_m, 0 \leq q_m \leq 1$) の操作を行う。次の世代へ生き残らせる個体は、個体適合度 g_n とその個体頻度をもとにした選択確率

$$x_n = \frac{g_n(c_{nk}^{[i]})}{p(c_{nk}^{[i]}, C_k^{[i]})^{1/R}} \dots\dots\dots (7)$$

によって決定される。ただしパラメータ $R (1 \leq R \leq \infty)$ は候補集団の生成に対する淘汰圧を表す。この世代交代は、集団中で最も高い適合度を持つ個体の占める比率が候補集団ごとに設定するしきい値 $\theta_k (0 < \theta_k < 1)$ を越える世代で打ち切り、このときの個体群 $C_k^{[T]}$ を部分問題 P_j に関する候補集団 $C_k^{(j)}$ とする。これには式 (6) に示すように価値基準 γ_k に対する評価の高い競合候補に類似の形質を持つ個体ほど存在している確率が高い。ただし、淘汰のしきい値 θ_k を低く設定し、評価値の高い個体の存在確率を抑えておくことで過淘汰を避け、候補提示における多様性を保つことが可能である。

4.2 飛移りを許容する候補提示 候補の提示に関して候補集団は、それぞれ適合度 F_k を持つ。候補を設計者に提示する候補集団は、この適合度の相対値を参照したルーレット選択によって決定され、その候補集団 C_k^c からは、ランダムに個体 c_k が抽出される。この個体から発現される候補構造属性 $s(c_k \Rightarrow s)$ は、システムに構築している知識ベースによって実現可能かどうか

が判定され、可能な場合のみに設計者に提示される(図4).

まず、候補構造属性 s が、競合候補 $s_{(1)}, \dots, s_{(Z)}$ のいずれかに未決定属性を除いて一致する場合、それは知識ベース推論により生成された属性であるので実現可能である。一致しない場合はさらに、その構造属性 s が構造形態として発現不可能、あるいは知識ベース推論の意味で実現不可能な致死の時と、 s を構成する属性値が知識ベース推論の意味で実現可能な時がある。前者の時には、候補集団のルーレット選択からやり直す。後者は、候補個体の持つ属性 $s_i^{(j)}$ ($j = 1, \dots, J$) の値が部分問題 P_j と同程度の段階、すなわち属性 $s_i^{(j)}$ と構造機能的に類似の属性 $s_i^{(j')}$ ($\approx s_i^{(j)}$) まで式(5)が成立する時である。これは、先行する部分問題で設計者に決定された属性値 s_i^* が、候補構造属性 s の値 $s_i^{(j)}$ と異なる段階において、設計者の考慮から切捨てられた候補である。ここで、部分問題 P_{j-1} までに設計者が意思決定を行った属性に構造機能が類似の属性に関しては、その値 s_i^* をそのまま用いることで、切捨てた段階まで意思決定を遡ることなく設計過程が継続可能となる。

実現可能な個体は、設計候補として設計者に提示し、その採否をたずねる。設計者が不採用とした場合には、その個体の属する候補集団の適合度 F_k を

$$F_k \leftarrow r_d F_k \quad (0 < r_d < 1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

のように減じ、提示を行う候補集団のルーレット選択からやり直す。これを設計者が候補を採用するまで繰返す。設計者によって候補個体が採用された候補集団の個体群では、その淘汰しきい値を

$$\theta_k \leftarrow w_a \theta_k \quad (w_a > 1) \quad \dots\dots\dots (9)$$

と増やし、採用候補 s の部分問題 P_j に関する属性 $s_i^{(j)}$ の値を s_i^* とした後に、次の部分問題 P_{j+1} へと設計を進めていく。

この過程における候補集団 C_k は、設計対象物の属性を集団として確率的に表すものである。すなわち、設計の進捗による淘汰しきい値 θ_k の増加とともに、個体形質の淘汰が進み、最終的な設計案の形成へと向かう。候補集団の適合度 F_k は、競合候補の設計者による採否の反復と共に調整されていく。これは設計候補提示における価値規準 γ_k に対する重みを表し、その集合 $\{F_1, \dots, F_K\}$ には設計者の価値観が反映されていると考えられる。

また、候補提示において、その段階での競合候補とは一致しないが実現可能なケースは、そこまでの知識ベース推論による設計過程の流れとは沿わず、決定木の飛移りともみなせるものである。もちろん、この飛移りは構造形態の遺伝子的表現による類似性をもとにしている

Table 1 Attributes of bridge structure

• Length	• Width
• Usage	• Material
• Max. span	
• Deck position	• Span assignment
• Supporting pattern	• Deck type
• Deck shape	• Max. deck height
• Min. deck height	• Web layout (T)
• Panel length (T)	• Girder type (G)
• Arch rib	• Stays
• Suspension cable	• Number of main structures (A/C/S)
• Tower shape (C/S)	• Tower height (C/S)
• Rise (A/S)	• Hanging pattern (A/S)
• Arch type (A)	• Arch rib type (A)
• Max. arch rib height (A)	• Min. arch rib height (A)
• Anchor type (S)	• Staying pattern (C)

ので、位相の異なるような構造形態であっても、構造機能性からの類似は保っている。このような候補提示の枠組は、先行する意思決定で選択肢を切捨ててしまうといった決定性を緩和することとなり、設計者に多様な設計候補を示唆する概念設計アシスタントの機能として有用であると考えられる。

5. 橋梁構造物の概念設計支援の例

5.1 橋梁構造物の遺伝子的表現例 橋梁構造物の設計に関する文献(12)(13)より、表1に示す29の構造属性を考える。橋長(Length)から支間長(Max. span)までの5属性が、設計要求を表す $s_1^{(r)}, \dots, s_5^{(r)}$ である。この遺伝子表現は、各属性のとり得る値が表現可能なビット列を順に結合することで行う(染色体長 $L = 65$)。アーチ・リブ(Arch rib), 斜張ケーブル(Stays), つりケーブル(Suspension cable)はともに橋梁けた部に対する補剛要素の有無を表す。これらの属性を表す遺伝子は発現支配遺伝子であり、その値によって発現される構造形態が決定され、それぞれアーチ橋、斜張橋、つり橋と分類される位相をとる。表1の()内は、(G)けた橋、(T)トラス橋、(A)アーチ橋、(C)斜張橋、(S)つり橋それぞれの発現形態の場合にのみ参照される属性を示し、何も記していない属性は全てに共通のものである。また、例えば(A/S)と記したつりパターン(Hanging pattern)は、アーチ橋、つり橋構造物の構造系の動的剛性に関して類似の役割を示す⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾ので、同じ遺伝子座で表現している。このような整理は、遺伝子表現に基づく類似度で構造物の類似を測ることを目的としたものである。

図5に示す構造形態への発現例では、アーチ・リブの有無を表す遺伝子が1をとるので、けた部の補剛要素にアーチ・リブが用いられ、ライズ(Rise)やつりパターンなどの、図中に太字で示した遺伝子が発現される。未発現の、例えばつり橋構造に固有の属性、定着形式(Anchor type)などを表す部分は、つりケーブルに関するビットが1とならない限り発現されないが、染色体には潜在

Fig. 5 Example of genetic representation of bridge structure

的に保持されている。

5.2 遺伝子的事例ベースの構築と候補集団生成の例

橋梁構造物に関する設計事例集⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾から211事例を収集し、表1に示した29の属性について事例値を整理し、設計事例群 C^c ($M = 211$) とした。個体数 $N = 5000$ の操作個体群に対して、交叉率 $p_c = 0.8$ 、突然変異率 $p_m = 0.1$ として3.2節に示した遺伝子的操作を繰返し、式(4)で定義した平均差 $\bar{e}$ が0.1以下となった第16世代 $C^{(16)}$ を遺伝子的事例ベース C^b とした。

得られた遺伝子的事例ベースをもとに、候補集団生成の様子を例示する。設計仕様例として橋長500m、幅員20m、橋下障害幅300mの鋼製道路橋を考える。第1の部分問題としてスパン長(m)、支間数の決定があり、2つの競合 $\hat{s}_{(1)}^{(1)} = \{500, 1\}$ 、 $\hat{s}_{(2)}^{(1)} = \{300, 3\}$ が知識ベース推論により得られる。この場合、構造機能性の価値基準 γ_1 の設計評価はそれぞれ、 $v_{1(1)} = 0.49$ 、 $v_{1(2)} = 0.51$ であり、本節ではこの基準のみを考慮した場合を考える。淘汰しきい値 $\theta_1 = 0.1$ 、淘汰圧 $R = 1$ 、候補生成における交叉率 $q_c = 0.3$ 、突然変異率 $q_m = 0.05$ とした場合には第5世代で候補集団が得られた。この集団 $C_1^{(1)}$ には、知識ベースに基づく競合候補 $s_{(1)}$ に一致する個体が13、 $s_{(2)}$ に一致する個体が553存在した。

この淘汰が、個体群 $C_1^{(1)}$ の集団としての形質に与えた影響を調べるために、次の橋梁形式、けた支持形式に関する部分問題 P_2 で生じ得る競合、すなわち設計者が $\hat{s}_{(1)}^{(1)}$ を採用した場合の候補(a)、および $\hat{s}_{(2)}^{(1)}$ を採用した場合の7つの競合(b)~(h)を表す個体の存在を確認した結果、表2に示す結果となった。これらの形質(a)~(h)そのものは、事例ベース個体群 C^b には、ほとんど存在していなかったが(表2)、部分問題 P_1 の2つの競合候補について淘汰することで、事例ベースに分散的に保持されている事例形質の特徴が現れてくるためと考えられる。

Table 2 Distribution of phenotypes in candidate population

Possible Candidates for Bridge Type (P_2)	a	b	c	d	e	f	g	h
In Population $C_1^{(1)}$ for Span (P_1)	3	3	8	75	50	72	0	19
In Case-Base Population C^b	0	0	0	1	1	0	0	0
(a) $\hat{s}_{(1)}^{(2)} = \{\text{arched, simple}\}$								
(b) $\hat{s}_{(1)}^{(2)} = \{\text{suspension, simple}\}$								
(c) $\hat{s}_{(2)}^{(2)} = \{\text{truss, continuous}\}$								
(d) $\hat{s}_{(3)}^{(2)} = \{\text{arched, continuous}\}$								
(e) $\hat{s}_{(4)}^{(2)} = \{\text{suspension, continuous}\}$								
(f) $\hat{s}_{(5)}^{(2)} = \{\text{cable-stayed, continuous}\}$								
(g) $\hat{s}_{(6)}^{(2)} = \{\text{truss, cantilever}\}$								
(h) $\hat{s}_{(7)}^{(2)} = \{\text{arched, cantilever}\}$								

5.3 複数候補集団による候補提示の例 橋梁構造物

の概念設計における価値基準に、構造機能性(γ_1)、感覚的デザイン性(γ_2)、経済性(γ_3)を考え、それぞれの初期個体群には前節で得た遺伝子的事例ベース C^b を用いる。設計仕様は前節と同様とし、感覚的デザイン性の要求には「優美さ」を考える。本来の設計支援過程では、設計者毎に得られた価値観を表す $\{F_1, F_2, F_3\}$ が候補提示の鍵となる。ここでは中立の価値観を持つ初期段階から、設計者による候補の採否によって、価値観がシステムに獲得されていく様子の確認を行う。このために、各候補集団に対する適合度の初期値はそれぞれ等しく $F_1 = F_2 = F_3 = 1/3$ 、淘汰しきい値も同様に $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0.1$ とする。設計者が候補を不採用としたときの候補集団適合度更新パラメータは $r_d = 0.8$ 、候補を採用するとしたときの淘汰しきい値更新パラメータは $w_a = 1.2$ とした。ここでは、淘汰圧 $R = \infty$ (式(7))とし、個体の選択には個体適合度 g_n のみが考慮されるものとする。

5.3.1 候補集団の適合度・淘汰しきい値への価値観の反映

知識ベース推論は、図6に示す流れで進捗され、図中に太字で示した属性の値の決定を部分問題 P_j とし、この段階で競合候補の提示と設計者による意思決定がなされる。ただし、橋梁形式の決定後は設計問題の構造が異なるので、それぞれの形式を識別するために括弧付きの上添字を用いている。本来、提示候補は適合度 F_k によって確率的に選ばれた候補集団から全くランダムに抽出された個体としているが、ここでは設計者の採否による候補集団適合度の調整機構の確認のために、設計仕様に対する実事例をひとつ参照し、選ばれた候補集団に最も多く存在する個体形質がその事例と一致する場合には設計者がその候補集団からの提示候補を採用、一致しなかった場合には不採用としたと仮定する。

Fig. 6 Design tree of bridge structure based on knowledge-based reasoning

Fig. 7 Continuously supported Lohse bridge of 3-spans

Table 3 Candidate population at subproblem of span-assignment

	in $C_1^{(1)}$	in $C_2^{(1)}$	in $C_3^{(1)}$
θ_k	0.1	0.1	0.1
$s_{(1)}$: (0.49, 0.40, 0.49)	0	0	19
$s_{(2)}$: (0.51, 0.60, 0.51)	551	545	1214
F_k	0.33	0.33	0.33

図7に示した下路式の3支間連続補剛けたを持つローゼ・アーチ橋は、設計仕様に対する一つの可能性である。スパン長(m), 支間数に対する部分問題 P_1 において知識ベース推論によって得られる2つの競合 $\hat{s}_{(1)}^{(1)} = \{500, 1\}$, $\hat{s}_{(2)}^{(1)} = \{300, 3\}$ に対して、設計評価はそれぞれ $v_{(1)} = (v_{1(1)}, v_{2(1)}, v_{3(1)}) = (0.49, 0.40, 0.49)$, $v_{(2)} = (0.51, 0.60, 0.51)$ となった。ただし評価値は $\sum_k v_{k(z)} = 1$ となる様に正規化している。各候補集団における個体分布は、表3に示すように得られた。候補集団の適合度を参照するルーレット選択によって経済性 γ_3 に関する候補集団 $C_3^{(1)}$ が選ばれ、最も多く存在する形質 $s_{(2)}$ が提示された。これは、図7で示した形質に一致するので、採用されるとした。

次の橋梁形式、けた支持形式に関する部分問題 P_2 では、淘汰しきい値を $\theta_1 \leftarrow 0.1$, $\theta_2 \leftarrow 0.1$, $\theta_3 \leftarrow 1.2 \times 0.1$ として候補集団の生成と提示を行った。知識ベース推論による競合候補 $\hat{s}_{(1)}^{(2)} = \{\text{suspension, simple}\}$,

Table 4 Distribution of phenotypes at subproblem of bridge-type and supporting-pattern

	in $C_1^{(2)}$	in $C_2^{(2)}$	in $C_3^{(2)}$
θ_k	0.1	0.1	0.12
$s_{(1)}$: (0.09, 0.25, 0.02)	2 (0.1%)	14 (2%)	48 (5%)
$s_{(2)}$: (0.19, 0.09, 0.18)	602 (39%)	77 (13%)	78 (8%)
$s_{(3)}$: (0.16, 0.12, 0.26)	657 (43%)	211 (35%)	244 (25%)
$s_{(4)}$: (0.11, 0.25, 0.02)	78 (5%)	124 (21%)	293 (30%)
$s_{(5)}$: (0.12, 0.08, 0.14)	125 (8%)	171 (29%)	305 (31%)
$s_{(6)}$: (0.19, 0.09, 0.18)	16 (1%)	0	0
$s_{(7)}$: (0.16, 0.12, 0.21)	65 (4%)	2 (0.3%)	15 (2%)
F_k	0.33	0.33	0.33
	0.36	0.36	0.29

$\hat{s}_{(2)}^{(2)} = \{\text{truss, continuous}\}$, $\hat{s}_{(3)}^{(2)} = \{\text{arched, continuous}\}$, $\hat{s}_{(4)}^{(2)} = \{\text{suspension, continuous}\}$, $\hat{s}_{(5)}^{(2)} = \{\text{cable-stayed, continuous}\}$, $\hat{s}_{(6)}^{(2)} = \{\text{truss, cantilever}\}$, $\hat{s}_{(7)}^{(2)} = \{\text{arched, cantilever}\}$ を参照して生成された候補集団において、これらと一致する個体の分布は表4に示すようになった。このとき個体適合度による淘汰は、淘汰しきい値によって打切っているため、分布には候補に対する評価値 $v_{(z)}$ だけでなく、個体群のもととなった事例群での事例頻度の反映が強くなっているが、構造機能性 (γ_1) に関する候補集団では、トラス橋構造として発現される $s_{(2)}$ の形質を持つ個体が他の候補集団に比べ多く存在していることなどから各候補集団での分布はそれぞれの価値規準によって特徴付けられているといえる。

提示を行う候補集団に、 $F_1 = F_2 = F_3 = 1/3$ に対するルーレット選択から、経済性に関するものが選ばれ、その候補集団 $C_3^{(2)}$ から $\hat{s}_{(5)}^{(2)} = \{\text{cable-stayed, continuous}\}$ が提示されたが、これは図7とは一致しないので不採用とされ $F_3 \leftarrow 0.8 \times 0.33$ となった。候補集団の適合度を $\sum_k F_k = 1$ となるように正規化した後に、候補集団の選択が再び行われ、感覚的デザイン性に関する候補集団から候補 $s_{(3)}$ が提示された。これは採用となり、 $\theta_2 \leftarrow 1.2 \times 0.1$ とされ、以降の部分問題へと設計が進捗されていった。同様の手順によって、アーチ形式 ($P_3^{(A)}$) については Lohse 形式、アーチ・リブ ($P_4^{(A)}$) には solid 形式、路面位置 ($P_5^{(A)}$) には through、けた部のつり構造 ($P_6^{(A)}$) には Nielsen 形式が提示されるまで候補集団の選択と候補提示を繰返した結果、最終的に淘汰しきい値は $\theta_1 = 0.1$, $\theta_2 = 0.25$, $\theta_3 = 0.12$ 、候補集団の適合度は $F_1 = 0.36$, $F_2 = 0.36$, $F_3 = 0.29$ であった。これは、この設計仕様において図7に示すような設計案が提案されるにあたって、感覚的デザイン性に対する候補の検討が進み、かつ経済性は他の価値規準に比べやや考慮の度合いが低いことを表している。得られた淘汰しきい値と候補集団の適合度は、設計者の価値観とみなせるものであり、次の設計で初期値として用いることで、候補提示における価値観の反映が可能となると考えられる。

Fig. 8 Considered bridge types

5.3.2 候補提示の飛移りの例 前項の設計過程において、アーチ・リブ形式に関する候補提示 ($P_4^{(A)}$) を調べる。ここまでの過程でアーチ支間=300m, アーチ形式=Lohse, けた形式=solid, 主構造数=2 が仮定されており, それらのもとでなされる知識ベース推論からはけた高には最大支間長の $1/40$ と $1/25$, それぞれに対しては solid と braced のリブ形式の競合が得られ, $\hat{s}_{(1)}^{(5)} = \{1/40, \text{solid}\}$, $\hat{s}_{(2)}^{(5)} = \{1/40, \text{braced}\}$, $\hat{s}_{(3)}^{(5)} = \{1/25, \text{solid}\}$, $\hat{s}_{(4)}^{(5)} = \{1/25, \text{braced}\}$ と表される。この段階での淘汰しきい値は $\theta_1 = 0.1$, $\theta_2 = 0.17$, $\theta_3 = 0.12$ であり, 候補集団には表 5 に示す個体分布が見られた。

ここで, 設計者が意思決定によって知識ベース推論の流れから切捨てた候補が再び提示される可能性について調べる。例えば, 他の橋梁形式をとる候補は P_2 に関する属性値が異なるので, 知識ベース推論の枠組ではそこまで遡り, その段階から推論をやり直すことになるが, ここではアーチ橋構造物 $P_3^{(A)}$, $P_4^{(A)}$, $P_5^{(A)}$ に含まれる属性値についても, 主構造数, けた高, けた形式のように他の橋梁形式と共通の属性の値はそのまま使われる。候補集団から選ばれる個体の実現可能性は, その属性値が式 (5) を満たすことで判断できる。ここで個体から発現される属性値が, けた高の決定 ($P_4^{(S)}$, $P_4^{(C)}$) に至るまで知識を満たす場合には, 後戻りすることなく決定木を横に飛移るとみなせる。このような個体形質 (図 8(a)~(c)) と, 1 段階だけ設計を後戻り ($P_3^{(S)}$, $P_3^{(T)}$) することになる個体形質 (図 8(d), (e)) を持つ個体数も表 5 に示す。これからは, 以前の部分問題で知識ベース推論の流れからは切捨てられた候補であっても, 候補集団中には存在し得ることが分かる。特に, 構造機能性に関する候補集団では, (d) トラスけたを持つつり橋構造や, (e) トラス橋構造物も存在しており, その特徴が反映されている。これらは, 事例と個体形質の表現に遺伝子的表現を導入したことで, 位相が異なってもそれらの構造的な類似性を測れることによるものと考えられる。

6. 結 言

概念設計における設計候補の生成に対して, 知識ベースと, 遺伝的アルゴリズムの考え方をを用いた事例ベース

Table 5 Distribution of phenotypes at subproblem of arch-rib type

	in $C_1^{(5)}$	in $C_2^{(5)}$	in $C_3^{(5)}$
θ_k	0.1	0.17	0.12
$s_{(1)}: (0.22, 0.44, 0.10)$	80	364	81
$s_{(2)}: (0.28, 0.06, 0.40)$	596	1	2302
$s_{(3)}: (0.22, 0.44, 0.10)$	0	63	67
$s_{(4)}: (0.28, 0.06, 0.40)$	0	1	479
• Other possible candidates without back-tracking			
(a) cantilever arched	0	0	9
(b) suspension	82	30	5
(c) cable-stayed	13	3	2
• Other possible candidates with one back-tracking			
(d) suspension with truss-beam	1	0	0
(e) truss-bridge	7	0	0
F_k	0.36	0.36	0.29

的手法の利用を考えた。遺伝的事例ベースでは, 構造属性は遺伝的に表現され, 過去の設計事例群の特徴を各個体の持つ部分的なパターンとして保持する。概念設計アシスタントによる候補生成に, 確率的なゆらぎを持つ遺伝子的手法を用いることで決定木の飛移りをも許容するような手法を提案した。これは, 設計の初期段階では異なったものに潜む類似を見出すことが重要であるとの指摘⁽¹⁹⁾とも関連するものである。この手法は, 知識ベースの流れからは見えないものも含んだ多様な候補の提示を可能とし, 設計者に幅広い検討の機会をもたらす一つの補助的な手段として有効であると考えられる。

文 献

- (1) e.g. 赤木, 設計工学 (下), (1991), 117, コロナ社。
- (2) e.g. Pu, P., *Artific. Intell. for Engng. Design, Anal. and Manufact.* 7-2 (1993), 79.
- (3) Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, (1989), Addison-Wesley.
- (4) 赤木, 設計工学 (上), (1991), 60, コロナ社。
- (5) 堀, 機誌, 94-877, (1991), 1010.
- (6) 池本・川上・小西, 機講論, No.950-24, (1995), 256.
- (7) 田中・平, 機講論, No.930-27, (1993), 52.
- (8) 瀬口・田中・山口, 機論, 55-520, A (1989), 2533.
- (9) 日本鋼構造協会編, 鋼橋計画マニュアル, (1985), 日本鋼構造協会。
- (10) Maher, M. L., *Artific. Intell. for Engng. Design, Anal. and Manufact.*, 1-3 (1987), 207.
- (11) 田中・平, システム制御情報学会論文誌, 8-9, (1995), 458.
- (12) 小西編, 鋼橋設計編 I, II, (1977), 丸善。
- (13) 平井ほか, 鋼橋 III, (1967), 技報堂。
- (14) 文献 (12) の 881 ページ。
- (15) 文献 (12) の 1120 ページ。
- (16) 池田ほか編, 橋梁と基礎, 26-1 ~ 28-1, (1992 ~ 1994), 建設図書。
- (17) 日本道路協会編, 道路橋年報 昭和 61・62 年度版, (1990), 丸善。
- (18) 成瀬, 橋梁工学, 橋梁工学 (鋼橋), (1989), 森北出版。
- (19) 野口, 精密工学会誌, 60-2, (1994), 285.