

(10) 局所ルールによるトラス構造のトポロジ・節点位置同時探索

TOPOLOGY AND GEOMETRY DESIGN OF TRUSS STRUCTURES BY USING LOCAL RULES

落 隆行*・岸 光男**

Takayuki OCHI, Mitsuo KISHI

*工修 三井造船(株)玉野事業所(〒706-8651 玉野市玉3-1-1)

**工博 大阪府立大学助教授 工学部海洋システム工学科(〒599-8531 堺市学園町1-1)

Considered in this study is a design problem to determine topology and geometry of plane truss structures under yielding and buckling constraints. A heuristic approach is introduced to solve the design problem. Using local rules, we control the location of truss-nodes. The design space is divided into segments of a size. Nodal objects are allowed to shift from the existing segment to a surrounding segment at every state transition. Hence, the length of the member related can change. The transition by local rules may unite/remove superabundant nodes and members. Consequently appropriate topology and geometry will emerge. The local rules for the state transition are classified according to the stress condition of a pair of the joining-adjointing members in the neighbourhood of the node. The design problem to be solved is a constraint satisfaction problem. Numerical examples for plane truss structures are provided to demonstrate the applicability of the proposed method.

Key Words: Topology and geometry design, Truss structure, Local rule

1. はじめに

本研究では、トラス構造のトポロジ・節点位置の同時探索問題に対して、局所ルールに基づく手法の適用を試みる。局所ルールによる構造の形態/形状最適化として、セルラ・オートマトンを用いた手法¹⁾がある。そこでは、均質化法²⁾と同じく設計空間を均等分割したうえで、分割した各セルの質量(あるいは剛性)を局所ルールにもとづいて変化させていく。その結果として、構造形状が生成されていく。

ところで、局所ルールを用いるにしても、トラス構造を対象とした形状生成問題を取り扱うなら、それにふさわしい構造形状の表現法が望まれる。ここでは、設計空間をセグメント分割し、各セグメントをトラス節点の配置候補と考える。トラス構造の各節点の位置は、その近傍の状態に基づき、局所ルールによって変化する。節点どうしが合体すれば、それによって構造部材数も削減され、トポロジが変化していく。そのような局所ルールの大枠を設定することが、この研究の目的である。それは、人工生命アルゴリズムなどによるチューニング処理の前段階として位置づけられる。

2. トラス構造のトポロジ・節点位置同時探索

著者らは、単位構造要素を結合していくことで形態を生成するレゴ構造設計問題³⁾を提示し、その例題としてトラス構造を対象としてきた。たとえば、最小の3角トラスの組合せとして図-1のような形態を得ることがで

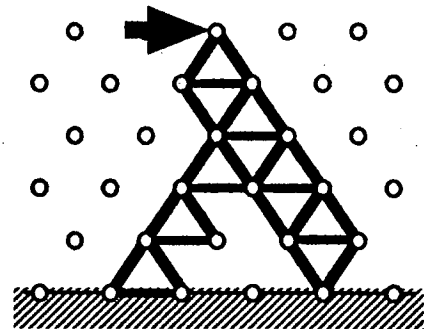


図-1 レゴ構造設計

きている。ただし、それはトポロジの探索であって、節点配置は限定されている。

トラス部材の断面諸元を所与とするなら、トラス構造の形状設計は次の3つのモードに分類される^{4,5)}。

- (A) トポロジ・節点位置同時探索モード：部材配置と節点配置とを求める。
- (B) トポロジ探索モード：節点配置を限定して、部材配置を求める。
- (C) 節点位置探索モード：部材配置を限定して、節点配置を求める。

本研究では、トポロジ・節点位置同時探索モードを対象とする。

設計代替案の評価規準を f とする。制約条件を満たし設計目的を達成することができる代替案の探索について

は、以下の3つのモードがある⁷⁾。

- (a) 最適解探索モード：最高の f 値をもつ代替案を求める。
- (b) 満足解探索モード：あるレベル以上の f 値をもつ代替案を求める。
- (c) 制約充足解探索モード： f 値を考慮せずに代替案を求める。

本研究では、制約充足解探索モードを対象とする。

以下に、対象とする設計問題を定義する。

(1) 初期条件：

トラス構造の初期形状、設計空間、トラス部材の材料特性、構造への作用荷重は、所与であるとする。各トラス部材とも、断面諸元が同じで長さ方向に一樣である。荷重は節点にのみ作用する。

(2) 設計変数：

節点位置を変化させ、それに応じてトラス部材長を変える。節点どうしが重なることで2本のトラス部材が合体しても、部材強度を1本のときのままとし倍増させない。

(3) 制約条件：

トラス部材の降伏および座屈について制約を付加する。部材の材料特性および構造への作用荷重は確定的とする。

(4) 評価関数：

代替案の評価関数を直接的に明示しない。ただし、構造重量の低減を局所ルールの中で意図する。

3. 局所ルールによるトポロジ・節点位置同時探索

3.1 人工生命の概念に基づく設計

人工生命(Artificial Life, 以下AL)⁸⁾の研究は、多数の要素間の相互作用から創発される挙動や構造を取り扱う。それは、以下のような合成型の方法論である。

- (A) ルールによって挙動が表現された単純なオブジェクトをつくる。
- (B) 多数のオブジェクトから成るシステムを考える。
- (C) オブジェクト間の相互作用の結果としてシステムに発現する構造や挙動をみる。

したがって、ALモデルは次の特徴をもつ。

- (a) 多数の単純な局所ルールの集合体である。
- (b) 局所ルールによって、ある環境下でのオブジェクト間の相互作用が規定される。
- (c) 局所ルールよりも上位の階層からシステムの挙動を制御するルールが存在しない。

ALモデルの分析にはシミュレーションがなじみやすい。

本研究では、トラス構造のトポロジ・節点位置同時探索にALの概念を導入する。

3.2 トラス節点の近傍

ALモデルの典型としてセルラ・オートマトン⁹⁾がある。たとえば、空間を格子状に分割して要素(セル)をつくり、個々のセルをオブジェクトとする。セルは状態を

もち、その状態は遷移していく。1つのセルの次の状態は、自身の状態とその近傍にある複数のセルの状態とに依存して決まる。

本研究でも、設計空間を格子状に分割する。ただし、それら分割要素(セグメント)をオブジェクトとするのではない。個々のトラス節点をオブジェクトとして取り扱う。各セグメントはトラス節点の配置候補である。ここでは、節点の近傍として図-2に示される範囲を考える。すなわち、各節点は、それに直接結合する部材(以下、接続部材, joining member)およびその隣接節点に結合する部材(以下、隣接部材, adjoining member)の応力状態に基づき、局所ルールによってその位置を変化させる。

3.3 状態遷移アルゴリズム

設計空間を分割し、各セグメントをトラス節点の配置候補と考える。各節点の位置は、その近傍の状態に基づき局所ルールによって、現状を維持するか周辺セグメント(図-3)へ移る。節点位置が変化すれば、接続部材の長さも変わる。節点どうしが合体すれば、構造部材数は削減され、トポロジが変化していく。

トラス節点の状態遷移のアルゴリズムは以下の通り(図-4)。

- (1) 対象とする節点について、接続部材および隣接部材の1つの組ごとに、それらの応力状態に基づき、局所ルールによって周辺セグメントに得点を与える(3.4参照)。
- (2) 周辺セグメントごとに、接続部材および隣接部材のすべての組に対する(1)の得点を集計する。
- (3) 現在位置するセグメントから各周辺セグメントの方向に、(2)の得点数に比例した大きさのベクトルをおく。
- (4) 得点の総和ベクトルをとり、その方向に位置する周辺セグメントへ節点を移動させる。総和がある値よりも小さければ、節点を現在位置に留める。

3.4 局所ルール

トラス節点の配置に関する局所ルールとして、If-thenルールの形式を用いる。すなわち、提案する設計システムはプロダクション・システムである。ルール前件部には、接続部材および隣接部材の組について、その応力状態が入る。1本のトラス部材の軸応力の大きさを、図-5のように分類する。ここで、 σ_1 および σ_2 は応力の境界標、 σ_a は許容応力である。

ルール後件部には、表-1に示される操作が入る。ここで、 σ_b は接続部材の座屈応力である。得点が与えられる周辺セグメントについては、図-6に示すように、タイプA、タイプB1、タイプB2の3パターンを考える。タイプAは接続部材の短縮、タイプB1は隣接部材と接続部材との角度調整、タイプB2は角度調整かつ接続部材の短縮、を意味する。

表-1にある各ルールの意図を以下に示しておく。

- (a) 高い応力値の隣接部材を支えるため、より多くの部

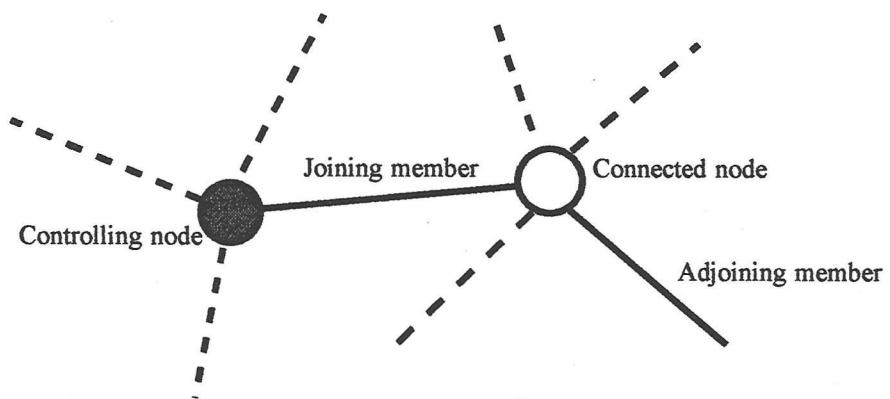


図-2 節点の近傍

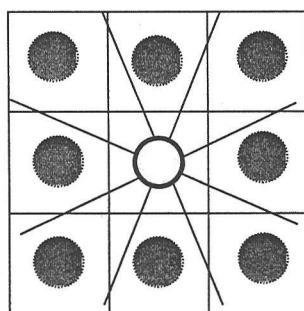
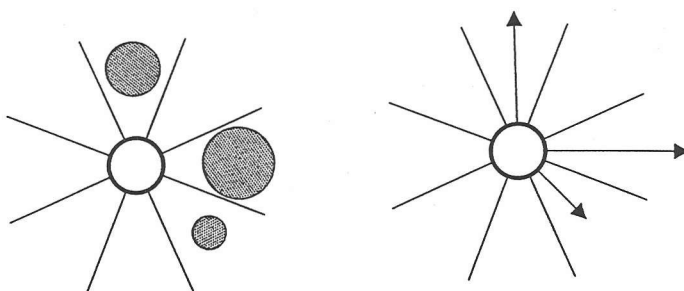
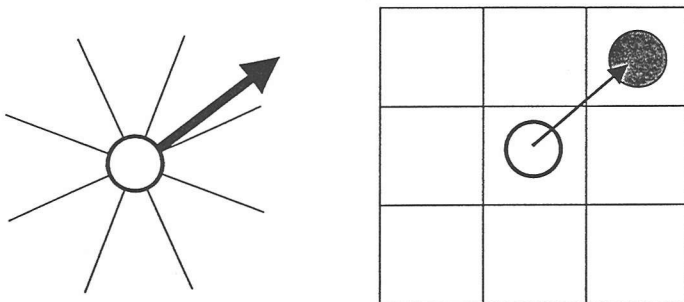


図-3 周辺セグメント



(1) Scoring surrounding-segments (2) Generating score-vectors



(3) Summing score-vectors (4) Shifting node-location

図-4 状態遷移アルゴリズム

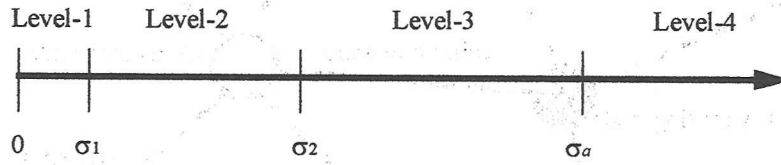


図-5 トラス部材の応力レベル

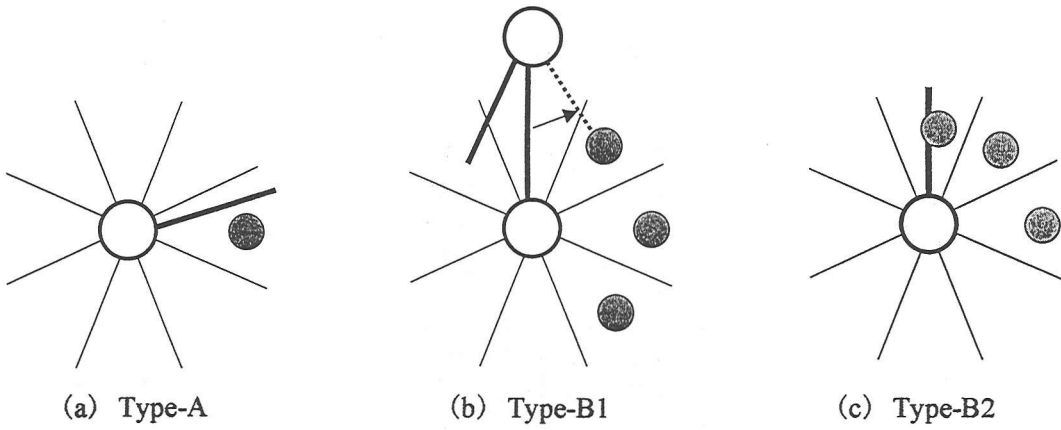


図-6 得点付与のパターン

表-1 局所ルール

Adjoining member Joining member	Level-1	Level-2	Level-3	Level-4
Level-1	A-(b), 1*	A-(b), 1	B1-(d), 1	A-(a), S_a
Level-2	A-(b), S_2	A-(b), S_2	B1-(d), 1	A-(a), S_a
Level-3	B2-(d), 1.2	B2-(d), 1.2	B2-(d), 1.2	B2-(d), 1.2
Level-4	B2-(d), 1.2	B2-(d), 1.2	B2-(d), 1.2	B2-(d), 1.2
$\sigma \geq \sigma_b$	A-(c), $2 \times S_b$			

* Scoring pattern - (Intention), Score value

$$S_2 = (\text{Stress of joining member}) / \sigma_2$$

$$S_a = (\text{Stress of joining member}) / \sigma_a$$

$$S_b = (\text{Stress of joining member}) / \sigma_b$$

材を集めたい(そのために接続部材を消す)。

- (b) 構造重量を減少させるため、低い応力値の接続部材を消したい。
- (c) 座屈を防ぐため、接続部材を短くしたい。
- (d) 接続部材と隣接部材とのなす角を効果的($\pi/3$)にするため、角度調整したい。

局所ルールによって周辺セグメントに与えられる得点は、接続部材の応力に依存して決まる(表-1 参照)。

なお、対称形状のトラス構造を生成させたい場合には、中心軸からみて対称関係にある2節点をリンクさせながら、それらの位置を線対称に動かしていけばよい。

4. 数値計算例

図-7 に示すように平面トラス構造の初期形状を与え、そのトポロジ・節点位置同時探索問題を解く。この初期形状の領域をそのまま設計空間とする。局所ルールによって、各節点の位置を非同期的に変化させる。構造の支持節点は水平方向にのみ移動することができる。トラス部材の許容軸力を単位荷重とおく。荷重作用節点の位置は変化しない。

まず、図-7 の●印の節点に水平方向の単位荷重をかけた場合について、構造が固定するまでの様子を図-8 に示す。得られた構造は、応力制約をすべて満足する。その構造は、図-1 の構造と同じく、トラス梁を1本の引張部材で支えている。

つぎに、水平方向に0.1 単位荷重、0.3 単位荷重、0.8 単位荷重、および1.2 単位荷重を作用させた場合について、それぞれの結果を図-9 の(a)から(d)に示す。

いずれの場合も、状態遷移の回数は数百のオーダーである。ただし、初期形状の変化や大作用荷重に対して不安定挙動がみられた。

5. おわりに

平面トラス構造を対象にして、そのトポロジ・節点位置同時探索のための局所ルールを設定した。すなわち、近傍(その節点の接続部材および隣接部材)の応力状態に基づき、各節点の位置を変化させていく。節点どうしが合体すれば、それによってトポロジも変化する。数値計算例を通して、以下の結論を得た。

- (1) 提案した設計システムの有効性が確認された。

- (2) 計算量の低減が望まれる。

- (3) 初期形状の変化および大荷重に対して不安定挙動がみられる。

人工生命アルゴリズムなどによる学習/チューニング^{10),11)}によって、ここで構築した設計システムの性能向上をはかりたい。このことは、立体トラス構造への拡張を考える際、いよいよ不可欠な事項となる。

参考文献

- 1) 伊能教夫：骨の適応機能に基づく自己組織化シミュレーション，数理科学，No.394，pp.21-26，サイエンス社，1996.4.
- 2) Bendsoe, M.P., Kikuchi, N.: Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, No.71, pp.197-224, 1988.
- 3) 落 隆行，岸 光男：確率的ニューラルネットワークによるレゾ構造設計，第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，構造工学技術シリーズ，No.1，pp.125-128，土木学会，1996.12.
- 4) Uri Kirsch(著)，山田善一，大久保慎二(監訳)：最適構造設計，丸善，1983.
- 5) 田川 浩，大崎 純：連続的トポロジー変化モデルおよびシミュレーテッドアニーリング法を用いた平面トラスのトポロジー・節点位置同時最適化法，第3回最適化シンポジウム講演論文集(OPTIS'98)，pp.225-230，日本機械学会，1998.8.
- 6) 大崎 純：パラメトリック最適化手法による構造物の最適設計，システム/制御/情報，Vol.42，No.12，pp.645-652，システム制御情報学会，1998.12.
- 7) 岸 光男：システム工学，共立出版，1995.
- 8) Langton, C.G.: Artificial Life, Addison-Wesley, 1988.
- 9) 加藤恭義，光成友孝，築山 洋：セルオートマトン法，森北出版，1998.
- 10) Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- 11) Langdon, W.B.: Genetic Programming and Data Structures, Kluwer Academic Publishers, 1998.

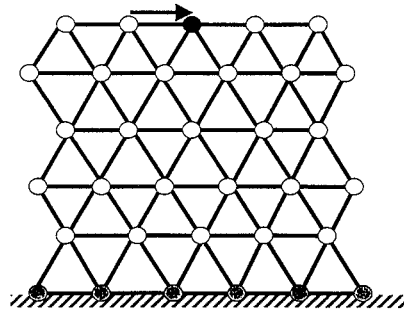


図-7 設計空間

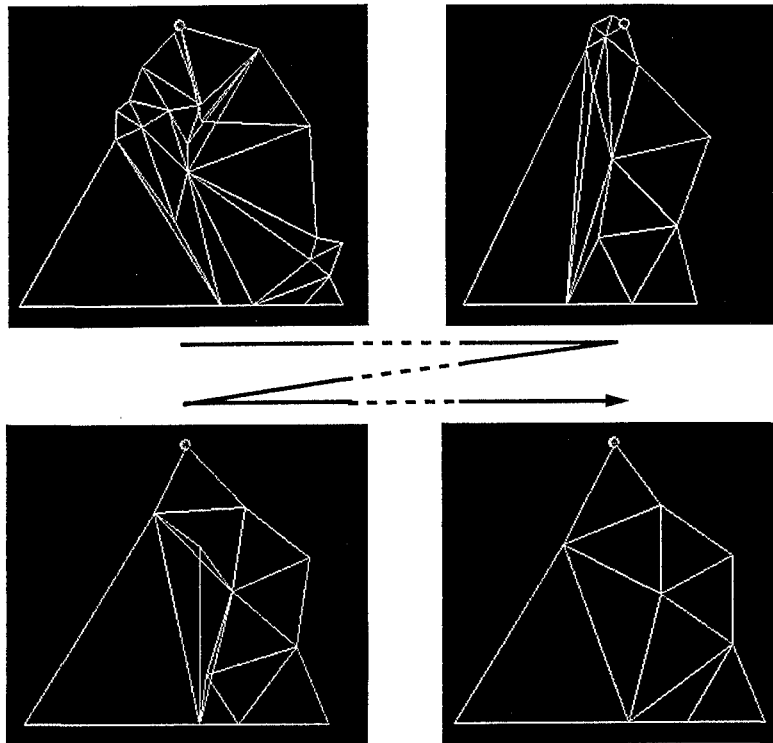


図-8 状態遷移の過程

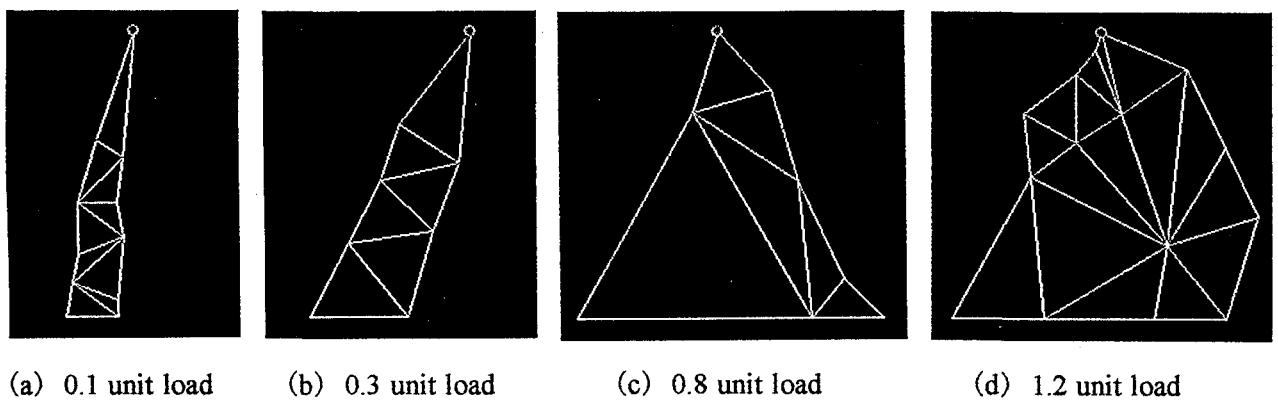


図-9 荷重の大きさによる影響