

Lattice³ 形式の骨組の最適形状を生成するアルゴリズム

Lattice³, a generative algorithm for shape-optimized structural frame

学籍番号
氏 名
指導教員

47-186771
藤本 月穂
佐藤 淳 准教授

1. 序

1.1 背景と研究目的

軽量かつ強固なラチス構造は、19 世紀、材料の削減のため多用されたが、加工費が高価になるとともに廃れた。しかし、消費エネルギーが問題となった現在、材料の削減が再び重要な課題となっている[1]。このとき、加工量に対してデジタルファブリケーション技術が解決の糸口となることが期待される、これを受け、本研究では、鉄骨を用いた最適なラチス形状の骨組を自動生成するアルゴリズムの構築を目指す。

1.2 Lattice³ 形式とは

ラチスとは、複数の弦材とその間をつなぐ斜材からなる構造をいう。

本論では、図 1 のようなラチス化の繰り返しを想定し、中でもラチス化を 3 回行ったものを Lattice³ 形式として取り上げる。

ラチス化の繰り返しにより、同程度の外形で強度を保ったまま、材の減量、および意匠面での透明感の獲得が期待できる。

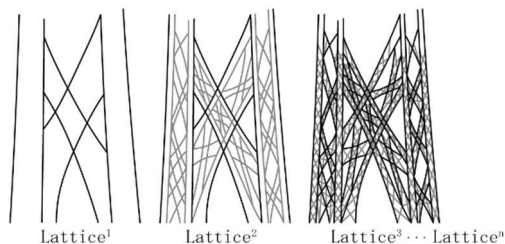


図 1 ラチス化の繰り返し

1.3 アルゴリズムの構成

本論で提案するアルゴリズムは、

- ① Lattice² 形式の骨組の構造
 - ② モデルのラチス化
- という 2 段階で構成される。

2. 構造解析

2.1 共役勾配法

形状を変化させ構造を強化する手法と

して、最適化法の一つである共役勾配法 (CG 法) を用いる。CG 法は、関数を曲面として見た時、その勾配方向に進み極値を探す最急降下法の応用である (図 2) [2]。共役勾配とは、ある点での関数を楕円に近似することで勾配方向に修正を施したものであり、図 3 のようにより早く極値解にたどり着くことができる。

2.2 実装

2.2.1 目的関数

骨組に対し重力と地震力を与えて構造解析を行い、各部材の安全率を算出する。目的関数をこれらの安全率の最大値、変数を各節点の xyz 座標とし、安全率の最大値を小さくするアルゴリズムを構築する (図 4)。加えて、極値の探索に必要な 4 つのパラメタを表のように定める。

表 1 アルゴリズムのパラメタ

名称	役割	値の例
ftarget	目標とする安全率の値	1.000
gamma	ステップ幅係数	0.0001
dfact	初段階で与える微小変位	0.005
eps	収束判定値	0.000001

全体は大きく次の 4 段階からなる。

- ① 形状の入力
- ② 変数を微小に変化させ、目的関数の勾配を調べる。
- ③ ② を初期値として、共役勾配方向を求める。

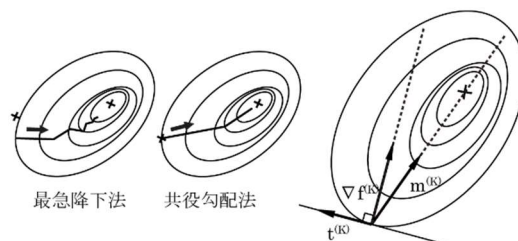


図 2 共役勾配法イメージ

図 3 共役勾配方向

- 4 その方向の極値まで変数を求める。
2~4を繰り返す。

2.2.2 形状操作 pinch

(特定の節点をつまむように動かす)

ある節点 i が距離 $distance$ だけ動いた

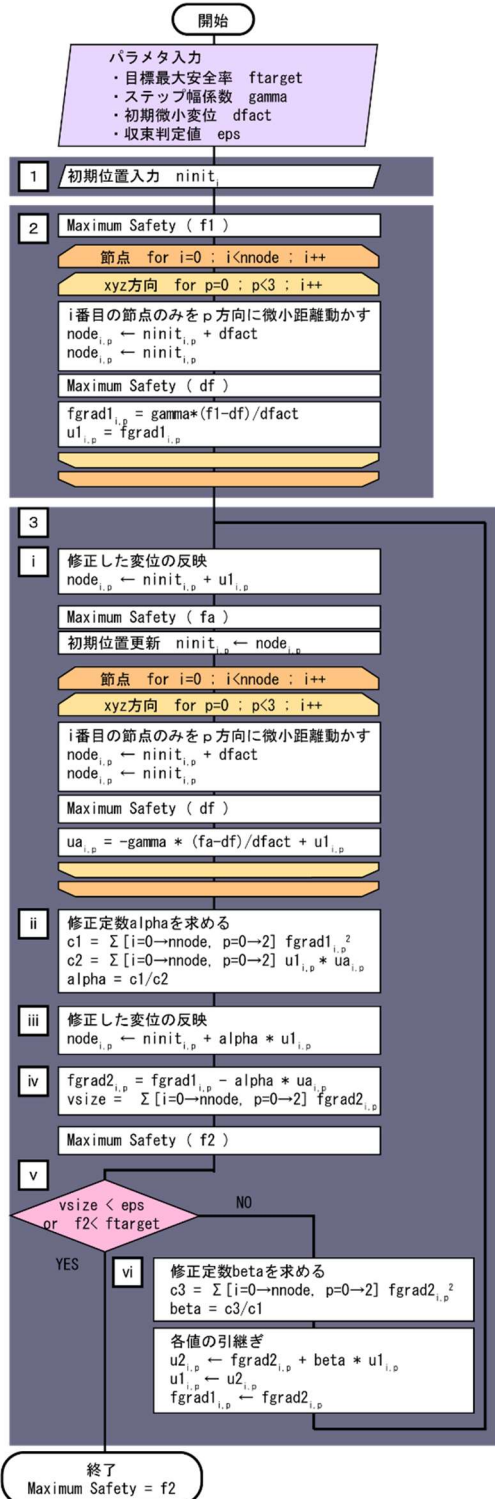


図4 形態解析フローチャート

とき、周囲の節点の移動距離を $\delta * distance$ とする(図5)。係数 δ は次のように定める。

- ① 各節点が i から何番目に近い点かを調べ、これを $nflag$ とする。
- ② 周囲のある節点 j に関して、係数 δ を
$$\delta = 1/nflag * d \quad (0 < d < 0.5) \quad (1)$$
とする。ただし d は定数とする。

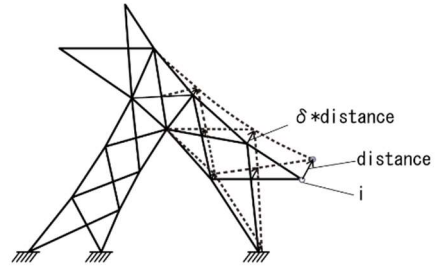


図5 Pinchによる節点移動のイメージ

2.2.3 形状操作 curve

(弦をしならせるように動かす)

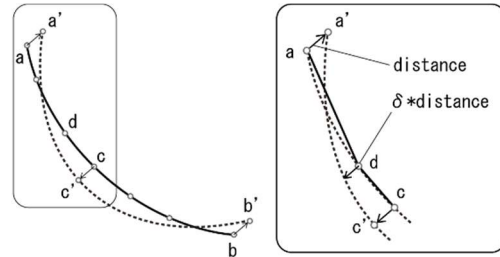


図6 形状操作 curve 図7 弦材上の節点移動

弦材がゆるやかな曲線を描くよう変形させる(図6)。以下に手順を述べる。

- ① 端点 a, b を移動
- ② 中央近点を端点と反対の方向に移動
- ③ 弦材上の節点の追従
- ④ Brace 交点の追従

③では、弦材上のある点 D について、端点 a, b 、中央近点 c との距離関係から、移動距離の係数 δ を定める。図7のように、端点・中央近点の移動距離を $distance$ 、各節点の移動距離を $\delta * distance$ としたとき、

$$\delta = \left\{ \frac{(AD+D)/2-AD}{(AD+DC)/2} \right\} * \frac{AD}{AC} \quad (2)$$

により δ を定める。 $\left\{ \frac{(AD+DC)/2-AD}{(AD+DC)/2} \right\}$ は点 D が端点 A に近ければ正、中央近点に近いほど負の値を取り、 $\frac{AD}{AC}$ は中央近点に近いほど大きくなる 0 以上 1 未満の値を取る。

また、④では各斜材交点に対し、周囲4点を抽出(図8中 $tonari$)。これらを2点ずつ、クロスに

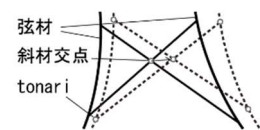


図8 斜材交点の追従

結んだ交点に移動する。

3. 骨組モデル生成

3.1 既往研究と本生成手法の意義

伊勢坊^[4]により、8本の基準線により与えた外形に対しLattice³形式の立体骨組を生成するアルゴリズムが開発された。それに対し、本研究では初期形状として中心線を与え、一段階のラチス化を行うアルゴリズムとした。これにより、任意のLatticeⁿ形式に対する応用が簡易になるとともに、形態解析における骨組の形状の変更の反映が容易になると考える。

3.2 開発環境

モデリングアルゴリズムの開発は3D CADソフト「Rhinceros」(Robert McNeel & Associates)、およびそのプラグイン「Grasshopper」(同社)を使用した。

3.3 2Dモデル生成アルゴリズム

図9にモデル生成の流れを示す。9Stepからなるモデル生成は、大きく3段階に分けられ、Lattice²骨組の中心線の入力、弦材の生成、斜材の生成を順に行う。

Step0では、Lattice²骨組の各部材の中心線を、3種類に分けて入力する。Lattice¹で斜材、Lattice²で弦材だった部材(Brace, Chord)の頭文字をとりBCとする)、同様にしてCC、斜材をまとめてBraceとする。解析データ上で各部材は節点で分割され順不同となっており、これらを整理しながらのモデリングが求められる。

図9のStep1-4では弦材の生成を行う。

Step1 中心線となる曲線の生成

BC,CCに対し、ばらばらに入力された各部材の端点を抽出、Z座標昇順に並べ、各

点を繋ぐ一本の曲線を生成する。

Step2 曲線の offset

各部材の中心線をLattice³の部材幅だけ offset し、弦材の下線を生成する。

Step3 Region

Step2の曲線を用いて、向かい合う弦材間に閉曲面を生成する。

Step4 Trim

CC, BC, Braceの勝ち負けに基づき、Step3の閉曲面を用いて、Step2で生成した弦材の下線を互いに切り取る。これにより、弦材が抽出できる。

次にStep5-9では、CC, BC, Braceの各部分に対してLattice³の斜材を生成する。

Step5 CC 斜材

Step4をもとにBC, BraceとCCの交点を抽出する。これらの交点と、CC部分の弦材を一定数に分割した点と合わせた点群から、向かい合う弦材に対し同数の点を選ぶ。これらを端点として斜材を生成する。

Step6 BC 交差部 斜材

Step4でTrimされたBC部分の弦材を用いて、BC同士の交差部を抽出する。端点同士をクロスに結び斜材を生成する。

Step7 BC 非交差部 斜材

Brace部分との交点を抽出する。Step5と同様、一定数に分割した点と合わせるが、BCは向かい合う2本の弦材の長さの差が大きくなりやすいため、2本のうち短いほうを基準として分割数を決定する。これらの分割点を用いて斜材を生成する。

Step8 Brace 交差部 斜材

Step6と同様に斜材を生成する。

Step9 Brace 非交差部 斜材

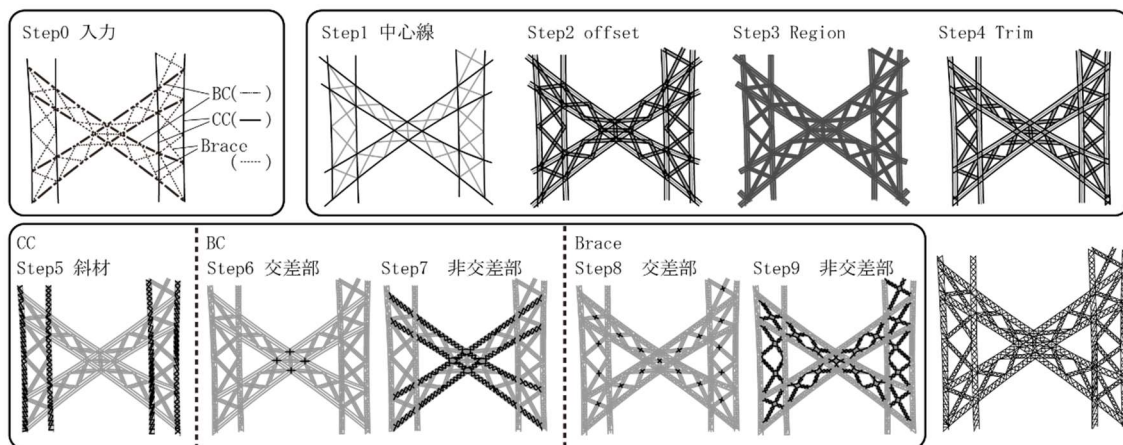


図9 モデル生成フローチャート

Step7と同様に斜材を生成する。

4. 試設計

4.1 形態解析

図10に平面モデルの形状、荷重・拘束条件、および形状と安全率の変化を示す。材料は鋼材のSS400(表2)とし、BC,CCはいずれも22mm角、Braceは15mm角とした。図に示す上部4点にX方向に4.9[N]、Zに9.8[N]の荷重を加える。形態解析の結果として、安全率(検定比)が1.251から0.948まで減少した。

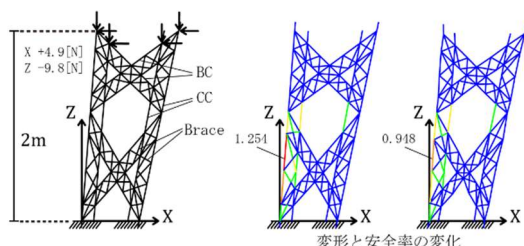


図10 平面モデルの構造解析

4.2 ラチス化

前節の形態解析は、Lattice³形式の3段階目のラチス材を縮約することで単部材とし、Lattice²形式として処理したものと解釈できる。等価なLattice³形式へとラチス化を行うにあたり、モデルの部材について、軸剛性・曲げ剛性の等価なラチス柱を求める。ラチス柱の幅は、弦材の中心線間の距離が元の単部材と等しいものとし、図11に示す条件下で表3のようになった。

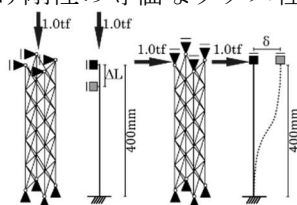


図11 縮約

表3 各部材に相当するラチス柱

元の角材の幅	22mm	15mm
ラチス弦材幅 [mm]	6.35	4.00
ラチス斜材幅 [mm]	5.00	2.00
軸剛性算出時変位 ΔL の変化 (角材→ラチス) [m]	0.004 →0.001	0.008 →0.029
曲げ剛性算出時変位 δ の変化 (角材→ラチス) [m]	1.302 →1.170	6.047 →3.527
鉄骨量の変化 (角材→ラチス) [kg]	1.510 →1.374	0.702 →0.340
鉄骨削減率[%]	9.01	51.5

22mm角材は弦材6.35mm,斜材5mmのラチス柱に、15mm角材は弦材4.0mm,斜材2.0mmのラチス柱にそれぞれ代替可能とわかる。また、骨組全体としての鉄骨の

削減率は22.5%となった。

図12に、ラチス化後のモデルを示す。

4.3 考察

構造解析ではテーパー形状の有効性が確認できた。

生成した最終形は透明感にやや欠ける。必要な剛性に対し、Lattice¹の段階から全体形状の検討を行うことで、より透明感のある形状とする余地があると考えられる。また、本モデルは高さが2mであるが、建築大

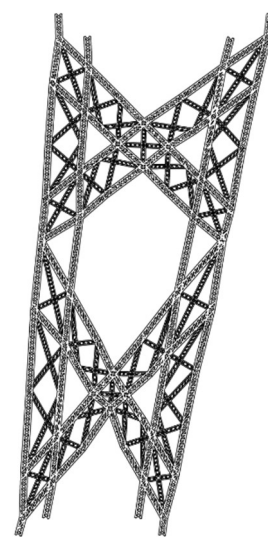


図12 Lattice3形式の骨組モデル

の骨組では各部材幅も大きくなる。スケールの大きな骨組に対しラチス化を行うことで、材の細さが感じられるようになり、透明感が出ると考える。

加えて、形態解析中、パラメタによっては骨組の形状が発散して異常に歪になる事例が多々あった。これは、目的関数が「全ての部材の安全率のなかで最大の値」であるがために、形状操作の条件によっては、クリティカルな部分さえ良くなっていれば、そこへ影響の少ない部分が力学的に良くない形でも、目的関数は良くなるためと考えられる。安全率の分布も目的関数として反映することで改善する可能性がある。

5. まとめと課題

本論では、Lattice³形式の骨組の生成アルゴリズム、およびラチス幅を滑らかに変化させて共役勾配法により安全率最小化を行う形態解析法を提案した。また、平面モデルでの試みにより、鉄骨量が2割程度削減できることを示した。

今後の課題は、まず立体骨組に対し拡張することである。また、形態解析の目的関数の設定に検討の余地がある。

主要参考文献

- [1] 佐藤淳 『佐藤淳構造設計事務所のアイテム』 INAX 出版 2010
- [2] 金谷健一 『これなら分かる最適化数学 -基礎原理から計算手法まで』 共立出版 2005
- [3] 伊勢坊健太, “Lattice3 形式の立体骨組を生成す