

外乱に応じて弦長を逐次可変とする張弦構造の自動制御

Adaptive automated equilibrium control of a lightweight,
sequential arch-cable structure

学籍番号 47-176745

氏名 小島 慎平 (Shimpei KOJIMA)

指導教員 佐藤 淳 准教授

1. 序論

1.1. 本論の背景

近年、建築設計では、温熱環境や日射条件に応じて建築の外皮を変形させることにより、住環境の効率化・維持コストの削減をする提案が多くなされるようになり、実際の建築物にも応用されてきている（図 1.1）。



図 1.1 可変建築物の例^{[1][2]}

一方で、構造的指標で与えられた外力に応じて形態を変化させるような例は少ない。

1.2. 研究の目的

本論では、センサーによる外乱情報取得と、電子制御による可変機構を用いて、自動で躯体を構造的に優位な形態に変化させる張弦構造の提案を目的とする。

1.3. 研究の手法

研究の方法として、図 1.2 に示すような可変機構を用いた多角形アーチ形状の張弦構造を対象に、外乱の検出及び変形フローの構築、可変機構の設計、逐次形態解析アルゴリズムの開発、モックアップによる検証を行う。ケーススタディとして扱う張弦構造は、6つの部材と5本のワイヤーから構成される多角形アーチを構築する。ター

ンバックル機構をワイヤーの中間に設置し、弦長を調節することにより、構造躯体が変形をするシステムとなる（図 1.2）。検証の後、実構造物を想定した荷重条件下で構造最適化を行うことで可変張弦構造の適用可能性の拡張を試みる。

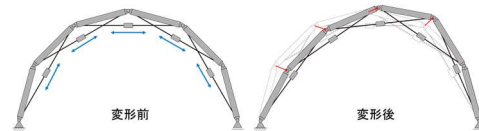


図 1.2 張弦構造の変形概念図

2. 外乱の定義及び変形フローの構築

2.1. 外乱の定義

本論における外乱とは、重力で安定している状態に対して作用する積雪・風荷重と定義し、本論では特に非対称に作用する場合に着目して単純のため静的荷重として扱う。

2.2. 変形フローの構築

図 1.3 に、可変張弦構造の変形フローを示す。重力で安定している架構の状態を定常状態とする。外乱によって発生した変位を取得し、目的関数に応じて最適形状に架構が変形する操作を繰り返す。

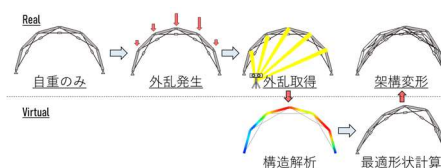


図 1.3 可変機構の変形フロー

3. 可変機構の設計

3.1. 架構形状の取得方法

回転角度センサーをフレーム部材のヒンジ部に用いて図 3.1 のようにして部材角度をセンシングし、架構形状を取得する。センサーのマウントパーツは下の写真のものを 3D プリントして生成した。

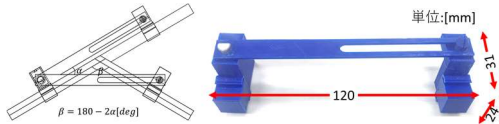


図 3.1 部材回転角度センサー

3.2. ターンバックル機構の設計

ターンバックル機構は、両方向から来るワイヤーを 1 つのモーターで巻き取る機能を基本に設計した。モーターの回転角を検出するため、リールと連動するように回転角センサーを付与した。以下にターンバックル機構の構成するパーツの 3D プリントで作成した装置を示す。

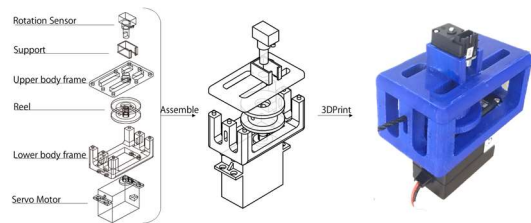


図 3.2 ターンバックル機構

4. 逐次形態解析コンポーネントの開発

4.1. 概要

Rhinoceros と拡張機能 Grasshopper の環境で、逐次形態解析のアルゴリズムを格納した C# コンポーネントを開発した。

4.2. 逐次機構解析コンポーネントの開発

架構形状のポリラインと部材の回転角度を、アルゴリズムの入力情報とする。2 つの情報を入力することで、機構解析の結果を節点座標のリストで返す。架構に与える拘束条件式を図 4.1 に示す。

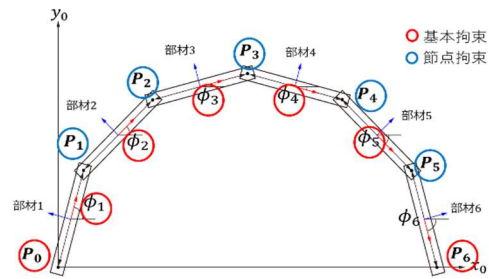


図 4.1 機構解析の拘束条件の付与

4.3. 逐次構造解析コンポーネントの開発

線材を用いた有限要素法により構造解析を行うコンポーネントを開発した。前述した機構解析コンポーネントから部材の節点座標を受け取りモデル形状の生成から構造解析までを自動で行う。

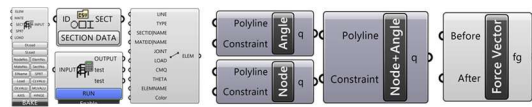


図 4.2 開発コンポーネント群の一例

4.4. 最適形状計算コンポーネントの開発

形状計算コンポーネントは、定常状態の形状に架構形状を復元させる弦長を算出する形状復元機能と、変形形状から発生している外力を推定し、その外力で発生する変位が小さくなるような架構形状をとる弦長を算出する変位最小化形状探索機能を持たせる。この外力仕事の最小化には最適化プラグイン wallacei を用いる。荷重ベクトルを $\{f\}$ 、変位ベクトルを $\{d\}$ 、全体剛性マトリクスを $[K]$ 、機構解析の拘束条件式を $C(q)$ 、変形時の部材の回転角度を $\{\alpha_i\}$ とすると最適化の定式化は以下のように表現できる。、角度の調整は $\pm 10^\circ$ の範囲に限定した。

$$\begin{aligned}
 &\text{find:} && \{\alpha_i\} \\
 &\text{minimize:} && f(x) = \{f\}^T \{d\} \\
 &\text{subject to:} && [K] \{d\} = \{f\} \\
 &&& C(q) = 0 \\
 &&& -10 \leq \{\alpha_i\} \leq 10
 \end{aligned}$$

5. 可変張弦構造の試作

5.1. 概要

小型架構の試作によるケーススタディを通して、ターンバックル機構・逐次機構解析コンポーネントの連携を図り、本提案の可能性を実証する。以下にケーススタディの各機能の変形フローを示す。

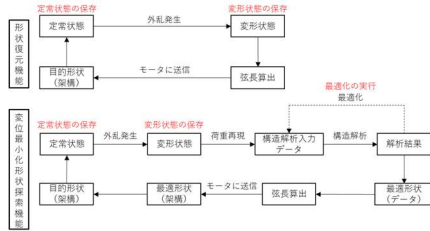


図 5.1 ケーススタディの変形フロー

5.2. セットアップ

架構のフレーム材には、溝形のアリミニウムを、ワイヤー材にはポリ塩化ビニルのケーブルを、接合部には 3D プリントしたヒンジ部材を使用する。

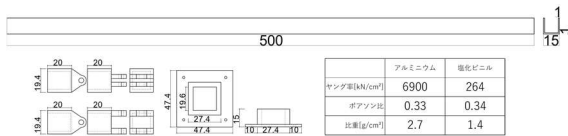


図 5.2 部材寸法[mm]と材料諸元

5.3. 実践

形状復元機能の実践において定常状態とした形状のモデル寸法と PC の画面キャプチ

ャ・架構の写真を図 5.3 に示す。

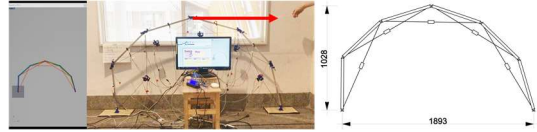


図 5.3 形状復元機能の定常状態

図中の矢印の方向に変形を与えた場合に除荷したとき、架構が定常状態に戻ろうとする過程を図 5.4 に示す。全ての機構が目標通り作動し、定常状態の形状に変形することが確認できた。

次に、変位最小化形状探索機能における、定常状態と変形状態の様子を図 5.5 に示す。架構にかかる荷重は、形状の変形に必要なモーターのトルクを考慮して、図中の矢印の方向に 0.5N の荷重をかけるものとする。

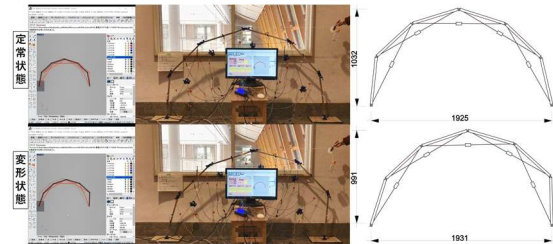


図 5.5 定常状態と変形状態

上記の二つの状態の変形の差分から推定した外力と、その外力に対する外力仕事最小化の最適化から得られた優良形状を図 5.6 に示す。

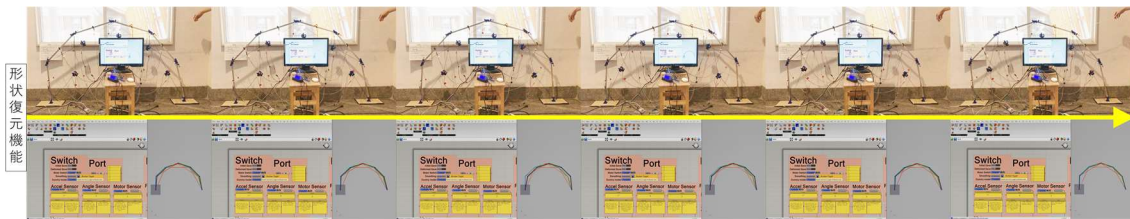


図 5.4 可変張弦構造の実践

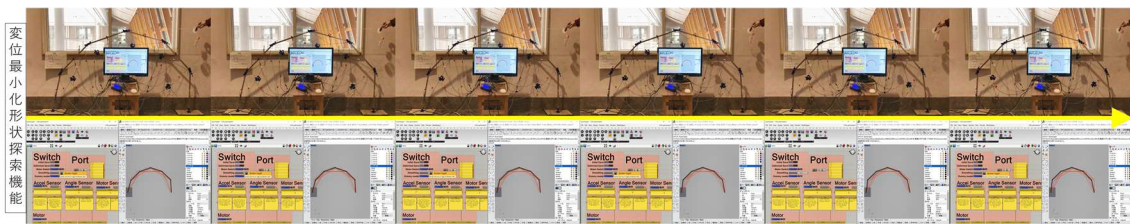


図 5.7 可変張弦構造の実践



図 5.6 外力の推定と最適化の優良解

実際の荷重は水平方向に一点のみに载荷したが、推定荷重は誤差が大きく、各節点に発生し、鉛直成分が含まれ、値が過剰に算出された。図 5.7 に示すように、得られた形状から算出された値に応じて可変張弦構造が優良解の形状に変形した。

6. 実大建築物への応用

6.1. 概要

実建築相当の荷重をかけた時の、本提案の可変張弦構造の性能を試算してみる。ここでは外力仕事最小化と、部材に発生する最大応力の最小化の2つを目的関数とした多目的最適化を行う。以下のように最適化の定式化を行う。

外力仕事最小化	最大応力最小化
find: $\{\alpha_i\}$	find: $\{\alpha_i\}$
minimize: $g(x) = \{f\}^T \{d\}$	minimize: $g(x) = N_{max}$
subject to: $[K]\{d\} = \{f\}$	subject to: $[K]\{d\} = \{f\}$
$C(q) = 0$	$C(q) = 0$
$-10 \leq \{\alpha_i\} \leq 10$	$-10 \leq \{\alpha_i\} \leq 10$

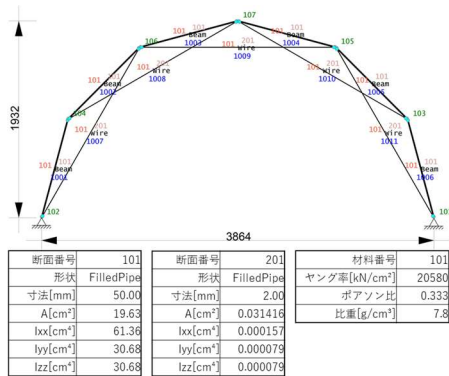


図 6.1 解析モデル概要

文献[6][7]を参考に、風荷重・等分布雪荷重・偏分布雪荷重の3つの荷重条件を設定する。なお偏分布荷重は、アーチ形状に多く見られる雪だまりを仮定し、通常の積雪量と同量の雪を偏らせて分布したものを扱う。

6.2. 結果と考察

初期形状の架構にかかる荷重と、多目的最適化の平均優良解を下図に示す。

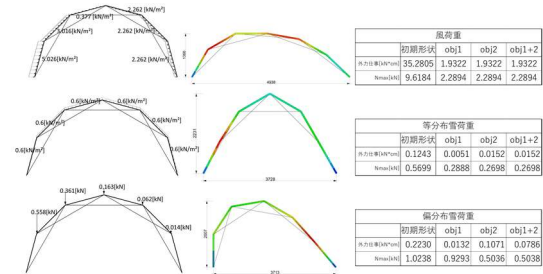


図 6.2 最適化の結果

2つの目的関数が総合的に最も低いとされる形状は、架構の形状が変わることにより、風や雪など、受圧面積の影響が大きい荷重を減らすような変形をするため、外力仕事もしくは最大応力の単一の目的関数であった場合にも似た形状が最優良解として計算される傾向がある。自重に代表される、形状によって変動の無い荷重に対しては、2つの目的関数はトレードオフの関係にある傾向がみられた。

7. 総括

本論では実大可変張弦構造の機構を提案し、その有用性を示すため、小型モックアップでの可変機構の設計、逐次形態解析コンポーネントの開発、実大建築での試算を行った。また、これにより外力仕事が65%程度、最大応力が51%程度減少することが確認された。一方で、接合部のあそびやセンシングの誤差から過剰な外力の推定が起きることや、モーターのトルク不足による変形可能形状の制限などに代表される課題を解決し、より大規模・多様な形態に対しても可変張弦構造の適用・実践をする必要がある。

- [1] Al Bahr Towers
- [2] ONE OCEAN
- [3] 佐藤淳(2010)『佐藤淳構造設計事務所のアイテム』、INAX 出版
- [4] 藤谷義信(1993)『パソコンで解く骨組みの力学』、丸善出版
- [5] 岩村誠人(2018)『マルチボディダイナミクス入門』、森北出版
- [6] 建築研究所(2016)『建築物の構造関係技術基準解説書』全国官報販売協同組合
- [7] 日本建築学会(2016)『建築物荷重指針・同解説 2015』日本建築学会