

# 構造形態デザインへの適用を目的とした XR デバイスの活用手法に関する研究 感度情報を利用した形状操作ナビゲーション

## Research on The Utilization Method of XR Devices for Application to Structural Form Design Shape manipulation navigation using sensitivity information

○門積 直宏\*<sup>1</sup>, 満田 衛資\*<sup>2</sup>  
Naohiro KADOZUMI\*<sup>1</sup> and Eisuke MITSUDA\*<sup>2</sup>

\*1 京都工芸繊維大学大学院生  
Graduate Student, Kyoto Institute of Technology.  
\*2 京都工芸繊維大学 教授 博士(工学)  
Prof., Kyoto Institute of Technology, Dr. Eng

キーワード：構造デザイン；形態創生；感度解析；性能操作型設計法；XR デバイス

Keywords: Structural design; Morphogenesis; Sensitivity analysis; Performance-manipulation design method; XR device.

### 1. はじめに

形状最適化手法を実務に適用する際、目的関数や制約関数の設定方法や、数量化が困難な制約の取扱い方法についてなどが問題になる。また、一度設計者が荷重等の設計条件及び初期形状を設定してしまうと、最終的な形態はコンピュータの中で自動的に決定されることになり<sup>1)</sup>、その間の形態の変化に対し設計者が意思を発揮させることが難しい。このような問題に対し、上谷は設計者がコンピュータと向き合っながら情報を交換しながら設計を進めていく対話型の設計手法を提案している<sup>2)</sup>。

これを受けて、筆者らは畔上<sup>3)</sup>によって提案された方法のアルゴリズムの中で形状変更の指標となる情報を可視化させ、その情報を参照しながら逐次的に直接形状操作を行うプログラムを作成し、設計者の意思を伴いながらも構造的なアドバイスが備わった性能操作型の形態創生手法を提案した<sup>4)</sup>。本論では、この手法を用いた設計例を紹介するとともに、提案手法をXR デバイス上で行い、従来の設計手法よりリアルな建築体験が伴う形態設計法を提案する。

### 2. 形状操作に利用する設計感度の導出

#### 2.1. 形状操作の際の指標

本手法では3次元グリッドシェル形態設計を行う際の力学的な指標として対象構造物の歪みエネルギーの値を用いる。また、形状操作の際の指標として、力法を用いた形状最適化の際に取り扱われる節点変更の情報を利用する。力法では、目的関数の設計変数に関する感度係数を求め、この感度係数に負号をかけたものを各節点の各方向の

荷重として加える。そして、線形弾性解析により各節点の変位  $\delta$  を求め、この変位を基準に作成した値を節点座標の更新量  $\Delta d$  とし、節点変位ベクトル  $d$  に対し  $d + \Delta d$  だけ座標の更新を行う。本手法ではこの節点座標の更新量  $\Delta d$  に適当な係数をかけた値をモデル上に描画し、設計者に対するアドバイス情報としている。

#### 2.2. 感度係数の導出

目的関数の設計変数に関する感度係数は以下のように求められる。

全体モデルの総節点数を  $N$  とし、全体座標系で表された節点座標を  $z_i (i=1, \dots, N)$  とする。また、節点変位の自由度を  $6$  とする。そして、全体座標系の全体剛性マトリックスを  $K \in R^{6N \times 6N}$ 、節点変位ベクトルを  $d \in R^{6N}$ 、節点荷重ベクトルを  $p \in R^{6N}$  と定義すると、剛性方程式は次のように書ける。

$$Kd = p \quad (1)$$

上式の両辺を  $z_i (i=1, \dots, N)$  で微分すると次式を得る。

$$\frac{\partial K}{\partial z_i} d = K \frac{\partial d}{\partial z_i} = \frac{\partial p}{\partial z_i} d \quad (2)$$

一方、歪みエネルギー  $C$  は次式で表される。

$$C = \frac{1}{2} d^T K d \quad (3)$$

歪みエネルギー  $C$  の、 $z_i$  に関する感度係数は、式(2)を用いて次のように書ける。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial z_i} &= \frac{1}{2} \left( 2d^T K \frac{\partial d}{\partial z_i} + d^T \frac{\partial K}{\partial z_i} d \right) \\ &= d^T \frac{\partial p}{\partial z_i} - \frac{1}{2} d^T \frac{\partial K}{\partial z_i} d \end{aligned} \quad (4)$$

節点荷重ベクトル $\mathbf{p}$ が $z_i$ に依存しないとき、式(4)を用いて、さらに次のように書ける。

$$\frac{\partial C}{\partial z_i} = -\frac{1}{2} \mathbf{d}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial z_i} \mathbf{d} \quad (5)$$

以上で感度係数が導出された。

### 2.3. アドバイス情報の導出

形状変更の際の指標となるアドバイス情報は以下のよう求められる。

2.2 節で得られた感度係数に負号をかけ、節点外力ベクトル $\mathbf{p}'$ を得る。

$$\mathbf{p}' = -\frac{\partial C}{\partial \mathbf{z}_i} \quad (6)$$

そして、 $\delta \in R^{6N}$ を未知変数とする連立方程式

$$\mathbf{K}\delta = \mathbf{p}' \quad (7)$$

を解き、得られた値に係数 $\alpha$ を乗じた値を節点座標の更新量 $\Delta \mathbf{d}$ とする

$$\Delta \mathbf{d} = \alpha \delta \quad (8)$$

以上でアドバイス情報となる値が導出された。

## 3. 設計プロセス

### 3.1. 概要

本手法では 2.3 節で求めた座標更新量 $\Delta \mathbf{d}$ をモデル上に描画し(図1参照)、これを設計のためのアドバイス情報として、その大きさ、方向を目安に形状操作を行う。これにより、設計者は自身が行おうとする形状の操作がモデル全体の力学的特性にどの程度影響を与えるのかを理解しながら形状操作を進めることができる。このような手法を用いることで、力学的特性を維持しつつも設計者の意思を反映させやすい形態操作が見込まれる。

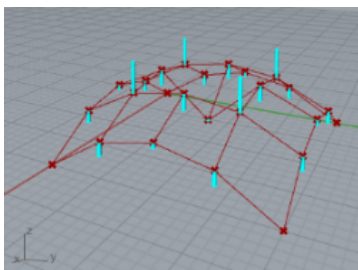


図1 アドバイス情報

### 3.2. プラットフォームとアルゴリズム

今回は、モデルの形状表現を Rhinoceros(RC)、構造計算、感度解析、形状操作を Grasshopper(GH)で行った。Rhinoceros を用いることで自由で滑らかな形状表現が簡単に行うことができた。また、構造計算と感度解析のプログラムは Grasshopper 内のコンポーネントの C# スクリプトを用いて実装した。設計アルゴリズムを図2に示す。

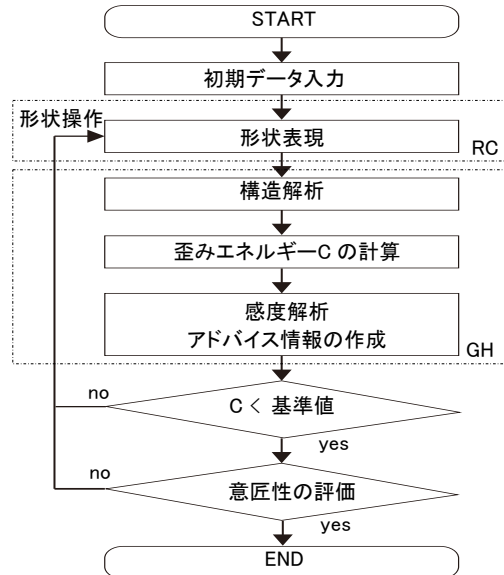


図2 設計アルゴリズム

### 3.3. 実行例

以下ではプログラムの実行例について示す。ここでの形状操作は、従来のようなキーボード入力ではなく Grasshopper の Number Slider コンポーネントによるスライダー操作を用いて、Rhinoceros による視覚情報をリアルタイムに得ながら直感的に行った。モデルの条件は以下の通りである。

- 応力算定は3次元静的弾性解析により行う。
- 要素は1要素2節点の梁要素とする。
- 1節点6自由度とする。
- 材料は鋼を用い、ヤング係数を  $2.05 \times 10^5$  (N/mm<sup>2</sup>)
- ポアソン比を 0.3 とする。
- 部材は  $\phi 139.8 \times 3.5$  を用いる。
- 外力は各節点に鉛直下向きに 5kN を加える。
- 支点条件は4隅を固定支持とする。
- 要素のスパンを 5m, 全体スパン 20m とする。
- 制御点を  $5 \times 5$  のグリッド上に配置する。
- モデルは正方形平面を有するグリッドシェルとする。

操作は以下の step からなる。

#### -step 0

初期形状を作成する(図3参照)。本例では図のようにふくらみを持ったモデルを初期形状とする。

#### -step 1

step 1 で作成したモデルの 13 番節点の節点 z 座標を鉛直下向きに操作し、モデルを生成する(図4参照)。本例では step 0 よりも歪みエネルギーCが減少する結果となった。

#### -step 2

この step より感度情報の利用を行う。step 1 で得られた形態に対して感度解析を行い、その結果を基にモデル上にアドバイス情報を表示させ、歪みエネルギーに対する依存度

が一番大きい節点を操作し、モデルを生成した(図5参照).

-step 3

step 2 で得られたモデルに対し、step 2 と同様に感度解析を行い、その結果を基にモデル上にアドバイス情報を表示させ、モデルの修正を行った(図6参照).

以上 step 0~3 の歪みエネルギーの比較を表1に示す. step 1~3 の過程で歪みエネルギーの低減がみられたことから、感度情報に基づきモデルの形状を操作することで、歪みエネルギーを増加させすぎることなく、任意の形態を生成できたことがわかる.

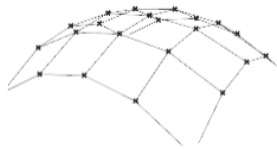


図3 step0 初期形状 C=4.61kNm  
C: 歪みエネルギー



図4 step1 C=4.36kNm



図5 step2 C=4.19kNm



図6 step3 C=4.14kNm

表1 歪みエネルギーCの推移

	歪みエネルギーC	単位
初期形状	4.61	kNm
Step 1	4.36	kNm
Step 2	4.19	kNm
Step 3	4.14	kNm

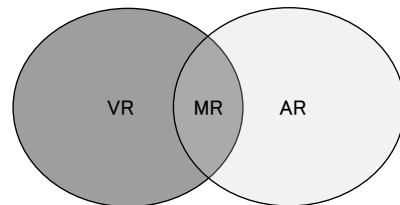
## 4. XR デバイスとの連携

### 4.1. 建築と XR

建築ではそのプロジェクトに携わる人々の中での建築物に対するイメージの共有が非常に重要である. そのため、イラストや写真、BIM ソフトを利用した 3D モデル、1/1 スケールのモックアップを作成し立案から設計、施工までのイメージの共有を行う. 近年では、この過程にバーチャルの技術を組み合わせることで、コストの削減や作業効率の向上を図る取り組みが数多くなされている. そこで、本手法では4節までで示した手法を XR デバイス上で行う. XR デバイスを用いることで建築空間をよりリアルに体験することが見込まれる.

### 4.2. 使用する XR 技術について

XR とは AR(拡張現実)/VR(仮想現実)/ MR(複合現実)などの技術の総称である. それぞれの技術方式により得手不得手があり、目的に応じてふさわしい技術方式を選択することが重要である. 例えば、VR では視界が 360° 覆われ、仮想空間に没入することができるが、現実空間のモノや自分の手足を見ることができず、仮想空間内でスケール感を測りづらい. 対して、MR では MR デバイスのカメラから現実空間のデータを取得し、そこに仮想空間のモデルを重ね合わせることで、現実空間と仮想空間をミックスさせている. さらに、仮想モデルを現実空間に配置するだけの AR とは違い、現実空間と仮想空間を重ね合わせているため、現実空間の机の上に配置したモデルを 360° 見て回ることも、モデルを持ち上げて内側から見ることも可能である. このような点から今回は MR での実装を行なった.



VR: 仮想空間に没入

MR: 仮想空間と現実空間の融合

AR: 現実空間に仮想モデルを投影

図7 XR の種類と特徴

### 4.3. 使用するデバイスとその連携方法について

本手法では MR デバイスとして Microsoft 社の HoloLens2 を使用する. HoloLens2 では指先のジェスチャーによって仮想モデルの拡大、縮小、回転、位置の変更といった操作が行える. 3 節で示したプログラムと HoloLens2 との連携は図8の通りである. 形状表現と解析

に使用する Rhinoceros&Grasshopper とモデルの形状操作に使用する MR デバイス HoloLens2 とのプラットフォームとしてゲームエンジンの Unity を使用した。Unity と Rhinoceros&Grasshopper の連携には Rhino.Inside を用いた。Rhino.Inside とは Rhinoceros&Grasshopper を 64 ビットの Windows のアプリケーションの中で実行できることを可能にするプロジェクトであり Rhinoceros7 から実装された。Rhino.Inside を利用することで、制御点を元に滑らかな形状変更ができる動的モデルを Unity 上で扱うことが可能になった。最後に Unity で MRTK-Unity(Mixed Reality Toolkit -Unity)<sup>9)</sup>を使用し、モデルを MR デバイスでの操作が可能なものに加工している。MRTK-Unity とは、一連のコンポーネントと機能を提供する Microsoft 主導のプロジェクトで、Unity でクロスプラットフォームの MR アプリの開発時間を短縮するために使用される。空間操作および UI 用のクロスプラットフォーム入力システムと構成要素が提供されている。

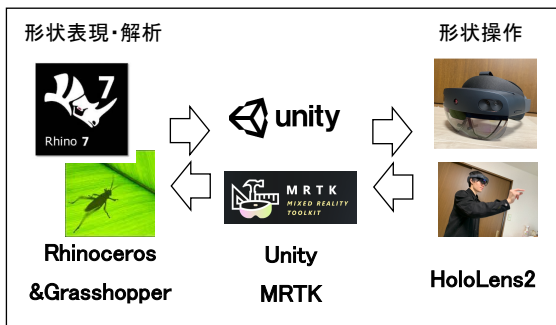


図 8 ツール間の連携

#### 4.4. 操作の流れ

ここでは Unity で作成した HoloLens2 の擬似空間での挙動を元に、提案手法の操作の流れを示す。モデルの左側に表示させた制御スライダーを動かすことでモデルの形状の変更を行う。形状変更の度に逐次的に解析が行われ、アドバイス情報が更新される。使用者はアドバイス情報を元に制御スライダーを動かす、形状の変更を行う。

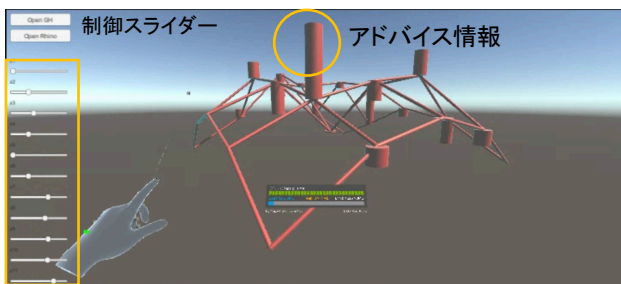


図 9 形状変更前

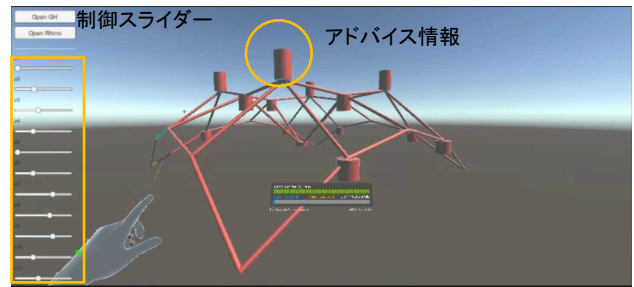


図 10 形状変更後

Unity 上で制御スライダーを操作する(図 11 ①)と、操作した制御スライダーと連動する制御点に関する情報が Rhinoceros に送信される(図 11 ②)。Rhinoceros では Unity から受信した制御点に関する情報を元にモデルの形状変更と解析が行われ(図 11 ③)、完成したモデルの形状の情報と解析結果を Unity へ送信する(図 11 ④)。本手法では以上のようなやりとりを逐次的に行うことで3節の設計プロセスを MR デバイス上で実装する。

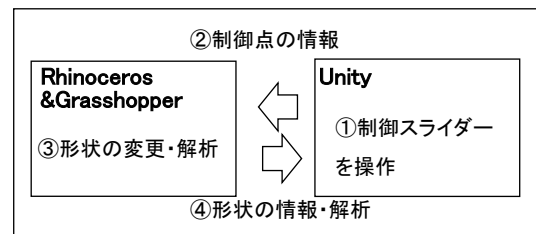


図 11 Unity と Rhinoceros&Grasshopper の連携

#### 5. まとめ

- 1)形状操作の根拠となる情報を表示させ、その情報をおおまかに利用しながら形状操作を行うことで、設計者の意思を反映させつつも構造性能指標を確保する設計手法を提案した。
- 2)提案手法を MR デバイス上で行うことによりリアルな建築体験を図った。

#### [参考文献]

- 1) 江畑和弘, 崔昌萬, 佐々木睦朗: 感度解析法による自由曲面シェルの構造形態創生(構造デザインへの応用), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp269-270, 2003.
- 2) 畔上秀幸: 領域最適化問題の一解法, 日本機械学会論文集, A 編, 60 巻, pp. 1479-1486, 1994. 6-
- 3) 上谷宏二: 実用構造最適設計法と性能操作型設計法, 日本建築学会大会(北陸)構造部門(応用力学)PD 資料, pp. 51-57, 2019.
- 4) 門積直宏, 満田衛資: 可視化された設計感度情報を利用する形状直接操作型の構造形態設計法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp 775-776, 2021.
- 5) Microsoft 社 Mixed Reality Toolkit とは (参照 2021/10/1) <https://docs.microsoft.com/ja-jp/windows/mixed-reality/mrtk-unity/?view=mrtkunity-2021-05>