

## 変形タイプ分類に基づくハンドル自動生成と そのパラメトリック操作による Mesh モデルの自由形状変形手法

北海道大学 ○水野 学, 伊達 宏昭, 金井 理, 岸浪 建史

### 要旨

概略形状設計でよく用いられる FFD は、格子状のハンドルを操作しモデル形状を変形する手法であるが、望む変形に適したハンドル作成が困難、変形のためのハンドル操作が煩雑という問題点がある。そこで本研究では、これらの問題を解決する、変形タイプ分類に基づくハンドル自動生成とそのパラメトリック操作による自由形状変形手法を提案する。

### 1 はじめに

データ構造が単純で形状表現自由度の高い三角形メッシュモデルの、CAD/CAM/CAE 分野での利用頻度が高まっている。この背景のもと、効率的な意匠設計/機能設計の実現のために、3D 形状スキャニングや、3D モデルデータベースなどから得られるメッシュモデルを自由に变形し設計者の所望の形状をすばやく立ち上げる技術が望まれている。

メッシュモデルを变形する際、メッシュの頂点位置を各々動かすのは非常に手間がかかる。これを解決する自由形状変形手法の代表的な例として FFD(Free-Form Deformation)が挙げられる<sup>[1]</sup>。FFD は、三次元の規則格子で定義されるパラメータ空間にモデルを埋め込み、規則格子をハンドルとしてパラメータ空間を歪めることでモデルの形状変形を行う手法である。規則格子の頂点全てを操作でき、変形操作の自由度が高い反面、操作すべき対象が多く、操作の入力が煩雑になってしまう。一方でそのような操作の煩雑さを解決する自由形状変形手法<sup>[2]</sup>も提案されているが、その場合可能な変形タイプ(曲げ、ねじり、など)が限定されてしまう。また、設計段階でのモデルの变形手法には、可能な変形タイプが多いこと、変形部分を陽に指定できること、操作が煩雑でないことなどが望まれるが、それらを全て満たす自由形状変形手法は提案されていない。

そこで本研究では、変形の分類/モデル化に基づくハンドルの自動生成と少ないパラメータによる変形が可能な新しい自由形状変形手法を提案する(図 1)。ハンドルの関係には、ハンドル形状自由度が高くモデル変形計算コストが低いという利点をもつ重心座標を用いる。

### 2 変形タイプ分類に基づくハンドルの自動生成

ユーザーの望む変形が特定の変形タイプに基づくことが多く、同じ変形タイプでは同じ形状のハンドルとその操作で変形が可能であることに注目する。すなわち、変形を分類/モデル化できれば、望む変形に必要な操作の自由度を残しつつ、変形のためのハンドル操作を減らすことが可能である。以下で様々な変形を分類/モデル化し、ハンドルの自動生成と少ないパラメータの操作で変形が可能な自由形状変形手法を提案する。

#### 2.1 変形の定義と分類

変形を統一的にモデル化するために、図 1 のように変形前後で内部頂点位置の変わらない空間を固定空間、内部頂点位置がアフィン変換として定量的に記述できる

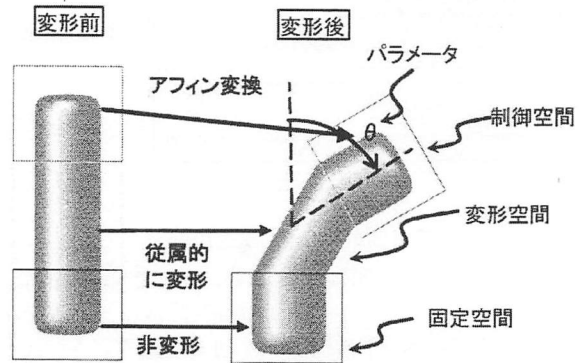


図 1 変形のモデル化(曲げ)

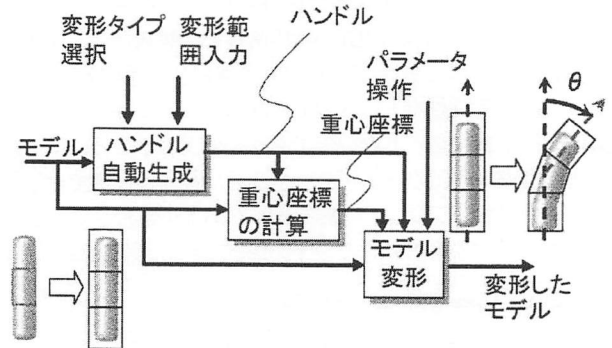


図 2 本手法の概要

表 1 各変形タイプの定義と変形の操作パラメータ

変形タイプ	空間の配置	操作パラメータ	変形の定義 (制御空間の位置移動)
曲げ		回転角 $\theta$	$k$ を軸とした回転移動で記述できる変形。
ねじり		回転角 $\theta$	$v$ を軸とした回転移動で記述できる変形。
伸縮		移動量 $d$	$v$ 方向への平行移動で記述できる変形。
反り		移動量 $d$	$k$ 方向への平行移動で記述できる変形。
部分拡大縮小		スケール定数 $s, t$	スケーリングで記述できる変形
部分移動		移動量 $d$	$v$ 方向への平行移動で記述できる変形。

■ 固定空間 □ 制御空間 — 変形空間  
 $v$  は固定空間から制御空間へ向かうベクトル  
 $k$  は  $v$  に垂直な任意のベクトル

空間を制御空間，それ以外の従属的な変形をする頂点を含む空間を変形空間とし，制御空間の変化を記述するアフィン変換の種類によって変形タイプを分類する．固定空間と制御空間の間には必ず変形空間が入る．これに基づくと，既存の研究や商用ソフトで実装されている変形，及び設計で望まれる変形はすべて表 1 のように「曲げ」「ねじり」「伸縮」「反り」「部分拡大/縮小」「部分移動」の 6 種に分類・記述可能であることがわかった．例えば，「曲げ変形」は制御空間の変換が，ベクトル  $\mathbf{k}$ (表 1 を参照) を軸とした回転変換で記述でき，変形のパラメータが回転角  $\theta$  で記述できる変形タイプと規定できる．

## 2.2 ハンドルの自動生成と操作

本手法では変形空間を 1 つもしくは複数の凸多面体の組み合わせで定義し，これをハンドルとする．制御空間をアフィン変換し，それに接続されているハンドルの頂点位置の移動に伴うモデルの変形を BCFFD(重心座標を用いた自由形状変形)<sup>[3]</sup>により実現する．

はじめに，図 2 の手順の通り，ユーザーが変形のタイプを選択し，モデルの変形空間内に含まれて欲しい(変形して欲しい)範囲を矩形もしくは矩形の組み合わせにより入力すると，システムによりハンドルが六面体の組み合わせで自動生成される．その後，対応する変形タイプの操作パラメータ値を増減させると制御空間がアフィン変換され，モデルの変形が行われる(図 3,4)．

BCFFD で用いる重心座標  $b_i(\mathbf{x})$  は凸多面体の内部で有理関数であるため滑らかであるが，変形空間の境界では  $C^0$  連続性のみが保たれる．すなわちモデル形状を変形空間の境界付近で滑らかに変形したい場合，ハンドル形状を六面体ではなく，自由曲面における制御点のように，追加頂点を加えた凸多面体にする必要がある(図 5)．今後の課題として，変形空間の境界付近での連続性を制御するために，追加頂点をどのように配置するかを理論的に検討することが挙げられる．

## 3 適用結果

本手法を簡単なモデル(板，棒)に適用し，変形のタイプと変形領域を選択することでハンドルが自動生成される事，パラメータ値の増減により変形が行えることを確認した(図 3,4)．又，工業製品モデル(椅子，携帯電話)および解析メッシュモデル(HDD カバー)に本手法を適用し，本手法が設計段階での形状変形に利用可能であることを確認した(図 6,7)．また，いずれの例もリアルタイムな変形が可能であることを確認した．

## 4 まとめ

本研究では，変形タイプ分類に基づくハンドルの自動生成と少ないパラメータによる変形が可能な形状変形手法を提案した．その特徴としてハンドル作成操作が容易であること，変形操作が煩雑でないこと，変形領域を陽に指定可能であること，リアルタイムな変形が可能であることが挙げられる．

今後の課題としては，変形時の境界付近の連続性に関する理論的解析，変形に伴うメッシュ歪みの緩和，寸法駆動型形状変形への拡張などが挙げられる．

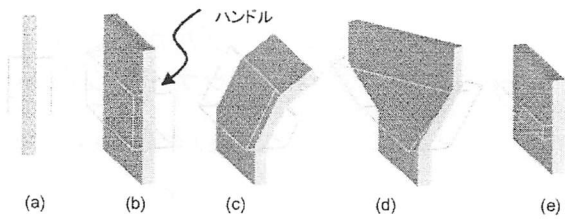


図 3 ハンドルの自動生成例① (a)変形範囲選択 (b)自動生成されたハンドル(c)曲げ(d)ねじり(e)伸縮

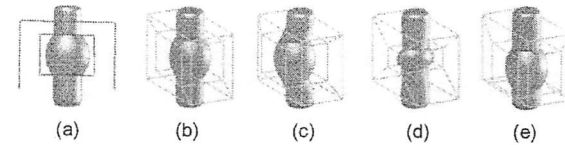


図 4 ハンドルの自動生成例② (a)変形範囲選択 (b)自動生成されたハンドル (c)反り (d)部分縮小 (e)部分移動

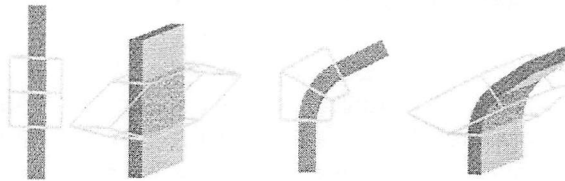


図 5 見た目の滑らかさを保つハンドル形状の 1 例(曲げ)

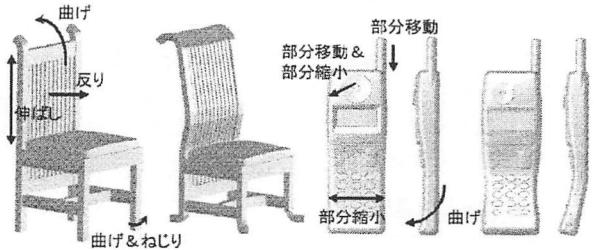


図 6 椅子，携帯電話への本手法の適用例

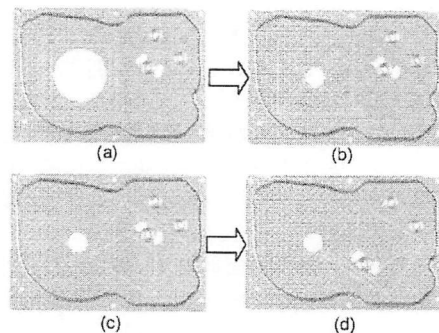


図 7 HDD のカバーの穴の径/位置の変更 (a),(b)穴の径変更(部分拡大/縮小) (c),(d)位置移動(部分移動)

### 【参考文献】

- [1] T.W. Sederberg, S.R. Parry: Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, Proc. SIGGRAPH'86, 1986, pp.151-160.
- [2] 例えば Y. Kho and M. Garland: Sketching mesh deformations. Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, 2005, pp.147-154.
- [3] 水野他: 任意凸多面体に対する重心座標を用いたメッシュモデルの自由形状変形, 第 12 回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集, 2005, pp.23-24.
- [4] Warren J.: On the uniqueness of barycentric coordinates, In Computational Mathematics, Proceedings of AGGM, 2003, pp.93-99.