新しい形状モデル CBR 法の開発*

福 田 収 —*¹

Development of a New Shape Model : CBR Method

Shuichi FUKUDA

With increasing diversity of products, it becomes more and more important to make appropriate decisions at the earlier stages of design. These decisions are more often qualitative. To effectively cope with this situation, we have developed a two dimensional shape model Coded Boundary Representation method. This method represents a shape in the form of a list using directional codes. Its major features are : (1) It can easily process rough sketches, (2) It can extract form features with ease and (3) It is compatible with the mechanics model. Although most of the conventional models can treat only closed figures, our model can treat open ones as well. What differentiates our model from the newly emerging nonmanifold model is that our model can take into consideration the relation between a shape and loadings. Thus, our model provides a very flexible tool at the preliminary design stage for predicting the mechanical behavior of a product.

Key Words: Design Engineering, Preliminary Design, Shape Model, Two Dimension, Directional Code, List, Rough Sketch, Mechanical Behavior, Qualitative Prediction

1. は じ め に

最近の製品の多様化によりできるだけ工程の上流側で適切な判断をすることが強く求められるようになってきた。機械、構造物の機能は形状と密接に関係しており、とくに力学的な挙動の予測には形状は最も重要な因子の一つである。しかし大幅に変化する条件に柔軟に、簡便に対処できるためには力学的に等価な簡易モデルへと置換できる必要がある。そこで著者らは Freeman が提唱した方向コードの概念を基礎に形状をリストで表現する符号化形態表現法(CBR 法)を開発し、その操作法を既に文献(1)としてまとめた。

本論文ではこの方法論の持つ意味について考察し、その位置づけを行う。

2. 開発の動機

最近の製品の急激な多様化に伴って各種の判断を製品開発製造のできるだけ上流工程で下すことが強く求められるようになってきた。これは下流工程へと行くほど組合せの数が増えるので、できるだけ上流で決定

をすればそれだけ組合せの数を減少させることができるからである。しかし一般的には上流側へ行くほど判断は定性的、概念的となり、下流側へ行くほど定量的、具体的な対応が必要となる(図1)。

機械・構造物においては形状と機能は密接に結び付いている。そのため機械・構造物の設計において形状処理は一つの大きな課題であり、これまで大きな努力が払われてきた。しかしこれまでに開発された形状モデルは大部分が実形状の忠実な再現を目指していた。それは少品種大量生産時代にあっては上流側の情報を下流へ伝えることに主眼があったからである。すなわちこの時代には組合せの数が限定されており、いかに

* 原稿受付 平成3年1月29日。

*¹ 正員、東京都立科学技術大学管理工学科 (●191 日野市旭が丘 6-6)。

上流側の情報を効率的に高い精度で伝達するかが問題であった。いわゆる CAD と CAM の結合問題はこの典型的な例である。そこでは CAD から CAM への情報の伝達を問題にしており CAM から CAD への情報の伝達はセンサ等の制御情報を除けばほとんど考えられていないといつてよい。

最近 CG が急激に発達し豊かな色彩で実物を再現する。また CG とは反対の立場にあたる画像処理の発達も著しい。しかしこれらの分野でも実形状をいかに忠実に再現するかを追求しており処理速度、高精度を問題にしている。

しかし多品種少量生産時代を迎えて形状処理は新しい観点からの追求が必要となってきた。すなわち形状そのものではなく、形状の持つ意味が問題となってきた。製品の多様化に伴い増大する検討条件を減少させるにはできるだけ類似条件を集め、組合せ数の減少を図るとともに、激しい条件変化にも柔軟に対処できなければならない。

このように少品種大量生産時代には形状処理は具象化を指向してきたが、多品種少量生産時代となり抽象化の追求が重要となってきた。これは換言すれば記号情報の重要性が増してきたということであり、従来の定量的な処理だけではなく、より定性的な対応が求められていると言える。すなわち従来は処理速度、高精度が追求されたが、今後はいかに柔軟に大まかな目安を得るかが大きな課題である。そのためには計算機プ

ログラムに形状の持つ意味を認識できる機能を付与することが次に述べるように重要となる。

3. 形状の意味の理解

ここでは力学的な問題に絞って形状の意味の理解について具体的に考察する。材料力学では問題を対象物の形でまず分類する。例えば棒、板等である。これらは形状的な特徴から付けられた名前である。次に例えば棒について荷重とその軸線の相互の方向の関係からはり、柱等に分類する。これらは力学的な名称である。例えば対象物が柱と認識されれば座屈が問題になると考えられるが、このような力学的な判断は柱という力学的な名称に付与された知識を基礎になされる。材料力学では、このように対象物の形状と荷重との関係を基礎に分類を行い、問題を整理して知識を体系化している(図2)。もちろん実製品では棒、板のように単純な形状はほとんどない。しかし例えば船の全体的挙動がはり理論で予測できることはよく知られている。船は極めて複雑な形状をしているのにもかかわらず力学的な教育を受けた人はその形状を単純化してはり近似して船の全体的な挙動を予測する(図3)。すなわち材料力学では人間が問題を分類し、力学的なモデリングを行っている。

これに対して FEM では力学的なモデリングは行われていない。FEM では問題に個別に対処するのではなく、最初から数値モデルとして解析を行っている。すなわち棒も柱も全く同様の手順によって処理される。このため FEM では得られた応力が引張圧縮応力か曲げ応力かの判定もできない。FEM では知識のない者が利用すると力学的に不適切な解を算出することがあり問題となっている。これは力学的なモデリングと評価が人間に任されており計算機プログラムにその機能が付与されていないためである。

図4に構造解析の手順を示す。材料力学では実線のように問題の力学モデルを構築し、それに基づいて力

図2 材料力学における知識の分類

図3 船のはりによる近似

学的挙動を予測し、必要に応じて数値解析を行い具体的な挙動を求める。力学モデルの構築、それに基づく挙動の予測はいわゆる定式化に相当し、式、すなわち定性的な議論であることに注意する必要がある。すなわちこの段階までは議論は一般化されており、数値を代入する段階で初めて個別の具体的問題が対象となる。

FEM では点線のように最初から数値モデルを構築しそれを解く。力学的なモデリングを必要としないので力学的な知識がなくても解析ができる利点がある。それが FEM が今日のように普及した理由でもある。しかしそのために得られた解の評価を行うことができない。最近のように製品が複雑化すると力学的なモデリングはますます困難となるので FEM の有用性はいつそう増大してきているが、力学モデルが不在で評価ができないという欠点は条件が大幅に変化し、しかも短時間で力学的な予測を要求される多様化の時代にはこれは設計において利用しにくいこととなり大きな欠点となる。

さて FEM では対象の記述と力学的な解法を分離している。すなわち対象の形状を有限要素によって近似し、要素間の結合情報と各要素に属性を付与することにより対称物の特性を表現し、力学的な処理は三角形等の有限要素について行っている。このように対象物に関する特性の記述とその力学的な解法を分離したことが FEM の最大の特徴であり、そのために高い汎用性が実現できた。

このように FEM は数値処理を基礎としているが知識表現の観点からは基本的に知識工学の表現形式そのものである。したがって若干の機能追加により現在の FEM に欠けている力学モデリング機能を付与できると考えられる。材料力学の知識表現の検討から私達の力学知識は分類作業を基礎にしていることがわかる。少なくとも設計者が力学的挙動を予測し設計案の指針を得る観点からは問題の分類作業が重要であろう。

図4 構造解析の流れ

このような観点から著者らは次に述べる新しい形状モデルを開発した。

4. 新しい形状モデル CBR 法の概要

形状表現には大別して(1)空間を分割する方法と(2)物体を分割する方法がある。デジタル画像処理では方法(1)が、CADでは方法(2)が利用される。FEMでは方法(2)が利用されるが、差分法では物体自身に注目しているとも言え空間を等分に分割して物体を表現しているので(1)と(2)の中間に位置する方法と言えよう。

ここで開発した形状モデルはこの分類に従えば差分法のモデリングに近い。

方法(1)の利点は対象がなんであれ同一の方法により対処できることがあるが、対象に関する知識を付与できにくい欠点がある。さらに全画素の情報を記憶すると不必要な情報まで記憶しなければならないので一般に多大の記憶容量を必要とする。方法(2)は対象物の特性によりモデリングを変える必要がある可能性があるが、対象物に関する特性が容易に記述できる長所がある。すなわち対象物の持つ各種の意味を表現しやすく、方法(1)に比較してこれら意味ある情報のみを比較的簡潔に保存できる。

Freeman⁽²⁾は方法(1)では通常多大の記憶容量が必要となる大きな欠点があるので、それを改善するため方向コードの概念を提唱した。彼は8近傍(図5)の概念を基礎に隣接画素に方向コードを与え、線画を方

図5 8近傍

Directional codes

Chain codes

図6 Freemanのチェーンコード

向コード列として表現した(図6)。彼は記憶容量の削減のみに注目したが、この方向コード列は別の見方をすれば形状のリスト表現にほかならない。形状がリスト表現できれば各種の属性の付与が極めて容易となる。そこで著者らは方向コードのリスト表現としての側面に注目した。

また Freeman は空間分割したラスタデータを対象としたが、著者らは物体を分割したデータを対象とする。すなわち基本的には差分法に相当する形状モデリングを考え、図7の方向コードを考える。これはデジタル画像処理での4近傍処理に相当する。著者らは物体分割データを対象とするので図8の基本形状要素を定義する。有限要素法や差分法では閉じた図形を対象としているが、本方法では閉じた図形はこの基本形状要素の組合せとして表現する。ただし本方法では後述のように開いた図形の処理も可能である。

差分法の場合と同様形状が複雑であれば量子化誤差が問題となる。しかし本方法の目的は忠実な図形の再現ではなく、概略の力学的な挙動の予測にある。そこで、ここでは形状が複雑でもその四角形から合成される外接形状を考えることにする。本方法では基本形状要素は図のようにリストで表現される。また本方法では有向辺の示す方向の左側に物体の内部があると約束する。この規約は FEM やソリッドモデルの規約と同一の基盤に立っている。もし定量的な情報が必要であ

図7 本方法の方向コード

図8 CBR 法の基本形状要素

れば辺長リストを考えるが、定性的な位相操作は辺長リストを除いたリスト操作で実行できる。例えば物体の内外の反転、回転、鏡像等の基本位相操作はリスト操作として実行できる。操作の詳細は文献(1)を参照されたい。

ここで開発した形状モデルは二次元化した B-rep に相当する。しかし最初からリスト表現をしている点、さらに空間分割データを基礎にしている点が B-rep との大きな相違である。これらの利点については後述する。B-rep との関連が強いので本方法を符号化された B-rep の意味で CBR (Coded Boundary Representation) 法と呼ぶ。

重要なことは FEM や差分法では物体内部を分割するが、内部分割辺は通常力学的には意味がなく、外部境界辺のみが問題の認識に関係する。実際ソリッドモデルでは、このため辺、頂点に注目してモデリングを行っている。CBR 法では内部辺と外部辺の区別は有向辺か無向辺かで判定する。すなわち内部辺は2個の隣接要素の方向が反対で、同一の値の有向辺に相当するので2個の隣接要素を接合すればその辺は無向辺となる(図9)。したがって形状データを作成した後で無向辺と有向辺の区別を行い、有向辺のみ取り出せば外部境界のみが抽出できる。

またこのようにして抽出された境界は空間分割したグリッドの大きさを基本にしており、一種のラスタデータに相当する。そこで同一の方向コードが連続してリスト中に存在する場合にはそれを単一の方向コードで置換する縮退操作を実施してベクトルデータ形式に変換する。これらの操作もリスト操作として実行できる⁽¹⁾。

最近 CAD では特徴形状の抽出により定性的な知識が利用できたり、また後続工程への各種の判断が容易になることから特徴形状の抽出に関する研究が盛んである⁽³⁾。CBR 法では各種の形状特徴の抽出も容易である。例えば上方向への凸凹は図10に示す方向リストが

図9 2要素の結合

全体の方向リストの部分リストに含まれているかどうかで判定できる。さらに注目すべきはこのリストだけでも一つの形状を表現していることである。すなわちこれらのリストは全体形状が凸形、凹形である形状の表現ともなっている。

さて辺長がある長さよりも短くなれば節点を縮退する。すなわち2個の節点を1個の節点で置換する操作を導入すれば、通常4個の要素から構成される形状リストを2個に、さらに1個に変換できる(図11)。この操作はいわばサーフェスモデルからワイヤモデルへ、さらにドットへの変換に相当する。ワイヤモデルに相当する場合には有向辺が無向辺に変換されて、ワイヤを表現する。

5. CBR 法の特徴

CBR 法の特徴をまとめると

- (1) ラフスケッチへの対処が容易である。
- (2) 空間分割データを基礎にしている。
- (3) 内部分割辺の処理が容易である。
- (4) 形状特徴の抽出が容易である。
- (5) 単なる形状モデルではなく力学モデルとして利用できる。

従来の大部分の形状モデルでは閉じた図形を対象と

図 10 凸凹の抽出

図 11 モデルの縮退

していた。しかし CBR 法はリスト表現を基礎とするため開いた図形を処理できる。実際材料力学の本等に掲載されている説明図はラフスケッチである。設計者はまずラフスケッチで全体の挙動を予測すると考えられる。また FEM 解析でも問題をラフスケッチとして表現する場合が多い。このようなラフスケッチの重要性が認識され最近では CAD でも非多様体モデルが提唱されている⁽⁴⁾。ワイヤ、サーフェス、ソリッドの各モデルを自由に結合するデータ構造が非多様体モデルであり、B-rep の拡張である。このように非多様体モデルは CBR 法と極めて類似している。しかし非多様体モデルでは物体の辺と頂点のみに注目しており、空間分割データに基礎をおく CBR 法と異なり、デジタル画像処理との親和性は低い。

非多様体モデルの他の利点として CAD データから FEM データへと直接変換できることが挙げられる。これは CBR 法でも同様であり、両者の間に機能的な差異はない。しかし最も重要な相違は非多様体モデルは基本的に形状モデルであり、力学モデルではないことである。すなわち形状操作に主眼がおかれており力学的な関係の記述が欠けている。すなわち非多様体モデルでは FEM のメッシュ生成等を容易化する利点はあるとしても現在の FEM が抱えている力学モデルの欠如という欠点を克服できない。CBR 法も形状モデルであることに違いはないが、空間分割を基礎としているために荷重と物体との関係を考慮することが容易であり、形状モデルと力学モデルを同一の基盤で論じることが可能である。

これを図12の片持ばりの例で考える。CBR 法では図に示すように縮退操作の逆操作である拡大操作を実施することにより FEM データを生成でき、また FEM データから縮退操作を実施することによりラフスケッチへと変換できる。このような形状操作だけについて言えば非多様体モデルで同様の操作ができる。しかし設計者が力学的挙動の予測を意図した場合にはサーフェスモデルとワイヤモデルの自由な変換よりもこの問題が片持ばりの問題と認識できるほうがより重要である。これが片持ばりであることは荷重の方向と

図 12 スケッチの理解(片持ばり)

物体の軸線の方向が直交しているのではあり、さらに一端が固定しており、自由端に荷重が作用しているとの推論から判断される。CBR 法では空間に対して方向コードを与えているので力学的な関係の記述が容易である。すなわち形状リストとは別に荷重リストを用意して両者の相互関係を述語で記述すれば力学的な問題を認識できる。荷重リストも形状リストも基本的には同一の表現であるが、形状リストの場合には有向辺の左側に実体があるとの規約を定めている点だけが異なる。すなわち図 13 に示す表現からこのスケッチが片持ばりの問題であることをシステムは理解でき、設計者に片持ばりの力学的挙動を示すことができる。

6. おわりに

最近の製品の多様化に対処するために簡便に製品の挙動を予測できる方法が強く望まれている。そのためには複雑な形状を機能的に等価な簡単な形状へと位置する必要がある。そこで最近ラフスケッチの重要性が認識され、例えば CAD では非多様体モデルが提唱され各種の形状モデルを同一の基盤で処理しようと試みている。しかし非多様体モデルは力学的挙動の予測という観点からは力学的な関係の記述が不足している。さらに非多様体モデルではデジタル画像処理との親和性が低い。これは既存の図面から設計案を生成する場合等に大きな障害となると考えられる。

著者らが開発した形状モデル CBR 法は基本的には二次元化した B-rep に相当する。しかし最初からリスト表現を採用している、空間分割データを基礎にしている点が B-rep との大きな相違である。リスト表現の採用により内部分割されたデータからの物体形状の抽出、デジタル画像処理との親和性の向上、各種の属性の付与の容易化が図れた。また空間分割データを基礎にしたために力学的な関係の記述が形状データと全く同一の基盤で処理でき、形状モデルと力学モデルの直接対応づけが可能となった。

図 13 スケッチの CBR 表現(片持ばり)

なおこれまでは長方形から合成される形状についてしか検証していないが、今後はより複雑な図形について検討を進めたい。その場合には単なる外接四角形としてではなく、図形の類似度の概念や、ファジィ理論等を導入する必要があるかもしれない。

本研究は東京大学生産技術研究所客員部門多次元数値情報処理部門で行った研究の一環である。種々のご配慮をいただいた同所の岡田恒男所長、中桐滋教授に感謝する。

また本研究の一部には平成元年度科学研究費補助金「総合研究(A)」「構造健全性評価用エキスパート・システムの開発」(研究代表者矢川元基東大教授)と平成元、2年度科学研究費補助金「一般研究(B)」「治具、ロボット等の周辺機器簡易化のための溶接構造設計法の開発」[研究代表者福田収一阪大助教授(当時)]の補助を受けた。ここに記し感謝する。

文 献

- (1) 福田, 信頼性設計エキスパートシステム—形態の処理とその応用—, (1990), 丸善.
- (2) Freeman, H., Computer Processing of Line-drawing Images, *Computer Surveys*, 6-1(1974), 57.
- (3) Dixon, J. R., 「特徴」の概念を用いた機械設計システム, コンピュータール, No. 25(1989), 81.
- (4) Weiler, Topological Structure for Geometric Modeling, *Ph. D. Thesis*, RPI, (1986).