強度設計へのトポロジー表現利用の試み*

福田 収一^{*1}, 中村 義隆^{*2}, 武正文夫^{*2}Utilization of Topological Representation in Mechanical Design
: an Attempt

Shuichi FUKUDA, Yoshitaka NAKAMURA, and Fumio TAKEMASA

This work is a preliminary investigation carried out in an attempt to develop a software system which detects the possible sources of degradation in the original design of machines and structures and provides alternatives to improve their integrities in terms of strength by noting their geometrical distinctions. The computer stores their topological data using a boundary representation model. The system detects the distinctive geometrical features and reasons based on them whether they might be triggers for degradation or not by referring to the attributes attached to each one of these geometrical features. The fundamental validity of the approach is verified on a personal computer using Prolog. What should be stressed as the originality of this paper is that although the design models cannot be modified without numerical data in the conventional strength-related designs, they can be improved, or better alternatives can be suggested, as long as their topological data are available in our system.

Key Words: Design Engineering, Geometrical Modelling, Boundary Representation, Topology, Strength, Prolog

1. はじめに

最近生産方式が従来の少品種大量生産から多品種少量生産へと急激に変化してきている。少品種大量生産の時代にはたとえ部品などの点数が多く組合せ数がぼう大であっても部品の接続などの関係が固定されているため各種の判断,あるいは検討などにさく時間にも比較的余裕があり,ある設計案について製造経験からその製作性の適否をまた供用経験から製品の不適切な箇所を見だし設計にフィードバックして設計案の改良を行うことがかなり容易であった。しかし多品種少量生産となると組合せの数がぼう大でしかもひんぱんにその組合せ方法が変化するので製造経験や供用経験を設計へフィードバックすることが従来のように容易ではなくなっている。このため計算機の助けを借りてできるだけ短時間に製造,供用可能な組合せを検討し,実物などによる検討は本当に必要な場合に限ることにより現在以上の密度の濃い検討を可能として製品の開発期間の短縮とあわせてよりいっそうの製品の

品質向上を目指そうとする動きが盛んである。

以上は新製品設計についてであるが,最近では機械,構造物がきわめて長期間使用されるようになってきているため補修が重要な作業となってきた。補修は通常設計とは呼ばれていないが,その行為自体は設計行為に外ならない。すなわちある機能を達成するために各種の部品群を組合せ,あるいは加工して特定の形状,構造をもたせることが設計であるとすれば,補修はある機能を維持するために各種の部品群を組合せ,または加工する行為であるから,基本的には設計行為に外ならない。

設計がきわめて困難な作業であるといわれているのはある機能を満足する解は通常多数存在するので設計では解が一意に定まらないためである。従来強度設計というところある機械,構造物について形状,機能が与えられたときその形状,寸法で要求機能を満足できるかを検討した例が多い。例えば有限要素法などによる応力解析などは強度設計で最も実用に供されている例であろうが有限要素法は具体的な寸法が決定しなければ解析できない。これらはいわば順問題を解いていることに相当する。こうした解析とは逆にまたある機能を満足する機械,構造物の形状を決定する最適設計理論もあり一種の逆問題解析となっているが,目的関数と

* 昭和62年11月20日 第949回講演会において講演,原稿受付 昭和62年4月27日。

^{*1} 正員,大阪大学溶接工学研究所(〒567 茨木市美穂ケ丘11-1)。

^{*2} 石川島播磨重工業(株)(〒135 東京都江東区豊洲3-1-5)。

して等応力設計,あるいは最小重量設計などある一定の目的関数を設定して全体的な最適化を進めている。しかし現実の設計を見るとこのように全体的に最適化できるある明確な目的関数が設定できる例はむしろまれであり局所的に要求機能を満足させながら,それらを適当にトレードオフして全体として要求機能を満足させる例が多いと考えられる。すなわちこのようにして完成される製品は要求は最低限満足しているが,それが必ずしも全体的にも,あるいは局所的にも最適化されているとは限らない。このような現実の設計行為に対処するために必要なことは設計行為自体が逆問題の解決であることに留意して,解の候補をあらかじめ絞られるような,言い換えれば必要に応じて随時モデルを変化できる方法をとることが重要であると考えられる。もし候補が絞り込め,モデルがいくつか確定すればその候補案について詳細な順問題解析,例えば有限要素法などを利用した詳細解析,を行うことにより多品種少量生産の設計に計算機を利用して対処することが現在よりもはるかに容易になると期待される。

本研究は機械,構造物の幾何形状情報のグラフ表現を利用して形態的な特徴を抽出し設計モデルの選択支援を行うシステム構築の初期研究である。

2. 形状モデルの表現

本研究では初期研究として板や四角柱などの直方体要素からなる機械,構造物を考え,その形状情報を次のような位相構造として表現する。例えば図1の構造

図1 構造物の例
(部分形状を表す。面分 f_1 関連情報のみを表示)

図2 図1の構造物のトポロジー表現
(面分 f_1 , りょう線 e_5 について展開)

物であればその位相構造の表現は図2となる。

すなわち1個の面分は1個以上の面ループで定義される。また各面ループは方向付けられたりょう線の列として表現され,その向きは右ねじの進む方向が物体の外側を向く方向にとる。面ループが2個以上となる多重面ループはある面分内に接触面があったり,穴があったりする場合に出現する。

本研究ではこのような位相構造を計算機上に表現する言語として Prolog を利用した。Prolog は位相構造の表現が簡潔だけでなく,その構造に対応した属性表現にも便利である。図3に Prolog を用いた形状モデルの表現を示す。図4はその具体例の一部である。

3. 特徴形状の抽出

本研究では面分と面分,面分とりょう線などの接続関係,すなわち位相構造に注目して特徴形状を抽出する。その内の基本的な例を次に上げる。

3.1 隣接面の凸凹判定 まず基本的な特徴形状の分類として2個の隣接面の凸凹判定がある(3.2節参照)。これはあるりょう線を共有する面 f_1, f_2 について例えば f_1 面の法線 n_1 を共有りょう線上に立て,その始点から f_2 面内にベクトル m_2 を引くとき n_1 と m_2 のなす角が π と $\pi/2$ の間であれば凸,零から $\pi/2$ の間であれば凹と判定できる。しかし本研究では浮動小数点演算のできない Prolog/KABA を利用したこともあり,また初期研究であることも考慮して簡便のため各りょう線に対し図3のように凸凹フラグを与え陽に隣接面の凸に関する情報を与えた。凸凹フラグが凸,凹のりょう線を以下ではそれぞれ凸,凹りょう線と呼ぶ。浮動小数点演算の可能な Prolog を利用すれ

```
object(object_name:atom,face_name:list)
face(face_name:atom,face_loop_name:list)
flp(face_loop_name:atom,edge_name:list)
edge(edge_name:atom,initial_vertex:atom,
      terminal_vertex:atom,
      凸凹flag:{ 1 凸|-1 凹 })
vertex(vertex_name:atom)
```

(TOPOLOGY REPRESENTATION IN PROLOG)

```
mobject(current_object_name:atom,attribute:list,
        improved_object_name:atom)
```

(KNOWLEDGE BASE REPRESENTATION FOR
CHANGING GEOMETRY)

図3 Prolog を用いた形状モデル

ば凸凹フラグを使用することなくこの判定基準に従ってまず基本的な特徴が抽出できる。

3.2 りょう線を共有する隣接面 りょう線は必ず2個の面分に共有される。りょう線 e が面分 f の構成要素であることを $e \in f$ と表すと、りょう線 e_i を共有する隣接面 f_j, f_k は次式で与えられる。

$$F_w(e_i) = \{(f_j, f_k) | (e_i \in f_j \wedge e_i \in f_k)\} \\ (j \neq k) \dots \dots \dots (1)$$

3.3 2面分に共通な隣接面 面分 f_i, f_j に共通な隣接面分 f_k は次式で与えられる。

$$F_c(f_i, f_j) = \{f_k | (e_i \in f_i) \wedge (e_i \in f_k) \\ \wedge (e_j \in f_j) \wedge (e_j \in f_k)\} \\ (i \neq j \neq k) \dots \dots \dots (2)$$

3.4 突起 ある面分 f 上に突起があるかないかは次の方法で判定できる。すなわちもしその面に凸部または凹部があれば f は多重面ループを有する。外縁面ループ以外の、すなわち面ループのリストの第2項

```
object(o1, [f1, f2, ..., f13]).
face(f1, [f11, f12]).
face(f2, [f13]).
.
.
.
face(f13, [f114]).
flp(f11, [e5, e6, e7, e8]).
flp(f12, [e13, e14, e15, e16]).
.
.
.
edge(e5, v5, v6, 1).
edge(e6, v6, v7, 1).
edge(e7, v7, v8, 1).
edge(e8, v8, v5, -1).
.
.
.
vertex(v1).
vertex(v2).
vertex(v3).
```

(TOPOLOGY REPRESENTATION IN PROLOG)

```
mobject(o1, [r1], o2).
```

(KNOWLEDGE BASE REPRESENTATION IN PROLOG
FOR CHANGING GEOMETRY)

図4 Prolog 表現の例

以後の面ループの構成りょう線がすべて凹であれば、その面ループを含む物体は突起である。

溝や穴についても同様の操作で求められる。

4. Prolog による部分形状の探索

例えば3.3節の2面分 f_i, f_j に共通な隣接面 F はPrologにより次のように探索される。

```
common(F1, F2, F) :- adjacent(F1, F),
                        adjacent(F2, F),
adjacent(F1, F2) :- -face_edge(F1, E1), !,
                    member(E, E1), wing(E, F),
                    member(F2, F), F2 /= F1.
```

紙面の都合上詳細は省略するが、図4の形式のデータを用い3に述べた操作をPrologを利用して施すことにより各種の特徴的な部分形状が探索できる。

5. 属性に基づく形状の検討

本研究では各形状に対してどのような形で力学特性などの属性を与えたらよいかについてまだ検討中であり、統一的なはん用性のある知識表現法は確定していない。本研究では種々の典型的と思われる例についてPrologを用いて個々に書き下し検討した。その中の数例を以下に示す。

例1 施工関連情報に基づく判断 建設機械のブームを考える。現在の設計案ではブームの剛性が不足しブームの部材形状を変更するか、補剛材を付ける必要がある。そこで補剛材付加の適否を判断したいとする。補剛材がある場合は3.4節の操作でブーム上面の突起物として探索される。補剛材がない場合のブーム上面は面ループが1個である。さて突起の接合方法には種々あるが、溶接で接合するとする。溶接ではまわし溶接が必要となる。まわし溶接では局所的な応力集中が生じる可能性が高いので疲労などが問題になる場合にはできるだけ補剛材の付加を避け上面は一体構造としたほうがよい。

以上を計算機の流れとして示すと図5となる。

例2 形態の結合情報に基づく判断 けた構造を考える。横けたを縦けたに結合するとき図6の方法をとったとする。周知のごとくこのような場合には応力集中の緩和および施工を容易にする観点から図7のように形状を変更して建造するのが通例である。ここでは設計者にもし知識がなく図6の方法をとったときには、計算機が図7のようにすべきことを教え、図7の方法を最初からとっているときは変更の指示をしないで設計案を承認する処理を考える。

この操作には横けたと縦けたの接合面 f_i が橋絡面

分か否かの判定をすればよい。橋絡面分はあるりょう線に注目した時、そのりょう線を共有する2隣接面に共通な突起面分のうち、このりょう線と共有点をもたない面分である。 f_1 が橋絡面分であれば横けたは図7の形態であるので、その設計案を採用し、必要に応じて有限要素解析などを実施してよりよい形状を決定する。もし f_1 とフランジと横けたとの接合面 f_2 が橋絡面分でなければそれらを橋絡面分とする操作を施し、その画像を出力して設計案の変更を求める。

6. おわりに

本研究は機械、構造物の幾何形状情報をグラフを利用して表現し、その形態的特徴から設計モデルの妥当性を判定するシステムの構築を目的として行った予備的検討である。

CADにおいてはソリッドモデリングとして形状の計算機の内部表現にグラフを利用する研究は多数あ

る⁽¹⁾。しかし本研究のように形状の特徴的部分をグラフを利用して抽出し計算機処理に活用する研究は他の分野でも最近開始されたばかりであり、例えばCAD/CAMの分野では文献(2)などの研究が見いだされる。しかしそれらの分野では形状の特徴的部分を抽出し、その属性として加工情報を付与することによりCAD、CAMの一体化を指向しており、本研究が指向している強度設計モデル(力学的な設計モデル)の選別に利用する立場とは使用する技術は似ているが、目的が異なるためその内容もおおのずから異なる。例えば弾性力学的なモデルでは数値によらず物体の結合関係だけである属性、例えば応力集中があるなどが判断できるが、加工情報ではある属性について結論づけるためには数値的な情報が必要であることが多い。

したがって本研究が指向しているような強度設計への幾何学的位相情報の利用の研究はほとんど行われていない。瀬口ら⁽³⁾は有限要素解析のための力学的な設計モデル構築にグラフの利用を試みているが、そこでは形態的な特徴抽出は行われていない。

本研究が指向する形態的特徴を抽出し、それに付与された属性から形態の変更、選別を行い設計者を支援するシステムは、したがって、少なくとも著者の知る限りまだ開発されていないと思われる。

本研究で利用している技術そのものはこのように独自ではないが、研究の目的とその接近法は独自で他に例を見ないと考えている。すなわち従来の強度設計では数値が不可欠であり、順問題解析に相当する有限要素法にしても、あるいは逆問題解析に相当する最適設

図5 形態的特徴による判断例(その1)

図6 けた構造物の部分形状(改良前)

図7 けた構造物の部分形状(改良後)

計にしてもその基本には数値があった。しかし日常の設計業務を考えると数値以前にまず設計モデルについての形態的特徴の抽出とそれによる設計案の選別の作業がある。実際設計案の良否がパターン認識的に判断されとの話もあり、また私達の経験もこうした形態的特徴に換言されて蓄積されている例も多いと思われる。例えばある構造物の写真を見て寸法も明確でない場合にもここが力学的に危ないといえるのはその形態的特徴からである。この意味で本研究は機械、構造物の設計案に基づいて検査すべき箇所の指示や、特定構造部分の画像の理解などにも将来は発展応用できると考えている。

本研究では初期研究として形態的特徴をグラフを利用して抽出すれば少なくとも設計案の選別に利用でき

ることをパソコン NEC PC9801 VM2 上で Prolog/KABA を用いて検証した。今後は対象機械、構造物を特定しそれに対応した特徴的部分の抽出方法、付加すべき属性とその一般的な表現方法などを検討する予定である。

文 献

- (1) 例えば、国井, CAD/CAM 技術, bit 別冊, (昭 60), 8, 共立出版.
- (2) 黒河・沖野・嘉数, 精密, 52-12(昭 61), 2043.
- (3) 瀬口・多田・菅沼, 第 2 回ソフトウェアコンファランス論文集, (昭 61), 193, (財)大阪科学技術センター.
- (4) 柴山・桜川・萩野, Prolog/KABA 入門, (昭 61), 岩波書店.