機械系 CAD のための設計資料グラフおよび テーブル活用支援の一手法*

車 周 憲^{*1}, 横 山 正 明^{*2}

A Supporting Technique for the Utilization of Various Reference Graphs and Tables in Mechanical CAD

Joo-Heon CHA and Masaaki YOKOYAMA

In automated search of a design database to support mechanical design, it is necessary to recognize a shape pattern which represents a design object. This paper introduces the concept of a surface relation graph (SRG) for recognizing shape patterns from a 3D boundary representation scheme of a solid object (a B-rep model). In SRG, the nodes and arcs correspond to the faces and edges shared by two adjacent faces, respectively. An attribute assigned to an arc is given by an integer which discriminates the relationship between two adjacent faces. The +sign of the integer represents the geometric convexity of the solid, and the -sign the concavity at the shared edge. The input shape is recognized by comparison with the predefined features which are subgraphs of the SRG. A hierarchy of the database for supporting the design is presented. A search for the design database is also discussed. The usefulness of this method is illustrated by some application results.

Key Words: Automated Design, Intelligent CAD, Database Search, Pattern Recognition

1. 緒 言

近年における電子計算機の性能の飛躍的な向上のおかげで、機械設計における計算機援用技術の発展には華々しいものがある。特に、形状モデリングとモデルディスプレイの技術、有限要素法や境界要素法などに基づく数値シミュレーションの技術において目を見張るものがあり、数多くの会社から数えきれないほどのソフトウェアパッケージが販売されている。

しかし、これら数多くの機械系 CAD のためのパッケージを調査しても先人達が長年にわたって苦勞して計算し、あるいは実物実験して蓄積してきた設計用資料を機械系 CAD に取り込んで有効に活用できるパッケージは見当たらないように思われる。そのために、例えば V 形切欠きを有する丸軸の設計に際しては、設計

者は①機械工学便覧⁽¹⁾や機械設計ハンドブックなどに掲載されている応力集中係数のグラフあるいはテーブルから数値を読み取り、必要な時には中間値を補間によって求め、それをキー入力して利用するか、あるいは②有限要素法か境界要素法を用いて力任せに計算機によって数値解を求めるか、のいずれかの方法を選択しなければならない。後者の力任せの方法には余りにも無駄が多く、賢明な方法とは思われない。グラフあるいはテーブルがあるにもかかわらず、それらを活用しないで計算しなおす理由はない。他方、前者の方法には計算に関連する無駄がないかわりに、人間が密接に関らなければならないわずらわしさがある。

最近機械設計支援システム⁽²⁾⁽³⁾が販売されているが、設計対象の形状認識をすべて人間に任せているので、その使用に際しては幾何学的形状に関する属性値などは設計者がいちいちキー入力しなければならない、自動的な設計支援システムであるとはいえない。

機械系 CAD における設計資料活用のこのような現状にかんがみ、本研究は便覧、ハンドブックあるいは学会論文集などに掲載されているグラフ形式、あるいはグラフ形式に変換できるテーブル形式の設計用資料を機械系 CAD に取り込み、その自動的・有効的活用

* 平成 3 年 9 月 27 日 日立地方講演会および平成 4 年 3 月 21 日 関西支部第 67 期定時総会講演会において講演、原稿受付 平成 4 年 5 月 29 日。

^{*1} 正員、東京工業大学大学院 (〒227 横浜市緑区長津田町 4259)。

^{*2} 正員、東京工業大学総合理工学研究科。

図1 設計データベースの階層構造

図2 段付き丸軸の応力集中係数(引張り)

を支援するための一つの手法を考案し、その有効性を確認することを目指す。

本報告においては、数多くある設計用資料の中から機械部品などの強度設計において重要な応力集中係数関連のグラフおよびテーブルを例に取り上げ、それらの持つ情報の記憶・活用の一手法について報告する。

2. 設計資料グラフおよびテーブルのデータベース

前述のように本報告の取扱う設計資料は応力集中に関連するグラフおよびグラフ形式に変換できるテーブルとしている。これらの中には切欠き平板の応力集中に関するもの、切欠き軸部品の応力集中に関するもの、Timoshenkoの著書⁽⁴⁾に収められている板曲げモーメント集中に関する数多くのデータなどが含まれる。

このような設計資料のデータベースは効率の良い探索に必要な種々のキーワードを含んでいなければなら

1	1	SCF
2	1	tension
3	1	Step_bar
		r/d
		Stress_concentration_factor_a
		D/d
		0.000000 0.300000
		1.000000 3.000000
4	10	
		0.046800 2.642105 1.000000
		0.054012 2.320155 1.000000
		0.097800 2.001504 1.000000
		0.121537 1.828766 0.313384
		0.169800 1.700752 1.000000
		0.216722 1.576295 1.000000
		0.300000 1.472180 1.000000
		2.000000
		0.042600 2.542857 1.000000
		0.048703 2.220429 1.000000
		0.097800 1.902256 1.000000
		0.124669 1.728129 0.353955
		0.159600 1.640602 1.000000
		0.207401 1.520824 1.000000
		0.300000 1.430075 1.000000
		1.500000

図3 図2の応力集中係数のデータベースの一部分

ず、このキーワードの階層構造の良否にデータベース探索の時間の長短が依存する。

図1は現在試作中の設計資料データベースの階層構造を示す。第1レベルは設計に必要な物理量の名称である。切欠き部品の応力集中係数(SCF)、板曲げモーメント(PBM)などが含まれる。第2レベルは設計対象における荷重・境界条件である。例えば、応力集中係数の場合は引張り、曲げ、ねじりなどの荷重条件などで構成され、板曲げモーメントの場合は集中荷重、一様分布荷重、非一様分布荷重、固定支持、単純支持などによって構成される。次の第3レベルには設計資料データの名前の由来する設計対象の形状に関連する情報が入る。すなわち、切欠き形状、平板、薄肉円筒などのような形状情報、グラフまたはグラフ表現したときのテーブルデータの縦軸変数、横軸変数とその範囲などによって構成される。最後の第4レベルはグラフあるいはテーブルにおける曲線の数と形状の情報を含み、1本の曲線の情報は7制御点、7重み、1パラメータから構成される。このグラフおよびテーブル情報の記憶においては、別報⁽⁵⁾において報告したように1本の曲線を3本の2次有理Bezier曲線の連なりによって近似し、その7制御点と3重みを記憶する方法を採用している。

図3は図2⁽⁶⁾に示された段付き丸軸の応力集中係数に関するデータベースの一部分、すなわちパラメータD/d=2, 1.5の2本の曲線までの部分を示したも

のである。この図からデータベースのデータ構造が前述の第1レベルから第4レベルまでの順序と内容に一致していることがわかる。

3. パターン認識によるデータベース探索法

機械部品の強度設計に際しては、その部品形状の中に含まれる応力集中部形状と荷重条件などに対応する応力集中係数を前章のデータベースの中から見出し、その値を決定しなければならない。

現在の研究段階では第1レベルと第2レベルのキーワードは設計者がキー入力しなければならないが、第3レベルの形状探索ならびに第4レベルの応力集中係数の決定は自動的に行なわれる。

第3レベルの形状探索は、本報告において初めて導入された「面関係グラフ」と応力集中部の形状を示す特徴パターン（部分グラフ）のマッチングにより行なわれる。

3.1 隣接する2面の凹凸関係の記述 本報告においては4種類の面を取り扱い、つぎのように分類される。

- (1) 平面
- (2) 完全円柱面（完全円錐面を含む）
- (3) 部分円柱面（部分円錐面を含む）
- (4) 回転自由曲面

ここで、完全円柱面は回転軸周りに直線を360度回転することによって生成される軸対称曲面を意味する。この直線と回転軸は同一平面上になければならない。完全円柱面は、例えばキー溝のような凹穴を持つことができる。回転角度が360度未満であるとき生成される曲面を部分円柱面と呼称する。また、この直線が自由曲線に変わると回転自由曲面が生成される。このような4種類の面は2次有理Bezier曲面パッチの組み合わせで正確に表現される。本報告においては双方向に自由曲線データを持つ曲面は取り扱わない。

このように定義した4種類の面により構成される立体において面と面の関係は隣接する二つの面の種類およびその稜線近傍における凹凸関係によって記述される。

4種類の面の組合せは次の10ケースが考えられる。

①平面と平面	②平面と完全円柱面
③平面と部分円柱面	④平面と回転自由曲面
⑤完全円柱面と完全円柱面	
⑥完全円柱面と部分円柱面	
⑦完全円柱面と回転自由曲面	
⑧部分円柱面と部分円柱面	

図4 稜線近傍における2面の凹凸関係の定義

⑨部分円柱面と回転自由曲面

⑩回転自由曲面と回転自由曲面

ここで、円内の数字1～10を識別子、すなわち二つの面の種類を識別するための数値として採用する。

隣接する二つ面の稜線近傍における凹凸関係の記述は以下に行なわれる。隣接する平面と平面の凹凸関係はすぐに決定されるが、例えば平面と部分円柱面における凹凸の判別は決定しにくい。図4に示されるようにそれには二つの場合が考えられる。図4(a)のように部分円柱面が凹面である場合には、部分円柱面の境界における曲線の中央の制御点CPがその平面を含む無限平面に対し、空領域（実体のない領域）または面上にあれば凹で、実領域（実体のある領域）にあれば凸とする。また、図4(b)のように凸面である場合には、その制御点CPが無限平面の空領域にあれば凹で、面上または実領域にあれば凸とする。

このような凹凸判定から、凹であれば－符号を、凸であれば＋符号を、前述の識別子の前に付け、隣接する二つの面における凹凸関係を記述する。

3.2 面関係グラフによる立体の記述 面関係グラフは、立体の面と稜線をそれぞれグラフの頂点と辺に対応させ、さらに辺には隣接する二つの面の種類を示す識別子とその稜線近傍における面の凹凸関係を示す±符号を与えて記述する。この面関係グラフと類似のグラフ記述法をJoshiら⁽⁷⁾が提案しているが、識別子を持たないために多面体にしか適用できない。

図5および図6に面関係グラフの例を示す。図5は非貫通穴を持つ直方体とその面関係グラフを示す。F₁とF₇の面関係は、平面と完全円柱面の関係を示す識別子2と凸の関係を示す＋符号から＋2となる。また、F₇とF₈の場合は、平面と完全円柱面が凹関係にあるので－2となる。その他は平面と平面の凸関係であるので＋1となる。図6は回転軸対称立体とその面関係グラフを示す。F₁とF₂は平面と完全円柱面の凸関係で＋2となり、F₂とF₃は完全円柱面同志の凸関係で＋5となる。さらに、F₃とF₄は完全円柱面と回転自由曲面の

凸関係で+7となり、 F_4 と F_5 は回転自由曲面と平面の凸関係で+4となる。

このように面関係グラフによれば多面体や回転体だけではなく、平面と曲面を含む立体などにおける面と面の関係の全体の記述が可能である。

3.3 立体形状のパターン認識 前述のように立体における応力集中部の形状認識はパターンマッチングによって行なわれる。すなわち、予め定義された応力集中部の形状を示す特徴パターンと入力立体の面関係グラフのパターンマッチングを行なうことにより、その形状のパターン認識が行なわれる。

図7に応力集中部形状のパターン認識の手順を示す。設計者が図面データを計算機に入力すると、そのデータからB-rep表現のソリッドモデルが生成される。その後、すべての面の種類が決められ、入力立体の面関係グラフが生成される。一方設計資料データベースに入っている応力集中部の形状を示す特徴パターンをパターン知識として予め認識プログラムに入れておく。このパターン知識と入力立体の面関係グラフを逐次比較することにより、入力立体における応力集中部が抽出される。

しかし、特徴パターンが同一であっても異なる応力

図5 非貫通穴を持つ直方体とその面関係グラフ

図6 回転軸対称立体とその面関係グラフ

集中部形状を持つ場合がある。例えば、図8に示す三つの異なる立体は面 F_3 に注目すればその周りに同一の特徴パターンを含んでいる。このような場合に立体を区別するためには実際の幾何学的な情報が必要となる。この場合においては平面 F_2 に対する平面 F_4 の角度の計算が必要となる。すなわち、その角度が0度なら図8(a)のU形切欠き帯板、60度なら(b)の60度V形切欠き帯板、90度なら(c)の段付き帯板の形状となる。このように共通の特徴パターンにおいて詳細な幾何学的形状に関する計算が行なわれ、最終的にその応力集中部形状のパターンが認識される。

3.4 パターン認識によるデータベース探索

設計資料のデータベース探索は図1に示されたデータベースの階層構造のレベルの低い順に行なわれる。

まず、設計に必要な物理量の名称の入力による第1レベルの探索が行なわれる。例えば、SCF（応力集中係数）あるいはPBM（板曲げモーメント）などの

図7 応力集中部形状の認識過程

図8 共通の特徴パターンを持つ面関係グラフとその立体

図9 段付き丸軸の寸法(a)と応力集中部形状の特徴パターン(b)

名称の入力および探索がそれである。つぎに、第2レベルにおいては引張り、曲げ、ねじりのような荷重条件あるいは境界条件の入力が必要である。このような第1および第2レベルにおけるデータベース探索は設計者によるキーワード入力によって行なわれる。

第3レベルにおける探索は前節において説明したように、設計対象の面関係グラフと応力集中部形状の特徴パターンのマッチングによって行なわれる。第4レベルにおいてはこの探索された特徴パターンに基づいて応力集中部の幾何学的形状の諸数値が求められ、グラフまたはテーブルデータにおける形状情報を参照して曲線のパラメータ値に対応する応力集中係数値が自動的に計算される。曲線のパラメータ値がデータベースに存在しない場合は近似曲線間に補間法を適用する。すなわち、そのパラメータ値に最も近い三つのパラメータ値を探し出し、近似曲線間において補間を行なうことにより、設計対象の応力集中部における応力集中係数値を計算することができる。

つぎに、図9(a)に示されるような引張荷重を受ける段付き丸軸を用いてデータベースの探索過程を例示する。まず、図9(b)に示す段付き丸軸の応力集中部の形状を示す特徴パターンを面関係グラフとパターンマッチングすることにより、入力立体が段付き丸軸であることが認識される。その後、入力立体のB-repソリッドモデルのデータから曲線パラメータ値などが求められる。すなわち、曲線パラメータ D/d は1.875、横軸変数 r/d は0.198となる。しかし、図2において曲線パラメータ値1.875は存在しないので、これに最も近い三つのパラメータ値2.0, 1.5, 1.3が探し出される。この三つの値から1.875における応力集中係数の補間値を求めると0.618となる。この値は図2のグラフから読み取れる値と非常に良く一致する。

このようにしてデータベースの階層構造において第3および第4レベルにおけるデータベース探索を自動的に行なうことができる。

また、本報告におけるパターン認識は部品形状の面関係グラフを全体的に、かつ同時に認識しようとするのではなく、その形状における特徴パターンのみを抽出して部分的に認識しようとするので、その探索時間が短縮されることが考えられる。

第1および第2レベルにおけるキーワードの自動的探索のためには、設計しようとする機械の全体構造における各々の部品の位置・姿勢およびその荷重状態・支持状態などを自動的に認識する必要がある。しかし、この問題に関する研究は未完成であるので、本報告においてはこの二つのレベルで必要な情報はすべてキー入力することになっている。

4. 設計資料データベースの探索例

本研究において、データベースとその探索システムはApollo Computer社のDN3500上でC言語および同社のユーザインタフェースDialogueによりプログラミングされ、また3次元グラフィクスは同社のグラフィクスツール3D-GMRにより作成された。

本章においては、形状のパターン認識によるデータベースの探索に関する二つの事例について述べる。まず、図10は五つの応力集中部、すなわち特徴パターンを持つ丸軸の諸元を示す。図11はこの丸軸に対する設計資料データベースの探索結果を示す。次に、図12は五つの応力集中部を持つ帯板の諸元を示す。また、図13はこの帯板に対する設計資料データベースの探索結果を示す。図11と図13において、ディスプレイ画面の左部分は種々の情報表示のためのアイコンで、階層構造における第1レベルの'SCF'と第2レベルの荷重条件'tension'がキー入力されて表示されている。右上部分の3次元グラフィクスは入力立体のソリッドモデルにシェーディングを施したものを示す。また、右下部分に設計資料データベースの探索結果を示す。五つの応力集中部に対してそれぞれのタイプとSCF値が表示されている。

これらの結果から丸軸と帯板両方における五つの応力集中部のタイプが良く認識されていることがわかる。また、求められたSCF値は応力集中部形状に対するSCF値と正確に一致することを確認している。

以上の結果から、複数の応力集中部を持つ設計対象に対する設計資料データベースの探索が自動的に、かつ正確に行なわれることが確認された。

図10 五つの応力集中部を持つ丸軸の諸元

図12 五つの応力集中部を持つ帯板の諸元

No	TYPE	SCF
1	→ Stop_bar	→ 1.778
2	→ U_bar	→ 1.912
3	→ V_bar	→ 2.381
4	→ Stop_bar	→ 1.778
5	→ Stop_bar	→ 1.948

図11 図10の丸軸に対するデータベース探索結果

No	TYPE	SCF
1	→ Stop_plate	→ 1.894
2	→ U_plate	→ 2.282
3	→ V_plate	→ 2.347
4	→ Stop_plate	→ 1.812
5	→ Stop_plate	→ 1.823

図13 図12の帯板に対するデータベース探索結果

5. 結 言

機械設計への知識工学の応用の一つとして、公的な知識源である機械工学便覧などに掲載されているグラフ形式あるいはテーブル形式の設計資料を自動的、かつ有効的に活用することが考えられる。本研究はこのような設計資料の活用支援の一つの手法を考案すべく、応力集中に関連したグラフおよびテーブルを例に取り上げ、形状のパターン認識による設計資料データベース探索について検討した。

まず、隣接する二つの面の種類を示す識別子とその稜線近傍における凹凸関係を示す±記号によって設計対象のトポロジーを記述する面関係グラフを提案した。

次に、面関係グラフと応力集中部の形状を示す特徴パターンのマッチングを行なうことにより、応力集中部のみを抽出し、その応力集中係数を自動的に計算する手法を示した。

最後に、二つの事例を通してパターン認識に基づく

設計資料データベース探索が実際の機械部品の設計に際して活用できることを確認した。

文 献

- (1) 日本機械学会編, 機械工学便覧, (1987), 丸善.
- (2) 三菱総合研究所, 疲労強度設計支援システム, METIS Ver.2, (1990).
- (3) 情報処理振興事業協会, MECHA-Tool, (1990).
- (4) Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S., Theory of Plates and Shells, (1959), McGraw-Hill.
- (5) 横山・車, 日立地方講演会講演論文集, (1990), 158.
- (6) 中原, 材料力学(上巻), (1965), 305, 養賢堂.
- (7) Joshi, S. and Chang, T. C., Computer-Aided Design, 20-2 (1988), 58.