

解説



コンピュータグラフィックスと人工知能†

木村文彦††

1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックスの技術は、ハードウェア、ソフトウェアともに急速な進歩を遂げ、日常的な道具として、さまざまな応用分野に定着してきた。コンピュータグラフィックスによって生成された、実物と見間違えるような精細な画像や、超現実的なアニメーションなどは、すでにお馴染みのものである。

しかし、コンピュータグラフィックスの意義は、単に画像生成だけにあるのではなく、画像という情報表現の媒体を通じて、人と計算機との間の良いインタフェースを提供することにある。このことを強調して、インタラクティブコンピュータグラフィックスという言葉を用いることもある。

さて、画像あるいは図形を介して、人と計算機との良いインタフェースを実現することは、なかなか面倒な問題である。人は、通常画像や図形に対して、陰に陽にさまざまな意味を与え、自分の意図を伝達しようとする。計算機は、当然ながらそのすべての意味を理解することができない。良いインタフェースの実現は、このミスマッチをどこまで減少させることができるか、にかかっている。

この問題を解決するのに、人工知能の技術が関連ありそうなのは、ただちに想像がつく。最近の人工知能研究の隆盛とともに、上記のようなコンピュータグラフィックスの観点からも興味ある研究が散見されるようになってきたので、概説してみたい。ただし、一般的に考えると範囲が広すぎるので、ここでは、エンジニアリングへの応用、特にCAD/CAMへの応用を主として考えることにする。

画像を媒介とするインタラクションの様子は、図-1のように単純化して考えると便利である。問題は二つ

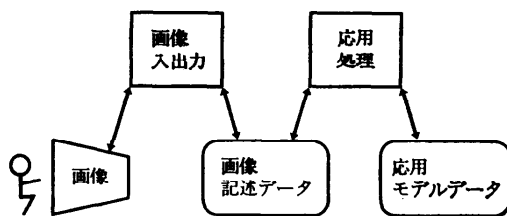


図-1 画像を媒介とするインタラクション

に大別される。一方は、人が直接扱う画像と、対応する記述データとの関連である。すなわち、画像出力や入力の問題であり、狭義のコンピュータグラフィックスの主要な話題である。他方は、画像データと応用処理が扱うさまざまなモデルとの対応である。コンピュータグラフィックスとの関連でいえば、このモデルは図形や形状モデルということになる。

画像出力や入力の問題については、一般のコンピュータグラフィックスの問題としてよく扱われており、また人工知能技術の応用として目立った成果も少ないので、ここでは考えない。CAD/CAMの立場からの、図形や形状モデリングの問題点と、その解決手法としての人工知能技術の応用を主に考えていくことにする。

2. 形状モデリングの問題点

2次元や3次元の図形や形状を計算機で処理することを、ここでは総括して形状モデリングと呼ぶことにする。形状モデリングは、コンピュータグラフィックスの立場から一般的にきわめて重要な技術であり、またCAD/CAMの中核技術として、実用的に必須の技術でもある。学術的な立場からも、興味ある固有の情報処理技術を必要とすることから、多くの研究が行われてきた。

実用システムとして、すでに自動車産業などを中心に、大規模で進歩したシステムが日常的に利用されており、形状モデリングは、一面ではかなり成熟した技術となった、とも考えられる。しかし、CAD/CAM

† Computer Graphics and Artificial Intelligence by Fumihiko KIMURA (Department of Precision Machinery Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo).

†† 東京大学工学部精密機械工学科

技術が進歩し、より高度な形状処理が要求されるにつれ、従来とは異なった形状処理へのアプローチが必要になってきた。

従来の形状処理の方式を乱暴にまとめて言えば、形状に対する要求を幾何学的条件として明確にし、それらを満たす形状をきちんと生成できる数学理論を発展させてきた、といえる。自動車に代表されるような高品質曲面の生成や、複雑な形状を誤りなく処理できる立体モデリングの技術など、実用的な技術として確立してきた^{1),2)}。より複雑で、高精度な形状を扱うためには、形状入力手法、形状処理理論、計算機上での実現技術などについて、さらに研究が必要とされている。

しかし、CAD/CAM への応用の立場から、広く形状処理の問題を考えてみると、従来はよく考察されていなかった問題点があることが分かる³⁾。それらは、大雑把に言えば、CAD/CAM システムで設計生産しようとする対象製品に対する要求条件を、いかにして対象製品の形状に対する条件に帰着させていくか、ということである。

機械製品を代表として、多くの工業製品は、最終的に形状が確定して、設計が終了する。形状を確定させるまでの過程は、製品の種類や業種によってさまざまである。意匠形状を重視する製品では、設計の早い段階から形状がきちんと考察される。このようなものに対しては、従来の形状処理技術を適用しやすい。機能製品では、機能設計が主体となり、形状設計に多くの工数をさく余裕がない。このようなものでも、最終的にはきちんとした形状を規定しなければ、物が作れない。そこで、従来の形状モデリングにより形状を生成するのであるが、いかにして形状定義データを生成するのか、が問題となる。

以上のようなことから問題となる点をまとめてみる。

(1) 形状定義の不完全性

製品機能からある制約が課されるが、形状の詳細については、設計者は気にしないという場合がある。このような場合でも、形状を細部まできちんと規定しなければならないとすると、設計者にとって大変面倒である。設計意図から不完全情報を補い、形状モデリングへ引き渡す仕組が必要である。

(2) 形状精度の制御

意匠形状や機能的に重要な役割を果たす形状などは、きわめて高精度に設計される必要がある。これら

に対しては十分に工数をかけて形状入力しても引き合う。さほど重要でないところには、それほど工数を掛けられない。しかし、形状は作らねばならないので、「ほどほどの」精度で形状を規定できると便利である。

(3) デフォルト形状の利用

通常の製品であれば、形状の多くの部分は、既存形状の引用である。簡単な指定で、あるいは無指定で、適切な既存形状を適合させて、はめこんでくれるとよい。

(4) 形状要素間の関係

形状を構成している要素間には、さまざまな関係がある。依存関係や拘束関係などがあるが、形状生成や変更のうちに、これらの関係を保持して、処理が進められると便利である。

(5) 多重モデル

設計過程では、同一物体について、いくつかの異なる形状モデルが構成されることがある。概略形状と詳細形状、組立品の全体形状とその部品形状などである。これらのモデルの間の関連を管理し、不整合を防ぐような仕組があるとよいが、難しい。また、一方から他方を生成することも必要となるであろう。

(6) 頑健性

人は、誤差の多い図面を書いても、対象を理解しているのだから、必要なときには精度の良い図面を書くことができる。計算機処理では、一度精度が落ちると、元へ戻すことは困難である。形状定義情報に基づき、精度を回復して、形状処理をより頑健にしていくことが必要である。もちろん、計算幾何学の問題として、頑健な幾何処理アルゴリズムを追及することが重要であることは、言うまでもない。

(7) 形状特徴

形状特徴 (form feature) は、最近きわめてよく知られるようになった概念である。設計や生産のいろいろな立場から、ひとまとまりとして把握できる形状を指す。この概念をうまく利用すると、形状入力や処理を効率的にすることができる。これについては、4. に詳しくのべることにする。

以上、思いつくままにあげたが、これらの点は従来からの形状モデリングの研究開発と対立するわけではなく、それらを補完するものである。

従来の形状モデリングでは、基本的に、人がこと細かに形状を規定せねばならなかった。意匠形状のような場合には、形状そのものが設計者の重要な意図を表しているのだから、当然のことであるが、上記の

ように、製品設計生産においては、そうでないような形状生成過程もたくさんある。そのような場合には、すべての形状を人が規定しなくても、人の設計意図やその他の制約条件から、形状を案に生成できるような、もう少し高度な形状生成法を導入することが望ましい、ということである。

たとえば、意匠面をもつ射出成形品を考えてみよう。意匠面は、製品価値を決めるから、工数をかけて設計することができる。射出成形品として成立させるためには、製品の肉厚を決め、内側形状を作り、内部部品を固定するための台などを配置し、補強のためのリブを入れたりする。成形性や強度などを考えると、これらは決して単純な作業ではないが、その結果の形状はかなり定型化している、と考えられる。その形状を一つ一つ、人手で入力していたのでは、設計変更や、類似品の製作なども考えると、とても現実的ではない。上記の問題点に記したような事柄を考慮に入れて、意匠形状を決め、技術的条件を人が指示すれば、細部形状を自動生成してくれるような機能が望まれる。

以上のような問題点を解決しなければ、形状生成に工数が掛かりすぎることが障害となって、CAD/CAMのための完備した形状モデリングが普及することは難しい。

上記のような点を背景に、最近新しい形状モデリングの方法がみられるようになった。「幾何推論」(geometric reasoning)に基づく形状モデリングである。従来の形状モデリングが、形状生成や変形の操作を主体に、形状を直接的に作り出すのに対し、幾何推論では、形状の幾何的性質とそれに対する推論機構を主体にしている点が大きく異なる。ここに、コンピュータグラフィックス技術と人工知能技術の結合の典型をみることができ、これが上記の問題の解決にきわめて有効であると期待されている。

3. 幾何推論と形状モデリング

幾何推論の話に入る前に、設計作業と形状モデリングの関係を見直して、幾何推論の役割を明確にしておこう⁴⁾。製品設計の実態は、製品により大幅に異なっている。しかし、かなり多くの場合に、図-2に示すような、制約条件を解いていく過程とみなすことができる。(設計過程を形式化するための考え方は、他にも多くあり、これが代表的なものではない。)種々の設計要求は、製品機能に対する制約条件に翻訳され、さ

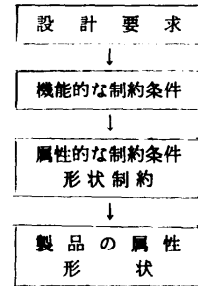


図-2 制約条件に基づく設計過程のモデル

らに具体的な製品にするために、製品を直接的に規定するような属性に対する制約条件に翻訳される。形状は最も重要な属性であり、形状に対する制約条件を解いて、製品形状が確定することになる。この段階で、幾何推論が有効に利用される。上記の過程で、制約条件の翻訳は決して容易ではなく、また制約条件は一般に整合的でもなく、完全でもないので、制約条件解法もまた単純ではないことを注意されたい。幾何推論について、この点を以下に論ずる。

幾何推論の概念がいつ導入されたのか、明確ではないが、形状モデリングの研究に従事していた人々の間では、その必要性は古くから意識されていた。形状を構成的に記述していく操作主体の形状モデリングがまず発展してきたが、その過程で、前章に述べたような問題点が指摘されるようになった。その解決の方向として、幾何推論的な機能が必要なことは意識されてきたが、最近に至るまで具体化の技術が追い付かなかった、というのが実態であろう。

幾何推論の定義は、文献によりさまざまであるが⁵⁾、対象とする要素の幾何学的性質とそれらの間の幾何学的関係を与えて、幾何学的な推論規則により、形状の性質を導出するというのが一般的な範囲である。特に、形状モデルに関連して、幾何学的関係を重視して、関連する幾何学的性質の整合性を保つことや、必要な幾何要素を生成することが重要であり、このための仕組が考察されている。具体化のための論理としては、特別なものは少なく、通常の述語論理の範囲で実現している。

対象となる幾何要素としては、実体に対応する線や面などだけでなく、それらを規定するために必要となるより抽象的な要素も考える必要がある。中心線など、あるいは形状を規定する構造的な骨組形状などである。また、これらの要素の間には、階層関係があり、性質の継承をきちんと表現しておく必要がある。

これらは後述するように、より一般的に形状特徴という概念でまとめられる。

関係情報としては、いわゆる幾何的 (geometrical) な情報のほかに、位相的 (topological) な情報も管理する必要がある。2次元形状の処理のように、位相的情報をあまり扱わなくてもよい場合には明確であるが、3次元形状処理のように、一般的には複雑な位相処理を必要とする場合は難しい。従来は、面モデルとか立体モデルなどのように、位相構造のはっきりしたもののみを扱ってきたが、設計過程を一般的に考えると、もっと多様な位相構造が必要となることが分かる。たとえば非多様体構造などである⁶⁾。従来の形状モデリングでは、これらの構造をポイント形式のデータ構造で表してきたが、幾何推論の対象としては不便である。述語論理による構造記述をすればよいが、処理効率の問題などがあり、今後、多くの検討が必要である。

幾何学的な推論規則の多くは、基本的には単純なブロダクションルールの形式で、書き下すことができる。しかし、形状生成や変更にもなる状態変化を管理するために、状態変数を導入したり、他の仕組を考慮する必要がある。複雑な位相構造の操作が必要な場合は難しい。たとえば、寸法を変化させて、形状を変更したとき、位相構造が変化するときである。このような変化を操作的ではなく、論理を用いて宣言的に効率良く記述できるか否か、まだ分かっていない。現状では、手続き的手法を呼び出して処理する性質とが多いと思われるが、そうすると、結果の形状の性を追跡することが困難になる。

形状の生成や変更は、通常次のような手順で行われる。形状に対する制約条件に基づき、推論規則を適用して、形状を決定する手順を導き出す。その手順に従って、具体的な形状構成操作を実行する。具体的な形状構成を一部実行しないと手順が決まらないとか、形状構成操作において、複雑な計算を必要とするものは、うまく扱えない。たとえば、一方から他方へ計算が進むように整理できず、多変数の方程式を解くような形式になると、一般に難しくなる。

論理操作で終始する幾何推論は良いのだが、最終的に通常の形式の形状モデルに、推論の結果を反映しようとするとき、困難な問題がいろいろ起きてくる。現状は、問題ごとに ad hoc に規則を規定している、とあってよい。今後の検討が望まれる。

実用的には、数式の形式の制約条件を扱えると便利

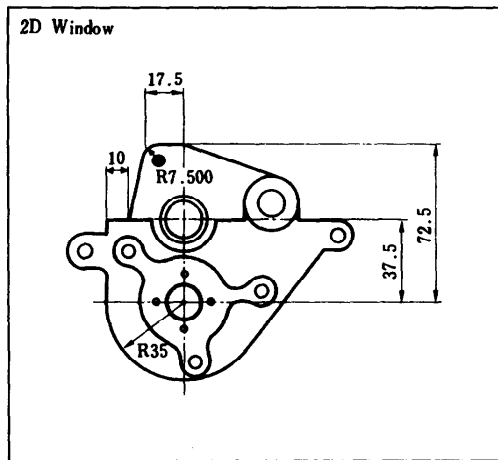


図-3 部分的形状を規定する寸法拘束

なことが多い。Euclid 幾何と解析幾何を、場合によって使い分けるようなものである。最近では制約論理プログラミング⁷⁾など、論理プログラミングの中で制約式を扱えるようにし、制約式の評価の制御を柔軟に行えるような道具も一般化してきた。数式処理や個別の問題解決ルーチンを結合して、強力な制約式評価を利用することは有用であろう。

また、制約条件を解く際に、制約条件間の不整合や不完全性を解決することは重要である。不整合な場合には、制約の強さにより、妥協をはかることが必要であり、不完全な場合には、デフォルト条件を導入する必要がある。これらのための幾何情報データベースを整備することは重要であるが、まだ何も行われていない。

形状生成の際の条件の依存関係を管理できることも必要である。図-3 に一例を示す⁸⁾。図中の●印で示した点を規定する寸法拘束が表示されている。このような依存関係を管理することで、形状変更や生成を効率的に実行することができる。その実現の仕組としてはいろいろ考えられるが、ATMS (Assumption-based Truth Maintenance System) を利用する方式が実験されている⁹⁾。

幾何推論のために、汎用の知識表現や処理の手法が活用されているが、幾何推論固有の問題点、特に具体的な形状データの生成などに関連して、より深い分析が必要とされている。

4. 形状特徴

幾何推論で、処理の対象となる要素として形状特徴

は重要である。前述したように、形状に対する拘束条件は、設計や生産上のなんらかの意図を表すものであると考えられ、その対象となる形状要素は、単に線や面だけでなく、設計や生産の意図に対応する意味あるまとまりであることが望ましい。これを形状特徴という。

形状特徴の定義は人によってさまざまなようである^{10)~12)}。一般的に言って、形状特徴とは、ある目的のために有用な、形状の特徴的な性質をもった部分を指す。これでは、ほとんど定義になっていないが、同一形状を見ても、何のために用いるかにより、異なった形状特徴が把握されるので、これ以上の一般的定義は難しいといえる。形状特徴は、応用の観点から、形状モデルより一段抽象的にみた形状要素の記述であると考えられる。

たとえば、寸法や公差の規定においては、関連する要素は形状モデルの中の幾何要素である、と考えると概念が巧く整理できない。平面性などの一定の性質をもった形状特徴間の関係を規定すると、考えるべきである。そのような形状特徴をノミナルに表現するものが、対応する形状モデル内の幾何要素である。また、機械加工を中心に考えると、図-4のような形状特徴があげられる。各形状特徴は、対応する加工法より付与される特有の性質を保持している。

現状では、応用ごとに個別の形状特徴の体系が考察されている。考察の観点としては、製品の概念設計、

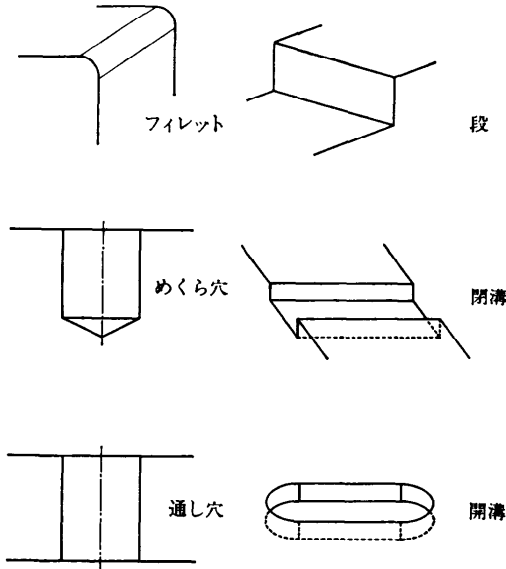
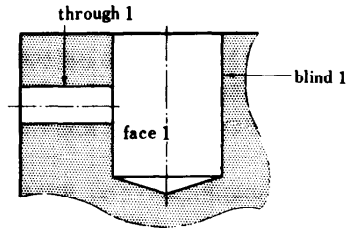


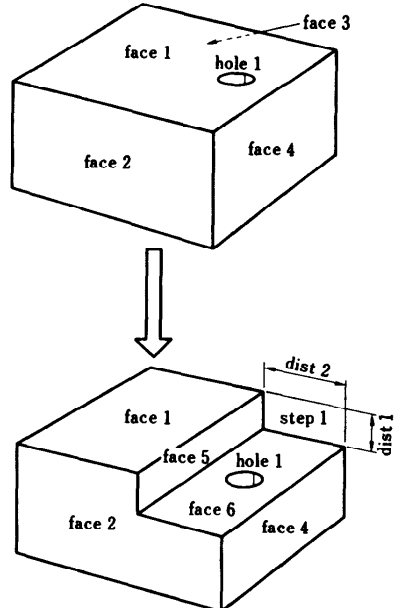
図-4 機械加工のための形状特徴

詳細設計、工程設計、あるいは加工や組立、検査など、さまざまであり、これらは強く関連している。たとえば、製品の設計意図が工程設計にいかに関係されるか、という問題は、設計形状特徴と工程設計形状特徴との間の関連や変換を考察するという問題に帰着される。このような問題を解くのに、幾何推論は一つの強力な枠組みとなる。

さて、形状特徴の表現法を考えてみよう。大別して、従来の立体モデリングなどの形状モデリングと関連をもたないものと、もつものがある。前者は、工程設計などの特定の応用のために導入されてきたものが多く、形状特徴を、特定の言語や論理記述などにより表現する。これでは、形状特徴に対応する形状の詳細な評価ができないので、後述するような形状特徴の変換や組合せなどを扱うことが困難である。一般的には、形状特徴記述と形状モデリングを緊密に統合し、



(a) 穴形状特徴の干渉



(b) 形状特徴の変化

図-5 形状特徴の干渉と変化

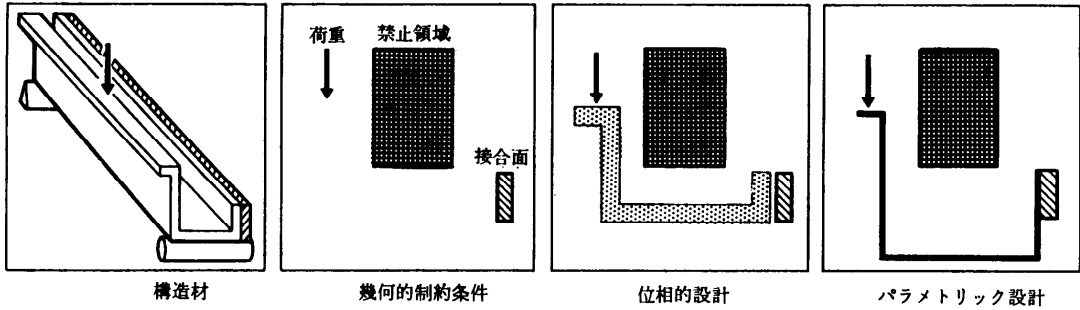


図-6 構造材の断面形状生成手順

一方の変化が他方にきちんと反映するような仕組みを考えておく必要がある。

基礎となる形状モデルの表現法としては、CSG (Constructive Solid Geometry) 表現や境界表現などがあるが¹⁾、形状特徴表現のためには境界表現を用いることが多い。しかし、通常の閉殻に基づく立体表現のみでは不十分で、非多様体表現を用いて、いろいろな位相構造を表現できるようにする必要がある。形状特徴は、これらの表現に含まれる幾何要素の性質や関係を、述語論理などの言語を用いて記述することにより、定義される。

設計生産などへの応用においては、形状特徴の入力や処理について考えておく必要がある。形状モデルを、通常形状モデラがもっているような基本形状の組合せとして入力することは、製品の機能や生産性からの要求との整合性が悪く、入力の手間が大変であることは、よく知られている。そのために、形状特徴が導入されたわけだが、実際の形状生成にあたっては、形状特徴の組合せや干渉処理に注意を払う必要がある²⁾。たとえば、図-5(a)においては、一つの穴の側面に他の穴が開口部をもっている。また、(b)においては、穴の上面の開口部に対応する平面を削ってしまうことにより、開口部の面が変わっている。このような場合に、形状特徴記述から形状モデル表現へ、あるいはその逆へと、表現変化の記述をきちんと行うことは、一般的には面倒で困難な処理である。

形状特徴により、形状が記述される場合には、詳細な形状に至るまで、記述が常に完全であるとはいえない。たとえば、指定された形状特徴の間を適切に結合するような形状要素を補完せねばならないようなことは多い。このような処理が完備して、初めて人に優しい形状入力が可能となる。一例として、3面図入力からの立体形状の再構成問題を考えてみる。現在的方式は、幾何学的考察にのみ依存しているため、図面が不

完全であると、全く無力となる。ところが、通常の3面図は、幾何学的には不完全であることのほうが普通である。これを解決するには、3面図の情報を形状特徴として解釈し、対象に関する付加的な知識も利用して、形状を合成する方式が考えられるが、まだよく研究されていない。

形状モデル記述から形状特徴を認識することも、また重要である。形状特徴は、その定義により、応用や目的に依存しているので、形状モデルのみから形状特徴を認識しようとするのは、ほとんど意味がない。むしろ、形状特徴の変換問題として捉えるほうが妥当である。たとえば、設計形状特徴により記述された製

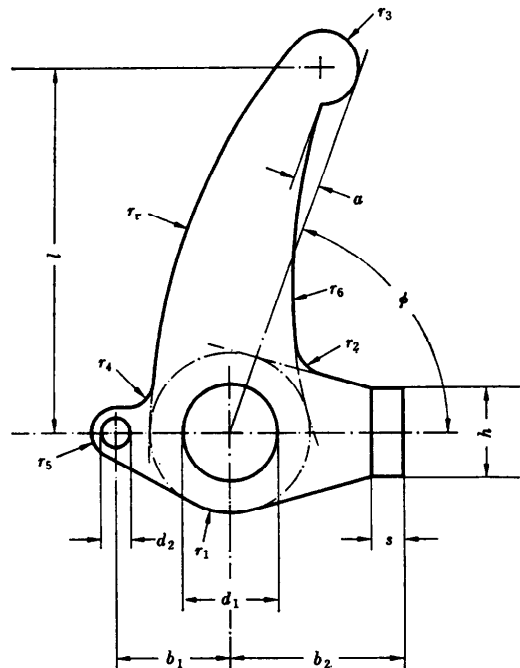


図-7 寸法により拘束された可変形状

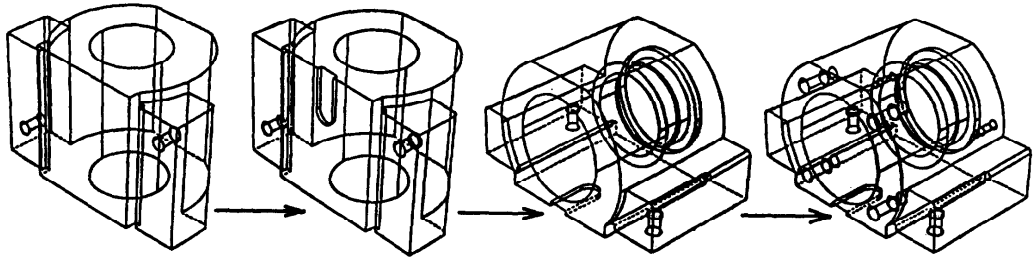


図-8 工程設計におけるモデル形状変化

品モデルから、工程設計で必要となる加工に対応する形状特徴を認識することなどである。このような認識のためには、形状要素間の局所的関係のみでなく、大域的な形状認識や技術知識なども必要となり、困難な課題となるが、いまだによく考察されていない。

以上のような各種の形状特徴操作は、個々の応用分野に従って、前章に述べた幾何推論の基本的道具を用いて実現されていくことになる。

5. 設計生産問題への適用例

本稿では、設計生産自動化の問題そのものを採り上げることはしない。しかし、2. で述べたように、機械製品を考える場合、最終的には形状が機能を発揮するという観点から、機能要求を、なんらかの手段により形状拘束に帰着させることは、かなり一般的な有効性をもつことが期待される。このことを前提として、以下では、幾何拘束と幾何推論によるモデル生成や変換の例を示す。

5.1 形状生成

形状に関する制約条件を与えられて、それを満足する形状を自動生成する問題を考える。一般に、必要十分な制約条件が与えられるわけではなく、制約条件の矛盾の解消や、付加情報の導入が必要となる。機能要求により概略の構造や形状を決定し、生産上の制約などを考えて、形状の詳細を決定するような方法が考えられている。打抜きによる板金部品¹⁴⁾や、引抜きによる構造材¹⁵⁾などの形状設計を扱った例がある。図-6に、構造材の断面形状生成手順の概要を示す。いずれも、2次元形状を扱っているが、3次元形状への拡張は容易ではない。このような類の問題については、過去の設計例や標準部品の情報、生産技術の知識などを体系的に整理し、利用しないと、高度な形状設計はできない。

5.2 可変形状 (Variational Geometry)

形状を規定する拘束条件として、寸法・公差はきわ

めて重要である。古くは、数理的手法によるものがあったが^{16),17)}、設計生産問題の要求に十分答えられなかった。最近では、論理記述により、寸法や公差の意味を記述し、幾何推論を適用して、寸法変更や公差域の算出などを可能とするものが出てきた¹⁸⁾⁻²⁰⁾。一例を図-7に示す¹⁹⁾。やはり、2次元形状が主体で、3次元の扱いはこれからである。

5.3 工程設計

機械加工の自動工程設計問題のために、製品の形状特徴記述とルールベースによる工程設計知識の形式化の研究が盛んに行われてきた²¹⁾。しかし、前章で述べたような、形状モデルと形状特徴操作との統合が十分でなかった。最近では、工程設計途上での対象製品や素材の変化をきちんとモデル化し、正確なプランニングを可能とするものが出てきた²²⁾。図-8に、モデル変化の様子を示す。現状では、加工手順の自動決定のレベルであるが、さらに取付け具の自動設定や、加工精度評価などを行うためには、より完全な形状特徴モデリングが必要とされている²³⁾。

6. おわりに

従来からの形状モデリングの研究開発が進展し、実用的に利用されるようになるにつれ、その機能を補完するものとして、幾何拘束と幾何推論による新しい方式に基づく形状モデリングの必要性が認識されるようになってきた。しかし、現状はその基礎理論も未発達であり、実証的な要求把握の仕事も不足している。また、幾何推論により、具体的な形状を生成する際に、従来の形状モデリングに対する新たな問題点が要求されてきており、今後の研究が心要である。

上記の問題を一例として、進んだ情報処理技術を利用した形状処理には、興味深い問題が山積している。

参考文献

- 1) Mantyla, M.: An Introduction to Solid Modeling, Computer Science Press (1987).
- 2) Boehm, W.: A Survey of Curve and Surface Methods in CAGD, Computer Aided Geometric Design, Vol. 1, No. 1, pp. 1-60 (1984).
- 3) 木村文彦: 形状モデリングと CAD/CAM, 精密工学会誌, Vol. 53, No. 3, pp. 361-364 (1987).
- 4) Kimura, F., Suzuki, H., Ando, H., Sato, T. and Kinosada, A.: Variational Geometry Based on Logical Constraints and its Applications to Product Modelling, Annals of CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 65-68 (1987).
- 5) Arbab, F. and Wing, J.: Geometric Reasoning: A New Paradigm for Processing Geometric information, Design Theory for CAD (Book), pp. 145-159 (1987).
- 6) Weiler, K.: Non-Manifold Geometric Modeling, Preprint of IFIP WG5.2 Workshop on Geometric Modeling (1986).
- 7) Jaffar, J. and Michaylov, S.: Methodology and Implementation of a Constraint Logic Programming System, Technical Report, Computer Science Dept., Monash University (1986).
- 8) 安藤英俊, 鈴木宏正, 木村文彦: 機械設計のための幾何拘束処理システム, 情報処理学会グラフィックスと CAD 研究会報告, 31-4 (1988).
- 9) 乾 正知, 木村文彦, 佐田登志夫: 非単調論理に基づくプロダクトモデリング—ソリッドモデリングへの応用—, 昭和 62 年度精密工学会秋期大会講演会論文集, pp. 293-294 (1987).
- 10) Pratt, M.: Synthesis of an Optimal Approach to Form Feature Modelling, Proc. Computers in Engineering 88, ASME, pp. 263-274 (1988).
- 11) Unger, M. and Ray, S.: Feature-Based Process Planning in the AMRF, Proc. Computers in Engineering 88, ASME, pp. 563-569 (1988).
- 12) Pratt, M. and Wilson, P.: Requirements for Support of Form Features in a Solid Modeling System, R-85-ASPP-01, CAM-1, Inc. (1985).
- 13) Inui, M., Kimura, F. and Sata, T.: Generation and Verification of Process Plans Using Dedicated Models of Products in Computers, Knowledge-Based Systems for Manufacturing ASME, PED-Vol. 24, pp. 275-286 (1986).
- 14) 佐藤達志, 鈴木宏正, 木村文彦: 緩やかな拘束条件のもとでの板金部品形状の生成, 第 5 回設計自動化学講演会論文集, pp. 19-21 (1987).
- 15) Duffey, M. and Dixon, R.: Automating the Design of Extrusions: A Case Study in Geometric and Topological Reasoning for Mechanical Design, Proc. Computers in Engineering 88, ASME, pp. 505-511 (1988).
- 16) Hillyard, R.: Dimensions and Tolerances in Shape Design, TR-8, Computer Laboratory, University of Cambridge (1978).
- 17) Lin, V., Gossard, D. and Right, A.: Variational Geometry in Computer Aided Design, Proc. SIGGRAPH 81, pp. 171 (1981).
- 18) Kimura, F., Suzuki, H. and Wingard, L.: A Uniform Approach to Dimensioning and Tolerancing in Product Modelling, Proc. CAPE 86, North-Holland, pp. 165-178 (1987).
- 19) Aldefeld, B.: Variation of Geometries based on a Geometric-reasoning Method, CAD J., Vol. 20, No. 3, pp. 117-126 (1988).
- 20) G. Sunde: CAD System with Declarative Specification of Shape, Preprint of the First Eurographics Workshop on Intelligent CAD Systems (1987).
- 21) Descotte, Y. and Latombe, J.-C.: Making Compromises among Antagonist Constraints in a Planner, Artificial Intelligence, Vol. 27, No. 2, pp. 183-217 (1985).
- 22) Inui, M., Suzuki, H., Kimura, F. and Sata, T.: Extending Process Planning Capabilities with Dynamic Manipulation of Product Models, Proc. 19th CIRP Manufacturing Systems Seminar, 273-280 (1987).
- 23) Boerma, J. and Kals, H.: FIXES, A System for Automatic Selection of Set-ups and Design of Fixtures, Annals of CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 443-446 (1988).

(昭和 63 年 9 月 12 日受付)