形状特徴モデリングによる形状デザイン手法に関する研究* (意志決定プロセスモデルに基づくモデリングシステム構成)

中山 隆文^{*1}, 前田 剛^{*2}
古館 宏次^{*1}, 塚本 一義^{*1}

Industrial Shape Design with Form-Feature-Based Modeling (System Architecture based on Determination Process Model)

Takafumi NAKAYAMA, Tsuyoshi MAEDA,
Hirotugu FURUTATE and Kazuyoshi TSUKAMOTO

To develop a 3D-modeling system that is utilizable for industrial shape design processes, a determination process model for shape creation work and a modeling system architecture based on this model are proposed. Our analysis of the design mock-up process makes it possible to assume that the determination model of shape creation processes is represented by a type of machining process model in order to determine such items as cutting procedures, cutting methods and cut-off-volume. In the feature-based modeling process the items to be determined are combinations of features, definitions of features and values of parameters. Therefore a modeling system for shape creation work can be constructed using the feature-based modeler by correlating these items with those of the determination process model. The applicability of this modeling system has been proven by its utilization for actual shape creation work.

Key Words: Computer-Aided Design, Design, Modeling, Industrial Design, Design Engineering, Feature-Based Modeling, Design Mock-Up Process

1. 緒言

家電製品をはじめとする民生機器の外観形状は商品価値を決定する重要な要因であり、生産性とともに意匠面からの要求を重要視して決定される。特に最近になって消費者はよりオリジナリティの高い商品を求めるようになり、差別化のために外観形状に自由曲面を多用した複雑な形状が採用されることが多くなってきた。一般にこのような自由曲面を含んだ形状は2次元図面で正確に表現することが困難であるため、3次元CADシステムを用いて製品形状を正確に記述することが強く求められている。

近年、3次元CADシステムにおける自由曲面の数学的取り扱いに関する研究が進展し、NURBS⁽¹⁾など優れた記述性を持つ自由曲面表現が3次元CADシステムのモデルとして実用化されている。その結果、最近では相当複雑な形状でも市販の3次元CADシステムを利用して正確に記述することが可能となっている⁽²⁾⁽³⁾。

しかしながら家電製品をはじめとする民生機器開発の形状デザインプロセスにおいて、3次元CADシ

ステムは意匠的に形状が確定した後の形状記述ツールとして利用されるに留まり、商品の形状を創出する造形プロセスそのものにはもっぱらデザインモックアップモデルと呼ばれる形状見本を実際に製作する方法が採られている。この理由として、現状の3次元CADシステムでは形状の記述性は向上しているものの、形状モデリング環境についてはなおデザイナーの造形感覚と著しく異なっていることが指摘されている⁽⁴⁾。その結果、デザインの本来業務ともいえる造形プロセスに3次元CADシステムが用いられるには至っておらず、商品開発プロセスの効率化の大きな課題となっている。

このような課題に対して形状操作の観点から、自由曲面制御点の直感的な操作手法に関する研究⁽⁵⁾、人工現実感生成技術を用いた形状操作デバイスに関する研究⁽⁶⁾⁽⁷⁾などが試みられている。これらの研究例は、いずれも柔軟性や直感性に富む形状操作手段を開発することによりデザイナーの造形感覚に近い形状モデリング環境を実現することを狙ったものである。

一方、形状デザインにおける造形プロセスは、要求仕様に対して過去の経験やデザイナーの感性に基づいて形状を決定する一連の意志決定プロセスと考えることができる。このことから、デザイナーの造形感覚に

* 原稿受付 1996年1月22日。

^{*1} 正員、三洋電機(株)メカトロニクス研究所 (〒570 守口市大日東町1-1)。

^{*2} 三洋電機(株)メカトロニクス研究所。

合った形状モデリング環境とは、「デザイナーにとって意匠造形に関する意志決定を行いやすい環境である」と考えるべきである。従ってこうした形状デザイン支援のためには、形状操作手段の改善に加えて、造形プロセスにおけるデザイナーの意志決定プロセスに類似した環境でモデリングを進めることができる形状モデリング環境を構築する必要がある。

このような造形時の意志決定プロセスに注目した研究例としては、渡辺らによる腕時計の形態デザイン支援に関する研究⁸⁾があるが、あらかじめ準備された形態要素の組み合わせによって形態が決定できる事例を対象にしたものであって、一般的な造形を対象とした研究例は見あたらない。

これに対して筆者らは、家電製品の形状デザインを事例として、意匠造形におけるデザイナーの意志決定プロセスの分析とそれに基づく形状モデリング環境の構築について検討を行ってきた⁹⁾¹⁰⁾。

本報告ではこれらの検討結果を踏まえ、意匠造形におけるデザイナーの意志決定プロセスのモデル化と、これに基づく形状特徴モデラを用いた形状モデリング環境の構築手法、さらには実際の形状デザイン業務への適用結果について述べる。

2. 家電製品の形状デザインにおける造形プロセスの分析

2・1 造形の役割 まず、実際の形状デザインプロセスを概観し、その中での造形プロセスの役割と位置付けを明確にする。

図1は家電製品などの民生機器の一般的な商品の形状デザインプロセスを示したものである。形状デザインプロセスの第一歩は商品企画案に基づいたデザインコンセプトの立案である。多くの場合このようなデザインコンセプトは、商品の形状イメージを端的に表すキーワードとして与えられる。

引き続いて図2に示すようなイメージスケッチが多数作製される。この作業はキーワードで与えられた抽象的な形状イメージを2次元の図形として表現することにより、造形ための方向性を探索するという役割を持っている。ここでは作製されたスケッチから、最終形状のイメージを把握するとともに、形状の基本となるフォルムのイメージ曲線が抽出される。

さらにこれらを基にしてデザインモックアップと呼ばれる形状見本が作製され、そのなかで最終的な形状が決定される。つまり、最終的なデザインモックアップが完成した時点では実質的な造形作業は終了している。このことから造形の役割とは、2次元的に表現さ

Fig.1 Shape design process for consumer electronics products

Fig.2 An example of conceptual sketch

れた形状イメージを実際の3次元の形状として具現化することであり、造形プロセスとはモックアップモデル製作プロセスのことであると考えることができる。

こうして最終的なデザインモックアップが完成した後、この造形結果を機構設計などの下流工程に伝達するために形状記述が行われる。これまでこの段階での形状記述には図面が用いられてきたが、前述のように最近ではこの段階での形状記述に3次元CADシステムが活用されるようになってきた。

しかしながらこうした活用形態では、造形工程に匹敵する作業量を要する形状モデリング工程が新たに必要となるという問題を抱えている。そのため本来的には、造形段階からの3次元CADの活用を図るべきであるが、緒言で述べたように3次元CADのモデリング環境がデザイナーの造形感覚と異なっているため実現するに至っておらず、商品開発プロセスの効率化にあたっての大きな課題となっている訳である。

2・2 切削法による造形プロセスの分析 前述のように、造形プロセスはデザインモックアップの製作という形態でおこなわれている。従って造形における意志決定プロセスをモデル化するためには、デザインモックアップモデルの製作プロセスを詳細に分析することが必要である。

デザインモックアップを作製する手段としては、粘土を用いる方法や加工性の良い材料を切削していく方法がある。家電製品のデザインでは後者の方法が広く用いられており切削法と呼ばれる場合もある。本報では後者についてそのプロセスを分析してみることにする。

切削法によるモックアップモデルの作成方法は、基本的にはアイデアスケッチから抽出されたイメージに従って大まかな曲線を発泡材料などの素材の上に描き、それをガイドとして図3のように材料を手で削りながらイメージ通りの形状を創出していくという作業の繰り返しである。切削法によるモックアップモデル作製プロセスは一見試行錯誤の繰り返しのように見えるが、実際には所望のイメージを得るための適切な切削手順や切削方法を絶えず考慮しながらプロセスが進められている。

図4は家庭用クリーナのモックアップ作製プロセスの一例である。ここでとりあげたクリーナの形状デザインは自動車のボンネットをイメージしたものであり、タイヤ位置とバランスがとれた輪郭形状や歪みのない上面のエッジラインを得ることなどが重要な造形の狙いとなっている。以下図に従ってその作製プロセスを説明する。

まず、イメージスケッチから抽出された外形の輪郭曲線を素材上に描き、それに従っておおまかな形を削

Fig.3 A cutting method in the mock-up process

りだす。(①-③) 次に上面・側面においてタイヤ中心位置での断面形状を決めた後、断面形状を変化させながら前後にスイープするように削って各々の面形状を形づくる。(④-⑤) さらに前面については、中央部での断面曲線を定め左右にスイープするように切削する。そして不要なエッジを適当に丸めることによりポイントとなる上面のエッジラインを浮かび上がらせる。(⑥-⑧)

図4に示したプロセスは大まかなものであり実際のプロセスはさらに複雑であるが、図に従って説明した各面の切削手順・断面曲線をスイープするといった切削方法・さらには断面曲線の形やスイープの方向などに関する決定が、効率よく所望の形状を得るための大きな要素となっている。また、これらの決定はデザイナーの過去の経験やノウハウなどに基づいて行われるため、個々のデザイナーによって作製プロセスが少しずつ異なっている。その結果、デザイナーの経験の差が意匠造形の結果や効率に反映されることになる。

ここで、さらにこれらの経験やノウハウの内容について考察してみる。デザイナーと形状についてディス

Fig.4 An example of design mock-up process

Fig.5 Determination process model

カッションを行うと、多くのデザイナーが造形された形状をその切削手順や方法を用いて説明するという事実がある。これを考慮するとデザイナーの造形に関する経験やノウハウとは、過去の造形結果をその切削手順や切削方法と結びつけた形で保持したものであり、デザイナーが新たな意匠造形を行う際にはこれらのノウハウと対比しながら最も適切な切削手順や切削方法を決定していると考えることができる。

このようにしてデザイナーの頭の中で切削手順や切削方法の決定が行われた後、実際に切削が実行され形状が創出される。この実際の切削作業は本質的には切削量の決定作業と考えることができ、経験やノウハウというよりはデザイナー個々の感覚や感性に頼って進められる試行錯誤的な作業である。しかしながら、前述のように切削手順や切削方法の選択が適切であると短期間で所望の形状が得られることになる。

このように、切削法による造形プロセスで意志決定される項目には、経験とノウハウに基いて決定されるものと試行錯誤的に決定されるものがあると考えることができる。

2・3 意志決定プロセスのモデル化 次に切削法による造形プロセスにおける意志決定プロセスのモデル化を考える。前述の分析結果によるとモックアッ

プ作製において切削手順・切削方法・切削量が確定するとモックアップモデルの形が確定する。従って、切削法による意匠造形プロセスは一種のモックアップモデルの加工工程とみなすことができ、加工者たるデザイナーはこれら3項目について意志決定を行っていると考えることができる。

図5にこうした観点から構築した意志決定プロセスモデルのイメージを示す。意志決定はまず切削手順と切削方法について行われる。これらの項目はイメージスケッチから得られた造形イメージを基に過去の経験やノウハウを参考にして決定される。ここで言うノウハウや経験とは、過去のデザイン事例に関連づけられた切削手順や切削方法のことである。引き続いて切削量の決定が行われる。意匠造形を加工工程と見なす立場からすると、切削量の決定は機械加工でいえば送り量のような切削パラメータ値の決定と考えることができる。この項目は試行錯誤的な形状操作を通じてデザイナーの感性によって決定される項目である。

このモデルの特徴は、意匠造形を一種の加工工程と見なすことにより意匠造形におけるデザイナーの意志決定項目を分かりやすい形で表現したことと、意匠造形におけるデザイナーのノウハウの実体についてもモデル化したことにある。

このモデルに基づく、造形のための形状モデリング環境は以下の要件を満たす必要がある。

- モデリングにあたっては、切削手順・切削方法・切削量について意志決定をすればよいこと。すなわち、切削手順・切削方法・切削量という入力によって形状操作が行えること。
- 切削量決定のための試行錯誤的な形状操作が容易に行えること。
- 切削手順、切削方法がモデリングされた形状に関連づけられて保存されること。

このモデル化によると緒言で述べた形状操作性の改善に関する研究^{(6)~(8)}はbの要件に該当する研究と考えることができる。

3. 形状特徴モデラを用いた形状デザイン向けモデリング環境の構築手法

3・1 形状特徴モデリング 前述のようなモデルを具体的に実現する方法としていわゆる形状特徴モデリングの手法を応用することが考えられる。形状特徴モデリングはよく知られているように穴や溝といった設計者やデザイナーにとって意味のある形状特徴に注目し、これを一つの形状操作単位とすることにより自然なモデリング環境を得ようとするものである。

Fig.6 An example of form feature based modeling

図6はLubyらが形状特徴モデラを用いてアルミの鋳造品をモデリングした例である¹⁰⁾。この例ではL型ブラケットと穴付きボスが形状特徴としてあらかじめ準備されており、ブラケットにボスを取り付けるといった手順でモデリングされている。さらには形状特徴を定義しているパラメータ値の変更によって形状を変更できるので試行錯誤も容易である。このように形状特徴モデラを用いると設計者にとって違和感の少ないモデリング環境を構築することが可能である。

こうした形状特徴モデリングにおいて設計者が決定すべきことは、以下の3点であると考えることができる。

- L型ブラケットに穴付きボスを取り付けるといった形状特徴の組み合わせ方
- L型ブラケットや穴付きボスといった形状特徴そのものの定義
- 形状特徴のパラメータ値

前述のように意匠造形における意志決定プロセスは切削手順・切削方法・切削量の決定というモデルで表現することが可能である。従って切削手順・切削方法・切削量をそれぞれ形状特徴の組み合わせ・形状特徴の定義・形状特徴のパラメータ値に対応づけることにより、形状デザインの造形における意志決定モデルに適合したモデリング環境の構築が期待できる。

以下の項では意匠造形における形状特徴の定義と構築すべきモデリング環境構成について述べ、モデリング環境の構築手法を具体化する。

3・2 造形プロセスに対応した形状特徴の定義

形状特徴モデリングを用いるためにはモデリング対象が形状特徴で完全に表現できることが必要である。従って、形状特徴モデリングを造形プロセスに適用するためには、モックアップモデル作製時の切削方法に対応した形状特徴を定義する必要がある。

モックアップ作製時の切削方法のパターンとしては、図4で示したように面の切削、エッジの丸め、穴

[Face cutting method]

[Face cutting feature]

Fig.7 An example of face cutting feature

Face cutting feature	Name	Operation method	Form of feature	Definition of features
type : cut				
form : profile sweep curve				
guide				
arc 1 R1 L1				
arc 2 R2 L2				
profile 1				
arc 1 R3 L3				
profile 2				
arc 1 R4 L4				

Fig.8 Representation of face cutting feature shown in Fig.7

あけなどがある。このうちエッジの丸めや穴あけなどについては、徐変フィレットや貫通穴といった通常の形状特徴モデラに標準的に定義されている形状特徴に対応させることができる。しかしながらモックアップ製作の主要部分を占める面切削については対応する形状特徴を定義した例は見られず、形状特徴モデリングを適用する際の重要な課題である。

面切削は図4で説明したように、切削断面の形状を想定し、ガイドカーブに沿ってスイープするように切削対象を削っていくといったものである。そこで今回は、複数の断面曲線とガイド曲線から定義される自由曲面を考え、それによって切削対象から削り取られた面に対応する形状特徴とした。さらに曲面を定義する断面曲線とガイド曲線は接線連続円弧で表現するものとした。これはパラメータ表現された形状特徴に対するデザイナーの形状認識性を考慮したものである。一般にこれらの定義曲線は自由曲線であると考えられる

が、接線連続円弧による表現でも円弧の数や接点位置を変えることによりかなりの自由度を持った曲線定義が可能である。また実際のモックアップ作製においても円弧定規をあてることによって曲線形状が評価されているので、こうした表現は妥当なものであるといえる。

図7はこうした考えに基づく形状特徴の例である。この例では形状特徴に対応する切削表面は、2本の接線連続円弧で構成されたガイドカーブと、スイープ開始と終了時の断面形状に相当する2本の単円弧のプロファイルカーブで定義されている。

図8はその内部表現の例である。形状特徴は内部的には、形状操作方法の記述部と形状特徴の形状定義部で構成されている。さらに形状定義部ではガイドカーブ及びプロファイルカーブはそれぞれ接線連続円弧と単円弧で定義され、これらの円弧は半径 R と弦長 L で定義されることが記述されている。一方、パラメータ値は後述のように別途記述する。

モックアップ作製時の面切削方法の決定に関する意志決定の本質は、スイープの断面曲線形状とガイド曲線形状の決定であると考えることができる。従ってプロファイルカーブの数及びプロファイルカーブ・ガイドカーブの形状（すなわち接線連続円弧の数）を形状特徴定義に関する入力項目とすることにより、切削方法決定のイメージに近いモデリング入力環境を得ることができる。

3. 3 形状モデリング環境の構成 形状特徴モデルは前述のような特徴的なモデリング機能を実現するために、数学的な形状表現手段(Geometric model)と形状特徴による形状表現手段(Form feature model)という2種類の形状表現手段を内部に持ち、モデリング作業者は形状特徴表現によって形状入力を行い、そのデータを基に数学的な形状記述データが自動的に生成される仕組みになっている¹²。この2つの形状表現に関して、前者を陽特徴表現後者を陰特徴表現と呼ぶこともある。

図9はこうした仕組みを利用した意匠造形向けの形状モデリングシステムの構成を示したものである。このシステムは陰特徴表現に相当する形状特徴モデルデータベース、陽特徴表現に相当する形状モデルデータベース、形状特徴モデルデータから形状モデルデータを自動生成する形状モデルジェネレータ、標準的な形状特徴を保存するための形状特徴ライブラリ、デザイナーが形状操作入力を行うための形状特徴エディタから構成されている。

ここで形状特徴モデルデータベース中の形状特徴の

Fig.9 System architecture

組み合わせについては形状特徴間のポイントと空間的な位置関係によって表現し、また、形状特徴の定義は図8で示した形式で記述するものとする。

本構成の特徴的な点は形状特徴モデルデータベースが形状特徴の組み合わせ、形状特徴のパラメータ定義、形状特徴パラメータの値の3つで構成されていることである。これは前述の意志決定モデルに対応した形でモデリングデータを保存するため、前述のlubyらのモデルなどではこのような明確な区別は見られない。

次にこのシステムを用いた場合のモデリングプロセスとシステムの内部動作について図7の形状を例にとって述べる。

- ①基本の形状となる直方体の形状特徴を形状特徴ライブラリから呼び出し形状特徴のパラメータ値を入力する。
- ②基本形状に対する切削手段として面切削の形状特徴を選択し基本形状に対する位置関係を入力する。
(切削手順の入力)
- ③プロファイルカーブ及びガイドカーブの入力を行い面切削の形状特徴を定義する。(切削方法の入力)
- ④形状特徴のパラメータ値を入力する。
(切削量の入力)
- ⑤以上の入力で形状特徴モデルデータベースへの記述が終了し、引き続き形状モデルジェネレータにより

Fig.10 A sample of shape creation

形状モデルデータが生成されディスプレイに形状が表示される。

- ⑥所望の形状と異なっていればパラメータ値を変化させ所望の形状に近づけていく。

(試行錯誤的形狀操作による切削量決定)

- ⑦最終の形状モデルに対して意志決定モデルに対応づけられた形状特徴モデルが存在しており、モデリングに伴うノウハウ経験が客観的に保持されている。

このように本構成によれば、形状デザインにおける造形に利用するための要件を満たしたモデリング構築が可能となる。

また、形状特徴モデラは図6のような機械加工部品のモデリングにもっぱら適用されてきた。しかしながら前述のように意匠造形を一種のモデル加工工程と見なすことが可能になったことと、面切削に対応した形状特徴を定義したので、従来適用がなされていなかった形状デザイン工程に対しても、形状特徴モデリングの適用が可能となった。

4. 意匠造形業務への適用結果

形状特徴モデラを備えている市販の3次元CADシステムを用いて前述のモデリング環境を構築し、実際の形状デザイン業務への適用を試みた。

図10はモデリング結果の一例である。このモデリングは造形プロセスとして行われたものであり、図に示す形状はデザイナーによるCAD上でのモデリングを通じて創出されたものである。

このように、今回構築した形状モデリング環境が形状デザイン業務に実用的なレベルで利用でき、商品開発の効率化に効果が得られることが実証された。また今回構築した形状モデリング支援環境に対してモデリングを担当したデザイナーは、従来の3次元CADシステムに比べて、形状モデリングの方針を立てやすいため造形プロセスに利用することができたという評価

を下している。これは、今回構築した意志決定モデルとそれに基づくモデリング環境が妥当なものであったことを意味している。

今後の課題としては、ディスプレイの画像ではなお完全には形状確認が難しいという場合があるという点と、複雑なエッジのぼかし部分は、今回利用した徐変フィレットを用いた形状特徴だけでは完全に表現できなかったという点があげられる。

前者については3次元ディスプレイなどバーチャルリアリティ的な技術の導入、後者については自由曲面の接続といった形状処理技術の導入を検討していく必要があると考えられる。

5. 結言

今回の研究により以下の知見が得られた。

- ①意匠造形を一種の加工工程とみなすことにより、意匠造形における意志決定プロセスを切削手順、切削方法、切削量の決定プロセスとしてモデル化できることを示した。
- ②併せて、切削手順・切削方法の決定に関するデザイナーの経験、ノウハウの保持形態についても明らかにし客観性を持つ情報として保持蓄積活用できる可能性を示した。
- ③形状特徴モデリングの手法を利用する事によって①のモデルに基づいた意匠造形支援環境の構築が可能であることを示し、実際の環境構築を通じてその有効性を実証した。

最後に、本研究の実施にあたって多大な協力をいただいた、三洋電機株式会社回転機事業部の関係各位に謝意を表す。

文 献

- (1) K.J.Versprille, Computer-aided design applications of rational B-spline approximation form, Ph.D Thesis Syracuse Univ., (1975)
- (2) 井上, 自動車のスタイリングデザインにおけるCADD S活用事例, 第13回全国CADD Sユーザミーティング資料, (1991), 13・24
- (3) 山元, カメラボディ3次元曲面デザイン・設計への適用, IBM C A T I A適用事例集, (1990) 54・60, 日刊工業新聞社
- (4) 金井, モデル設計用CADの高機能化, 精密工学会誌, 59-7, (1993), 1066・1068
- (5) 山下・福井, 曲線・曲面の直接操作, 情報処理学会CGシンポジウム'92講演論文集, (1992), 77・83

- (6) 村上, 3次元形状デザインのための直感的インターフェースの構想, 機講論, No.930-9, (1993-3), 596-598
 - (7) 大富・亀山, 直接的設計手法の提案とその一実現方法, 機講論, No.930-9, (1993-3), 581-583
 - (8) 渡辺・犬丸・森・杉山, ファジイ推論による腕時計の形態要素抽出支援システムの開発, デザイン学研究, No.87, (1991), 131
 - (9) 前田・中山・古館, 家電製品デザインにおけるフィーチャーベースパラメトリックCADの応用, 機講論, No., (1992-12), 154-157
 - (10) 中山・前田・古館, デザイナーの造形プロセスを支援する3次元CADシステム, 機講論, No.930-9, (1993-3), 569-571
 - (11) S.C.Luby・D.R.Dixon・M.K.Simmons, Design with features: Creating and using a features data base for evaluation of manufacturability of Castings, ASEM Computers in Engineering, (1986), 285-292
 - (12) 鈴木, プロダクトモデリングとインテリジェントCAD, インテリジェントCAD(下), (1991), 7-30, 朝倉書店
-