

システム技術開査研究－2(2)

高付加価値意匠デザインのための 3次元形状
モデリングに関する調査研究報告書

平成 10 年 3 月

財団法人 械 シ ス テ ム 振 興 協 会
委託先 財団法人マルチメディアコンテンツ振興協会

目次

<調査研究概要>

I.	調査研究の目的.	I-1
II.	調査研究の実施体制.	II-1
III.	調査研究成果の要約.	III-1
III.1	形状創成のための3次元CADの機能と課題の調査検討. . .	III-1
III.2	企業における3次元CADの活用と課題および要望の調査検討.	III-4
III.3	3次元形状モデリングの技術的動向に関する調査検討. . .	III-9
III.4	CADシステムの現状・課題と今後の検討事項.	III-11

<本編>

第1章 研究概要

1.1	研究の目的.	
1.2	CADシステムの現状と課題.	
1.3	デザインプロセスと高付加価値の領域.	
1.4	まとめと課題.	

第2章 3次元CADシステムの現状

2.1	3次元CADシステムの製品動向.	
2.2	形状生成のための機能と課題.	

第3章 企業における3次元CADの活用と課題

3.1	(株)GKテックにおける例.	
3.2	ソニー(株)における例.	
3.3	日産自動車(株)における例.	
3.4	(株)日立製作所における例.	
3.5	富士通(株)における例.	
3.6	三菱電機(株)における例.	

第4章 3次元形状モデリングの技術的動向

- 4.1 形状モデリングの技術的動向.
- 4.2 形状入力の研究動向.
- 4.3 発想支援と3次元CADシステム.
- 4.4 3次元形状モデリングに関する文献.

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、都市、防災、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、通商産業省のご指導のもとにシステム技術開発調査研究事業、システム開発事業、新機械システム普及促進事業等を実施しております。

このうちシステム技術開発調査研究事業及び、システム開発事業については、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 東京大学教授 中島 尚正氏）を設置し、同委員会のご指導のもとに推進しております。

本「マルチメディアコンテンツの権利処理集中管理システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人マルチメディアコンテンツ振興協会に委託し、実施した成果をまとめたもので、関係諸分野の皆様方のお役に立てば幸いです。

平成 10 年 3 月

財団法人 機械システム振興協会

総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	東京大学 大学院工学系研究科 教授	中島 尚正
委員	政策研究大学院大学 政策研究プロジェクトセンター 教授	藤正 巖
委員	東京大学 大学院工学系研究科 教授	月尾 嘉男
委員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣田 薫
委員	東京大学 大学院工学系研究科 助教授	藤岡 健彦
委員	通商産業省工業技術院 機械技術研究所 企画室長	濱 純
委員	通商産業省工業技術院 電子技術総合研究所 企画室長	大和田野 芳郎

はじめに

本調査研究報告書は、財団法人マルチメディアコンテンツ振興協会が平成 9 年度事業として、財団法人機械システム振興協会から受託した「高付加価値意匠デザインのための 3 次元形状モデリングに関する調査研究」の成果をまとめたものです。

近年、CG（コンピューター・グラフィックス）/CAD（コンピューター・エディット・デザイン）技術は、高度情報社会の基盤技術として重要性を増しています。

成熟工業社会においては、機能に加えて意匠デザインが工業製品の付加価値を決定的に規定します。

そのため、自動車産業などを中心として美しい曲面のデザインを支援する CAD システムはよく普及しており、実用的に不可欠の道具となっています。

本調査研究は、今までの延長的なテーマではなく、先導的意匠デザインの構築のために意匠デザイナーやアーティストの要求を明らかにし、デザイナーの発想支援に有効な方式と理論を開発することを目標としています。

本調査研究報告書では、3 次元形状モデリングと意匠デザインの調査研究と意匠デザイナーの CAD、モデリングに関する要求を整理した結果を述べています。

本調査研究で得られた成果をもとに、幅広い分野の方々が参加して、「高付加価値意匠デザインのための 3 次元形状モデリング」の研究開発活動が深まり、利用応用分野の拡大が進むことになれば幸いです。

最後に 1 年間にわたり調査研究を進めてくださった委員長、副委員長、各委員として参加いただいた各位、各方面でご協力いただいた関係者各位に深く感謝の意を表します。ご指導とご支援をいただいた通商産業省機械情報産業局情報処理システム課の各位に厚くお礼を申し上げます。

平成 10 年 3 月

財団法人マルチメディアコンテンツ振興協会

I. 調査研究の目的

成熟工業社会においては、機能に加えて意匠デザインが工業製品の付加価値を決定的に規定する。

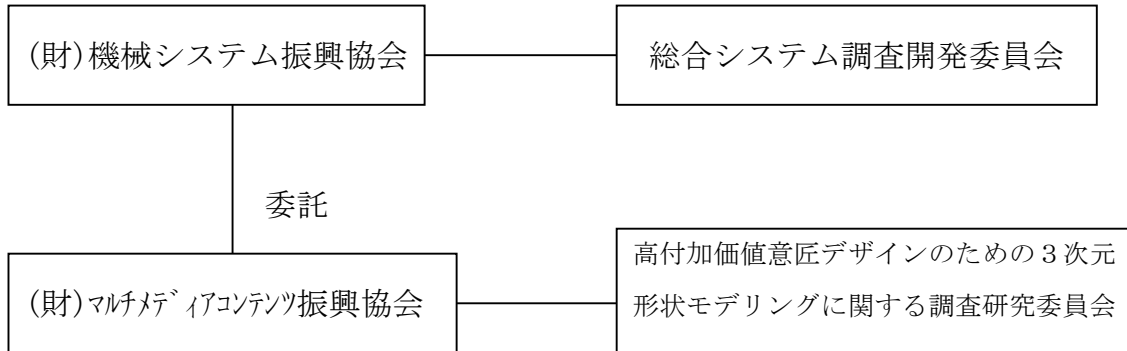
本調査研究では、先導的意匠デザインシステムの構築のために意匠デザイナーやアーティストの要求を明らかにし、デザイナーの発想支援に有効な方式と理論を開発することを目標としている。

本調査研究で目標とする内容は以下のとおりである。

- (1) ・製品や計算機の技術ではなく、意匠デザイナーやアーティストの真の要求を明らかにする。
 - ・単なる形状モデリングではなく「デザイナーの発想支援」に有効な方式と理論を迫及する。
 - ・単なる「お絵描きツール」ではなく、高品質工業製品としての評価に耐える曲面モデリングを目標とする。
 - ・急速に発展している CAD/CAM、コンピュータ・グラフィックスやネットワークの開発成果を十分に活用し、それらをプラットフォームとして「意匠デザイン」に特化して、実用性の高い調査研究を行う。
 - ・調査研究の成果をもとに、直ちにシステム開発を提案できることを目標とする。
- (2) 意匠デザインのための 3次元形状モデリングの現状調査
- (3) 意匠デザインが要求する 3次元形状モデリングの検討
- (4) 高付加価値意匠デザインのための形状創成理論の検討
- (5) 高付加価値意匠デザイン支援システムの提案
- (6) 本調査研究は、「意匠デザイン」を主題として、計算機基礎技術 (OS, Hardware)、CAD/CAM、コンピュータ・グラフィックスやネットワークなどの技術を横断的に統合しようとするものであり、新しい産業分野の創出に貢献できるという特徴を持っている。このような研究開発は、アメリカを中心として、全世界的に激しい技術競争が展開されているが、我が国は、依然として製品の基礎的な製造技術に優れており、これを基礎に、マルチメディア技術や意匠デザイン技術を統合すれば、世界にひけをとらない「高付加価値意匠デザイン」力を維持できるものと期待される。

II. 調査研究の実施体制

本調査研究は、以下の実施体制で行なった。



本調査研究の実施にあたり、(財)マルチメディアコンテンツ振興協会内に「高付加価値意匠デザインのための3次元形状モデリングに関する調査研究委員会」を設置した。

本調査研究は上記委員会の指導のもとに具体的業務を遂行し、調査研究成果を報告書としてまとめた。委員会の名簿を次に示す。

高付加価値意匠デザインのための3次元形状モデリングに関する調査研究委員会名簿（五十音順・敬称略）

委員長	木村 文彦	東京大学大学院工学系研究科教授
副委員長	近藤 邦雄	埼玉大学大学院工学系研究科助教授
委員	渡辺 誠	千葉大学工学部工業意匠学科助教授
	青木 潔	(株)エヌ・ケー・エクサ デザインスピナーカーセンター
	岩政 隆一	(株)GK テック
	小池 純一	富士通(株) 総合デザイン研究所 インダストリアル研究部
	高橋 靖	ソニー(株) クリエイティブセンター
	田島 進	日経 BP 社 日経 CG 編集
	原 正樹	三菱電機(株) デザイン研究所開発企画グループ 研究企画 Gr.
	矢島 章夫	(株)日立製作所 デザイン研究所

	若森 真一	日産自動車(株) テクニカルセンターデザイン本部 デザイン計画課
オブザーバ	高木 一彰	通商産業省機械情報産業局情報処理システム開発課
	八木 一男	(財)機械システム振興協会 調査開発部
	伊藤比呂行	ファモティク(株)プロジェクトエンジニアリング部
研究協力者	徐 崢	埼玉大学理工学研究科博士後期課程近藤研究室
	松田 浩一	埼玉大学理工学研究科博士後期課程近藤研究室
	小森 望	埼玉大学理工学研究科博士前期課程近藤研究室
	三浦 貴宏	埼玉大学理工学研究科博士前期課程近藤研究室
	紀伊国奈々	埼玉大学工学部情報システム工学科近藤研究室
事務局	青柳 裕文	(財)マルチメディアコンテンツ振興協会研究開発部
	増井 久之	(財)マルチメディアコンテンツ振興協会研究開発部
	大山 由美	(財)マルチメディアコンテンツ振興協会研究開発部

Ⅲ. 調査研究成果要約

本調査研究では、以下の4点を行った。

- (1) 3次元CADシステムの調査を行い、形状創成のための機能と課題についてまとめた。
- (2) 企業における3次元CADの活用と課題を調べ、CADへの要望をまとめた。
- (3) 3次元形状モデリングの技術的動向を調べ、課題をまとめた。
- (4) CADシステムの現状と取り組むべき課題を整理し、今後の検討事項を提案した。

Ⅲ.1 形状創成のための3次元CADの機能と課題の調査検討

Ⅲ.1.1 3次元CADシステムの現状

現状の3次元CADシステムは価格帯から3種類に分類できる。まず、最もコストの高いハイエンド3次元CADシステム（統合型3次元CADシステム）は、大規模アセンブリ製品を迅速に設計、評価、製造することを目的に開発されているため、さまざまな解析・評価機能を有する。投資規模は数百万から数億となるが、教育・メンテナンス・コンサルティングなどがフルセットでサポートされるメリットがある。

そして、ハイエンドシステム的设计機能部分だけを抜き出し、安価なパソコンで運用できるようにしたシステムがミッドレンジ3次元CADである。百万前

CADに必要な機能はハイエンドCADと遜色ない機能を備えている。しかし、ミッドレンジ3次元CADは、部品設計機能は優秀でも、後工程に必要な解析機能やCAMとの連携機能が弱いため、データの再利用が進まず導入に踏み切ることが難しい。

低価格3次元CADは数万円から数十万程度であり、導入に対してあまり抵抗がない。低価格3次元CADでは高度なモデリング機能を省略したものが多い反面、機能が限定され、比較的操作を覚えやすい。また、単純な形状の部品設計や意匠設計に限定した使い方もされている。

Ⅲ. 1. 2 ソリッドモデラによる形状生成手法

ソリッドモデルで形状を生成する手法として、フィーチャベース・モデリングとパラメトリック変形による手法が挙げられる。フィーチャとは意味を持つ形状のまとまりであり、サイズや形状の属性を形状情報としてもたせることにより、複雑な部品形状を修正するときに、影響するすべての寸法を自動的に変更することが可能となる。また、パラメトリック変形は、上記のフィーチャの寸法・位置属性をパラメータとしてユーザが変更可能にする手法である。このパラメータ変更により影響を受けるすべてのフィーチャのパラメータを、システムは自動的に矛盾のないように変更する。

Ⅲ. 1. 3 ソリッドモデラによる形状生成の問題点

フィーチャベース／パラメトリック変形機能をもつソリッドモデラの利用の際には、形状変更作業を投影画面上で直接行うことが不可能である。したがって、モデル形状を変更する場合には、フィーチャの再定義・パラメータの再入力が必要とされる。部分的な修正を行う場合には、これまで定義されてきた全ての手順をさかのぼって定義し直さなければならない。したがって、一般には設計製造プロセスの後工程ではフィレットや抜き勾配を考慮し後工程の技術者がモデルデータを修正するが、そのモデル修正が困難となっている。

Ⅲ. 1. 4 3次元 CAD をデザインプロセスに利用する上での問題点

フィーチャベース／パラメトリック変形機能をもつソリッドモデラの利用の際には、作図の初期段階から幾何学的な厳密性が要求される。したがって、これらのシステムを利用するには形状が完成されていなければならない。デザイン初期段階での利用には適していない。また、現存の3次元 CAD のモデリングインタフェースは製造プロセス全般のさまざまな要求に応えられるように非常に多くの機能を有するが、それらが理解を困難にする要因ともなる。逆にデザインプロセスに最適化したモデリングツールを開発したとしても、それを視覚シミュレーションするだけであれば、市販の3次元 CG ソフトを利用すれば事足りる。デザインモデルを元に試作品を迅速に生成でき、機構解析シミュレーション1度できあがったものから可逆的に自由な変形・修正が可能、のである。

Ⅲ. 1. 5 次世代 3 次元 CAD に要求される課題

3次元 CAD に必要とされることは、モデルデータを設計製造プロセス全体で共有できる統合型 CAD の思想である。しかしながら、現存の統合型システムでは、前述の通り後工程でのモデル修正が困難になっていることは否めない。したがって現実問題として、次世代 3 次元 CAD システムは、既存のソリッドベースの 3 次元 CAD システムと自由なデータ交換機能を持つシステムでなければならない。現状では市販されている 3 次元 CAD システムが独自の 3 次元データ構造を持っており、ソリッドモデルのユニバーサルなデータ交換は極めて困難な技術的・コスト的課題を抱えている。

Ⅲ.2 企業における3次元CADの活用と課題および要望の調査 検討

Ⅲ.2.1 (株) GK テックにおける例の要旨

プロダクトデザインの領域で利用される3次元ソフトは簡易的に利用されるだけであり、デザイン業務全体に普及するには至っていない。その理由として、(1)使用方法の理解が容易でない、(2)システムそのものの大きさの問題、(3)導入費用の問題、が挙げられる。これらの要素が満たされた2次元Desk Top Publishing (DTP)環境は、ユーザの広がりにより仲間のネットワークが築かれ、ノウハウの共有などにより普及を促すこととなった。さらに、3次元CADにおいては前述の理由の他に、定番プラットフォームがないことも普及を妨げる理由の1つである。これは創成する製品によって適したソフトが異なることがその要因となっている。

また、3次元CADが使いにくいとされる要因として、現状の3次元CADが扱う世界は、抽象的な概念の世界でしかないことも挙げられる。デザイナーが当たり前前と考える、(1)不干渉の法則(材料の界面は保持され、貫通することはない)、(2)材料の重量不変の法則、(3)材料の体積・表面積一定の法則(近似)、(4)線長一定の法則(近似)、といった、現実世界では当たり前の世界観が実現されていないため、初心者が利用に戸惑うことになるのである。日常の体感を重要視するデザイナーがこのような世界観を押し付けられて、計算機の都合にわざわざ合わせて感覚を損なっているのではないだろうか。したがって、現存の3次元CADの入力インターフェースには、本来実世界ではあるべき拘束条件が存在せず、自由度がありすぎ制御できないことに根源的な理由があると言えるだろう。次世代3次元CADが必要としている入力インターフェースには、日常感覚とギャップの少ない入力インターフェースが期待される。以上のことから次世代CADの実現のためには、(1)物理モデルを考慮した共通プラットフォームの確立、(2)加工法も含めた素材の流通、(3)多数ユーザへの普及を促す、個人所有可能なCADの開発、が期待される。

Ⅲ.2.2 ソニー(株)における例の要旨

現在、デザインプロセスの下流において用いている。2次元。2次元ADけるや3次元モデリングCADは、造形の作り込みツールとしてデザインを支援すると共に、そのアウトプットを図面データやNC切削モックアップで設計者に伝

えたり関係者にプレゼンテーションしたりするためのコミュニケーション手段、そして、その3次元データを金型加工に活かすデータアプリケーションとして利用されている。

デザインの発想は、要求仕様からデザイン形状を生み出す飛躍の作業である。その飛躍を媒介するのがスケッチなどの視覚媒体であり、デザイナーの機能概念と実体概念の往復作用を促進する。しかしながら、デザイナーの持つハードウェア・ソフトウェアには互換性がなく、操作性・精度も異なるため、表現の往復作業を素早く行うことができず、発想段階の道具としては不十分である。したがって、要望する次世代CADシステムは、以下の3つの要素から構成されると考えられる。

- (1) イメージ・図面・3次元が自由に行き来できるシームレスな、マルチ・モーダル統合型デザインCAD
- (2) 発想刺激イメージ・アクセラレータ、形状バリエーション自動生成といった、発想支援を行うインテリジェントな機能
- (3) 異なるプラットフォームで同様の作業が可能であったり、異種CADとの完全データ互換を保證するようなハードウェア・ソフトウェアの開発

そして、上記の要素を反映したシステムを構築することにより、おおまかなイメージを素早く3次元形状としてモデリングでき、その3次元形状を用いてシミュレーションを行うなど、インタラクティブな操作による挙動チェックを1つのシステム上で手軽に行き来することが可能となる。

Ⅲ. 2.3 日産自動車における例の要旨

CADを業務に適用した場合、長所として、形状の微妙な変化の作り込みが可能、曲線・曲面の評価が定量的に可能、意匠形状の正確な表現が可能であることが挙げられる。さらに、デザイン初期の発想段階において、クレイモデルやスケッチの代わりにCADやCGが用いられるようになってきた。その理由として、発想段階で立体としての検証や試行錯誤を行いたいスケッチだけでは検討が十分にできず、スケールモデルで検討する場合にはスケッチほど容易に試行錯誤が不可能であることが挙げられる。しかしながら、実際のCAD利用においては以下のような問題点がある。(1) 全体の形の構成や組み立て順序を考え、それに従って要素毎に曲線・曲面を作成しなければならない、(2) 試行錯誤を繰り返してデザインを発展させるためには多くの手間を必要とし、あいまいな部分を残すことができない、(3) すでにある形状の再利用が困難。

しかしながら、自動車デザインにおいては、デザイナーとモデラーが共同で作

業を行っており、今後も、発想から基本立体の定義はデザイナーが、その後の形の作り込みはモデラーが行うなどの役割分担は変わらず、それぞれに利用する CAD が特化していく可能性がある。

そこで、デザイナーの利用する CAD として以下のような提案を行う。(1) デザイナー自身がスケッチ並みな手軽さで扱える、(2) スケッチと立体との行き来が容易に行える、(3) 立体構成要素ごとに曲線・曲面分割せずに、かたまりベースのモデリングが可能、(4) 1 度できあがったものから可逆的に自由な変形・修正が可能、(5) CAD 間における完全データ互換性を持つ。さらに、自動車デザインにおいては微妙な線・面の変化が重要であるためフルサイズモデルを作ることが不可欠であり、また、室内空間全体もデザインする必要がある。それらすべてを CAD により実現するには、高度な VR によるシミュレーションが必要となる。

Ⅲ. 2. 4 (株) 日立製作所における例の要旨

家電製品のデザインは自動車デザインと異なり、開発サイクルが短く、多品種を一人のデザイナーが担当するなどの理由により、CAD の専任モデラを置くことが困難となっている。さらにデザイナーにとっては、下流工程の代替入力になるような単純作業をデザインプロセスの一部に組み込むことに対する拒絶感がある。したがって、3 次元 CAD の利用法は、形状概略という意味での、見た目の評価であり、スケール感・ボリューム感・操作性についてはモックアップを利用している。

3 次元 CAD 導入に消極的な理由は、現在の CAD システムが形状の作り込みにしか利用できないこと、また、個人個人の形状生成アプローチが異なり、CAD システムが提供するコマンド群がデザイン意図を忠実に表現するとは限らないことが要因である。そして、多種多様な工業製品を開発するためには、3 次元 CAD に求められる要件も異なってくると考えらる。る

上記の理由から現状 CAD への要望は以下の通りである。(1) デザイン意図に沿った多様な形状入力手法、(2) 下流工程とのインタフェースを独立化できる形状モデリング、(3) 非専門オペレータでも従来デバイスと同等の分かりやすい入力コマンド・装置・ユーザインタフェース、(4) 造形力支援タイプの形状提案型 CAD、(5) 画像・図面・仕様書等を融合し、デザイン意図を提案する発想支援 CAD。

Ⅲ. 2.5 富士通（株）における例の要旨

従来のデザインプロセスでは2次元CADを用いていたが、設計・製造の合理化と開発期間の短縮を目的として、3次元CADシステムの利用が必要となってきた。しかしながら、デザイナーにとっては、形状データの入力やシステムの操作といった、意匠デザインとは別の特別な技能を要求されることとなり、3次元CADシステムを利用する際の大きな障壁となっている。また、意匠デザインの初期段階ではCADの利用はほとんど実績がなく、ラフスケッチからイメージを具体化し、プレゼンテーションを行うためのレンダリング用CADを用いる程度である。しかし、モックアップを作成する段階ではCADデータを用いたNC加工が徐々に増加しつつあり、デザイン初期での電子化イメージ創成が必要となりつつある。

パソコンをはじめとする個人向け情報通信機器は技術の進歩が非常に早く、新製品の市場投入サイクルは他の分野に比べても短い。このような分野でのプロダクトデザインでは、短期間での質の高いデザインが要求される。形状創成段階においてCADが活用可能となれば前述の要求に応えるための大きな手段となると考えられるが、現状では、デザイナーの要求に応え得る、ストレスなく利用できる操作性を持つシステムが存在しない。したがって、次世代3次元CADシステムには、性能の高さや機能の豊富さよりも使いやすさに重点をおいたシステムが期待される。そのためには、高度な形状データベースと知識データベースを有機的に結び付けることのできるアルゴリズムと、誰でもストレスなく使えるインタフェースが必要である。

Ⅲ. 2.6 三菱電機（株）における例の要旨

CAD利用の背景として、（1）海外のOEM先、OEM元との商談において3次元データによるコミュニケーションが増加しつつある、（2）デザインのトレンドとして3次元曲面を多用した形状が多くなり、2次元の図面だけでは形状を伝えるには情報不足、（3）製品競争力を高めるための、開発期間の短縮化・コスト低減が必須、であることが挙げられる。比較的精度の高い曲面定義の可能なソリッドモデラの登場によりデザイン部門の3次元CAD化はより一層加速することとなった。

しかしながら、現状の3次元CADは、設計条件のあいまいな意匠デザインの段階にデザイナーが利用するレベルに達していない。CADシステムに必要な機能は、設計変更に対する柔軟性であり、試行錯誤が容易でないシステムは、デ

ザイナーにとって単に決定形状の3次元化を強いるシステムとなる。

以上のことから次世代CADに期待される機能は、（1）厳密な精度の寸法定義を必要としない、あいまいさへの対応、（2）設計変更に対し柔軟に対応し、試行錯誤が容易、（3）部門間における3次元データの共有、一元性が保証されること、といった要素を実現したシステムである。

Ⅲ.3 3次元形状モデリングの技術的動向に関する調査検討

3次元形状を扱うためには、立体形状の表現手法およびその入力手法の双方の技術が必要である。以下はそれらの手法についての研究動向について過去五年間のCAD関係の論文を調査し、まとめた結果である。

Ⅲ.3.1 形状モデリングの研究動向

形状モデリングにおける研究を調査し、(1)式による曲線・曲面の生成、(2)パッチとメッシュによる曲面の生成、(3)曲線・曲面の性質、(4)曲線・曲面の変形、(5)形状特徴とモデリング、(6)その他の6つに分類した。この分野では、曲面の高精度な表現を可能にする手法、汎用性が高く頑強なデータ構造が求められている。

(1) 式による曲線・曲面の生成では、曲線・曲面に対し連続性・滑らかさを保ちながら局所制御を行う研究が多い。従来のB-Spline表現の補間曲線では、連続性と補間の性質を保ちながら意図した形状にするための全体的・部分的な修正が困難であったからである。特に局所制御は、微妙なデザイナーの意図を反映するような曲線・曲面形状の制御に必要な技術である。また、立体生成アプローチとしてスイープを用いた立体生成の研究も多数されており、回転体同士の融合も試みられている。

(2) パッチとメッシュによる曲面の生成においては、Bezierパッチを用いて曲面生成を行う研究が多く見られた。パッチ・メッシュデータから滑らかな近似曲面を求めることが目的であり、パッチは三角形に限らず、不規則メッシュを補間する曲面生成についても研究が行われている。

(3) 曲線・曲面の性質では、局所性をもつ連続な補間曲線が存在する最小条件、曲面間が連続であるための必要十分条件などに関する研究が行われている。

(4) 曲線・曲面の変形では、ハイライトラインを用いた変形操作、自由曲面上の曲線の変形による曲面変形操作に関する研究が行われている。曲線変形による曲面操作により操作性の向上を図ってはいるものの、この分野の研究における変形操作手法は制御点やパラメータの変更によるものである。

(5) 形状特徴モデリングにおいては、フィーチャーの持つ位相・属性を簡潔に表したり、位相矛盾の解決を行うためのデータ構造が提案されている。これらは単に形状特徴を現す段階から実用段階以降のための技術が中心となっている。具体的には、既存立体から部分形状を取り出し新規形状とするための技術や、フィーチャー同士の演算時に発生する境界面における計算誤差による位相

矛盾を解決する手法が提案されている。

(6) その他では、形状を塊としてとらえ、形状内部の電荷モデルの状態により操作する研究、曲線・曲面間の干渉問題、数値誤差問題などに関する論文が見受けられた。

Ⅲ. 3. 2 形状入力の研究動向

形状入力における研究は、(1) スケッチによる形状入力、(2) 3次元空間における形状入力、(3) 三面図からの形状入力、(4) 実モデルを用いた形状入力に分類できる。特に、スケッチを用いた形状入力と3次元空間における形状入力はハード・ソフトの両面から研究が盛んであり、今後の動向が注目される。

(1) スケッチによる形状入力では、ペンベースインタフェースの研究が中心となっている。デザイナーの描いた単線によるスケッチをどのように理解し、また、それを幾何図形・3次元モデルへ変換するかが焦点となっている。これらの論文では、あいまいな手書きスケッチからどのように3次元モデルを生成するか論点が集中しており、修正法について述べられている論文はほとんどない。この修正法の確立が、デザイナーの試行錯誤を実現する手法として期待できる。

(2) 3次元空間における形状入力では、パッチレベルでの形状操作の研究が主である。3次元空間における位置を認識させるために投影面を利用したり、概観形状からの自動パッチ生成をする研究が見られる。また、現在では3次元入力デバイスの研究も盛んであり、VRの分野で研究が進められているフォースフィードバックデバイスを用いた3次元形状入力の研究も行われている。

(3) 三面図からの入力手法では、2次曲面を含んだ三面図からの復元、2次元データと3次元データの間データ構造による2D-3D変換に有効な手法などが提案されている。

(4) 実モデルを用いた形状入力においては、ハードウェアを用いた手法の提案が多数されている。形状決定において重要な役割を果たすクレイモデルをデザイン評価した後、改めて実体モデルとして計測装置を用いて座標入力を行うために利用される。デバイスとしては接触型3次元計測装置・非接触型計測装置があり、また、立体視を用いた3次元形状入力、複数枚の写真からの立体生成手法なども提案されている。

Ⅲ.4 CAD システムの現状・課題と今後の検討事項

工業製品などの製品デザインにおいて、CAD/CAM システムの利用が広まっているが、現存の CAD/CAM システムは技術者の発想により作られたインタフェースが提供されるため、デザイナー側から必要とされるとは言い難い。また、現存の CAD/CAM システムは、上記の理由から発想支援よりも、立体生成に主眼を置いていることもその理由である。

そこで、本研究においての高付加価値 3次元モデリングを 2種類の支援形態に分類し、その柱とする。1つ目は、スケッチのプロセスにおける高付加価値であり、思考を発散させる創造型の支援である。この型の支援では、デザイナー思考展開のプロセスをモデルとして扱うことにより、未知の形状を探索するシステムとする。その際には、デザイナーの思考のモデル化、デザイナーの個人的資質のデータベース化、形状創成を促進する知的なシステムといったテーマを検討する必要がある。また、2つ目は、レンダリングした形状をデザイナーの意図する形をもとに、データとしてきれいに作成してくれる、代行型の支援システムである。このシステムにおいては、デザイナーのノウハウのデータベース化、理解しやすい入力インタフェース、モデルの構成要素のデータベース化、といったテーマがある。前者、後者いずれの型においても、デザイナーの思考・知識を明らかにすることが必要である。

そのために、本研究では 2章において、意匠デザインのための 3次元モデリングの現状調査により既存システムの調査を行い、3章においては、現状技術の整理・体系化を行った。また、4章においては、意匠デザイナーが要求する 3次元形状モデリングの検討のために、デザイナーが理想とするデザイン支援環境についてベンダ・ユーザへのアンケートを行い、次世代 3次元 CAD についての要求をまとめた。

今後さらに、以下のような方向に向けて検討を進めることが課題である。

- (1) プロトタイプの要求機能案の検討
- (2) 高付加価値形状デザインのための形状創成理論の検討
- (3) モデリング機能検証のためのプロトタイプング
- (4) 高付加価値意匠デザイン支援システムの提案
- (5) システム開発の試行によるフィージビリティスタディ

また、プロトタイプには、デザイナーが頭に浮かんだ形状のアイデアを直接入力してモデル化できるような、形状創成の初期段階を支援できる機能が要求される。このプロトタイプにより作られた形状のモデルは、詳細設計に適した既存の CAD への入力となる。

1.3 デザインプロセスと高付加価値の領域

1.3.1 高付加価値モデリングの範囲

一般にデザインプロセスは、「コンセプト（デザインコンセプト）の作成」「スケッチによるアイデア展開」「レンダリングによるデザイン案の決定」「試作の為のモデル図面の作成」「モデルの試作」の5つのプロセスにわけられ、これに「設計部門への業務引継のためのデータ作成とフォロー」を加え6つのプロセスと考えることができる。もちろん業種・メーカーなどによって異なることや、より細分化したプロセスとして、逆に大まかなプロセスとして考えることはできるが、ここでは、この6つのプロセスを前提として高付加価値3次元モデリングの範囲がどのプロセスに該当するか考えてみることにする。

現在の3次元モデリングが対象とする範囲は、図-1.3-01に示すように、レンダリングが終了しデザイン案が決定した後のプロセスに適応される。すなわち、デザインがほぼ決定したプロセスから適応されることになる。この現状の適応範囲における高付加価値は、システムの操作性の向上などに代表される付加価値が種に要求される。しかし、デザインにおける高付加価値3次元モデリングとして望まれるものは、この現状のシステムに対する付加だけではなく、デザインを思考展開する上での支援となるシステムである。すなわち、図-1.3-01の高付加価値範囲に示したように、デザインプロセスの上流における支援となる。したがって、本委員会での範囲は、現状の3次元モデルが適応される範囲とその上流のデザインの思考展開する部分を合わせた範囲を対象とする。

ここで、3次元モデリングに限らずデザインを支援するための研究について概観すると、図-1.3-01の右下のように、デザインの全てのプロセスを対象としていることがわかる。このうち、1985年頃から始まったデザインにおけるエキスパートシステムの支援は、図右上に示すように、デザインプロセスに対応して段階的に考えられたものと、あるプロセスを省略したものとの2つに分類できる。この違いは、前者が意志決定をデザイナーに委ねたものであるのに対して、後者は意志決定までも支援するものである（これらについては詳しくは第2章、第3章の動向調査を参照）。

では、本委員会の対象とする高付加価値3次元モデリングの支援はどのようなものか。従来の支援システムで考えられて行った支援とは全く立場が異なるとは考えにくい。むしろ、従来考えられていた支援において、それらを3次元で表現することで飛躍的に進化すると考えられる部分が対象となるのではない

だろうか。ただ、3次元化というビジュアルライゼーションだけではなく、3次元で考えるという付加価値が重要であると言える。

なお、図-1.3-01に示すように、本委員会では、主に形状を主体として扱わないコンセプト（デザインコンセプト）の作成プロセスはその対象から除外する。また、近年プロダクトデザインが手がけている、インターフェイスデザインも対象から除外する。

1.3.2 2つの高付加価値支援

では、このスケッチ以降のプロセスにおいて考えられる3次元高付加価値モデリングとはどのようなものが存在するのか。ここでデザインのプロセスをもう一度考えると、大きく2つに分けることができる。前者は、主に現状の3次元モデリングでも対象範囲としていない、スケッチのプロセスにおける高付加価値である。このプロセスは、デザインプロセスにおいて思考を発散するプロセスであり、創造型の支援としての付加価値が要求される（図-1.3-02）。後者は、現在の3次元モデリングにおける高付加価値であり、より優秀なデザイナーのアシスタントとしての支援が考えられ、できることであればレンダリングによりデザイナーが決定したイメージを忠実に詳細に至るまで決定するプロセスを代行してくれる支援が考えられる。

また、この2つは、レンダリングがデザインにおいて形の方向性が決定するプロセスであると考えれば、前者は、このレンダリングというゴールに対してそれを探索する、すなわち「見えないゴールの探索支援」が主となる。それに対し後者は、レンダリングで決定した形状をデータとしてきれいに作成してくれる、すなわちデザイナーの意図することや、形に関する経験や知識を利用してレンダリングという定まった目標を忠実に再現することを代行してくれる「見えているゴールの自動運行」であると言える。

さらに、この2つのシステム化の方法として、前者の創造型では、デザイナー思考展開のプロセスをモデルとして扱うことで、形状を探索するシステム化が考えられる。後者の代行型においては、デザイナーの意図の翻訳を、詳細設計におけるルールやノウハウのシステム化が考えられる。両者ともに、デザイナーの思考・知識を明らかにすることは言うまでもない。以下の具体的テーマは、本委員会において提案されたアイデアを創造型と代行型に分類したものである。一部のものは両者に該当するものもあるが、一応2つに分類している。もちろんこれら全てのテーマを実現することは難しいが、以下のテーマの中から本委員会の対象とすべき核が抽出できるのではないだろうか（図-1.3-03）。

高付加価値 3次元モデリング検討における具体的なテーマの一例 創造型

- ・ 価値ある形状の創出
デザインにおける価値とは何か。その価値の定義は、何に依存するものなのか。
- ・ デザイナーの思考のプロセス化
デザイナーの思考を、あるモデルに当てはめることによりプロセスとして把握することでシステム化できないか。
- ・ デザイナーの個人的資質と企業資産のデータベース
デザイナーの個人的資質にはどのようなものが存在し、それらの内、企業として共有すべき情報はどれか。
- ・ 形のブラッシュアップの加速
形を自動的に考えるシステムとはなには、デザイナーの目指す形の展開方向を判断することができないか。
- ・ スケッチ \leftrightarrow モデルのシステム
描いたスケッチがモデルとして提示されるシステムはできないものか。そのために付加すべき情報は何か。
- ・ パーソナルアシスタント
各デザイナー個人の癖を覚え込ませることが可能か。

代行型

- ・ しなやかなモデリングとは
あいまいな形状定義に対応できるモデリングが可能か。デザイナーの意図を具体的に3次元形状として表現するためには何が必要か。
- ・ フリーハンドモデリング
スケッチを描くようにモデリングをするためにはどのような装置とシステムが必要なのか。
- ・ 構成要素毎のモデリング
データベースとして対象を構成する要素に分解し、それをシステムによって組み合わせることができるのか。要素の分解と統合が可能なシステムの留意点は何か。
- ・ クレイモデルのようなモデリング
手の感触によるモデリングにはどのような装置とシステムが必要なのか。

- 形を作る「おきて」とは
デザイナーの経験としてのノウハウをシステム化するためには何が必要か。また、デザインの形に関する知識のデータベースとはどのような情報を有するものか。
- デザイナーの意図の伝達
デザイナーの意図を具体的3次元形状として表現するためには何が必要か。
- 造形言語のオブジェクトデータベース
形を表現する造形言語を利用するシステムには、どのようなデータベースが必要か。
- 簡単テキストチャーマッピングVS高リアリティー
3次元のビジュアライゼーションの簡略化と高品質の双方の実現のためのシステムとは何か。
- システムのインターフェイス
デザイナーが扱いやすい(理解しやすい)ソフトウェアのインターフェイスとはどのようなものか。
- システムマネジメント
システムのマネジメントは、システムの波及の為には重要なポイントではないか。デザインセクションにおけるシステムのマネジメントとはどのような方法か。
- バーチャル工房
モデルの代わりに成る成果を求める為には、どのような装置とシステムが必要なのか。
- コンポーネントショップ
デザインを構成する要素のばく大なデータベースとはどのような構造か。またデータそのものはどのようなものなのか。業種による違いや企業による違いをどう解決するか。

図-1.3-01 高付加価値モデリングの範囲

図-1.3-02 2つの高付加価値支援

図-1.3-03 高付加価値モデリングの2つの範囲

1.4 まとめと課題

1.4.1 今年度の活動状況と次年度への課題

今年度は、およそ以下のような活動をしてきた。

- (1) 意匠デザインのための3次元形状モデリングの現状調査
既存システムの調査やベンダ・ユーザへのアンケート、技術文献調査などにより、現状技術の整理、体系化に努めた。
- (2) 意匠デザイナーが要求する3次元形状モデリングの検討
デザイナーが理想とするデザイン支援環境を議論し、現状の不備を基に、新システムへの要求を種々の立場から迫及した。

上記の内容を整理して、第2章から第4章にまとめた。デザイン会社、意匠デザイン製品の製造会社、3次元CADのベンダ、など、おのこの立場からの意匠デザインシステムへの要求や課題、3次元CADシステムの技術の現状、などについて、さらに具体的な検討へ進むための十分な基礎情報が得られたものと考えられる。

次年度は、以下のような方向にむけて検討を進めることが必要である。

- (1) プロトタイプ of 要求機能案の検討
基礎的検討の成果を実証的に評価するために、意匠デザイン支援システムのプロトタイプに対する要求機能の検討を行う。多くの実証項目が考えられるが、以下のようなものは重要である。
 - ・ 3次元造形の特徴を表す概略的な形状モデル（これを3次元スケルトンと呼ぶ）を基にしたデザイナーの造形意図を取り込む初期形状構成
 - ・ 造形上あるいは技術上の制約などを考慮した初期形状の大域的局所的変更改善手法
- (2) 高付加価値意匠デザインのための形状創成理論の検討
本年度の成果に基づき、(1)の要求機能に対応して、特にデザイナーの造形意図を柔軟に取り込めるような、形状創成理論の開発と整備を行う。
- (3) 意匠デザイン支援機能検証のためのプロトタイピング
以上の成果を基に、中核的な技術を検証するためのプロトタイピングを行う。

- ・（適当な既存の3次元モデラを基礎として用いた）3次元スケルトンの構成
- ・3次元スケルトンを基にした曲面定義法（曲面形状特徴の利用）
- ・形状に対する制約条件の定義
- ・制約を満たし、要求される曲面品質を達成する大域的局所的曲面変更改善手法

（4）高付加価値意匠デザイン支援システムの提案

プロトタイプの成果をデザイナーの試用などにより評価し、実用的なシステムの仕様を策定し、開発計画を提案する。

（5）システム開発の試行によるフィージビリティスタディ

前項と平行して実用的なシステム仕様の検証を目的として、プロトタイプピンングの成果を拡張したフィージビリティスタディを行う。

1.4.2 プロトタイプシステムの機能と応用例

具体的に検討を進めていくためには、対象物、デザインのプロセス、ツールの相違、などに応じて、より厳密な技術的検討が求められている。例えば、次のような方向でのプロトタイプピンングが考えられるが、具体化は次年度以降の課題である。

概要：デザイナーが頭に浮かんだ形状のアイデアを直接的に入力してモデル化できるような形状創成の初期段階を支援できるプロトタイプシステムの機能を実現する。このプロトタイプにより作られた形状のモデルは、詳細設計に適した既存のCADへの入力となる。

- ・（既存CADのワイアフレームモデルなどを基礎に用いて）デザイナーの造形意図の基本をスケルトン（骨組み）として粗っぽく表現する。
- ・特徴的な曲面要素などを計算機に覚えさせておき、付加的な指示をスケッチなどでスケルトンに追加することにより、曲面要素をスケルトンに貼り込む。
- ・貼り込まれた曲面要素間の整合性（繋がり、傾きや曲率の連続性）を満たすように、造形したい曲面の初期形状を自動的に作り出す。
- ・与えられた形状的な制約（平面部がある、対称性がある、長さが決まっている、など）を満たすように形状を自動整形する。
- ・デザイナーの指示にしたがって、大域的あるいは局所的変形を行う。（全体的に丸く、全体的に長く、緊張感のある形に、など）
- ・曲面の反射特性などを基礎にして、デザイナーが曲面品質を評価しやすくな

るような指標を提示し、その改善の手段を提供する。

プロトタイプシステムの的確な評価を行うためには、プロトタイプの応用例を適切に選択する必要がある。例えば、以下のようなものである。

概要：品質の良い概念形状を素早く作り出すことが必要な応用

- ・家電品、オーディオ製品、自動車、などの意匠形状の初期アイデア創出支援
- ・3次元形状を含む一般的なコンテンツの制作支援(アニメーション、CM、DTP、etc.)

意匠デザインの初期形状構成については十分な実用実績がないので、上記のようなプロトタイピングにより有用な知見が得られるものと期待される。

第2章

3次元CADシステムの現状

2.1 3次元CADシステムの製品動向

3次元CADシステムは古い歴史を持っているが、その用途は航空機産業など比較的狭い範囲に限られていた。1980年代以降、エンジニアリング・ワークステーションの発達に伴いCADのパッケージ製品が多数登場するようになったが、そのほとんどは2次元CADだった。しかし、80年代後半に、ソリッドモデルを使ったフィーチャベース/パラメトリック変形という画期的な手法が提案され、一気に3次元CADは使いやすく、かつ有効な設計支援ツールとして認識されるようになった。

この新世代の3次元CADシステムは、単に設計業務を支援するだけでなく、構造解析や機構解析、さらには製造プロセスまで含んだ生産システム全体に影響を与える。それだけに、現場技術者にはさまざまな業務改革を要求する。また、2次元CADに比べれば投資規模も大きい。90年代前半は、この高い導入障壁を乗り越えるため、3次元CADの導入効果を慎重に評価する時期が続いた。それでも、製品開発競争の激しい自動車産業やエレクトロニクス産業を中心に徐々に導入が進み、90年代中盤以降は一気に大規模な導入が始まりつつある様相を示している。

現在、市場に出回っている3次元CADシステム製品は、大きく以下の3種類に分類できる(図-2.1-01)。

2.1.1 統合型3次元CADシステム

ハイエンド3次元CADシステムとも呼ばれる製品群で、この分野ではほぼ欧米生まれの製品が市場を独占していると言ってもよい。Pro/ENGINEER(米Parametric Technology社)、I-DEAS Master Series(米SDRC社)、CATIA(仏Dassault社)、Unigraphics(米EDS社)、CADD5(米Computer Vision社、

現在は Parametric Technology 社が買収)、CADSEUS (日本ユニシス) と言った大型製品が競合している (表-2.1-01)。

この分類の製品は、米国やヨーロッパで航空機産業や軍事産業を対象に開発され発展してきたものが多い。飛行機のような大規模アセンブリ製品を迅速に設計、評価、製造することを目的に開発されたため、単に3次元モデルで部品を設計 (CAD) するだけでなく、さまざまな解析・評価機能 (CAE) や工作機械との連携機能 (CAM) をセットにして売られている。また、PDM (Product Data Management) と呼ばれる製品データベースと連携して、コンカレント・エンジニアリングを実現する環境を提供するのも、この製品の特徴である。もちろん、3次元形状のモデリング機能はもっとも発達している (図-2.1-02)。モデリングした複雑な部品を多数集合させたアセンブリであっても、高速で3次元表示できるので、デジタルモックアップなどへの応用も期待されている。

多くの場合、UNIX系ワークステーションとセットで販売され、1システムで最低数百万円、数10台導入すると数千万円から数億円の投資規模になる。投資規模は大きい、教育、メンテナンス、コンサルティングなどがフルセットでサポートされるというメリットがある。

日本では最近、自動車メーカー各社がこれらの製品の導入を熱心に進めており、とくに1997年以降は大規模導入例が新聞等で報道されている。自動車メーカーがこれらの製品を採用すると、下請けの部品メーカーも追従せざるを得ないので、ここ数年の内にこの種の統合型3次元CADシステムの出荷量はさらに伸びると見られる。

2.1.2 ミッドレンジ3次元CAD

上記のハイエンドCADシステムは、投資額が大きいため導入できる企業は限られる。これに対し、ハイエンドシステム的设计機能部分だけを抜き出し、しかも安価なパソコン上で動くミッドレンジ3次元CADという製品カテゴリーが90年代中期から登場した。SolidWorks (米 SolidWorks 社)、SolidEdge (米 Intergraph 社)、Autodesk Mechanical Desktop (米 Autodesk 社) など、初めからパソコン上で動かすことを前提に開発された製品のほかに、I-DEAS Artizan Series や PT/Modeler などハイエンドCADシステムの下位版として開発された製品もある。この分野でも、大部分の製品は米国やヨーロッパ製であり、多くの新製品が次々に発表される活気のある製品分野である。

安価なシステムであることを特徴にしてはいるが、フィーチャベース、パラメトリック変形機能など機械系3次元CADに必要な基本機能は、ほぼハイエン

ドCADと遜色のないものを備えている。当初はソリッドモデルの複雑な計算処理をパソコンでこなすのは無理ではないかとも心配されたが、その後わずか数年でパソコンの3次元グラフィック表示性能が飛躍的に向上したため、現在ではその問題も比較的小さくなった。3次元モデルの生成に、ソリッドモデリング・カーネルと呼ばれるサードパーティ製のソフトウェアモジュールを使用する例が多い。価格は1本当たり100万円前後で、ハードウェアと分離して販売されることが多い。

しかし、この分類の製品には、部品設計機能は優秀でも、解析機能やCAMとの連携機能が弱いため、なかなか導入が進まないという問題がある。3次元で設計をする以上は、解析や加工など後工程でモデルデータが再利用できないと、導入メリットは小さい。しかも、3次元CADを導入することは、現場の設計者に手慣れた2次元の設計手法を放棄させることを意味するので、よほど大きなトータルメリットを示せないと、導入に踏み切ろうとする企業は少ない。

なかなか販売本数を伸ばしきれなかったところへ、1997年後半にはSolidWorksがDassault社に、SolidEdgeがParametric Technology社にそれぞれ買収されるという出来事が起きた。有力な統合型CADがさらに市場を独占してゆくという寡占の構図が、明確になりつつある。

2.1.3 低価格3次元CAD

この分類の製品は、価格的には10万～20万円程度、高いもので50万円ぐらいである。機械設計用の3次元CADには高度なモデリング機能が要求される。ハイエンドCADシステムやミッドレンジCADまでは、ソリッドモデルをベースにしたフィチャーやパラメトリック変形と呼ばれる作図支援機能が備わっている。しかし、この価格帯の製品はこうした高度なモデリング機能を省略したものが多く、このため生成できる形状には限界がある。反面、操作は比較的簡単であり、ユーザーも操作手順を覚えやすい。また、価格が安いので導入に際してあまり抵抗がない。この分類では、国産のCADソフトもいくつか開発・販売されている。

この種の製品は、後述する3次元CGソフトと似た用途が想定される。すなわち、解析や加工工程でのデータ利用はできない代わりに、単純な形状の部品設計や、意匠設計に限定した使われ方をする。

また、建築・土木用途向けに開発された3次元CADもこの価格帯に多数存在する。これらのソフトでは、ソリッドモデルを使うケースは比較的少なく、3次元CGソフトと同じようにサーフェスモデルが用いられる。

2.1.4 3次元CGソフト

設計製造プロセスにおける3次元CGソフトは、設計支援というより、設計内容を可視化するツールとして利用されてきた。したがって、デザインの検討などに使われることが中心で、作成したデータを解析や加工工程で再利用するという発想は、基本的にない。これが、CADとCGを分ける基準であるとも言える。

しかし、一部には、かなりCADに近い使い方をする製品もある。工業デザイン用のハイエンド3次元CGシステムであるAlias Studio（カナダAlias/Wavefront社）はこの分類に入る数少ない製品である。Alias Studioは、デザイン検討に使うことを前提に開発されたサーフェスモデル・ベースのソフトウェアで、高度な自由曲面の作成などを得意とする。しかし、Pro/ENGINEERやI-DEAS Master Seriesと言ったハイエンドCADシステムとのデータ交換機能が付随しており、このソフト上で作ったデータは3次元CADで再利用できる。サーフェス、ソリッド、両者のハイブリッド形式でデータを転送することができるのは、サーフェスモデルを元に、面を閉じてソリッドモデルを生成する機能が付いているからである。

Alias Studioは価格的には300万円を超す高価なソフトで、稼働環境もUNIXワークステーションである。これに対し、パソコン上で動く安価な3次元CGには、さまざまな製品がある。多くは、エンターテイメント系コンテンツを制作するツールとして利用されるが、中には意匠設計に使われる例も少なくない。

3次元CGソフトの製品動向は極めて動きが激しく、製品数もどんどん増えている。分類すれば、UNIXをベースにした業務用CGソフト（価格的には100万円以上）、Windows NTやMacintoshをベースにしたハイエンドCGソフト（価格的には20万円から100万円程度）、それに一般向けのローエンドCGソフト（1万円程度からある）に分けられる。

形状生成の手法はさまざまで、多くはポリゴンベースのサーフェスマデラーだが、NURBS（非均一有理化B-Spline）などの自由曲面を生成できるものも少なくない。また、ミッドレンジ3次元CADと同じようにソリッドモデリング・カーネルを採用した製品もある。

低価格帯のCGソフトは専門家だけでなく一般ユーザーも購入対象にしているので、いかに簡単にモデリングを習得させるかは製品にとって重要な問題である。実際、さまざまなモデリング手法が開発されており、ユーザーの選択肢は広い。

レンダリングに関しては、ほとんどのソフトが高精度のレイトレーシング機

能を保有しており、静止画のクオリティは甲乙つけにくい時代になった。建築シミュレーションや工業デザインに適したラジオシティ法を持つソフトも比較的 low 価格で入手できる。最近のトレンドは、ノンフォトリアリスティック・レンダリングで、3次元モデルからスケッチ風やデッサン風、手描き風の出力を生成するソフトが増えてきた。

3次元CGソフトの利用目的は、静止画よりもアニメーション制作に向かっており、モデリング機能もそれに合わせて改良されつつある。例えば、「ボーン」という機能は、人体の骨や関節を模したもので、手を振って歩く人間を表現するとき、自然な動きが得られる。

このように、最近の3次元CGソフトはデザイン・プロセスで利用するには十分な機能を持っており、単に製品のフォトリアルな静止画像を作るだけでなく、アニメーション化したり、マルチメディア・コンテンツに再利用したり、視覚化ツールとしてさまざまな利用が可能である。ただし、これらのデータが直接、製造プロセスで再利用されることは極めてまれである。

2.2 形状生成のための機能と課題

2.2.1 ソリッドモデル

3次元CADと3次元CGを区別する一つの基準として、モデルデータの構造がある。大部分の3次元CADはソリッドモデルを使っており、大部分の3次元CGはサーフェスモデルを使っている。もちろん、これは決定的な違いではない。多くの3次元CADはサーフェスマデラーも持っているし、ソリッドモデラーを使うCGソフトも少なくない。CADとCGを分けるのは、その利用目的である。

3次元CGは、視覚的な表現を主目的に開発されてきたため、モデルデータ自身は光学的なシミュレーションのための土台となればよい。例えば、ポリゴンを組み合わせた凹凸のある面であっても、シェーディング処理によってなめらかな曲面として見えるならば、それで十分である。

これに対し、製品の製造を目的とした3次元CADでは、3次元モデルデータが物理的な実体と1対1に対応している必要がある。モデルデータをもとに工作機械を精密に駆動したり、物理的なシミュレーションを行ったりする必要があるからだ。このため、最近の3次元CADは基本的にソリッドモデルを使う。ソリッドモデルは表面が必ず閉じており、中身の詰まった物体を表現できるか

らだ。

2.2.2 フィーチャベース・モデリングとパラメトリック変形

ソリッドモデルで形状を作る手法として、フィーチャベース・モデリングとパラメトリック変形は非常に重要な役割を演じる。

フィーチャとは「意味を持つ形状のまとまり」という意味で、例えば穴であるとかフィレット（丸め）であるとかを指す。四角いブロックに貫通穴を開けた場合、システムが「貫通穴」という形状の意味を認識していれば、ブロックの高さを変えたときでも、穴の形状（高さ）が追従して貫通した状態が維持される。逆に、穴に対して貫通という属性ではなく深さ（50）という属性を持たせれば、ブロックの高さを変えても穴の深さは維持される（図-2.2-01）。

この仕組みがないと、複雑な部品形状を修正するときに、影響するすべての寸法を入力し直さなくてはならない。

パラメータ変形は、これらのフィーチャの寸法属性をシステムに変数として持たせる機能である。今の場合、穴の半径や位置などが変更可能なパラメータである。フィーチャとパラメトリック変形は対になって、ソリッドモデリングの効率的な作成、修正を実現する。あるフィーチャのパラメータを変更すると、それによって影響を受けるすべてのフィーチャのパラメータをシステムが自動的に計算して、矛盾のない形状変更を行う。

2.2.3 ソリッドモデラーにおける作図

最近の3次元CADは、フィーチャベース/パラメトリック変形機能を持つソリッドモデラーを使うため、作図の初期段階から幾何学的な厳密性が要求される。

典型的な作図手順を最近の3次元CAD製品の例に沿って紹介する。たいていの3次元CADには、スケッチャーと呼ばれる2次元の作図ソフトが付属している。まず、このソフトで目的とする部品の断面形状（プロファイル）を作成する。普通は、平面上で円や矩形など部品の原型となる形状を作り、これにさまざまな幾何拘束や寸法拘束を付加してゆく。

幾何拘束を付加するとは、平行、垂直、接続、正接など図形要素間の幾何学的な約束事を指定していく作業である。最近の3次元CADでは、この作業を効率よく実施するために、ダイナミック・ナビゲーションなどと呼ばれる作図支援機能が付いている。マウスでカーソルを動かすと、カーソルの位置に従って、

中点や端点、中心などの図形の特徴的な要素がハイライト表示される。これらのガイド機能によってユーザーは容易に幾何拘束を付加していけるが、それでも幾何拘束同士が自己矛盾を起こす場合がある。その時には、システム側から警告が出されたり、別の選択肢が示される。

設計の初期段階では、ラフなスケッチを繰り返すので、この種のナビゲーション機能（インテリジェントスケッチ機能などとも呼ばれる）は必須である。さらに、最近ではマウスでフリー図形を描いても、システムが特徴を認識して自動的に四角や円に変形してくれる機能なども付いている場合がある。

このようにしてスケッチした形状に、寸法拘束を付加（寸法値の入力）して形状が完成する（寸法拘束と幾何拘束の手順は逆でもよい）。ただし、入力する寸法値によっては、指定した幾何拘束に矛盾する場合や、二つ以上の解が生じてしまう場合もある。そのような場合でも、システムはユーザーの考えていることを理解して、適切な解法を選択肢の形で示したりする。

2次元平面上で作成した形状に対し、押し出しや回転を行って、3次元のモデルを作成する。この3次元モデル化のプロセスは、フィーチャ（形状特徴）を規定する作業でもある。フィーチャには、押し出し、回転、穴開け、シェル、らせん、面取り、フィレット（丸め）などがあり、たいていは複数のフィーチャをいろいろな順序で定義していく（図-2.2-02）。

このフィーチャ定義機能は、3次元CAD製品が優劣を競い合う特徴的な要素とも言える。最近では、画面上のアイコンを選ぶだけで、簡単にフィーチャを定義できるシステムが多い。また、フィーチャツリーあるいはフィーチャマネージャなどと呼ばれる履歴管理機能を持った製品も多く、フィーチャの選択や編集、寸法編集、入れ替え、削除などが簡単にできるようになっている（図-2.2-03）。

2.2.4 ソリッドモデラーにおける形状生成の問題

フィーチャベース／パラメトリック変形機能を持つ3次元CADでは、形状の変更作業が3次元表示画面上でダイレクトに行えない。つまり、3次元CGソフトのようにマウスでモデルの端点をつまんで変形したりとか、モデルの一部（例えば穴）をドラッグして位置を変えたりはできないということである。モデルの形状を変える場合は、2次元プロファイルに戻って、フィーチャを再定義したりパラメータを再入力するしかない。3次元CADでは、モデリングあるいはフィーチャの定義をどのような順番で行ってきたかが、形状を修正するとき重要な意味を持つ。3次元CADのモデルは幾何拘束と寸法拘束で制約されており、現在のモデルはこれまでに定義されてきたすべての拘束条件を矛盾なく満

たす唯一の解である。パラメータは互いに複雑な参照関係にあるので、多くの場合、モデリング手順を過去にさかのぼっていかないと形状の修正はできない。

3次元CADのモデルに対して、CGソフトのように3次元画面上で自由に形状を変形させようという研究もなされている。ごく最近、米SDRC社はVGXと呼ぶ技術で、いくつかの簡単なモデルについてはこの機能を実現した。この技術が、さまざまな形状変更に対応できるようになれば、3次元CADは新しい世代に進化すると言われている。

2.2.5 3次元CADをデザインプロセスに利用する上での問題

統合型3次元CADの思想は、モデルデータを設計製造プロセス全体で共有するということである。このため、製品デザインの検討工程でも他の工程と同じCADシステムを採用しなくてはならない。しかし、デザイン検討段階はアイデアを発散させる作業であり、上述したような現状の3次元CADのモデリング・インタフェースは、必ずしも最適とは言えない。

例えば、多くのCADは設計製造プロセス全般のさまざまなユーザーの要求に答えられるように、非常に複雑な機能を有している。このため、画面上には多数のコマンド・アイコンが並んでいるし、マウスボタンの使い方も複雑である。

それ以上に重要な問題は、統合CADである以上、デザイン検討の段階からある程度、後工程のことを考慮してモデリングを行わなくてはならない場合があるということだ。例えば、プラスチック成形部品の場合、モデリングデータを基に後工程で金型を切削することになる。プラスチックの金型には抜き勾配と呼ばれるゆるやかなテーパーが必要である。普通、デザイナーはこうした抜き勾配やフィレット（面と面の接合部の丸め処理）などは意識せずにデザイン検討を行うものである。フィレットや抜き勾配は、後工程の技術者が自分でモデルデータを修正するのが筋であるが、上述したように後工程でのモデル修正は困難を伴うことが多い。

では統合CADの考え方に反旗をひるがえして、デザインプロセスに最適化したモデリングツールを開発したとしても、それを視覚シミュレーションだけに利用したのではつまらない（そのことだけをするなら、さまざまな市販の3次元CGソフトの中から選べばよい）。デザインモデルを基に試作品が迅速に作れたり、いろいろな機構解析シミュレーションができなくては、高付加価値形状生成ツールとは言えないだろう。

つまり、現実問題としてはソリッドベースの3次元CADシステムと自由なデータ交換機能を持つツールでなくては、意味がないと思われる。しかし、現状

では、市販されている各種の 3 次元 CAD システムはそれぞれ独自の 3 次元データ構造を持っており、ソリッドモデルのユニバーサルなデータ交換は極めて困難な技術的課題を抱えている。上述した A Alias Studio の場合でも、各 CAD 製品別のデータ・トランスレータを開発するために莫大なコストをかけている。CAD 製品は頻繁にバージョンアップを繰り返すので、そのたびにトランスレータも開発しなくてはならない。

この問題に対しては、ミッドレンジ 3 次元 CAD 製品が採用しているソリッドモデリング・カーネルの動向に注意を払う必要があるだろう。もし、サードパーティ製のモデリング・カーネルがデファクトスタンダードとして多くの CAD で採用されるようになれば、この種の問題は一気に解決するかもしれない。

図-2.1-01 3次元 CAD システムの分類 (出典：日経 CG 1997 年 3 月号)

図-2.1-02 ハイエンド CAD システムの作図画面の例 (出典：日経 CG 1997 年 3 月号)

図-2.2-01 フィーチャを使ったパラメトリック変形の例 (出典：北村、「新 CAD の基礎知識」、日経 BP 社、1996 年)

図-2.2-02 フィーチャの例（出典：北村、「新 CAD の基礎知識」、日経 BP 社、1996 年）

図-2.2-03 フィーチャマネージャの例（出典：日経 CG 1997 年 3 月号）

表-2.1-01 主なハイエンド 3 次元 CAD（出典：日経 CG 1997 年 3 月号）

第3章 企業における3次元CADの活用と課題

3.1 (株)GK テックにおける例

3.1.1 歴史と現状認識

(1) デザインワークでのコンピュータ活用の歴史はMacintoshに始まる。

デザインの世界でのコンピュータの普及はMacintoshという優れたプラットフォームの登場で急加速した。GUI (GraphicalUserInterface) の扱いやすさ、レーザプリンタ、フルカラーディスプレイ、ローカルネットワーク等デザインワークにフォーカスの当たったシステムを手にすることができた。その上に新たなパーソナルCADといえるカテゴリーの優れたソフトウェアが育った。

2次元のラインドローイング——>Illustrator

2次元のカラー画像処理——>PhotoShop

といった各種のツールがグラフィックデザイン業務に大きな変革をもたらした。

ドキュメントの制作には2次元のDTP——>PageMaker, QuarkExpress

プレゼンテーション、さらにはインタフェースデザイン等の時間軸のあるデザインに2次元のアニメーション——>Macromind Director

といったツールがそれぞれ定番としてのポピュラリティを得た。

工業デザインは大きくいえば平面構成を考えるグラフィックデザインと立体構成を考えるプロダクトデザイン、時間軸を考えるインタフェースデザインといった領域にまたがる。それらを包括して、パーソナルなデスクトップデザイン環境を生み出したMacの功績を忘れてはならない。

- ・個人でも入手可能なスケールを持ったこと。
- ・理解して使えるという扱い易さのスケール
- ・机の上に収まる大きさ・複雑さのスケール
- ・価格のスケール

といった要素が満たされることによってユーザが広がり、ノウハウを伝授しあえる仲間のネットワークも生まれ、更なる普及を促した。

これからのCADを語るのにあたって、この革命的な進化の潮流に倣う必要がある。

(2) 3次元CADが普及に至っていない理由

立体構成のプロダクトデザインの領域でも簡易な 3 次元ソフトは利用されている。手軽さで StrataStudio, 上限は Form-Z といったところでどまっている。2 次元 CAD で経験した、誰もが納得できたパフォーマンスのインパクトはない。

ワークステーションに載る 3 次元 CAD も各種検討された。試用例もあったが普及するに至らなかった。前項に述べた適切なスケールに収まらなかったことが第一の理由である。共有の前提になる定番のプラットフォームとソフトウェアがない事もある。作りたいものによって適したソフトが異なる状況もあった。

特定の CAD を持っていたらデザインを発注するといわれるケースも少なからずあるが、それぞれに対応する投資（物的、人的）をするリスクは負にくい。

後工程にデジタルデータを渡すことが一義的な要請となりにくいフリーランスオフィスでは、3 次元 CAD 導入のモチベーションは結果として低くなったのである。

（3）立体構成のデザイン

デザイナーは立体構成をスケッチやモデルを通じて行う。マーカーの勢いやモデルを持った感触の世界でデザインが進む。検討の繰り返しの最後は、図面と高精度のモックアップというのが大方のプロセスである。

画面の上でスケッチを行う試みはあった。Painter といった優れた描画ソフトも手に入る。しかし鉛筆、マーカーと紙という手軽でスピーディにアイデアを定着できる道具にはかなわない。2 次元 CAD は基本的に編集作業としてのパフォーマンスが納得できたから普及したのである。

モデルという実体も人間とも界面を持つ道具のデザインには欠かせない。大きさ・重量・素材のテクスチャ等のスケール感が重要である。

（4）3 次元 CAD はマストのデザインツールか

CAD はなくても自由曲面のデザインはできる。インダストリアルクレイという優れた造形素材がある。デザイナーの意図を汲み取り、後工程に従って寸法精度を作り込んでいく、優れた生産技術をメーカーは誇りにしてきたはずである。

プロセスを通じたマネジメントの問題として CAD 化のメリットを秤にかけて判断すべきである。CAD がなければ、エンドユーザにとっての「高付加価値デザイン」は生まれないと問われれば否と答える。

1.1

3.1.2 将来の次世代 CAD に期待するもの

(1) 高付加価値デザインを生み出す道具の条件

扱って楽しく、知的な刺激を与えてくれる道具があれば、自ずとオリジナリティのあるデザインが生まれる必要条件是満たされると思う。

バーチャルな世界とリアルな世界の適切なバランスは、創造行為に非常に重要なものである。体感・リアリティが発想を刺激する。発想は頭と目だけではなく体全体の感覚から生まれるものである。寸法、重量等のリアルワールドのスケール感・身体感を CAD を用いたからといって失いたくない。

未来 CAD に実現されるべきモデルのありようと、そのモデルを操作する方法に関していくつかの提案を試みる。

(2) 2次元と3次元の深い溝 (geometry based modeling の限界)

2次元とは抽象的な概念の世界である。点と線という数学的に定義されるもの。そして厚みを持たない領域としての面。計算機の画面上で扱うことにもともと違和感が生じない対象なのである。グラフィックデザインに CAD がすんなりと普及した理由は突き詰めればここにある。

現状の3次元 CAD が扱う世界はやはり抽象的な概念の世界である。ワイヤーフレームやサーフェスモデルは形状の特徴は表現しているにせよ数値の定義の集まりである。

ソリッドモデルも中身があるという性質を数学的に定義しただけである。

われわれの生きている実在の世界は3次元である。(時間を加えて4次元という言い方もある)紙でさえも厚みをもつ。この世界では誰でも、ものが相互に貫通するなどという事は信じない。それが3次元 CAD では普通のことであるところに根の深い問題がある。

(3) 実在のおきて (Real World)

- ・ 干渉の法則 (材料の界面は保持される、通り抜けは許さない)
- ・ 材料の重量不変の法則
- ・ 材料の体積・表面積一定の法則 (近似)
- ・ 線長一定の法則 (近似)

さらに物理的なエネルギー保存則その他様々な実在世界がゆえのしきりがある。

(4) 3次元 CAD はマジック

上述の当たり前のおきてが CAD に実現（シミュレート）されていないのはなぜなのか。素朴な疑問である。初心者が戸惑うのはこんな基本的な感覚を無視されてしまうからだ。日常の体感を大事にしたいデザイナーがこれに甘んじて良いのだろうか。計算機の都合に合わせて感覚を麻痺させているのではないか。簡単な切り紙の「かざぐるま」でさえも普通の CAD で作るのは初心者には至難の技だ。

(5) 実在の世界をシミュレートした CAD (Physically Based Modeling)

有り余る計算機のパワーを持ってしても不足する模擬実在 (Simulated Reality) の世界の中で素材を加工しながらデザインする。それが一つの夢である。

ユーザインタフェースも自然に生まれる拘束条件から根本的に改善するはずだ。3次元を2次元操作系で扱うから難しいといわれるが、本来あるべき拘束がないために自由度がありすぎて制御できない事に根源的な問題がある。日常感覚との Semantic Gap のないインタフェースの実現が期待される。

(6) VR 技術を援用したインタフェース

フォースフィードバック、リアル 3D 表示等の VR 技術は次世代の CAD に欠かせない。CAD 内に構築されるモデルが実在をシミュレートすればするほど Hi-Fidelity の入出力チャネルが欲しくなる。ゲームセンターで遊ぶ感覚でデザインができるのが理想にちかい。

操作という意識的な手順への翻訳を要求しないインタフェースの設計が必要だ。

1.2

3.1.3 次世代 CAD 実現のシナリオ

(1) CAD の共通プラットフォームとプラグインの流通 (コンポーネント化)

CAD のカーネルは共通化していくことが望ましい。形状生成履歴を持ったデータ交換が可能になるからである。それに重力および衝突検知に基づく拘束を最低限モデル環境として持つプラットフォームが理想である。汎用的な変形加工編集ツールは組み込む。他の特殊な操作や物理モデルはプ

プラグインとしてサードパーティが開発・流通できるオープンシステムとする。本体の肥大化の抑制とメンテナンス負荷の軽減、ユーザの導入コストやカスタマイズコストの削減等多くのメリットが想定される。現在の 3 次元 CG ソフトの開発およびオープン化戦略が参考になる。(3DStudioMAX, SoftImage 等)

(2) 加工方法も含めた素材の流通

様々な物理特性を持った素材をその物理モデル済みの部品も流通可能にする。すべてコスト・供給寸法・重量・納期等のデータと適した加工方法を含めてプラグインコンポーネント化して、流通させる。CAD ならではのユニークな素材や加工法もありうる。加工済みアセンブリへのリンクを持つ。

すなわち実体を供給するメーカーとシミュレーテッドモデルを供給するディストリビュータが共存する。電子コンポーネントでは既に現実のものとなっている。

(3) 個人の所有できる CAD 実現の重要性

Macintosh のデザイン業に与えたインパクトの例に明らかなように、デザインワークの道具が個人の手の届く範囲にスケールダウンしてくると加速度的に普及を始める。同時に多数のユーザのフィードバックと量販効果によって高品質の CAD が手ごろな価格で買えるようになる。その好循環のスパイラルの基礎作りに公的な調査研究開発が役割を果たすことを期待したい。

3.2 ソニーにおける3次元CADの活用と課題

3.2.1 高付加価値意匠デザインとは

デザインはもともと、主に外装形状の創造によって商品の付加価値を高める作業である。その中で特に付加価値が高いデザインとは、どのようなものであろうか。内蔵機能の技術的優位性、卓越した商品企画、高いブランドイメージ等を取り去っても残るデザインの高付加価値性とは何か。

これをつきつめれば、「高品質の造形」と、「独創的な造形プロトタイプ」の2つに整理できるであろう。「高品質の造形」は、機能、使い勝手、しっかりした作りなどを十二分に満足する完成度の高いデザインであり、高品位、パリエーション感、熟成した文化に通ずる。「独創的な造形プロトタイプ」は、商品カテゴリーにおける新しい「らしさ」の創造であり、商品の新しい流れを生みだし先導する。これが社会的に認知されれば、その形が商品カテゴリーの典型として新たな象徴性を獲得する。例えばソニーのAV商品では、2代目ウォークマン、初代ディスクマン、ハンディカム・ビデオカメラなどが思い浮かぶ。1996年に発売されたプラズマトロン(PZ-2500)は、平面テレビの造形プロトタイプを世に問うたものである。このデザインの過程では、平面構成にもかかわらず簡単な3次元モデリングを用いて多くの環境シミュレーションが行われた。デザイナーのもう一つの役割として、「新しいベネフィットの創造」がある。これは、ユーザーの潜在ニーズやデザイナーのウォンツを新しいベネフィットとして形にまとめて商品化するタイプのもので、この場合のデザイナーの役割は、商品企画そのものをカバーしているといえる。今回の3次元モデリングの議論とは関係が薄いので、ここでの検討から省くことにする。

3次元モデリングは、「高品質の造形」と「独創的な造形プロトタイプ」にどのように役立っているのか。3次元モデリングを使ったからといって高付加価値意匠デザインが生まれるわけでないことは言うまでもないが、曲面を使った「高品質の造形」の場合は、今や3次元モデリングCADが必須のツールとなりつつある。ただしそれは発想段階の支援でなく形の作り込み段階の支援に限られているのが現状である。この辺の事情は「独創的な造形プロトタイプ」デザインの場合も同じである。要は、デザインプロセスにおいて現状の3次元モデリングCADは、形状の方向が決まった段階で、実体化の検討と詳細な形状の作り込みのために使われている。

3.2.2 3次元モデリング CAD 活用の変遷

ソニーのデザイン部門では、1978年のデザイン CAD 検討開始以来 20 年間に亘って、2次元 CAD の普及促進（ID 全員使用）、版下デザイン CAD 開発、包装デザイン CAD 開発、デザイン用 CG システム開発とならんで、3次元 CAD の開発導入を行ってきた。3次元 CAD は 1985 年前後、各種ソリッドモデラーやサーフェスモデラーの CAD システムをベンチマークテストしたが良いものが見当たらず、当時社内で研究開発段階にあった FRES DAM というサーフェスモデラーを積極支援して、デザイン側の要求仕様をいろいろ盛り込んでいった。デザインの基本的な要求は、

- (1) デザイナーの意図する形状が正確にサーフェスモデリングできること
- (2) NC 切削でモックアップが削れ、金型データとして活かせること
- (3) 操作が簡単なこと
- (4) 形状検討のための機能や表現が豊富であること

であった。(1)、(2) はまづまづであったが(3)、(4) はその後も改良を重ねてきた。デザイン部門では 1987 年、FRES DAM Version 1 の完成と同時にシステムを CAD グループに導入し、デザイン・アプリケーションを開発しながら広げていった。その後の展開は 3 期にわかれる。

・開発導入期（1987～1990）：CAD 担当者によるデザインアプリケーション開発とモデリング

CAD グループの担当者がデザイナーから 2次元 CAD 図面を受け取って 3次元モデリングをし、NC 切削までフォローしてデザイナーに渡す。デザイン機種は、曲面デザインの付加価値が出しやすいヘッドフォンやハンディカムビデオなどのモデルに限った。この時期はデザイナーが 3次元モデリングの特性をよく理解していないために、CAD 担当者とのコミュニケーションがスムーズにいかなかった。設計側の FRES DAM 対応が十分でなく、金型メーカーへのデータ渡しもデザイン部門から直に行くなどの場面も多々発生した。しかしながらデザイナーと CAD 担当者が一体となって、何とかして 3次元モデリングならではの高付加価値デザインを生み出そうと心血をそそぎ、インナーイヤータイプのヘッドフォン（MDR-E555）などのモデルでカテゴリーの「造形プロトタイプ」といえるような商品を世に送り出すことができた。

・展開期（1990～1994）：デザイナーによるモデリングの習得

人体に密着して使われ、また内部機構が高密度に実装される両商品カテゴリーでは、曲面デザインは必須のものとなり、また、金型切削にデータがつなが

るメリットも事業部側に認められて、FRES DAM モデルが急増した。これに伴い、関心の高いデザイナーに順次オペレーションを教育し、ワークステーションの台数を増やしていった。これによって、3次元のラフ形状をデザイナーがみずからモデリングするとか、詳細モデリングや形状修正の場面での CAD 担当者との意思疎通が改善された。また、3次元モデリングを前提とした場合の形状の押さえどころのノウハウも相互に蓄えられた。モックアップ切削用 NC をデザイン部門内のワークショップに導入し、モックアップ完成までの工期短縮もできた。しかしながら、デザイン日程がタイトなコンシューマーAV 商品では、デザイナーが全工程をモデリング処理する時間はなく、無味乾燥なオペレーションにデザイナーのモチベーションも上がらなかった。

・普及期（1994～）：専任オペレータによるモデリングとモックアップ制作

FRES DAM 対応モデルのさらなる増加と下流へのフォロー業務の増加に対して、デザイン部門としてはワークショップに専任オペレーターを集中し、デザイナーの依頼に基づくモデリングと NC モックアップ制作を効率的にこなす体制を整えた。また、デザインができる CAD 担当者をデザインチームの中にデザイナーとして配属し、FRES DAM に限らず CG 系のレンダラーや MAC を用いたさまざまなソフトを、デザイン上流段階で活用する体制にした。

結局現状の3次元 CAD は、発想支援ではなく造形の造り込みの支援にしかならず、2次元 CAD 図面と簡単な言葉でオペレータに意図が伝わるのであれば、その作業をオペレータに任せて、デザイナーはよりクリエイティブな仕事に専念したほうがよいということがわかってきた。もしデザイナーが自ら喜んで造り込みまでモデリングするような3次元 CAD があるとすれば、それは現在モデラーとやりとりしている以上に簡潔な表現でシステムに意図が伝わり、しかも形状変更が思いのままにできるようなものでなければならないであろう。そのためには、各デザイン分野で3次元形状を指示、あるいは評価する際に使われている3次元造形言語を整理してソフトウェアに組み込み、簡単な操作で自由にモデリングできる CAD システムを開発する必要がある。

3.2.3 発想段階における CAD

デザイナーはデザインの発想段階から造形の造り込みの段階にいたるまで、スケッチ、図面、3次元模型の3種の表現媒体をスパイラル状に繰り返し使いながら、発想を具体化していく。この枠組みは昔も今も基本的に変わらない。そこにコンピュータが導入された足跡をたどると、まずは図面書きを主眼とした2次元 CAD に始まり、NC 切削につながる3次元モデリング CAD、そして現在、

イメージを検討するためのコンピュータが試みられているというのが、凡その流れである(図-3.2-01)。これはいずれもデザインプロセスの下流段階から始まっている。すなわち、2次元CADや3次元モデリングCADは造形の造り込みのツールとしてデザインを支援すると共に、そのアウトプットを図面データやNC切削モックアップで設計者に伝えたり関係者にプレゼンテーションしたりという、いわゆるコミュニケーションとしての効用と、いま一つは3次元モデリングデータを金型加工に活かすというデータ・アプリケーションとしての効用がそれである[1]。いま始まっているイメージ検討用のコンピュータ・ツールもその例外ではなく、まずは造形の方が見えてきたものに対してその造り込みをすると共に、そのアウトプットであるレンダリング・スケッチやモーションCGを使って関係者にプレゼンテーションする、すなわちコミュニケーションのツールとして使われている。

こうした対外的に効果が目にみえる部分から利用が始まるのは止むをえないとしても、そろそろ本格的にデザインの発想段階に活かせるようなコンピュータツールを生み出す努力を、デザイナーとベンダー、研究者が一体となって取り組む時期にきているのではなかろうか。

デザインにおける発想とは何であろうか。デザインも設計の一領域であるとするれば、吉川の一般設計学が示す「設計とは機能空間から(実体を規定する)属性空間への恒等写像である」[2]ということができよう。ここで明らかにされたことは、1960年代後半のクリストファー・アレキサンダーやブルース・アーチャーらの時代から繰り返し言われているように、求める機能あるいは要求仕様は何らかの言語、記号および図形によって表出可能であり、また属性も物理的実体を生み出すのに必要にして十分な情報として記述できる。しかし、両者の関係は一対一対応ではなく、論理的アルゴリズムで自動変換ができない、ということである。

デザインの発想は、デザインに求められる要求仕様からデザインがかかわる属性の中心課題である製品の外装形状を生み出すための、飛躍の作業である。その飛躍を媒介するのが、スケッチなどの視覚媒体であり、それはデザイナーの内部に機能概念と実体概念の往復作用を促進する。たとえば鳥や魚の流麗な形状から空気抵抗の少ない流線形をイメージして、それをそのままコピーするのではなく自分の形としてドローイングする、また、自分がある機能を満たす実体形状として表現しているスケッチの中から、まったく異なる機能の要件を感じ取り、その機能性を図面やラフ模型で別途検討しはじめる、などの往復作業である。要はデザイナーは、紙やディスプレイに表われている視覚刺激の奥にある新たな意味性を感じ取り、またそれが示す架空の実体をつかみ取ろうとし

ているのである。ここで注目すべきことは、同じ図形がデザイナーの頭の中であるときは機能概念として解釈され、またあるときは実体概念として認識されていること、そして、発想過程で次第に実体概念が具体化するばかりでなく、当初考えていた機能概念も修正・付加され、より豊かな意味性を持つてくることである。

従ってツールに求められる要件は、表現の往復作業が素早くできることと同時に、スケッチ、図面、3次元モデリングなどの表現モードを自由に切り替えられ、また、システム側でモードを自動変換してくれることである。たとえば、あるブラシタッチの抑揚のある線から意図する最適のベクターラインを抽出するとか、その描線がフィレット部分を表わすときには、線の抑揚から最適な徐変のフィレットRを認識するなどのさまざまな相互変換が、ややこしいオペレーションなしにできるツールが求められている。

現在デザイナーの手元には、2次元ドラフティング CAD、3次元モデリング CAD と共に、イメージを扱うツールとしてマック系やシリコングラフィックス系のハード・ソフトがある。しかし残念なことに、あるアプリケーションから別のアプリケーションにデータを移すには非常に煩わしい作業が必要であり、操作性が異なり、データの精度も保証されない。さらに多くの場合、異なるハードウェア環境を強いられているのが現状である。これでは発想段階のツールとはいえない。デザイナーにとっては、発想段階では必ずしも高度な3次元曲面モデリングが必須ではない。むしろ大づかみなイメージを2次元形状に定着でき、それを素早く3次元形状としてモデリングでき、さらにさまざまなテクスチャーやライティング、あるいはインテリアなどの環境の中で検討でき、また、人体や他の機器や家具、建築などとの関係性を検証でき、インタラクティブな操作によって起こる挙動のチェックを行う、といった作業を一つのツール上で手軽に行き来しながら進められることが大切である。

3.2.4 発想支援 CAD システムに求めるイメージ

ここで、デザイナーが求める発想支援 CAD システムの要件を、ラフスケッチしてみよう (図-3.2-02)。

- (1) マルチ・モーダルな表現を自由に行き来できるデータ構造と操作性
 - ・画像イメージ・モード (スケッチやレンダリング、写真等のビットマップイメージ)
 - ・ドローイング・モード (ブラシや細線などの手書きによるベクター&ビットマップ表現)

- ・ドラフティング・モード（寸法精度のあるベクターデータ、製図機能）
 - ・3次元モデリング・モード（サーフェスがしっかり定義できるモデラー、およびソリッドで基本形体のコンフィギュレーションがインタラクティブに検討でき、サーフェス・モデルへの転換が簡単にできる機能）
 - ・リアルシミュレーション・モード（3次元レンダリングを基にした3次元空間での動きや変化の検討）
 - ・奥行き方向に任意のレイヤーを重ねられる
 - ・平面方向に少なくとも4つのウインドウを切って任意にモードをアサインできる。
- (2) 目と手が共働するタブレット・ディスプレイ
- ・タブレット一体型ディスプレイとスタイラスペンによるダイレクト・オペレーション
 - ・フリーハンド・ドローイングに適した B3～A2 サイズの作画領域と 1 インチ厚のタブレット・ディスプレイ
- (3) デザイナーの思考に近いモデリング言語と操作のインターフェース
- (4) インテリジェントな発想支援機能
- ・発想を刺激するイメージ・アクセラレータ（要求仕様（機能概念やイメージ概念）を言語入力することにより関連イメージデータを自動提示し、対話的に収斂）
 - ・形状バリエーション自動生成機能（基本形状（コンフィギュレーション）から形状バリエーションを自動生成し、対話的に形状探索）
- (5) ネットワーク・コラボレーション
- ・遠隔地とのデータ・コミュニケーションと双方向リアルタイム検討機能

これらの要件は部分的には既の実現されているが、これを統合するシステムの実現には多くの障害があることは、私も承知しているつもりである。しかしながら、本当に高付加価値意匠デザインに役立つ CAD を目指すのであれば、このような目標イメージについても、皆で具体的に議論してみる必要がある。

参考文献：

- [1] 高橋靖：“プロダクトデザインにおける 2 次元 CAD の役割、デザイン学研究”，日本デザイン学会 No. 73 pp. 103-110, (1989)
- [2] 吉川弘之：“設計とは何か——一般設計学の試み——”，日本機械学会誌 Vol. 84 No. 749 pp. 23, (1981)

図-3.2-01 ソニーにおける現状の CAD 環境

図-3.2-02 のぞましいデザイン CAD

3.3 日産自動車（株）における例

3.3.1 デザインプロセスとCADの活用

自動車の場合、他の多くの工業製品に比べても、製品開発におけるデザインの比重が大きく、その範囲も車体外形（エクステリア）からインテリアのスイッチ類、車体色やシート等の素材に至るまで、目に止まる部分は全てデザインの対象になると言える。そのため、デザイン開発はエクステリア、インテリア、カラーの各デザイナー及び、モデルを製作するモデラーからなる共同作業が基本で、専門化・分業化が進んでいるのが特徴である。

デザイン開発は基本的に「スケッチ→スケールモデル→フルサイズモデル→線図データ（形状を定義するCADデータ）」のプロセスで進められる。

この内、フルサイズモデル以降の段階には古くからCADが使われ、設計・生産部署等とのデータによる業務連携を実現している。CADを業務に適用した場合の長所としては、以下のことがあげられる。

- ・断面やハイライトの流し方等、形状の微妙な変化を造り込める。
- ・曲線や曲面の評価が直感のみに頼らず、定量的にできる。
(曲率ベクトルやハイライト線の参照等 図-3.3-01, 図-3.3-02)
- ・正投影ビューで見る等、図面的にデザインを検討でき、また設計条件等を参照しやすい。
- ・全体のプロポーションを一気に変えるような、大規模な変更がしやすい。
- ・意匠形状を正確に表現し、後工程に伝えることができる。

さらに最近ではデザイン初期（～スケールモデル）の発想段階において、クレイモデルや手描きスケッチに代わるものとして、CADやCGが使われるようになってきている。その理由は、発想段階で立体としての検証や試行錯誤を手軽に行いたい、スケッチだけでは立体としての検討が十分できず、スケールモデルで検討する場合は、スケッチほど手軽に試行錯誤ができない、という問題を解決したいためである。しかし、実際にはCAD特有の以下のような問題がある。

- ・全体の形の構成や組み立て手順を考え、それに従って要素毎に曲線/曲面を作成せねばならない。
- ・ある程度出来上がった形をベースに、変形/修正しながら試行錯誤を繰り返す、デザインを発展させるのに手間がかかる。また、集合部等のあいまいな部分もキチンと作らねばならず、クレイモデルのように適当にすませるモデリングができない。
- ・作成した形状全体をそのまま変形することが困難。再度、線や面を作り直さねばならない。(クレイモデルのように、ざっと大きな固まりを作り、それをベースに修正・追加を繰り返すことが不得手)

システムとしては、デザイン初期には市販CAD/CGシステムや内製CGシステムを、デザイン中期以降（フルサイズモデル～線図データ）では内製のCADシステムを使用している。

また、それらの操作は、市販 CAD/CG の場合はデザイナーの操作を基本とし、内製スタイル CAD の操作はモデラーが行っている。

自動車デザインの場合、デザイナーの仕事はデザインテーマの発見とそれを形作るアイデアの提案といった、発想を中心としたものであり、具体的な形状構築はモデラーが担当することが普通である。そのため、デザイナーがどこまで CAD モデリング（形状の造り込み）に工数をかけるべきか、また立体構築のスキルをどこまで身につけるべきかが課題である。要するに、デザイナーが発想を形にするのは良いが、CAD モデリング自体が仕事になってしまうのでは本末転倒ということである。

さらに、自動車デザイナーの場合、デザイナー自らが CAD を使う段階（スケッチやスケールモデル）が総デザイン期間に占める割合は相対的に小さく、再びその段階に戻ってくるには1年以上かかる場合もあり、CAD の操作習熟が進まないという問題もある。

3.3.2 CAD を用いた形状創成法

デザイナーの立体構築行為は、線図的に具体的な構成を考える場合（キャラ

クターラインや断面などにより解析的に立体を考える等) と、イメージ的に考える場合 (おおらかな面とか緊張感ある形といった、言葉でデザインの狙いを形容し、具体的な立体構成までは指定しない) が混ぜ合わさっている。

デザイン初期の発想段階ではイメージ的な立体構成を主とし、スケッチやスケールモデルで試行錯誤を行う。(全体のかたまり、プロポーション、ボリューム等を優先し、厳密に線や面に分解しないで全体的に形作る等)

それに対して、デザイン後期 (フルサイズモデル) では、断面の変化の仕方、ハイライトの位置・流し方、集合部角Rの優先度等、具体的な組み立てを考え、デザインの狙いを形に落とし込む作業を行う。

イメージ的な立体構成をCADで行う場合、立体を一つの塊として制御し、徐々に狙った形に収束させて行く方法がある。実際には一つの面からなる基本立体を作成し、面の制御点を単独あるいは複数同時に動かしながら形を整えて行く。ただし、この方法では袋状の立体を扱っているに等しく、滑らかな変化のみを追求するには良いが、局所的な曲率変化 (大きな曲率から急激に小さな曲率に移行する、あえて折れを作る等) やエッジの表現に限界があり、単調なデザインに陥る危険性がある。しかし、全体のデザインをリアルタイムに動かしながら試行錯誤できる点は捨て難い魅力であり、さらに偶然性による思わぬ発見ができる等、形のコンセプト表現の段階では有効な手法ではある。(図-3.3-03, 図-3.3-04)

それに対して、デザイン後期のような造り込みをCADで行うには、線図的なモデリングが必要となる。具体的には、まずデザインを表現するキャラクターラインや断面線を厳密に決め、でき上がった線をもとに、スウィープ等で面を創成する。これを要素毎に繰り返し、全体の立体を組み立てていく。この場合、曲面の変化は断面線によって厳密にコントロールでき、面の微妙な味付けやハイライトの意図的な制御等、高度なデザイン表現と高い面精度を実現することができる。反面、形状が複雑な場合には、数多くの面に分割せざるを得ないため、大域的なコントロールが難しい。そのため、大きく試行錯誤することは不可能で、あらかじめ全体的なデザイン、形の組み立て方が決まっていることが前提となる。

デザイン作業では以上の形状創成方法を組み合わせて使う必要がある。しかし、前者から後者へデータをつなげていくことはまだしも可能性があるが、その逆は一般に困難であり、発想と作り込みを自由に行き来できない不自由さがある。

3.3.3 形状入力と形状評価方法

デザイナーはスケッチまたはキーライン（3面図におこした手書き線）を入力し、CADでデザインを始める。そして、それらをトレースし、線を作成し直す。この場合、スケッチの勢いやカーブのニュアンスが失なわれがちである。これはCAD内にカーブ定規を準備し、キーラインの段階からカーブ定規を使用すればある程度解決することであるが、画面上で自由にカーブ定規を呼び出し、操作できる機能を有することが前提となる。

また、入力した2次元の曲線を各ビューに振り分け、3次元の線として合成し、立体形状を表わす線に整えなくてはならない。さらにそれらの線は、面を張り、全体を構築していくための基準となるため、ある程度の精度で線を作っておく必要があり、手間のかかる作業である。

次にCADでデザインを評価する場合、以下のような問題がある。

- ・CAD画面上では複雑な曲面を作成できても、それで良いのか、とどめをさせない（断面線等で定量的な評価はできるが、それを感覚的な評価と一致させられない）
- ・また、CGを作成してもハードウェアシェーディングのレベルでは、立体感を把握しづらく、実世界との相関もあやふやなため、面の大きな傾向はつかめても、微妙な表情（固い、柔らかい等）までは把握できない。
- ・実車写真のようなCGも作成できるが、リアルタイムでなく、CADと融合した形では使えない（線画による形状創成とCGによる確認をリアルタイムかつ頻繁に繰り返せない）。
- ・CAD画面の大きさが絶対的に小さく、自動車特有のスケール感や空間感を把握するのはさらに困難である。

3.3.4 CADへの要望

自動車デザインはデザイナーとモデラーが共同で行っており、今後も、発想から基本立体の定義はデザイナーが、その後の形の造り込みはモデラーが行うという役割分担は変わらないものと思われる。その意味で、自動車デザインに利用するCADは、それぞれに特化していく可能性がある（違うCADを使う、または同じCADでも使う機能が違う等）。

デザイナーが扱うCADとしては以下の要望が考えられる。

- ・デザイナー自身がスケッチ並みの手軽さで扱える。
- ・2次元(スケッチ)と3次元(立体)との行き来が容易に行える。
- ・手書き線が直接CADで扱えるデータに変換できる。

(画面に向かって描いた線からモデリングが始められる。スケッチと曲線入力が同時にできる)

- ・立体構成要素毎に曲線/曲面を分解しないでモデリングできる。

(かたまりベースでモデリングができる)

- ・一度できあがったものから可逆的に自由に変形/修正が加えられる。

(ゼロからの造り直しにならない)

- ・線・面の接合等、CAD的な煩わしさがなく、大雑把にモデリングできる。
- ・CGにより実際の見え方が、可能なら立体視で、リアルタイムに評価できる。
- ・モデラーが使うCADに精度面等で問題なくデータが渡せる。

しかし、以上のことが実現しても、依然自動車デザインにはフルサイズモデルを作ることが不可欠である。その理由は、自動車の車体は大きく、かつ微妙な線・面の変化を伴っているため、そのデザインを評価するにはフルサイズの立体として、屋外で見る必要があるからである。また、インテリアデザインは、操作性等を含め、圧迫感や広々感等を考慮して室内空間全体をデザインするものであり、形状作成を主体とするCADだけでは対応できないためである。

したがって、全てをCADでデザインするには、VRの飛躍的な進歩等、高度な技術革新が必要である。

図-3.3-01 曲率半径ベクトル線

図-3.3-02 ハイライト線

図-3.3-03 CGによる形のコンセプト表現

図-3.3-04 イメージ的な立体構成（ワイヤーモデル）

3.4 (株) 日立製作所における例

3.4.1 デザインプロセスと CAD の活用

(1) 日立の製品とデザイン

日立のデザイン部門（デザイン研究所）で取り扱うデザイン対象は、日立の製品分野拡大とともに、従来の家電品の外形（色、形、素材など、：写真-3.4-01）から、産業・公共製品（エレベーター、エスカレータ、車両、建設機械など：写真 3.4-02, 03）へ範囲を広げており、さらにはコンピュータなどの情報産業に関連して、ハードウェアだけでなく、ソフトウェアのデザインが重要になってきている。その意味では形状のみを取り扱う 3次元 CAD の必要性は低下しているといえる。しかしながら、依然家電品を中心に曲面を主体とする意匠形状としては高付加価値のデザインが必要なことに変わりはない。製品開発サイクルと製品個数をプロットすると図-3.4-01 のようになり、量産タイプといえども開発サイクルは、自動車等に比較し短期間であり、製品単価も安価なことから、3次元 CAD に求められる要件も異なってくると考えられる。

文献[1]に準拠すれば、図-3.4-02 のように、製品は意匠（Aesthetics）、技術（Engineering）、人間工学（Ergonomics）の 3要素を考慮してデザイン・設計が進められると考えられる。発想支援 CAD という観点では、これら全てを支援するシステムが要求されるが、3次元 CAD に限れば、このうちのスタイリングデザインとエンジニアリングデザインを繋ぐものとして活用すべきと考える。

(2) デザインプロセス

デザイナーが形状を創成しようとする場合、個人個人の感性によって、同一形状でも削り出して作るプロセス（彫刻的アプローチ）と、形状を加えながら作るプロセス（粘土細工的アプローチ）があり、必ずしも CAD システムで用意されたコマンド群がデザイン意図を忠実に表現するとは限らない。

通常、複雑な曲面を持った意匠形状をデザインする場合、スケッチ図等を作成し模型で確認する方法が採られるが、製造原価が自動車と 2桁以上差違がある家電品分野では、a) 数カ月に 1回のモデルチェンジ、b) 多品種を一人のデザイナーで担当、などの理由によって専任のモデラーを置くことは困難である。このため、デザイナーが直接 CAD システムを利用するか、利用せずに模型作成業者やインハウスのモデルショップでモックアップモデルを作成することが普通である。とくにデザイナーとしては、下流の設計工程の代替入力になる

ような単純作業を、デザインプロセスの一部に組込まれることに拒絶感が強い。また意匠形状といえども、家電品においては、その比重はそれほど大きくなく、内部構造を如何に包み込むかというような、構造性を考えながらのデザインになっている。

一方、模型の作成が困難であったり、曲面構造がそれほど複雑でない、車両などの産業機械などでは、3次元CADを直接利用して、構造検討を行ったり、デザイン図を作成している。ここでは、3次元CG的なCADシステムの利用がなされており、形状の厳密性よりは、解析的な曲面をペーパーモックの代わりに作成するような使用法が主体である。

3.4.2 CADを用いた形状創成方法

基本的には、高付加価値意匠曲面にはCADを使用していず、単純曲面を主体とした製品でCG的な使用法がなされている。ここでは、文献[2]、[3]のような、意匠形状創成用のCADを作成したときの形状定義方法について説明する。

デザイナーは通常デザイン図に表現される程度の線画の情報はスケッチ図から起こせるという仮定で、キャラクタラインのみを指定し、それらに囲まれた内部形状は広域曲面補間によって生成する。この生成に関しては、デザイナーの直感と一致する、平行移動・回転移動の組み合わせによって行えるようにしている。これによって、クレイモデルから形状を測定することなしに曲面格子のデータを作成でき、点群データを取り扱うCAMシステムへの繋ぎも容易になった。

3.4.3 形状入力と形状評価方法

前述のように、キャラクタラインの入力によって形状を入力する方法では、2次元のCADを使用して曲線を入力し、これから3次元の曲線を合成し、3次元曲面を創生する方法で形状入力を行ってきた。Pro/Engineerなどの市販CADの利用においても、同様の考えで入力しているが、曲面の生成範囲が狭いので手間は若干多いことになる。

現状3次元CADの利用方法はCG的であり、その意味で形状の評価は、見た目の評価になる。形状評価はCG画面で行うが、概略形状という意味での確認であり、家電品のスケール感・ボリューム感・操作性については、CGでは困難なので、モックアップを利用している。また、環境やリサイクル考慮の表面材料や塗料など検討が必要になってきており、このための基礎データが積み上がるま

では、実際の塗装で検討するケースもある。

3.4.4 CAD への要望

工業製品のデザインにおいては、当然製造を考慮したデザインが行わなければならない。しかしながら、設計工程での CAD データのデータ入力をデザイン工程で入れるような要求が強くなってきており、デザインプロセスの合理化による、デザイン生産性の向上という目的には反するような動きになっている。このため、現状 CAD への要望は、

- ・デザイン意図に沿った多様な形状入力手法
- ・下流工程とのインターフェイスを独立化できる形状モデリング
- ・非専門オペレータでも従来デバイスと同等以上の分かり易い入力コマンド・装置・ユーザインターフェイス
- ・造形力支援タイプの形状提案型 CAD
- ・画像・図面・仕様書等を融合し、デザイン意図を提案する発想支援 CAD などが望まれる。

参考文献：

- [1] Kimura F. : “Issues in Styling and Engineering Design” , Annals of CIPR Vol. 46 No2 pp. 1-8, (Aug. 1997)
- [2] Yajima A. et al. : “An Algorithm for Interpolation of Free-Form Surfaces” , J. of Information Processing Vol. 10 No. 2 pp. 74-80, (Apr. 1987)
- [3] 上西, 矢島 : “広域曲面補間法” , 情報処理学会論文誌 Vol. 27 No. 4 pp. 401-410, (Apr. 1986)

写真-3.4-01 冷蔵庫デザインの例

写真-3.4-02 車両デザインの例

写真-3.4-03 公共情報端末デザインの例

図-3.4-01 デザイン対象と特性

図-3.4-02 製品デザインの3要素

3.5 富士通（株）における例

3.5.1 デザインプロセスと CAD の活用の現状

情報技術の急速な進展により、従来一般の人々が目に触れることの少なかつた情報通信システム機器が人々の生活の中に浸透しつつある。富士通の製造・販売するこのような情報通信機器においても、近年、プラスチック外装の多用に伴って曲面を活用した3次元立体のデザインが増加してきた。従来、板金製の直方体でしかなかった大型コンピュータの本体でも、図-3.5-01 に示すような曲面形状が採用されてきている。このような3次元曲面をもった機器の開発プロセスにおいては、設計・製造の合理化と開発期間の短縮を目的として、3次元CADシステムの利用が必要となっており、設計の過程でのツールとして社内の各部門での適用が進んでいる。

図-3.5-01 大型コンピュータ本体の例

デザイン部門における従来からのデザインプロセスにおいては、デザインでの形状決定後に、設計部門にデザインデータを受け渡すための図面として、主として2次元のCADを用いていた。このデータ作成では、デザイナー自身が実装設計の条件を加味して、外観形状に関わるテクニカルドローイングを作成する作業を行っており、製造のための図面作成の一部を負担する作業となっている。上に述べたような、設計部門においてのCAD/CAMシステムの3次元化の進展にともなって、開発のステップの早い段階での3次元モデル化、図面化が望まれており、デザイン部門としてはデザイナーに対しての教育を行い、徐々に

3次元化への準備を進めているところである。

しかしながら、一方では、現在の3次元CADシステムでは形状データの入力やシステムの操作に意匠デザインとは別の特別な技能が要求されることもあり、デザイナーが3次元CADシステムを活用する際には大きな障壁となっている。

3.5.2 CADを用いた形状創成方法

意匠デザインの最初の段階である形状創成では、現在のところ、紙の上でのスケッチや発泡プラスチックの切削などの方法によりデザイナーの頭の中のイメージを具体的な形状に創成していく手法が主体となっている。この段階でのCADの使用は、ほとんど実績がなく、ラフスケッチがある程度できた後に、イメージをより具体的にしてクライアントにプレゼンテーションを行うために、レンダリング用のCADを用いたり、モックアップを業者に依頼する際に業者とのインタフェースに、一部簡単な3次元データを作成し使用している程度でしかないのが現状である。

しかし、モックアップを作成する段階では、CADデータによるNC加工が徐々に増加しつつあり、やはりデザインの早期の段階での電子化イメージ創成が必要になりつつある。

3.5.3 CADへの要望

パソコンをはじめとする個人向けの情報通信機器は技術の進歩が非常に速く、新製品の市場投入サイクルも他の分野に比べて短い。このような分野でのプロダクトデザインは短期間で質の高いデザインが要求される。形状創成段階でのCADが活用できれば上記の要求に応えるための大きな手段となると考えられるが、現状ではシステムの操作性やヒューマンインタフェースの点でデザイナーがストレスなく利用できるものはない。今後は、性能の高さや機能の豊富さよりも使いやすさに重点をおいたCADシステムの出現が期待される。このためには、高度な形状データベースと、知識データベースを有機的に結び付けることのできるアルゴリズムと誰でもストレスなく使えるインタフェースを持ったシステムが必要であると考えられる。

3.6 三菱電機(株)の例

3.6.1 はじめに

三菱電機では1983年からCADを導入し、デザインのCAD化に対しさまざまな試行をしてきた。ここ数年来、パソコンやワークステーションがデザインのツールとして欠かせない存在になりつつあり、従来の価値観では捉えきれないほどデザインの環境は急速に変化している。また、デザインという言葉も最近では極めて広義に捉えられ始めている。従来の製品のスタイリングだけでなく、事業化のコンセプトまでもデザインが担当する機会が増えており、この行為もデザインである。しかしながら、本報告では形状定義の方法論についての報告であり、デザインの行為をスタイリングから製品化までの従来の意味にかなり近い行為として定義しておく。

デザインのプロセスは製品化の最上流に位置づけられており、製品の外形形状を生産のための情報として設計部門へ様々な形で伝達してきた。スケッチやレンダリング、2次元の図面、デザインモデルなどである。近年になって、設計部門への外形形状としてのデザイン情報の移管はコンピュータを使ったデジタルデータでの移管が非常に効果的になって来ている。そのために、同じCADシステムを使用した設計部門への3次元データ移管はデザイン部門にとって避けられない環境になりつつあり、開発・生産工程の川上から川下へのシームレスなデータの一貫性がデザイン部門にも期待される様になってきた。

3次元CADの活用はデザイン部門が形状データに対して責任を持ち、より精度の高いデザイン情報を設計部門にトランスファーすることを可能にする。

一方で、現在の3次元CADは、設計条件のあいまいなデザインの段階でデザイナーが活用するにはかなり使いにくいというのが現状である。真にデザイナーのツールとなりうるCADシステムは設計変更に対する柔軟性を持ったCADのアプリケーションが不可欠ということになる。この設計変更に対する柔軟性は、形を「いじくる」デザイナーにとって非常に重要な要素であり、この試行錯誤が簡単にできないと、デザイナーは単に、決定した形状を3次元化するという作業を強いられることになる。形状に対する責任をデザイナーが持たなければいけないことは認識の上でも、デザイン部門本来の役割である美しい形を作るという創造性の発揮とはかけはなれた行為であり、3次元CADの活用に対する課題はますます多くなってきている。

3.6.2 CAD 利用の背景

デザイン部門を取り巻く CAD の環境はここ 2~3 年来著しく変化しており、下記事実を視野に入れながらデザインの役割を語らなくてはならない。

(1) 海外の OEM 先、OEM 元との商談の中で、3 次元データによるコミュニケーションが増加しつつある。この時、2 次元の図面は参考程度の扱いになっている。

(2) デザイナーの意図する曲面が高度化
最近のデザインの 1 つのトレンドとして 3 次元曲面を多用した形状が多くなっており、2D の図面だけでは形状を伝えるのに情報不足で、デザイナーが意図する形状を表現し、設計部門設計部門へ正確に伝える言語が必要となっている。

図-3.6-01 曲面解釈の曖昧性

図中の a、b、c の R は同じであるがそれぞれをつなげる面の解釈が異なる

(3) 製品の市場での競争力を高めるうえで、開発期間の短縮化/コスト低減が必須となっており、CAD データのシームレスな流れやデータの共有は重要になっている。

このような背景をベースとして、デザイン部門にとっては社内の生産システムや時代に合致した新しいデザイン CAD システムへの変革が絶えず不可欠である。CPU パワーとアプリケーションのバージョンアップは年 2 回以上が一般化しており、デザインも設備に対するタイムリーな投資が重要になりつつある。

3.6.3 3次元CADの現状

デザイナーがスケッチをする行為は自分の頭の中にある立体イメージを2次元におき変えるものであり、デザイナー同士はもとより設計部門、営業部門など第三者に対し形を伝えるコミュニケーション手段として有効である。3次元CADを使用して、デザインステップの極めて早い段階から立体形状とインタラクティブな検討ができる環境は、デザイナーにとって大きな魅力であり理想システムと言える。しかし残念なことにこの段階でデザイナーが手書きのスケッチやレンダリングよりもツールとして使いこなせる3次元CADはまだない。むしろ、2次元のパソコン用のドローイングツールの方がデザイナーの創造性をサポートするには効果的ツールとなり始めている。

一方、操作環境の普遍性や過去のデータ資産の流用はCADにとって重要な課題であるが、デザインCAD(スタイリング)に限っては、過去の資産流用よりも先に述べた設計の柔軟性や操作の簡単性の方が重要な要素になっている。これは、デザインの場合、特に新製品開発においては、その都度設計要件が変わるものであり、常に新規に形状定義しなければならず、過去の資産はあまり役に立たないのが現状である。むしろ、効率化といった観点よりも、CADにより図法上の矛盾の無さや寸法の正確さを期待しているといった方が適切かもしれない。

(1) デザインプロセスの変革

デザイン部門が、開発サイクルの短縮化と事業構想の早期意思決定を支援していくためには、できるだけ速くデザイン形状を確認し、ユーザー受容性について検討していく必要がある。

現在の設計部門のCADはPro-E、I-DEAS、Uni-Graphics、CATIAでほぼ市場分けされているが、デザイン部門も全社の生産システムの1部であり、デザイン部門に閉じた独自のCADシステムを検討することはあまり意味のないことといわざるを得ない。即ち、設計部門とのデータ共有によるコラボレーションは必須であり、データの変換がたいした労力をかけずに思いのまま可能になることが不可欠である。実際には、このデータ変換が大きなネックになっており、特に、履歴管理型のCADシステムが主流になるにつれて、設計部門と同じCADシステムを導入することが避けられない環境にある。

一方、デザイン内部の工程におけるデータの一貫性については余り述べられてはいない。しかし、デザイナーが効率的な業務を推進するうえではデザイン部門内のデータの共有や一元化も重要な課題である。ここでは下記の様な課題

が明らかになっている。

- ・アイデアスケッチはパソコンを使用するケースが増えてきており、ここで作成したデータをデザイン図面、版下、意匠登録等デザインの後工程で再利用したいこと。
- ・デザイン部門と協力関係にあるモデル業者全てが3次元データからの加工に対応しておらず、2D図面は必須である。従って、全ての工程を3次元化することは現時点では不可能であること。
- ・ワークステーションのCADは高価であり、1人1端末を目指すのは設備投資の点からも不可能であり、パソコンCADと組み合わせた実質的なCADシステムの構築が必須であること。
- ・従来のモデル加工に比べ、3次元データからのモデル製作は現状では納期メリット、コストメリットが少ないこと。(精度は良いが高くて、遅い)

(2) CADシステムにおけるインタフェースとデザイン評価

CADシステムにおけるインタフェースは一般論からすればデザイナーが真にツールとして活用するレベルに至っていない。それは、現状の市販の3次元CADシステムが設計ベースから進化してきたCADであり、すでに寸法が確定した形状を入力するという点ではそこそこのレベルになっているが、形を検討するというデザインの初期段階で使用するにはまだまだ工夫を要する。

しかし、ここ2～3年の間に良いソリッドモデラーが登場し比較的精度の高い曲面の定義が可能になってきたことがデザイン部門の3次元CAD化を加速している。これは、基本的にはサフェースモデルより、ソリッドモデルの方がデザイナー向きと言えるからである。それは紙細工を張り合わせるような面の定義をしていくサフェースモデルより、粘土をひっかいたり伸ばしたりしながら造形をするソリッドモデルの方がデザインの行為に近いからと言える。しかし、反対にソリッドモデルでは作れない面が在るのも現状であり、真にデザイナーにとって使いやすい3次元CADの開発を期待するべきである。

画面上でのデザイン形状の評価については、ハイライトや接線連続性などある程度の評価はCRT上で可能である。経験を積んでいけばデザイン内部での検討の工程は効率化できる可能性は持っているものの、やはり、重量や握り感覚など、最終的デザイン評価をするためにはデザインモデルは不可欠とも言える。少なくとも経営幹部が最終製品としてデシジョンするためにはデザインモデルは必要であると考えられる。

一方、3次元CADはデザインモデルを作れないような室内や景観など、モデル化できない対象に関してはメリットは大きく、CGのアニメーションによるプ

レゼンテーションの効果も大きい。このようなバーチャルなモデル化で、厳密な精度の寸法定義を必要としない分野においてはますますデザインのツールとして機能していくことが期待できる。

図-3.6-02 サフェースモデルとソリッドモデルの考え方

形状を定義するために個々の面を張っていくサフェースモデルと、基本的な固まりをガイドを使って削り取っていくソリッドモデル

3.6.4 その他の課題点

CADの活用により、何よりも期待効果が大きいのは、社内情報ネットワークによる情報伝達の即時性による効率化である。しかし、デザインの工程がデジタル化され、ネットワークを活用した新しいコミュニケーションができると、そこに新たな課題もでてくる。システム管理やシステムのアップグレードなどのメンテナンスにかかる人材や時間・コストも大きな課題としてとらえなければならない。デザイン部門は、デザインスキルに閉じた組織から、情報システム部門の支援が不可欠な環境になりつつある。

また、デザイナーが3次元CADを習得するためには教育プログラムは非常に重要な要素である。デザイナーにとって良い教育プログラムがあまり無いことも影響しており、CADベンダーと一体になった教育システムのあり方も議論しなければいけない時期に来ている。さらには、育成のための費用も相当投資せざるを得ない環境に在ることなども課題である。

以上、CADシステムの現状と課題について述べてきた。真にデザイナーのツールとなっていくためには、課題は山積みであるがデザイン部門にとって正面から取り組まなければいけない課題になっている。

第4章

3次元形状モデリングの技術的動向

4.1 形状モデリングの技術的動向

本章では、3次元の形状モデリングの技術的な動向について、最近の特徴的な傾向を簡単にまとめ、研究のトピックスをいくつか抽出しまとめを行った。最後に関連する論文の紹介をした。

4.1.1 最近の特徴的な傾向

(1) 式による曲線・曲面の生成

曲率が連続であるものとして、B2 スプライン補間曲線の研究が挙げられる。B-Spline 曲線は制御点を通過しないため、点列を指定して通過する曲線を作るのに複雑な計算を行う必要があった。そこで補間曲線の各制御点間に付加的な制御点（中間制御点）を挿入することにより、与えられた点を通過しかつ局所制御を可能にする B2 スプライン曲線が Woodward らにより提案された。

古川ら[1]は中間制御点を算出するために、曲率プロファイルが滑らかなになるような評価式をいくつか提案・比較し、評価した。

黒田ら[2]は局所性を制御できる C2 連続な B2 スプライン補間曲線を提案した。

また、曲率が連続であるこれ以外の曲線・曲面の生成の研究として、東ら[3]は縮閉線に基づいた曲率変化の滑らかな曲線・曲面の生成を提案し、デザイナーが曲線の間位置での接線方向を指定することにより、微妙なデザイナーの意図を満足するよう曲線形状の制御を可能にしたり、4境界線が与えられた場合に、これらの縮閉線を基に曲率変化の滑らかな曲面を生成する方法を提案した[4]。

また、黒田ら[5]はできるだけ曲線導出法を利用できるように配慮しながら、クロソイドスプライン補間曲線を拡張して曲率プロファイルを1～2次の B-Spline で表して制御することができる双クロソイド/第2クロソイドスプ

ライン補間曲線を提案した。内挿するものとして、Wenz[6]は一般化された円を利用して2次元曲線データをG1或はC1連続で内挿する方法を提案した。また、A. Nasri[7]は再帰分割技術を拡張して、定義した曲線を内挿する曲面生成を行なう手法を提案した。

スイープによって生成するものとして、Taiら[8]はSin関数を輪郭曲線とブレンドして周期スイープ曲面を生成する方法を提案し、日常生活中に見いだすことができる複雑な形状の物体を簡単にモデリングすることを可能にした。

また、Allenら[9]はDupin環状回転体と放物線形状回転体の両方を利用した自然な二次曲面間のpure blendの研究を討論した。

次数を減少させるものとして、Bogackiら[10]は端点内挿統一近似方法でBezier曲線の次数を減らす手法を提案した。

また、Eck[11]はBezier曲線の次数を最小自乗法で減らし、既存の方法よりも簡単かつ高速である手法を提案した。

その他の研究として、Maら[12]は任意点列をB-Spline曲線と曲面に最小自乗適合するためのパラメタライゼーションを提案した。

パラメタ化した分散点列から曲線と曲面を生成することはCADシステムの重要な機能の1つである。この提案されたパラメタ化手法は、規則的、不規則的、ランダム、いずれの分散の点列の処理に対しても有効である。

(2) パッチとメッシュによる曲面の生成

3角形パッチを用いるものとして、Hagenら[13]は3角形化概念の概要を説明して、応用例として、G1とG2で接続する3角形パッチによる穴曲面デザインのアプローチを提案した。

Peters[14]はBernstein-Bezier3辺3次パッチ系数を利用して、多面体を平滑化する方法を提案した。この手法の制約条件は頂点のところで高々4つの面しか扱うことができないことである。

また、Parkら[15]は分散した三次元点列を滑らかな曲面で近似するための適切な手法を提案した。近似曲面はC1連続3次3角形Bezier曲面の集まりで生成され、計算時間的にも効率的な手法である。

その他の手法を用いる研究として、Reif[16]は双4次のベジエパッチを用いて任意のトポロジーを持つメッシュ上に、ジオメトリ的に滑らかな曲面を生成する手法を提案した。

Maら[17]は、Bezierパッチで自由曲面を平滑化する統一的方法を提案した。この手法により、双三次パッチを利用してソリッド形状を覆うG1連続曲面を作成する。

Schneiders ら[18]は、金属加工過程における六面体要素メッシュの新しい生成アルゴリズムを提案した。

Peters[19]は、不規則メッシュを補間する四次多項式 C1 曲面の生成方法を紹介した。

(3) 曲線・曲面の性質

黒田ら[20]は、局所性のある C2 補間曲線のための最小化条件について検討した。この論文において、1 スパンが 6, 8 個の通過点から決まる曲線のために最小化条件の導入をはかり、局所性と滑らかさという相反する要求の追求について検討した。桜ら[21]は、完全同次処理の考えに基づいて 2 次有理 Bezier 曲線と 2 次 NURBS を同次空間において見直し、より一般的な性質を証明した。Kiciak[22]は、有理 Bezier 曲面間の G1 連続であるための必要十分条件を求めて、2 つのパッチ間を G1 連続にすることに対する問題点を分析した。

また Goodman ら[23]は、変多量 Bezier ネット凸包性の必要十分条件を求めた。

(4) 曲線・曲面の変形

鈴木ら[24]は、自由曲面上の曲線を変形することにより、曲面を変形する手法を提案した。しかし、変形の際には、適当なパラメータを与える必要がある。

Chen ら[25]は、NURBS 曲面のハイライト線を直接変更する手法を提案した。この論文の中で、NURBS 曲面の制御点とハイライトラインの関係を示す方程式を求めている。

Zhao ら[26]は、Lee と Majid(1991)の研究を拡張して、有理式で四辺形曲面を表現することを考え、ローカル制御パラメータを修正することを実現した。

Leon ら[27]は、曲面の制御ポリゴンと棒(板)網識の機械平衡係数の類似点を利用して、機械的なパラメータの変更でリアルタイムの形状修正を可能とさせる手法を提案した。

(5) 形状特徴とモデリング

形状特徴の研究として、鈴木ら[28]は CSG グラフを用いることによって、これまでの形状特徴モデリングでは十分に対応できなかった、形状特徴の干渉を扱うことができ、また付加的な形状特徴をより一般的に扱うことを可能にするモデルを提案した。

長坂ら[29]は、形状を生成するプロセスをルールによって記述し、そのルールを生成途中の形状の状態などの条件にあてはめることにより形状を生成する手法を提案した。

小島ら[30]は、設計背景情報と連携を目指して、製品モデルをシンボリックに表現する面ベース表現に仮想面という概念を導入し、フィーチャの位相と属性を簡潔かつシンボリックにテンプレートとして表現する方法を提案した。

Qamhiyahら[31]は、多面体表現のCADモデルから順次に形状特徴を抽出する新しい処理過程を提案した。

Cavendish[32]は、自由な形状変形とフィーチャベースの曲面デザインの技術を統合して2段階からなる1つのCADデザイン手法を提案した。この論文では、それぞれの手法の優れた点を統合することで、産業での実際の曲面デザインにおいてすばらしい効果を上げることを示している。

モデリングの研究として、増田[33]はこれまでのソリッドモデルの位相的な制約について解説し、柔軟な位相表現として3次元非多様体のデータ構造と位相表現を紹介した。また、非多様体形状の変形操作としてオイラー操作と集合演算操作についても解説している。

鈴木ら[34]は、多様体をベースとする階層型非多様体モデルを用いて、ソリッドモデリングにおける集合演算を曲面に拡張した分割結合演算やフィレットの復元の機能、その実現方法およびその理論的基礎について述べた。

東ら[35]は、丸めや桁落ちなどの誤差が原因で位相と幾何の矛盾が生じることを解決するために、新しい面によるデータ構造と頑強なアルゴリズムの多面体処理方法を提案した。

Leeら[36]は、新しい薄板モデルを紹介し、薄板物体を平面上に生成することを可能にする手法を提案した。この手法により、一旦薄板物体が生成されると、任意厚さのソリッドを自動的に生成することができるが、複雑な形状への対応に問題がある。

(6) その他の研究

曲線・曲面の干渉処理として、幾何的ニュートン法が広く使われているが、非有理である通常多項式として表された曲線・曲面のみを対象としているため、山田ら[37]は有理曲線・曲面も対象とする同次幾何的ニュートン法を提案した。

先田ら[38]は、工業デザインの初期段階での形状創成は、形状を塊として操作させる形状モデルが適しているという著者の観点から、形状モデルとして形状内部の電荷モデルの状態によって操作する手法を提案した。

桜ら[39]は、 4×4 行列式法に基づくポリゴンに対する点の内外判定を提案した。この論文の手法により、内外判定に広く使われている奇偶テストの問題点である幾何的問題と数値誤差問題が解決できる。また、この手法を拡張して2次曲線境界を含むポリゴンを対象とした手法も提案した[40]。

Barequet ら[41]は、CAD システムなどで生じるポリゴンの境界における隙間を検知し、修正するアルゴリズムを提案した。隙間の検知には、曲線のマッチング技術を用い、マッチングしない箇所には最適な3角ポリゴンを生成させることで解決している。

Field[42]は、ソリッドモデルから自動的に有限要素メッシュ生成する方法の歴史について述べた。早期のもっとも重要な技術と最近の先進技術の状況を特に強調している。

4.1.2 研究のトピックスの紹介

(1) 不規則メッシュ上に滑らかな曲面を貼る研究

(a) 研究の背景

B-Spline は、幾何モデリングにおいて部分的にしか曲面を表現することができない。これはB-Spline の制御点メッシュの中の点は、必ずその四角形の格子に囲まれているからである。したがって、四角形ような形状には有効であるが、自由形状にはあまり有効ではない。

この欠点を解決するために、現在よく使われている方法は、パッチの有理化などの手法である。しかし、この方法は別の問題点が生じている。例えば、有理化した曲面をスムーズに連結する要求などがある。

これらの課題に対して、Peters[14]はここで述べる新しい方法を提案している。

(b) 提案手法の概要

この論文では、B-Spline 表現式と技術を利用して不規則メッシュ上にスムーズな曲面を構築する概念と理論を示している。この方法は、三角形パッチをベースにして曲率が連続となるスプラインを定義している。

四角形でないメッシュおよび、頂点のところで4つより多いかあるいは少ない面が集まるメッシュを適切に処理するために、B-Spline 式を拡張したパラメータ多項式曲面を構築した。論文の中では、メッシュの点をB-Spline として扱い、局所的に平均化して、Bernstein-Bezier 表現式を得ている。これを利用して曲面上の点を定義する。

ここでは、まず制御点メッシュやメッシュを定義し、 G_k を保つ二つのパッチを連結するための対称性や次数を限定し、 G_k を保つ n 個パッチを接続するための対称性や微分方程式などのスプライン曲面を算出・分析するための、重要な

概念と技術を紹介した。さらに、不規則メッシュの制御点から C2 連続曲面の Bernstein-Bezier 表現式を生成するアルゴリズムを紹介した。次に、紹介したアルゴリズムで生成したスプラインの連続性と空間の性質を討論した。最後に C2 曲面スプラインの形状特性を討論した。

結論として、今までよく使われている手法（コーナを切削、再分割など）でメッシュを生成して、B-Spline の方法を利用して曲面を生成すると、形状のスムーズ性に問題があることがわかった。

この問題をうまく解決するために、スプライン式および理論を拡張して不規則メッシュ上の曲率が連続となるスプライン曲面の生成方法を提案した。この方法はソリッドモデルのスムーズ化には有効な方法である。論文の中には、提案した方法のアルゴリズムのソースが公開されている。

(2) ハイライトラインを直接用いて曲面を変形する研究

(a) 研究の背景

NURBS は、自動車の設計製造に利用される CAD でもっとも多く利用されている曲面表現形式である。NURBS は、インタラクティブな形状の作成や修正、クレイモデルからの CAD データへの変換などに利用される。また異なる CAD 間のデータ交換にも業界標準として広く利用されている。

制御点を発生し、移動させることで、自由曲面を作成し、修正する能力が、NURBS の大きな強みである。しかし、デザインの最終段階では、制御点の操作では直接的に操作できない特性、例えば、ハイライトラインやリフレクションラインやアイソフォトとして表現される反射パターンなどが重要となる。

したがって、直接的に反射パターンなどを指定して曲面を補正する手法が望まれていた。これらの課題に対して Chen[25]らはここで述べる新しい方法を提案している。

(b) 今までの研究の問題点とこの研究の目的

Klass(1980)は、差分形状に基づき、複数のリフレクションラインに加えた修正から、曲面の補正量を近似して、この推定補正量分だけ元の曲面に修正オフセットの集合を加える事で指定したリフレクションラインを得るという手法を提案した。

この手法では、修正された部分で元の曲面の定義が失われるという問題点がある。

Kaufman & Klass(1988)は、アイソフォトを用いて曲面の骨格となる複数のスプライン曲線を修正するというよく似た手法を提案した。最初の手法と比べる

と、この手法では、スプラインを修正するために、修正オフセットの集合を加えるのではなく、同様の定義のスプラインを加えている。このために、元の曲面の復元が容易になっている。

この研究では、反射パターンの中でも、特にハイライトラインに注目し、望ましいハイライトラインを指定すると、自動的に NURBS 曲面の制御点を補正する手法を開発する事を目指した。

(c) 提案手法の概要

曲面のハイライトライン上に参照点を作り、この参照点を曲面上で動かしてハイライトラインを制御する。新しい参照点の位置から新しい曲面の制御点の位置を求め、曲面を補正する。曲面の制御点の数は、変更しない。

内部処理としては、ハイライトラインの定義式と NURBS の定義式および参照点の情報から非線形方程式を求め、この方程式を一階のテイラー展開を利用して解く。解を安定して得るためには、参照点の選択と選択した参照点に対応する制御点の選択を的確に行うことが重要である。ハイライトラインの解析的な表現が得られないために、理論的に上記の選択を的確に行うことはできない。しかし、現実的には、今回の手法で採用した Maximum Influence Rule (1つの参照点に対してもっとも影響する 2つの制御点を選ぶ方法)は十分役立つことがわかった。

また、ハイライトラインの変更が曲面全体に及ぼす影響を制御するために Displacement Function を採用した。

図-4.1-01 にこの手法の例を示す。(a) は元の曲面であり、実線がハイライトライン、点線が望ましいハイライトラインを示す。(b) は、影響範囲を狭めた上で望ましいハイライトラインを得るように曲面を変形した例である。

(c) は、影響範囲を広げた上で望ましいハイライトラインを得るように曲面を変形した例である。

(d) 今後の課題

現在の手法では、次の限界がある。

(i) 一階のテイラー展開を用いたことによる近似誤差がある。誤差の大きさは、ハイライトラインの輝度と曲面の曲率による。

(ii) 1枚の NURBS 曲面上のハイライトラインしか取り扱えない。

(iii) ハイライトラインがほぼ、曲面の UV 方向に沿っている必要がある。今回の手法では、ハイライトラインが曲面の UV 方向にほぼ沿っていないとうまく処理できない。UV 方向に対して対角上に走るハイライトラインやループをなす

ようなハイライトラインに関しては対処できない。

(3) CSG グラフによる付加的形状特徴のモデリング

(a) 研究の背景

設計や製造を指向した製品モデリングシステムの一要素として、形状特徴モデリング機能が利用され始めている。

Patt は、形状特徴モデリングを立体モデラ上で実現するためには、形状を表すボリューム（体積）を明示的に表現することの必要性を指摘している。これは、形状特徴の消去や変形の操作を行う場合に必要となる。この消去や変形の方法としては、CSG による方法と非多様体による方法がある。CSG による方法は、CSG 木の節点と形状特徴を対応させる方法で、商用のシステムでも採用されている。

また、非多様体モデルによる方法は、形状特徴に対するボリュームを集合演算する際に、立体を空間分割することによって、形状特徴ボリュームを保持しようとするものである。いずれも、形状特徴を基本立体として表現し、それを集合演算によって全体形状に付加するという点では共通している。

(b) CSG 木の問題点

形状特徴から構成される形状は、いくつかの形状特徴によって構成されている。このようなモデリングを行なうには、形状特徴を基本立体で表現しておき、集合演算によって全体形状に付加していく。問題は、この CSG 木を見ても形状特徴が全体形状の中でどのような具体形をとっているかはっきりとわからないことである。つまり、このような具体形に対応する節点がないのである。これは形状特徴の応用の点からも都合が悪い。

この問題は、和特徴と差特徴の干渉の記述が、CSG 木では十分に行なわれていないことに起因している。

これらの課題に対して鈴木[28]らはここで述べる新しい方法を提案している。

(c) 提案手法

この研究では、CSG 木を拡張した CSG グラフを提案し、和特徴と差特徴の干渉を記述する枠組を用意し、差特徴の影響範囲の制御や、具体形をはっきりと表現することを目的とした。

CSG グラフは、CSG 木に再構成演算子を加えることによりグラフ構造となったものであり、非循環、根付き、順序付きの有向グラフである。順序付きとしたのは、差演算の定義において引かれるものと引くものを区別するためである。

また、部品（部品全体の形状を表現、正の体積の集合和で構成される）、ブロック（プリミティブの組合せで表現）、プリミティブ（円柱や直方体などの基本立体）は、それぞれ CSG グラフの根、根に接続する節点や葉に対応する。

(d) 今後の課題

より複雑な形状や干渉に対する評価ができない。これは、再構成演算子の指定が困難になることが予想されるためである。具体的にどのような指定の方法を設計者に与えるかが重要である。また、形状特徴モデリングのための演算子の拡張なども課題である。

(4) 形状を塊としてとらえる研究

(a) 研究の背景

工業デザインの初期の段階では、一般に形状は確定していない。その場合に通常の CAD システムを用いることには操作面および、試行錯誤の面から問題があった。それを解決する 1 つの方法として、形状を表面の定義という考え方から、塊としてとらえる等ポテンシャル面の考え方をを用いて解決しようとする試みが、Blinn、西村、先田らによって研究されている。

従来の CAD では、自由曲面などの形状をパラメトリックな曲面で定義を行うため、あらかじめ明確な数値を設定する必要がある。しかし、デザインの初期段階ではそのような明確な数値は定まっておらず、試行錯誤をしながら作成していくには不向きであった。等ポテンシャル面は明確な数値を設定する必要がなく、滑らかな曲面を作成することができ、滑らかな形状の融合が可能で、試行錯誤することが容易にできる。

ここでは、先田ら [38] によって提案されている濃度空間モデルについて詳しく述べる。濃度空間モデルは、Blinn の blobby model や西村らのメタボールを改良した形状モデルとして提案されている。

(b) 従来の等ポテンシャル面の問題点

従来提案されている等ポテンシャル面は物体の表現に多くのプリミティブ形状が必要である点、幾何形状が近似表現になってしまう点、また、形状操作の影響範囲と結果の予想がつけにくい点などが問題点としてあった。

これは、空間上の 1 点のポテンシャルが複数の電荷のポテンシャルの集合として計算され、電荷のポテンシャルは距離の比で指数的に減衰するために距離が離れてもお互いに影響を及ぼし合うこと等の理由から生じる。

(c) 提案手法

この研究では、従来の等ポテンシャル面を拡張したものを濃度空間モデルと呼び、

$$\text{濃度値} = \text{濃度プリミティブ (従来と同じ距離の比で指数的に減衰するポテンシャル成分)} + \text{幾何プリミティブ (濃度値一定)} - \text{閾値}$$

として表現している。

さらに、面分の放線方向だけに影響を及ぼす電荷モデルを導入した。そのために濃度分布曲面、減衰率曲面を定義している。

これらの拡張により、形状の演算、フィレット形状（濃度分布曲面と減衰率曲面がともに均一な平面プリミティブをプリミティブに付加）、アール形状（直方体の幾何プリミティブの稜線に負の濃度値をもつ管面プリミティブを付加し、頂点付近には負の球面プリミティブを付加）、形状の融合などが簡単に行えるようになった。

これらの演算を用いた、意匠設計の適用例も示されている。

(d) 今後の課題

濃度プリミティブの電荷モデルの影響範囲の設定と組み合わせによっては加工工程から要請される法線ベクトルの連続性が保証されない場合があり、今後の課題となっている。また、形状の局所制御性の達成も今後の課題である。

関連文献：

[1] 古川 進, フロランテ サルバドール, 黒田 満, 牧野 洋: “滑らかな局率プロファイルを有する B2 スプライン補間曲線”, 設計工学 Vol. 29 No. 5 pp. 31-36, (1994)

[2] 黒田 満, 古川 進, 木村 文彦: “局所性を制御できる C2 連続な B2 スプライン補間曲線”, 精密工学会誌 Vol. 60 No. 1 pp. 65-69, (1994)

[3] 東 正毅, 川畑 弘幸, 毛利 仁: “縮閉線に基づく曲率変化の滑らかな曲線, 曲面の生成(第 2 報)”, 精密工学会誌 Vol. 60 No. 4 pp. 519-523, (1994)

[4] 東 正毅, 蔦森 秀夫: “縮閉線に基づく局率変化の滑らかな曲線, 曲面の生成(第 3 報)”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 9 pp. 1272-1276, (1996)

[5] 黒田 満, 斉藤 剛, 渡辺 由美子, 東 正毅: “曲率連続な双クロソイド/第 2 クロソイドスプライン補間曲線”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 6 pp. 801-806, (1997)

- [6] Hans-Jorg Wenz: “Interpolation of curve data by blended generalized circles” , CAGD Vol.13 pp.673-680, (1996)
- [7] A.Nasri: “Curve interpolation in recursively generated B-spline surfaces over arbitrary topology” , CAGD Vol.14 pp.13-30, (1997)
- [8] Chiew-Lan Tai, Kia-Fock Loe: “Surface design via deformation of periodically swept surfaces” , The Visual Computer Vol.0 No.12 pp.475-483, (1996)
- [9] Seth Allen, Debasish Dutta: “Cyclides in pure blending II” , CAGD Vol.14 pp.77-102, (1997)
- [10] Przemyslaw Bogacki, Stanley E. Weinstein, Yuesheng Xu: “Degree reduction of Bezier curves by uniform approximation with endpoint interpolation” , Computer Aided Design Vol.27 No.9 pp.651-660, (1995)
- [11] Matthias Eck: “Least squares degree reduction of Bezier curves” , Computer Aided Design Vol.27 No.11 pp.845-851, (1995)
- [12] Weiyin Ma, J. P. Krush: “Parameterization of randomly measured points for least squares fitting of B-spline curves and surfaces” , Computer Aided Design Vol.27 No.9 pp.663-675, (1995)
- [13] Hans Hagen, Gregory Nielson, Yasuo Nakajima: “Surface design using triangular patches” , CAGD Vol.13 pp.895-904, (1996)
- [14] Jorg Peters: “Smoothing Polyhedra Made Easy” , ACM Transactions on Graphics Vol.14 No.2 pp.162-170, (1995)
- [15] Hyungjun Park, Kwangsoo Kim: “An adaptive method for smooth surface approximation from scattered 3D points “ , Computer Aided Design Vol.27 No.12 pp.929-939, (1995)
- [16] Ulrich Reif: “Biquadratic G-spline surfaces” , CAGD Vol.12 pp.193-205, (1995)
- [17] Lizhuang Ma, Quncheng Peng: “Smoothing of free-form surfaces with Bezier patches” , CAGD Vol.12 pp.231-249, (1995)
- [18] Robert Schneiders, Rolf Buntgen: “Automatic generation of hexahedral finite element meshes” , CAGD Vol.12 pp.693-707, (1995)
- [19] Jorg Peters: “Biquartic C^1 -surface splines over irregular meshes” , Computer Aided Design Vol.27 No.12 pp.895-903, (1995)
- [20] 黒田 満, 木村文彦, 古川 進: “局所性のある C^2 補間曲線のための最小化条件” , 精密工学会誌 Vol.60 No.6 pp.843-846, (1994)
- [21] 桜林, 吉田 典正, 花蜜 宏晃, 山口 富士夫: “2 次有理 Bezier 曲線お

- よび2次NURBSの同次表現について”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 4 pp. 504-508, (1997)
- [22] Przemyslaw Kiciak: “Constructions of G^1 continuous joins of rational Bezier patches”, CAGD Vol.12 pp.283-303, (1995)
- [23] Tim N.T. Goodman, Jorg Peters: “Bezier nets, convexity and subdivision on higher-dimensional simplices”, CAGD Vol.12 pp.53-65, (1995)
- [24] 鈴木 宏正, 山本 貴史, 金井 崇, 木村 文彦: “面上線による自由曲面形状の操作”, 精密工学会誌 Vol.62 No.1 pp.75-79, (1996)
- [25] Yifan Chen, Klaus Beier, Dimitris Papageorgiou: “Direct highlight line modification on nurbs surfaces”, CAGD Vol.14 pp.583-601, (1997)
- [26] Pei Zhao, Hung Chuan Teh: “Rational bicubic simple quadrilateral mesh surfaces”, The Visual Computer Vol.0 No.11 pp.401-418, (1995)
- [27] J.C.Leon, P.Veron: “Semiglobal deformation and correction of free-form surfaces using a mechanical alternatives”, The Visual Computer Vol.0 No.13 pp.109-126, (1997)
- [28] 鈴木 宏正, 田中 一郎, 木村 文彦: “CSG グラフによる付加的形状特徴のモデリング”, 精密工学会誌 Vol.60 No.4 pp.509-513, (1994)
- [29] 長坂 一郎, 山岸 淳, 田浦 俊春: “意匠デザインのための3D形状モデル(第2報)”, 精密工学会誌 Vol.63 No.2 pp.193-197, (1997)
- [30] 小島 広久, 東 正毅: “面ベース表現に基づくフィーチャ記述と生成”, 精密工学会誌 Vol.63 No.7 pp.982-986, (1997)
- [31] A. Z. Qamhiyah, R. D. Venter, B. Benhabib: “Geometric reasoning for the extraction of form features”, Computer Aided Design Vol.28 No.12 pp.887-903, (1996)
- [32] James C. Cavendish: “Integrating feature-based surface design with freeform deformation”, Computer Aided Design Vol.27 No.9 pp.703-711, (1995)
- [33] 増田 宏: “非多様体形状の位相表現”, 設計工学 Vol.29 No.7 pp.1-6, (1994)
- [34] 鈴木 建彦, 江口 誠治, 本多 正人, 石井 清継, 谷本 茂樹: “多様体をベースとする階層型非多様体モデルの理論と応用”, 精密工学会誌 Vol.59 No.10 pp.1665-1670, (1993)
- [35] Masatake Higashi, Fuyuki Torihara, Nobuhiro Takeuchi, Toshio Sata, Tsuyoshi Saitoh, Mamoru Hosaka: “Robust algorithms for face-based

- representations” , Computer Aided Design Vol. 29 No. 2 pp. 135-146, (1997)
- [36] Kunwoo Lee, Ho Sang Lim: “Efficient solid modelling via sheet modeling” , Computer Aided Design Vol. 27 No. 4 pp. 255-262, (1995)
- [37] 山田 教, 松村 潔, 山口 富士夫: “”同次幾何的ニュートン法による有理曲線, 曲面に対する干渉処理”” , 精密工学会誌 Vol. 61 No. 2 pp. 203-207, (1995)
- [38] 先田 和弘, 井越 昌紀: “濃度空間モデルによる意匠形状設計” , 精密工学会誌 Vol. 61 No. 6 pp. 795-798, (1995)
- [39] 桜 林, 吉田 典正, 花蜜 宏晃, 山口 富士夫: “4×4 行列式法に基づくポリゴンに対する点の内外判定” , 精密工学会誌 Vol. 62 No. 8 pp. 1177-1181, (1996)
- [40] 桜 林, 吉田 典正, 花蜜 宏晃, 山口富士夫: “4×4 行列式法に基づく 2 次曲線境界を含むポリゴンに対する点の内外判定” , 精密工学会誌 Vol. 62 No. 12 pp. 1712-1716, (1996)
- [41] Gill Barequet, Micha Sharir: “Filling gaps in the boundary of a polyhedron” , CAGD Vol. 12 pp. 207-229, (1995)
- [42] David A. Field: “The legacy of automatic mesh generation from solid modeling” , CAGD Vol. 12 pp. 651-673, (1995)

4.2 形状入力の研究動向

本節では形状入力に関する研究の動向について関連する論文の紹介とその概要を述べる。三次元形状の入力方法を

- 4.2.1 スケッチによる形状入力
 - 4.2.2 三次元空間における形状入力
 - 4.2.3 三面図からの形状入力
 - 4.2.4 実体モデルを用いた形状入力
- に大別してそれぞれ述べる。

4.2.1 スケッチによる形状入力

ファジー理論を用いたペンベースの入力システムの提案として C. L. Philip Chen ら [1] によるものがある。本システム (Fuzzy Freehand Drawing System: FFDS) は、リアルタイム描画システムであり、入力の位置・速度・加速

度といった情報をもとに幾何図形を生成する。従来手法でも速度・加速度を用いた手法があったが、遅い描画への適応ができず描き手の意図しない抽出が行なわれたり手振れによる誤抽出が行なわれるといった欠点がある。しかし、ファジー理論を用いることによりそれらの誤抽出点を削除することが可能となる。なお、本論文では直線・円・円弧・楕円・B-Spline の清書アルゴリズムを扱っている。

明尾により、デザイナーの描く一枚のアイデアスケッチからの素早い自由曲面モデルの生成と、その自由曲面モデルの修正を行なう手法についての提案が行なわれている。従来手法では拘束条件として物体形状の直交性や左右対称性を利用していった。そこで自由度の高い自由曲面形状を扱うために、2次元画を3次元に復元する付加情報としてスケッチ画の断面線に着目している。形状生成には消失点及び断面線を用い空間座標値を求め、ワイヤフレームモデルを作成する。なお、曲面にはB-Spline 曲面を用いている。

H. Lipson らは手書きスケッチを3次元モデルへ変換する手法についての提案を行なった。本手法は、隠れ線を含む3次元形状を単線でフリーハンド入力する。その入力された図形を線分および頂点接続グラフに変換し、その情報を基に3次元形状変換を行う。従来手法では正確な透視図であることが必要であったり、生成可能な形状が限られていたが、提案手法ではさまざまなオブジェクトタイプの不正確なスケッチから3次元形状を再構成することを試みている。

Lynn Egli らは手書き入力による簡易的な3次元形状の入力手法を提案した。稜線として入力可能な要素は直線・円弧・B-Spline カーブであり、それらはモード選択により入力を切替える。また、平行・垂直といった制限もモード選択により行なう。清書された図形に対して制御点の操作を行ない形状変形を行なう。そして、出来上がった2次元図形をスイープすることにより3次元形状を生成する。更に、その3次元形状に対し切り抜きの長方形や円といった特徴を与えることにより、切り抜きが可能となっている。なお本論文では、簡単なB-Spline 曲面の入力についても述べられているが単体の生成についてしか述べられておらず、修正法については述べられていない。

松田らによって、手書きスケッチを用いた形状入力システムが提案されている。従来のスケッチ入力を扱った研究は、単線による入力しか受け付けなかったが、本論文では、スケッチが多数の線群から構成されることに着目し、重ね描きによる描画を可能にする柔軟な入力インターフェースを提案している。重ね描き処理による長所は、修正処理も同様のアルゴリズムで扱うことを可能にすることであり、試行錯誤を実現する手段として有効である。重ね描きによる

処理を行うのは描画する 2 次元平面上においてだが、3 次元モデラの入力インターフェースとして実装することにより、投影面に投影されている 3 次元モデルに直接描画し、切断線を描くなどのインターフェースとして適用可能である。

4.2.2 三次元空間における形状入力

Elvis Ko-Yung Jeng[6]はリアルタイムに 3 次元空間上にある形状に対し直接操作をすることのできる手法を提案した。ディスプレイに表示されている 3 次元形状をクレイモデルのように自由に変形できるようにしたいという要望がある。現在のところ実現が非常に難しいが、柔軟さと正確さを兼ね備えた位置決定・彫刻操作の可能な直接入力の手法がないことが要因である。提案手法では Editing Cursor Plane と呼ぶ面で作業を行なう。扱う 3 次元形状は三角形ポリゴンで生成されていることを前提としている。また、Editing Cursor Plane には立体が平行投影されており、ポリゴンの頂点の奥行きを操作することにより変形操作を行う。

小堀ら[7]は三角形パッチにより立体の大まかな形状を自動生成する手法を提案した。一般に製品の外形は、その内部に含まれる部品を外包している。この考え方に基づき、本手法では内部部品に相当する基本立体を空間内に配置し、それを覆うような概観形状を自動生成する。生成される形状は直方体、錐体、柱体、球などの基本立体を組み合わせてできる基本立体群を覆い、ある程度滑らかなものとして生成される。デザイナーは自動的に生成された初期形状を CAD システムを用いて変形していくことにより、容易に意匠設計を行うことができる。本手法では最初に直方体、錐体、柱体、球などの基本立体群を空間内に配置する。次に、この立体群を包含する凸包を生成する。凸包の各面は三角形パッチに分割され、各パッチはできるだけ正三角形に近づくように整形処理が施される。最後に生成された三角網を弾力性のある網モデルと考えそのエネルギーが最小となる状態に収縮させることにより基本立体群を包含する形状が生成される。デザイナーはこの初期形状を従来の CAD に備わっている局所変形などの操作により、所望の形状へ対話的に近づけていくことが出来る。

4.2.3 三面図からの入力

小堀ら[8]によって、与えられた 2 次元図面を元に、あらかじめ分類された曲面モデルにあてはめて 3 次元曲面を生成する手法の提案がなされた。従来手法では 2 次元曲面を含んだ立体形状を中心に論じた手法は少ない。一般に曲面を含

む立体形状生成が困難であるのは立体形状を3面図に投影した場合にワイヤフレームの生成に必要な要素が消失するからである。そこで対象曲面を体系的に分類し、3面図に対し消失している直線・曲線を付加することにより3次元復元を可能にする。なお、復元可能な曲面は2次元図面において直線・円・円弧で表すことの可能な形状、すなわち2次曲面およびトーラス面である。

増田、沼尾[9]は3面図からソリッドモデルを生成する際に2次元データと3次元データの中間のデータ構造としてセル表現を用いる手法を提案した。セル表現は2次元図面から考えられる3次元形状の候補を統一して扱えるという点で、2D-3D変換に対して非常に強力である。3次元形状と3面図から得られる制約はブール演算の連立方程式として表現され、それらの解はATMSによって瞬時に求められる。本手法を用いることで(1)3次元形状の表現であるワイヤフレーム、サーフェースモデル、ソリッドモデルが統一的なデータ構造で表現できる非多様体形状モデルは2D-3D変換に適している。(2)非多様体位相表現に基づくセル表現は非常に多くの立体の候補を素早くサーチできる。

参考文献：

- [1] C. L. Philip Chen, Sen Xie: “Freehand drawing system using a fuzzy logic concept”, *Computer Aided Design* Vol. 28 No. 3 pp. 77-89, (1996)
- [2] 明尾誠: “スケッチ図からの三次元形状の生成”, *設計工学* Vol. 29 No. 7 pp. 17-21, (1994)
- [3] H. Lipson, M. Shpitalni: “Optimization-based reconstruction of a 3D object from a single freehand line drawing”, *Computer Aided Design* Vol. 28 No. 8 pp. 651-663, (1996)
- [4] Lynn Eggli, Ching-yao Hsu, Beat D Bruderlin, Gershon Elbert: “Inferring 3D models from freehand sketches and constraints”, *Computer Aided Design* Vol. 29 No. 2 pp. 101-112, (1997)
- [5] K. Matsuda, S. Sugishita, Z. Xu, K. Kondo, H Sato, S. Shimada: “Freehand Sketch System for 3D Geometric Modeling”, *Shape Modeling International '97*, pp. 55-62, (1997)
- [6] Elvis KoYoung Jeng, Zhigang Xiang: “Moving cursor plane for interactive sculpting”, *ACM Transactions* Vol. 15 No. 3 pp. 211-222, (1996)
- [7] 小堀研一, 梅本耕二, 藤村真生, 久津輪敏郎: “意匠設計のための初期形状の自動生成”, *設計工学* Vol. 32 No. 9 pp. 17-25, (1997)
- [8] 小堀研一, 馬場裕行, 久津輪敏郎, 二上範之: “曲面を含む3面図からの

立体自動生成” , 設計工学 Vol. 31 No. 4 pp. 15-22, (1996)

[9] Hiroshi Masuda, Masayuki Numao: “A cell-based approach for generating solid objects from orthographic projections”, Computer Aided Design Vol. 29 No. 3 pp. 177-187, (1997)

[10] 石原肇: “図面の三次元化” , 設計工学 Vol. 29 No. 7 pp. 22-26, (1994)

[11] Dov Dori, Karl Tombre: “From engineering drawings to 3D CAD models: are we ready now?” , Computer Aided Design Vol. 27 No. 4 pp. 243-254, (1995)

関連文献 :

形状入力の研究に関連のある文献を以下に列挙する。

[12] 金井 理, 遠藤 明彦, 堀田 邦彦, 青木 潔: “デザインスケッチからのリアルタイム NURBS 曲線生成の研究” , 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集」 (1997)

[13] Paul Stewart, Pietro Buttolo, Yifan Chen: “Data Representation for Haptic Virtual Prototyping” , ASME 1997 Design Engineering Technical Conference, DETC97/CIE-4307, (1997)

[14] Kanai S., Takahashi H.: “Modeling And NC Programming for Free-Form Surfaces by Haptic Interfaces” , Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conference and Computers in Engineering Conference, ASME, New York, 96-DETC/DFM-1410, (1996)

[15] Massie T.H., Salisbury J.K.: “The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects” , Proceedings of the 1994 Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition, Dynamic Systems and Control Division, ASME, New York, DSC-55-1, pp. 295-299, (1994)

[16] Todd Furlong: “Virtual Reality Sculpture using Free-form Surface Deformation” , ASME 1997 Design Engineering Technical Conferences, DETC97/DFM-4511, (1997)

[17] Eric J. Stollnitz, Tony D. DeRose, Davis Salesin: “Wavelets for Computer Graphics -theory and applications-” , Morgan Kaufmann Publishers, Inc. (1996)

[18] J.M. Lounsbery: “Multiresolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type” , PHD Thesis Paper, Univ. of Washington (1994)

[19] Matthias Eck, Tony DeRose, Tom Duchamp (Univ. of Washington), Hugues

Hoppe (MicrosoftResearch), M. Lounsbery (Alias Reseach): “Multiresolution Analysis of arbitrary Meshes” , ACM Computer Graphics SIGGRAPH 95 pp. 173-182, (1995)

[20] Huges Hoppe, etc: “Surface Reonstrcution from unorganized points” , SIGGRAPH’ 92 pp. 71-78, (1992)

[21] Huges Hoppe etc: “Mesh Optimization” , SIGGRAPH ’ 93 pp. 19-26, (1993)

[22] Huges Hoppe, etc: “Piecewise Smooth Surface Reconstruction”, SIGGRAPH ’ 94 pp. 295-302, (1994)

[23] Kanade. Takeo : “Recovery of the Three Dimensional Shape of an Object from a Single View “, Artfical Intelligence, 17, pp. 409-460, (1981)

[24] 前原一夫, 川島孝夫, 金谷健一 : 直交性仮説による多面体の3次元形状復元, 電子情報通信学会論文誌(D-II), J72-D-II-6, pp. 887-895, (1989)

[25] 趙修偉, 大沼一彦 : 物体の鏡面对称性を利用して2次元画像から3次元情報を復元する方法, デザイン学研究, 78, pp. 23-28, (1998)

[26] 田中雅次 : 三面図からの自動立体生成法、グラフィックスとCAD, 59, 3, pp. 17, (1992)

[27] 佐々木康仁, 伊藤潔, 鈴木誠道 : 非線形疑似ブール代数解法による三面図からの物体の自動合成, 情報処理学会論文誌, 30, 6, pp. 699, (1989)

[28] 高橋正充, 伊藤潔 : 疑似ブール代数解法による三面図からの物体の自動合成, 情報処理学会論文誌, 32, 6, pp. 640, (1991)

[29] 千田豊満 : 三面図からのもとの立体の自動復元 (平面だけで構成される立体への適用) , 情報処理学会論文誌, 31, 9, pp. 1312, (1990)

[30] 千田豊満 : 三面図からのもとの立体の自動復元 (円柱部分を含む立体への適用) , 情報処理学会論文誌, 32, 9, pp. 1122 , (1991)

[31] 井上正博, 金昌憲, 西原清一 : 代数曲面を含む三面図の解釈, グラフィックスとCAD, 61, 2, pp. 9, (1993)

[32] H. Sakurai , D.C. Gossard : Solid Model Input through Orthographics Views, Proc. of SIGGRAPH ’ 83, 17, 3, pp. 243, (1983)

[33] Lipson H and Shpitalni M : A new interface of conceptual design based on object reconstruction from a single freehand sketch, Ann. CIRP Vol. 44, No. 1, pp. 133-136, (1995)

[34] Shpitalni M and Lipson H : Identification of faces in a 2D line drawing projection of a wireframe object, IEEE Trans. Pattern Analiysis && Machine Intell.

[35] Sugihara K : Machine Interpretation of Line Drawings, MIT Press (1986)

- [36] Nagendra I V and Gujar U G : 3D objects from 3D orthographic views--a survey, *Comput. Graph.* Vol.12 No.1, pp.111-114, (1998)
- [37] Wang W and Grinstein G : A survey of 3D solid reconstruction from 2D projection line drawings, *Comput. Graph. forum* Vol.12, pp.137-158, (1993)
- [38] Huffman D A : Impossible objects as nonsense sentences, *Machine Intelligence* Edinburgh University Press, pp.79-116, (1971)
- [39] Kanade T : Recovery of the three dimensional shape of an object from a single view, *Artificial Intelligence*, Vol.17, pp.409-460, (1980)
- [40] Marill T : Emulating the human interpretation of line drawings as three dimensional objects, *Int. J. Comput Vision*, Vol.6, No.2, pp.147-161 (1991)
- [41] Leclerc Y G and Fischler M A : An optimization based approach to the interpretation of single line drawings as 3D wire frames, *Int. J. Comput Vision*, Vol.9, No.2, pp.113-136, (1992)
- [42] Lamb D and Bandopadhyay A : Interpreting a 3D object from a rough 2D line drawing, *Proc. First IEEE Conf. on Visualization 90*, pp.59-66, (1990)
- [43] Marti E, Regomcos J, Lopez-Krahe J and Villanueva J J : Handline drawing interpretation as three dimensional object, *Signal Process.* Vol.32, pp.91-110, (1993)
- [44] Grimsted I J and Martion R R : Creating solid models from single 2D sketches, *Proc. Third Symp. on Solid Modeling Applications*, ACM Siggraph, pp.323-337, (1995)
- [45] Dori D : Dimensioning Analysis -- toward automatic understanding of engineering drawings, *Commun. ACM*, Vol.35, No.10, pp.92-102 (1992)
- [46] Friedberg, S A : Finding axes of skewed symmetry : *Comput. Vision Graph. & Image Process*, No.34, pp.138-155, (1986)
- [47] Aldefeld, B. : Variation of geometries based on a geometric-reasoning method, *Computer-Aided Design*, 20(3), pp.117-126, (1988)
- [48] Bouma, W., Fudos, I., Hoffmann, C., Cai, J. and Paige, R., A geometric constraint solver, *Computer-Aided Design*, 27(6), pp.487-501, (1995)
- [49] Bruderlin, B. : Constructing three-dimensional geometric object defined by constraints, In *Proceedings of the 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*, ACM SIGGRAPH, Chapel Hill, North Carolina, (1986)
- [50] Bruderlin, B. : Using geometric rewrite rules for solving geometric problems symbolically, *Theoretical Computer Science*, 2(116), pp.291-303, (1993)

- [51] Eggli, D.L., Bruderlin, B. and Elber, G., Sketching as a solid modeling tool, In Proceedings of the 1995 ACM/SIGGRAPH Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications, Salt Lake City, pp. 17-19, (May 1995)
- [52] Freemans-Benson, B. N. and Maloney, J. : The DeltaBule algorithm: an incremental constraint hierarchy solver, Technical report, 88-11-09, Computer Science Department, University of Washington, November, (1998)
- [53] Hillyard, R. and Braid, I. : Analysis of dimensions and tolerances in Computer-aided Design, 10(3), pp. 161-166, (1978)
- [54] Hsu, C. and Bruderlin, B., A hybrid geometric constraint solver using exact and iterative geometric constructions : In CAD Tools and Methods for Design System Development ed. D. Roller and P. Brunet. Springer-Verlag, (in press) .
- [55] Hwang, T. and Ullman, D. : The design capture system: Capturing back-of-the envelope sketches, Journal for Engineering Design, 1(4), pp. 339-353, (1990)
- [56] Hwang, T. and Ullman, D. : Recognizing features from freehand sketches, Computers in Engineering, ASME, 1, pp. 67-78, (1994)
- [57] Light, R. and Gossard, D., Modification of geometric models through variational geometry, Computer-Aided Design, 14(4), pp. 209-214, (1982)
- [58] Nielson, G. and Olsen, Jr D. : Direct manipulation techniques for 3D objects using 3D locator devices, In Proceedings of the 1986 Symposium on Interactive 3D Graphics, (1987)
- [59] Owen, J., Algebraic solution for geometry from dimensional constraints, In Proceedings of the 1991 ACM/SIGGRAPH Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications, (May 1991)
- [60] Pugh, D. : Designing solid objects using interactive sketch interpretation, In Proceedings of the 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics, (1992)
- [61] Serrano, D., Automatic dimensioning in design for manufacturing, In Proceedings of the 1991 ACM/SIGGRAPH Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications, (May 1991)
- [62] Sohrt, W. and Bruderlin, B. : Interaction with constraints in 3D modeling, International Journal of Computational Geometry and Application, 1(4), pp. 405-425 (1991)

- [63] Solano, L. and Brunet, P. : Constructive constraint-based model for parametric CAD systems. *Computer-Aided Design*, 26(8), pp.614-621, (1994)
- [64] Sutherland, I., Sketchpad, a man-machine graphical communication system, Ph.D. thesis, MIT, (January 1963)
- [65] Verroust, A., Schoneck, F. and Roller, D. : Rule-oriented method for parameterized computer-aided design, *Computer-Aided Design*, 24(10), pp.531-540, (1992)
- [66] Saga, S and Makino, H : Fuzzy spline interpolation and its application to on-line freehand curve identification, *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, pp.1183-1190, (1993)
- [67] Farin, F : *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design, A Practical Guide* Academic Press, USA(1990)
- [68] Bier, E. A., Skitters and jacks : Interactive 3D positioning tools, In *Proceedings of the Workshop on Interactive 3D Graphics*(Chapel Hill, NC, Oct.), pp.183-196
- [69] BUTTERWORTH, J., DAVIDSON, A., HENCH, S., AND OLANO, T.M. : A three-dimensional modeler using a head-mounted display, In *Proceedings of 1992 Symposium on Interactive 3D Graphics*(Cambridge, MA, March), pp.135-138
- [70] HERNDON, K. P., ZELEZNIK, R.C., ROBBINS, D.C., CONNER, D.B., SNIBBE, S.S., AND VAN DAM, A. : Interactive shadows, In *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology*(Monterey, CA, Nov.), pp.1-6
- [71] LIANG, J. AND GREEN, M. : A highly interactive 3D modeling system, *Computers & Graphics* 18, 4(July), pp.499-506
- [72] NIELSON, G. M. AND OLSEN, D.R. : Direct manipulation techniques for 3D objects using 2D locator devices, In *Proceedings of the 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*(Chapel Hill, NC, Oct.), pp.175-182
- [73] SHAW, C. AND GREEN, M. : Two-handed polygonal surface design, In *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology*(Marina del Rey, CA, Nov.), pp.205-212
- [74] ZHAI, S., BUXTON, W., AND MILGRAM, P. : The "silk cursor" : Investigating transparency for 3D target acquisition, In *Proceedings of the CHI'94 Conference on Human Factors in Computing Systems*(Boston, MA, April), pp.459-464, 483

4.2.4 実体モデルの入力

車のデザインにおいて形状を決定していく段階においてクレイモデルが利用される。このクレイモデルは、デザイナーが提案した形状を計算機内部モデルとして生成した形状を評価するために利用される。ここでデザイン評価した後、このクレイモデルを3次元測定装置で形状を改めて入力している。また、ひとつのキャラクタを実体モデルとして作成し、そのサイズなどを変更したときの形状評価をしたい場合がある。これはまず3次元測定器によって入力し、形状モデリングシステムで変形を行ない、次に光造形システムで出力し、実体モデルを評価する。このように実体モデルを用いた形状生成は活用分野が多い。

このような実体モデルの入力のために、接触型3次元計測装置、非接触型計測装置を利用した形状入力や、立体視を用いた三次元形状入力、複数枚の写真を用いた形状生成法が提案されている。また、測定された3次元点列からポリゴンや曲面を生成するための手法も重要であり、さまざまな研究が報告されている。

参考文献：

- [1] Neugebauer P. J. : “Geometrical cloning of 3D objects via simultaneous registration of multiple range images” , Shape Modeling International, (1997)
- [2] Nagano M. , Sato K. , Chihara K. : “Shape integration of multi stereo images using surveyed points for an archaeological site” , Shape Modeling International, (1997)
- [3] Shinagawa Y. , Hioki H. , Kunii T. : “Recognizing three-dimensional shapes while measuring them” , Shape Modeling International, (1997)
- [4] Sato Y. , Sato I. , Ikeuchi I. : “3D shape and reflectance morphing” , Shape Modeling International, (1997)
- [5] 金井崇、鈴木宏正、木村文彦： “複数枚の写真からの三次元形状生成システムの関” , 日本図学会図学研究, 第31巻2号, (1997.6)
- [6] Hugues H. , Tony DeRose: “Surface Reconstruction from Unorganized Points” , ACM SIGGRAPH' 92 pp.71-78, (1992)
- [7] Hugues H. , Tony DeRose: “Mesh Optimization” , ACM SIGGRAPH' 93, pp.19-26, (1993)

[8] Hugues H., Tony DeRose: “Piecewise Smooth Surface Reconstruction”, ACM SIGGRAPH’94, pp. 295-302, (1994)

4.3 発想支援と3次元CADシステム

デザインにおける3次元CADの実践的利用例が盛んに紹介される用になったのは、80年代の後半つまり今から約10年ほど前のことである。当時は、市販のシステムではなく、全て社内で開発されたシステムであった。この当時の3次元CADのシステムは、自社内で開発が可能な企業に限られたものであった。またこれらのシステムは、デザインセクションが単独でシステム開発を行ったというよりも、全社的な意向によりCADの利用が推進され、形状に関しては最上流部分であるデザインセクションも巻き込まれるような形でCADが導入されている。したがって、これらのシステムはデザインの発想を支援する目的よりも、生産を支援する為の3次元CADのシステムであると言える。

では、このような時代背景の中で、デザインの支援を目的とするシステムがどのように研究されてきているだろうか。デザインにおけるコンピュータの支援は、80年代になってから報告されるようになった。さらに、85頃にはデザインにおけるエキスパートシステムの研究事例が報告されている。これが、90年代に入ると創造性の支援を行うものとして提案されるとともに、最近では発想の支援ツールとしての研究事例も報告されている。しかしこれらは、研究の実用段階においては3次元CADを想定してはいるものの、そこまで開発した事例はほとんど見あたらない。むしろ、デザイナーの思考の解明とそのモデル化を研究対象としプロトタイプ（試作品）としてのシステムの構築にとどまっている。すなわち、3次元化の前段階として、形状を目的とした情報の生成にとどまっておき、それを実際にCADなどを利用して3次元形状として視覚化するには至っていない。表1に近年の研究のタイトルを示す。

現在、研究されている発想支援のシステムは上記のようなものが多いが、これらを実際の3次元CAD上で利用可能なものにするには、大きく以下のような2つの問題が上げられる。

第一は、実システムとして3次元形状が作成可能になるためには、現在のプロトタイプの数倍から数十倍の形状に関する情報量が必要とされることである。これは、どこまで厳密に形を定義するかにも関連があり、システムの利用方法に応じた適正な情報の整備が必要である。いたずらに、システムを肥大化させると、情報の構築だけで膨大な時間を費やすことになるため、注意が必要であ

る。

第二は、このシステムの運用に関するマネージメントである。発想を支援するという事は、デザインにおける形のマネージメントの一部をシステムに移管する事になる。せつかく構築下システムであっても、利用されないのでは開発コストがそのまま損失となってしまう。さらにその前段階では、利用価値の効用が不明確なままにシステムを開発すると、効率的に投資回収ができないものとなってしまう。このようなマネージメントに関する問題は、設計部門以上に十分に熟慮する問題であるだろう。

前者の問題は、まさに技術的な問題であり、効率的なデータベースの構築などは本委員会での一つの課題となりうる。しかしながら、後者の課題は技術的な問題として取りあげるよりも、その前段階の問題の方が多いため、本研究会の対象ではない。

現在の発想支援と3次元CADに関する研究は、理論的にはその両者が手をつなぎ構築が可能なものも多く見受けられる。しかしながら、そのシステムを利用したデザインの現場での運用については、デザインセクションの立場や将来性に依存することが大きいのではないだろうか。

参考文献：

- [1] 田慕玲：“進化アルゴリズムに基づく自動車形態生成モデル”，デザイン学研究 Vol. 44 No. 4, (1997)
- [2] 萩原祐志：“確信度付きセンテンスによってデザイン支援を行なうシステムの構築とその利用事例”，デザイン学研究 Vol. 44 No. 2, (1997)
- [3] 山岸淳：“形状デザインのためのコラボレーションメディア”，デザイン学研究 Vol. 43 No. 6, (1997)
- [4] 目黒秀明：“CADにおける筆圧を利用した3次元空間へのアクセス方補と応用”，デザイン学研究 Vol. 43 No. 5, (1997)
- [5] 野口尚孝：“発想支援方法開発のためのデザイン思考過程も出るの研究”，デザイン学研究 Vol. 43 No. 1, (1996)
- [6] 萩原祐志：“形状案作成支援システムにおける図形の置き換えによる形状案創出方法”，デザイン学研究 Vol. 42 No. 5, (1996)
- [7] 渡辺誠：“腕時計における段階型思考過程モデル”，デザイン学研究 Vol. 42 No. 5, (1996)
- [8] 原田利宣：“自動車の”構え“決定支援システム”，デザイン学研究 Vol. 42 No. 3, (1995)

- [9] 原田利宣: “自動車の形態分析への「認知幾何」の応用”, デザイン学研究 Vol. 42 No. 1, (1995)
- [10] 田慕玲: “目標イメージに適する自動車の形態を探索するデザイン支援システム”, デザイン学研究 Vol. 41 No. 6, (1995)
- [11] 渡辺誠: “ファジィ推論による腕時計文字板デザイン支援システム”, デザイン学研究 Vol. 41 No. 2, (1994)
- [12] 萩原祐志: “造形の発想を支援するためのCAD”, デザイン学研究 Vol. 41 No. 1, (1994)
- [13] Kuohsiang Chen: “From language and style description”, Design Studies Vol. 18 No. 3, (1997)
- [14] Shih-Wen Hsiao: “A semantic and shape grammar based approach for product design”, Design Studies Vol. 18 No. 3, (1997)
- [15] Michael Tovey: “Styling and Design: intuition and analysis in industrial design”, Design Studies Vol. 18 No. 1, (1997)
- [16] Hungsiang Wang: “An approach to computer-aided styling”, Design Studies Vol. 16 No. 1, (1995)
- [17] Casper G.C. van Dijk: “New insights in computer-aided conceptual design”, Design Studies Vol. 16 No. 1, (1995)
- [18] P.F. Culverhouse: “Constraining designers and their CAD tools”, Design Studies Vol. 16 No. 1, (1995)
- [19] M. Tovey: “Form creation techniques for automotive CAD”, Design Studies Vol. 15 No. 1, (1994)

4.4 3次元形状モデリングに関連する文献一覧

本委員会で過去5年間の形状モデリングに関連する論文を調査した。その一覧を以下に示す。

- [1] Jorg Peters: “Smoothing Polyhedra Made Easy”, ACM Transactions Vol. 14 No. 2 pp. 162-170, (1995)
- [2] Elvis KoYung Jeng, Zhigang Xiang: “Moving Cursor Plane for Interactive Sculpting”, ACM Transactions Vol. 15 No. 3 pp. 211-222, (1996)
- [3] Gershon Elver, Elaine Cohen: “Adaptive Isocurve-Based Rendering for Freeform Surfaces”, ACM Transactions Vol. 15 No. 3 pp. 249-263, (1996)

- [4] C. W. A. M. van Overveld, Marie Luce Viaud: "Sticky Splines : Definition and Manipulation of Spline Structures with Maintained Topological Relations" , ACM Transactions Vol.15 No.1 pp. 72-98, (1996)
- [5] A. Gu, Kam Chan: "Product modelling using STEP" , Computer Aided Design Vol.27 No.3 pp.163-179, (1995)
- [6] Dov Dori, Karl Tombre: "From engineering drawings to 3D CAD models: are we ready now?" , Computer Aided Design Vol.27 No.4 pp.243-254, (1995)
- [7] Kunwoo Lee, Ho Sang Lim: "Efficient solid modelling via sheet modeling" , Computer Aided Design Vol.27 No.4 pp.255-262, (1995)
- [8] Chang-Xue Feng, Andrew Kusiak: "Costraint-based design of parts" , Computer Aided Design Vol.27 No.5 pp.343-352, (1995)
- [9] Vinod Kumar, Debasish Dutta: "Quadric shell intersections" , Computer Aided Design Vol.27 No.8 pp.573-586, (1995)
- [10] Hyowon Suh, Rashpal S Ahluwalia: "Feature Modification in incrementa feature generation" , Computer Aided Design Vol.27 No.8 pp.627-635, (1995)
- [11] Przemyslaw Bogacki, Stanley E Weinstein, Yuesheng Xu: "Degree reduction of Bezier curves by uniform approximation with endpoint interpolation" , Computer Aided Design Vol.27 No.9 pp.651-660, (1995)
- [12] Weiyin Ma, J.P.Krush: "Parametarization of randomly measured points for least squares fitting of B-spline cureves and surfaces" , Computer Aided Design Vol.27 No.9 pp.663-675, (1995)
- [13] James C.Cavendish: "Integrating feature-based surface design with freeform deformation²⁷" , Computer Aided Design Vol.27 No.9 pp.703-711, (1995)
- [14] Stephen Parry-Barwick, Adrian Bowyer: " Multidimensional set-theoretic ferture recognition" , Computer Aided Design Vol.27 No.10 pp.731-740, (1995)
- [15] Hiroshi Sakurai: "Volume decomposition and fearture recognition: Part1-polyhedral objects" , Computer Aided Design Vol.27 No.11 pp.833-843, (1995)
- [16] Matthias Eck: "Least squares degree reduction of Bezier curves" , Computer Aided Design Vol.27 No.11 pp.845-851, (1995)
- [17] Jorg Peters: "Biquartic C1-surface splines over irregular meshes" , Computer Aided Design Vol.27 No.12 pp.895-903, (1995)
- [18] Xiangping Chen, Christoph M Hoffmann: " On editability of

- feature-based design” , Computer Aided Design Vol.27 No.12 pp.905-914, (1995)
- [19] Hyungjun Park, Kwangsoo Kim: “An adaptive method for smooth surface approximation to scattered 3D points” , Computer Aided Design Vol. 27 No. 12 pp. 929-939, (1995)
- [20] C.L.Philip Chen, Sen Xie: “Freehand drawing system using a fuzzy logic cocept” , Computer Aided Design Vol.28 No.3 pp.77-89, (1996)
- [21] Michela Bertolotto, Elisabetta Bruzzone, Leila De Floriani, George Nagy: “Generating assembly and machining sequences from the Face-to-Face Composition model” , Computer Aided Design Vol. 28 No. 3 pp. 101-111, (1996)
- [22] R.Anderl, R.Mendgen: “Modelling with constraints: theoretical foundation and application”, Computer Aided Design Vol. 28 No. 3 pp. 155-168, (1996)
- [23] Jerry Y.H.Fuh, Chao-Hwa Chang, Mechel A Melkanoff: “The development of an integrated and intelligent CAD/CAPP/CAFP environment using logic-based reasoning” , Computer Aided Design Vol.28 No.3 pp.217-232, (1996)
- [24] Mervi Ranta, Martti Mantyla, Yasushi Umeda, Tetsuo Tomiyama: “Integration of functional and feature-based product modelling -the IMS /GNOSIS experience” , Computer Aided Design Vol. 28 No. 5 pp. 371-381, (1996)
- [25] H.Lipson, M.Shpitalni: “Optimization-based reconstruction of a 3D object from a single freehand line drawing” , Computer Aided Design Vol.28 No. 8 pp. 651-663, (1996)
- [26] A.Z.Qamhiyah, R.D.Venter, B.Benhabib: “Geometric reasoning for the extraction of form features” , Computer Aided Design Vol.28 No.12 pp. 887-903, (1996)
- [27] Lynn Eggli, Ching-yao Hsu, Beat D.Bruderlin, Gershon Elbert: “Inferring 3D models from freehand sketches and constraints” , Computer Aided Design Vol.29 No.2 pp.101-112, (1997)
- [28] Masatake Higashi, Fuyuki Torihara, Nobuhiro Takeuchi, Toshio Sata, Tsuyoshi Saitoh, Mamoru Hosaka: “Robust algorithms for face-based representations” , Computer Aided Design Vol. 29 No. 2 pp. 135-146, (1997)
- [29] Hiroshi Masuda, Masayuki Numao: “A cell-based approach for generating solid objects from orthographic projections”, Computer Aided Design Vol. 29 No. 3 pp. 177-187, (1997)

- [30] Konstantinos Nezis, George Vosniakos: “Recognizing 2.1/2D shape features using a neural network and heuristics” , Computer Aided Design Vol. 29 No. 7 pp. 523–539, (1997)
- [31] Barry Joe: “Quadrilateral mesh generation in polygonal regions” , Computer Aided Design Vol. 27 No. 3 pp. 209–222, (1995)
- [32] Weidong Min, Zesheng Tang, Zhengming Zhang, Yu Zhou, Minzhi Wang: “Automatic mesh generation for multiply connected planar regions based on mesh grading propagation” , Computer Aided Design Vol. 28 No. 9 pp. 671–681, (1996)
- [33] Claudia Cottin, Ruud van Damme: “Construction of a VC1 interpolant over triangles via edge deletion” , Computer Aided Geometric Design Vol. 11 pp. 675–686, (1994)
- [34] Panagiotis D. Kaklis, Nickolas S. Sapidis: “Convexity-preserving interpolatory parametric splines of non-uniform polynomial degree” , Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 1–26, (1995)
- [35] Tim N.T. Goodman, Jorg Peters: “Bezier nets, convexity and subdivision on higher-dimensional simplices” , Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 53–65, (1995)
- [36] Ulrich Reif: “Biquadratic G-spline surfaces” , Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 193–205, (1995)
- [37] Gill Barequet, Micha Sharir: “Filling gaps in the boundary of a polyhedron” , Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 207–229, (1995)
- [38] Lizhuang Ma, Quncheng Peng: “Smoothing of free-form surfaces with Bezier patches” , Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 231–249, (1995)
- [39] Przemyslaw Kiciak: “Constructions of G^1 continuous joins of rational Bezier patches” , Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 283–303, (1995)
- [40] M. I. G. Bloor, M. J. Wilson, H. Hagen: “The smoothing properties of variational schemes for surface design” , Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 381–394, (1995)
- [41] J. C. Leon, P. Trompette: “A new approach towards free-form surfaces control” , Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 395–416, (1995)
- [42] Lizhuang Ma, Qunsheng Peng, : “Recursive G^k transformations between adjacent Bezier surfaces” , Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 439–458, (1995)
- [43] David A. Field: “The legacy of automatic mesh generation from solid

- modeling” , Computer Aided Geometric Design Vol.12 pp.651-673, (1995)
- [44] Robert Schneiders, Rolf Bunten: “Automatic generation of hexahedral finite element meshes”, Computer Aided Geometric Design Vol. 12 pp. 693-707, (1995)
- [45] D.L.Marcum, N.P.Weatherill: “Aerospace applications of solution adaptive finite element analysis” , Computer Aided Geometric Design Vol.12 pp.709-731, (1995)
- [46] Jorg Peters: “Curvature continuous spline surfaces over irregular meshes” , Computer Aided Geometric Design Vol.13 pp.101-131, (1996)
- [47] Shi-min Hu: “Conversion of a triangular Bezier patch into three rectangular Bezier patches” , Computer Aided Geometric Design Vol.13 pp.219-226, (1996)
- [48] Xiuzi Ye, Youdong Liang, Horst Nowacki: “Geometric continuity between adjacent Bezier patches and their constructions”, Computer Aided Geometric Design Vol.13 pp.521-548, (1996)
- [49] Hans-Jorg Wenz: “Interpolation of curve data by blended generalized circles” , Computer Aided Geometric Design Vol.13 pp.673-680, (1996)
- [50] Hans Hagen, Gregory Nielson, Yasuo Nakajima: “Surface design using triangular patches” , Computer Aided Geometric Design Vol.13 pp.895-904, (1996)
- [51] A.Nasri: “Curve interpolation in recursively generated B-spline surfaces over arbitrary topology” , Computer Aided Geometric Design Vol.14 pp.13-30, (1997)
- [52] Seth Allen, Debasish Dutta: “Cyclides in pure blending II” , Computer Aided Geometric Design Vol.14 pp.77-102, (1997)
- [53] Michael S. Floater: “Parametrization and smooth approximation of surface triangulations” , Computer Aided Geometric Design Vol.14 pp.231-250, (1997)
- [54] Yifan Chen, Klaus Beier, Dimitris Papageorgiou: “Direct highlight line modification on nurbs surfaces” , Computer Aided Geometric Design Vol.14 pp.583-601, (1997)
- [55] Jon Herman, Rismoen and Johannes B. Sigurjonsson: “EXPERIENCE WITH INDUSTRIAL DESIGN IN PRODUCT DEVELOPMENT FOR VERY SMALL COMPANIES” , ICED '97 Vol.1 pp.105-108, (1997)
- [56] Elmar Storath, Carstern Mogge, Harald Meerkamm: “TELEENGINEERING -

PRODUCT DEVELOPMENT IN VIRTUAL DESIGN OFFICES USING DISTRIBUTED ENGINEERING NETWORK SERVICES” , ICED '97 Vol.1 pp.173-178, (1997)

[57] Wolfgang Beitz: “QUALITY THROUGH CUSTOMER INTEGRATION AND SYSTEMATIC DESIGN” , ICED '97 Vol.1 pp.281-284, (1997)

[58] Zhuojun Bao: “METHODOLOGICAL PRODUCT DESIGN FOR QUALITY BASED ON A QUALTY CYCLE” , ICED '97 Vol.1 pp.291-299, (1997)

[59] Per Nilsson, Gunnar Erixon, Mark W.Lange: “AN EASY TO USE TOOL FOR PRODUCT DESIGN; THE CARP SOFTWARE” , ICED '97 Vol.1 pp.301-308, (1997)

[60] Rainer Zust: “SYSTEM ENGINEERING - A Methodology for Life Cycle Engineering in Interdisciplinary Teams”, ICED '97 Vol.1 pp.329-335, (1997)

[61] Niels Henrik Mortensen: “DESIGN CHARACTERISTICS AS BASIS FOR DESIGN LANGUAGES” , ICED '97 Vol.2 pp.23-30, (1997)

[62] Kari Tanskanen: “ON-SITE COMPONENT SELECTION SUPPORT USING WWW” , ICED '97 Vol.2 pp.243-248, (1997)

[63] Zdenek Zdrahal, John Domingue: “THE WORLD WIDE DESIGN LAB: AN ENVIRONMENT FOR DISTRIBUTED COLLABORATIVE DESIGN” , ICED '97 Vol.2 pp.249-254, (1997)

[64] L.Drisis: “COMPUTER GRAPHICS AND VIRTUAL REALITY IN DESIGN PROCESS” , ICED '97 Vol.2 pp.445-448, (1997)

[65] Paul Kennedy: “INTEGRATION OF COMPUTATIONAL TOOLS INTO THE DESIGN PROCESS - AN INTERGRAL APPROACH BASED ON THE DESIGN” , ICED '97 Vol.2 pp.597-602, (1997)

[66] Shigeru Hagihara, Masahiko Hihara, Seiji Shimizu, Masahito Abe, Susumu Furukawa, Makoto Ito: “A CAD/CAM System for Artistic Jewelry Products” , ICED '97 Vol.2 pp.623-0, (1997)

[67] Johan Malmqvist, Peter Schachinger: “TOWARDS AN IMPLEMENTATION OF THE CHROMOSOME MODEL FOCUSING THE DESIGN SPECIFICATION” , ICED '97 Vol.3 pp.203-212, (1997)

[68] Zhihui Yao, Aylmer L.Jhnsn: “ THE APPLICATION OF EMPIRICAL CONSTRAINTS IN THE DESIGN PROCESSES” , ICED '97 Vol.3 pp.213-217, (1997)

[69] T.Bar, C.Weber: “SUPPORT IN THE EARLY DESIGN PHASE BY WORKING WITH INTELLIGENT ELEMENT PAIRS WHICH SIMPLIFY THE USE OF FEM” , ICED '97 Vol.3 pp.231-234, (1997)

[70] Horst Werner, Michael Muth, Christial Weber: “FUNCTIONAL MODELLING USING AN OBJECT-ORIENTED DESIGN SYSTEM” , ICED '97 Vol.3 pp.235-238, (1997)

- [71] Tatsuya Ohmachi, Katsumi Inoue, Masana Kato: “A CAD SYSTEM FOR KNOWLEDGE-BASED MECHANICAL DESIGN AND OPTIMIZATION”, ICED '97 Vol.3 pp. 239-246, (1997)
- [72] Klaus Ulrich: “FLEXIBILITY IN MECHANICAL PRODUCT DESIGN WITH PARAMETRIC CAD-TECHNIQUES AT THE EXAMPLE OF HICAD”, ICED '97 Vol.3 pp. 289-294, (1997)
- [73] Bonyuet Lee, David and Monferrer, Alexandre: “PARAMETERS EVALUATION IN THE USER INTERFACE DESIGN OF TELEOPERATED ROBOTS”, ICED '97 Vol.3 pp. 571-576, (1997)
- [74] 森脇 俊道, 杉村 延広, 王 力(羽軍): “工作機械の CAD/CAE のためのモデリングシステムの開発(第1報)”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 2 pp. 233-238, (1993)
- [75] 増田 宏: “非多様体形状モデルを用いた形状特徴の表現と管理”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 6 pp. 956-962, (1993)
- [76] 向井 伸治, 古川 進, 小尾 誠, 木村文彦, 佐田 登志夫: “凸多面体の類似判定について”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 6 pp. 963-968, (1993)
- [77] 古島 終作, 金井 理, 高橋 秀智: “手書き図形の自動認識による3次元自由曲線モデルの生成”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 6 pp. 969-974, (1993)
- [78] 岸 義樹: “モデル制作における人間感性の役割”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 7 pp. 1063-1065, (1993)
- [79] 金井 理: “モデル設計用 CAD の高機能化”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 7 pp. 1066-1068, (1993)
- [80] 岸浪 建史: “曲面表現とデータ交換方式”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 7 pp. 1075-1077, (1993)
- [81] 鈴木 裕: “曲面加工の高速・高精度技術”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 7 pp. 1078-1079, (1993)
- [82] 小島 俊雄, 久貝 穰, 中村 伊知郎, 木村文彦: “STEP を用いた境界表現ソリッドモデルデータ交換システムの試作と実験”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 7 pp. 1187-0, (1993)
- [83] 中村 伊知郎, 小島 俊雄, 久貝 穰, 木村 文彦: “STEP を利用した CAD データベースインターフェースの標準化”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 8 pp. 1227-1232, (1993)
- [84] 池田 豊隆: “デザイン創造性支援を求めて 自動車のデザインシステム”, 精密工学会誌 Vol. 59 No. 10 pp. 1585-1586, (1993)
- [85] 鈴木 建彦, 江口 誠治, 本多 正人, 石井 清継, 谷本 茂樹: “多様体を

- ベースとする階層型非多様体モデルの理論と応用”，精密工学会誌 Vol. 59 No. 10 pp. 1665-1670, (1993)
- [86] 木村 文彦：“STEP と産業オートメーション”，精密工学会誌 Vol. 59 No. 12 pp. 1917-1922, (1993)
- [87] 鈴木 宏正：“STEP における製品モデルの構造”，精密工学会誌 Vol. 59 No. 12 pp. 1923-1926, (1993)
- [88] 岸浪 建史：“アプリケーションプロトコールと開発方法”，精密工学会誌 Vol. 59 No. 12 pp. 1927-1930, (1993)
- [89] 田中 文基, 菊池 慶仁：“形式的データ仕様記述言語 EXPRESS”，精密工学会誌 Vol. 59 No. 12 pp. 1931-1936, (1993)
- [90] 小島 俊雄：“STEP の利用とデータ交換システム”，精密工学会誌 Vol. 59 No. 12 pp. 1937-1942, (1993)
- [91] 小林 一也：“STEP における幾何・位相モデル”，精密工学会誌 Vol. 59 No. 12 pp. 1943-1948, (1993)
- [92] 平岡 弘之：“CAD 図面交換のための STEP 製図モデル”，精密工学会誌 Vol. 59 No. 12 pp. 1949-1954, (1993)
- [93] 沖野 教郎：“CAD の研究と手法”，精密工学会誌 Vol. 60 No. 1 pp. 35-38, (1994)
- [94] 黒田 満, 古川 進, 木村 文彦：“局所性を制御できる C2 連続な B2 スプライン補間曲線”，精密工学会誌 Vol. 60 No. 1 pp. 65-69, (1994)
- [95] 野口 尚孝：“クロス推論モデルを用いた工業デザイン発想支援システムの試み”，精密工学会誌 Vol. 60 No. 2 pp. 285-290, (1994)
- [96] 鈴木 宏正, 錦見 美貴子, 金井 理, 松本 明宏：“「生産ソフトウェアの再評価」の企画趣旨について”，精密工学会誌 Vol. 60 No. 4 pp. 475-476, (1994)
- [97] 間瀬 俊明：“”CAD/CAM/CAE はどのように役に立ったか, 今後の方向は””，精密工学会誌 Vol. 60 No. 4 pp. 477-482, (1994)
- [98] 長澤 勲, 鈴木 宏正：“知的 CAD 研究・開発への提言”，精密工学会誌 Vol. 60 No. 4 pp. 483-486, (1994)
- [99] 井上 久仁子：“CAD と CAM の結合”，精密工学会誌 Vol. 60 No. 4 pp. 497-501, (1994)
- [100] 鈴木 宏正, 田中 一郎, 木村 文彦：“CSG グラフによる付加的形状特徴のモデリング”，精密工学会誌 Vol. 60 No. 4 pp. 509-513, (1994)
- [101] 東 正毅, 川畑 弘幸, 毛利 仁：“”縮閉線に基づく曲率変化の滑らかな曲線, 曲面の生成(第 2 報)””，精密工学会誌 Vol. 60 No. 4 pp. 519-523, (1994)
- [102] 乾 正知, 松本 則夫, 木村 文彦：“複数の面分からなる形体へ適用可能

- な幾何公差方式の提案”，精密工学会誌 Vol. 60 No. 6 pp. 837-841, (1994)
- [103] 黒田 満, 木村文彦, 古川 進: “局所性のある C2 補間曲線のための最小化条件”, 精密工学会誌 Vol. 60 No. 6 pp. 843-846, (1994)
- [104] 鯉淵 興二: “製品開発の方法”, 精密工学会誌 Vol. 61 No. 1 pp. 5-10, (1995)
- [105] 山田 教, 松村 潔, 山口 富士夫: “同次幾何的ニュートン法による有理曲線, 曲面に対する干渉処理”, 精密工学会誌 Vol. 61 No. 2 pp. 203-207, (1995)
- [106] 先田 和弘, 井越 昌紀: “濃度空間モデルによる意匠形状設計”, 精密工学会誌 Vol. 61 No. 6 pp. 795-798, (1995)
- [107] 落合 芳博: “金型用 CAD のための自由曲面の創成法”, 精密工学会誌 Vol. 61 No. 8 pp. 1087-1091, (1995)
- [108] 川島 泰正, 城間 祥之, 嘉数 侑昇: “3次元ソリッド形状のスウィープ立体に関する理論的考察”, 精密工学会誌 Vol. 61 No. 9 pp. 1255-1259, (1995)
- [109] 岸浪 健史: “STEP による技術データ統合の現状と動向”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 1 pp. 19-23, (1996)
- [110] 鈴木 宏正, 山本 貴史, 金井 崇, 木村 文彦: “面線上による自由曲面形状の操作”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 1 pp. 75-79, (1996)
- [111] 坂田 安男, 斗谷 充宏: “携帯型情報ツール”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 2 pp. 184-187, (1996)
- [112] 辻尾 昇三, 中村 嘉伸: “CAD 作図された機械図面に対するコンピュータ支援寸法検図システム(第3報)”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 2 pp. 265-269, (1996)
- [113] 加瀬 究, 鈴木 宏正, 木村 文彦: “シミュレーテッド・アニーリング法と Bezier テンプレートによる形状誤差特徴の抽出”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 4 pp. 522-525, (1996)
- [114] 木村 文彦: “設計論と CAD”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 6 pp. 773-777, (1996)
- [115] 桜 林, 吉田 典正, 花蜜 宏晃, 山口 富士夫: “ 4×4 行列式法に基づくポリゴンに対する点の内外判定”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 8 pp. 1177-1181, (1996)
- [116] 東 正毅, 蔦森 秀夫: “縮閉線に基づく局率変化の滑らかな曲線, 曲面の生成(第3報)”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 9 pp. 1272-1276, (1996)
- [117] 長坂 一郎, 山岸 淳, 田浦 俊春: “意匠デザインのための 3D 形状モデル”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 11 pp. 1567-1571, (1996)

- [118] 桜林, 吉田 典正, 花蜜 宏晃, 山口富士夫: “ 4×4 行列式法に基づく 2 次曲線境界を含むポリゴンに対する点の内外判定”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 12 pp. 1712-1716, (1996)
- [119] 黒田 満, 東 正毅, 斉藤 剛, 渡辺 由美子: “数式処理システムによるクロソイドスプライン補完曲線”, 精密工学会誌 Vol. 62 No. 12 pp. 1717-1721, (1996)
- [120] 鈴木 宏正, 山本 徹也, 金井 崇, 木村 文彦: “Welch/Witkin の薄板曲面近似を用いた三角形メッシュモデリング”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 1 pp. 45-49, (1997)
- [121] 味岡 成康: “モノづくりの基盤としての設計論”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 2 pp. 154-157, (1997)
- [122] 守友 貞雄: “モノづくりのための知情意と心技体”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 2 pp. 158-161, (1997)
- [123] 田川 高司: “モノの評価 1 観のうつりかわり”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 2 pp. 170-174, (1997)
- [124] 長坂 一郎, 山岸 淳, 田浦 俊春: “意匠デザインのための 3D 形状モデル(第 2 報)”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 2 pp. 193-197, (1997)
- [125] 桜林, 吉田 典正, 花蜜 宏晃, 山口 富士夫: “2 次有理 Bezier 曲線および 2 次 NURBS の同次表現について”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 4 pp. 504-508, (1997)
- [126] 中邨 博之, 東 正毅, 穂坂 衛: “面名を用いた記号処理による多面体の頑強な干渉計算(第 1 報)”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 4 pp. 515-519, (1997)
- [127] 梅田 靖, 富山 哲男, 吉川 弘之: “機能設計支援のための FBS モデリングの提案”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 6 pp. 795-800, (1997)
- [128] 黒田 満, 斉藤 剛, 渡辺 由美子, 東 正毅: “曲率連続な双クロソイド/第 2 クロソイドスプライン補間曲線”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 6 pp. 801-806, (1997)
- [129] 小島 広久, 東 正毅: “面ベース表現に基づくフィーチャ記述と生成”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 7 pp. 982-986, (1997)
- [130] 中川 威雄: “精密工学と型技術”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 9 pp. 1213-1217, (1997)
- [131] 戸沢 幸一: “金型の高精度・高速高能率加工”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 9 pp. 1226-1230, (1997)
- [132] 樽原 弘之: “型とラピッドプロトタイピング”, 精密工学会誌 Vol. 63 No. 9 pp. 1236-1239, (1997)

- [133] タン アットミック, 竹原 康, 登阪 繁行: “CAD への適用を目的とした基本形状要素の組み合わせによる機械要素設計の一方法について(続報 円筒歯車の設計)”, 設計工学 Vol. 28 No. 6 pp. 33-38, (1993)
- [134] 下土橋 渡: “CAD の 2 次元グラフィックプログラミング機能”, 設計工学 Vol. 28 No. 9 pp. 33-38, (1993)
- [135] 乾 正知: “ソリッドモデリングに基づく公差の表現と解析”, 設計工学 Vol. 28 No. 11 pp. 11-16, (1993)
- [136] 牧, 博司, 橋本 龍司: “機械設計製図教育からの授業改革”, 設計工学 Vol. 29 No. 3 pp. 31-35, (1994)
- [137] 近藤 誠造, 久保 昭雄, 吉村 俊英: “回転による軸側投影図の作図法”, 設計工学 Vol. 29 No. 4 pp. 31-34, (1994)
- [138] 古川 進, フロランテ サルバドール, 黒田 満, 牧野 洋: “滑らかな局率プロフィルを有する B2 スプライン補間曲線”, 設計工学 Vol. 29 No. 5 pp. 31-36, (1994)
- [139] 増田 宏: “非多様体形状の位相表現”, 設計工学 Vol. 29 No. 7 pp. 1-6, (1994)
- [140] 萩野 富二夫: “形状特徴に基づくモデリング”, 設計工学 Vol. 29 No. 7 pp. 7-11, (1994)
- [141] 細川 治男: “CBVD:拘束ベースの可変設計”, 設計工学 Vol. 29 No. 7 pp. 13-16, (1994)
- [142] 明尾 誠: “スケッチ図からの三次元形状の生成”, 設計工学 Vol. 29 No. 7 pp. 17-21, (1994)
- [143] 石原 肇: “図面の三次元化”, 設計工学 Vol. 29 No. 7 pp. 22-26, (1994)
- [144] 檜原 弘之, 斎藤勝政: “光造形法によるラピッドマニユファクチャリング”, 設計工学 Vol. 30 No. 2 pp. 19-24, (1995)
- [145] 土井 美和子: “使いやすいヒューマン・インターフェースの設計”, 設計工学 Vol. 30 No. 6 pp. 1-5, (1995)
- [146] 北川 勝也: “Windows 環境における 3 次元 CAD システム”, 設計工学 Vol. 30 No. 8 pp. 1-4, (1995)
- [147] 鱒淵 好輝: “パソコン CAD/CAM システム”, 設計工学 Vol. 30 No. 8 pp. 5-9, (1995)
- [148] 深野 修一: “設計者のためのパソコン CAE システム”, 設計工学 Vol. 30 No. 8 pp. 10-13, (1995)
- [149] 福本 利明: “パソコンネットワークと図面管理”, 設計工学 Vol. 30 No. 8 pp. 14-18, (1995)

- [150] 笹島 和幸：“設計・製図教育のあり方”，設計工学 Vol. 30 No. 8 pp. 31-38, (1995)
- [151] 川北 和明：“感性工学とこれからの設計”，設計工学 Vol. 30 No. 10 pp. 1-6, (1995)
- [152] 柳 和久, 小林 直規：“格子点状の三次元表面凹凸波形データにおける局部頂上の一抽出法”，設計工学 Vol. 31 No. 1 pp. 27-32, (1996)
- [153] 小堀 研一, 馬場 弘行, 久津輪 敏郎, 二上 範之：“曲面を含む三面図からの立体自動生成”，設計工学 Vol. 31 No. 4 pp. 15-22, (1996)
- [154] 大滝 英征, 綿貫 啓一, ハッピー ウイビソノ：“寸法公差を考慮したNC加工の自動化”，設計工学 Vol. 31 No. 5 pp. 29-34, (1996)
- [155] 馬場 靖憲：“設計の挑戦:環境の変化と新しい可能性”，設計工学 Vol. 31 No. 6 pp. 1-4, (1996)
- [156] 中沢 弘：“設計方法論の変遷-個人的な体験の視点から-”，設計工学 Vol. 31 No. 6 pp. 5-9, (1996)
- [157] 徳岡 直静, 青山 英樹, 志澤 一之：“設計教育の方向”，設計工学 Vol. 31 No. 6 pp. 10-13, (1996)
- [158] 青木 潔：“設計技術の進歩-CAD の発達-”，設計工学 Vol. 31 No. 6 pp. 14-18, (1996)
- [159] 山下 光明, 塚原 一二：“金型加工技術の変遷と設計手法の変革”，設計工学 Vol. 31 No. 6 pp. 19-24, (1996)
- [160] 千葉 矩正, 西垣 一郎：“解析技術の高度化と CAE への展開”，設計工学 Vol. 31 No. 6 pp. 25-30, (1996)
- [161] 杉田高行：“CAD 教育の実践的考察”，設計工学 Vol. 31 No. 10 pp. 29-34, (1996)
- [162] 平田 隆教：“自動車の設計・開発の現状と将来展望 (CAD/CAM/CAE を中心として)”，設計工学 Vol. 32 No. 1 pp. 7-12, (1997)
- [163] 岩原 光男：“自動車設計における最適化”，設計工学 Vol. 32 No. 4 pp. 19-23, (1997)
- [164] 田中 基八郎：“家電製品における構造設計の最適化”，設計工学 Vol. 32 No. 4 pp. 24-26, (1997)
- [165] 津田 靖久：“自動車の将来要件の検討について”，設計工学 Vol. 32 No. 4 pp. 27-36, (1997)
- [166] 小堀 研一, 梅本 耕二, 藤村 真生, 久津輪 敏郎：“意匠設計のための初期形状の自動生成”，設計工学 Vol. 32 No. 9 pp. 17-25, (1997)

図-4.1-01 ドアパネルに適用した例