

TECHNOLOGY

REVIEW

UNISYS

技 報

通巻

44

1995年2月発刊

Vol. 14 No. 4

特集：CADCEUS

巻頭言

特集「CADCEUS」の発刊によせて 稲葉 聡 1

論 文

CADCEUS の概要 酒井喜嗣 3

形状モデリング 谷本茂樹 15

パラメトリック・モデリング 荻野富二夫 31

製図サブシステム 有田淳一 58

CAM サブシステム 大野順三 67

CAE サブシステム 毛利 明 78

CG サブシステム 大平昌明 90

CADCEUS のフレームワーク 中辻 等, 笹尾 忍, 古澤裕一
板東 司, 小竹正之 98

幾何処理モジュール 宮地恵美 120

位相処理モジュール 片平正成 129

データ交換サブシステム 藤井 省 140

新製品紹介 153

掲載論文梗概 表 2, 3

CADCEUSは機械分野全般を対象とした設計の初期段階から生産準備までの製品開発工程を支援するCAD, CAM, CAE, そしてCGの統合システムである。CADCEUSは製品モデル, 形状特徴, 幾何拘束等の先端技術を実装することにより, 設計・生産の品質向上, 工期短縮を狙いとしている。酒井喜嗣のCADCEUSの概要は, CADCEUSの主要な概念, 特徴的な機能について概説している。

CADCEUSの製品モデラにおける形状モデリング機能の特徴は, サーフェスマデラとソリッドモデラとの統合である。統合は, 曲面と立体に関するデータ表現と演算を統合し複合曲面を強力にすることにより実現され, 使用者に曲面と立体の区別を意識させない広範な機能を提供している。谷本茂樹は形状モデリングの中で, CADCEUSの提供するモデリング環境と, モデラ開発の基本的な考え方を明らかにすることを目的とし, モデラの扱うデータと特徴的なモデリング機能について述べている。

近年, パラメトリック・モデリングと呼ばれるモデリング形態の有効性が広く認められつつある。CADCEUSでは, 「手順型パラメトリック」と「非手順型パラメトリック」と呼ぶ二つの異なる技術を採用した。荻野富二夫はパラメトリック・モデリングの中で, それぞれの手法の考え方, 特徴, 機能体系, 実現法(データ構造, アルゴリズム), 応用について解説している。

製図システムは操作性が重要な課題である。CADCEUSにおいても, 操作性向上のためのラバーバンドやナビゲーションなどの機能や, 形状と寸法の連動を, 実現している。製図にはJIS等の規格に加え, 客先固有の規格もあり, その対応にシステムとして柔軟性が不可欠である。有田淳一は製図サブシステムの中で, CADCEUSのサブシステムの一つである製図サブシステムの機能と特徴を説明している。

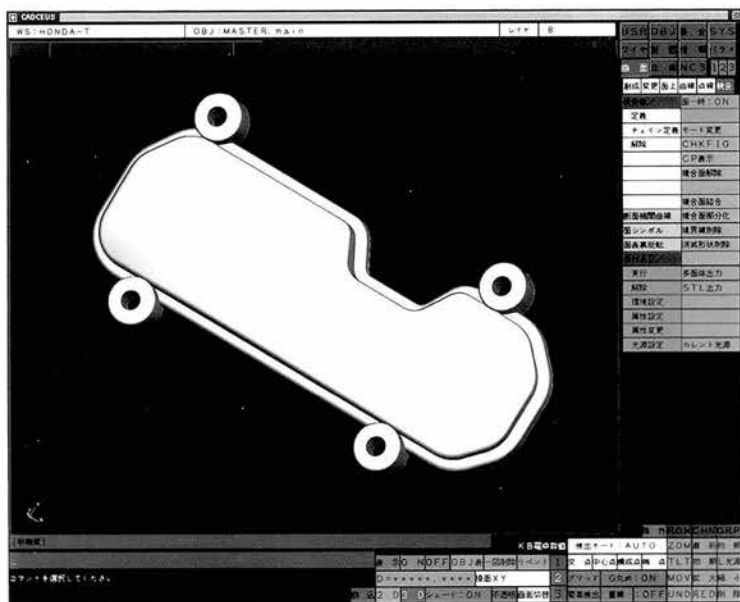
CAMサブシステムは, CADCEUSのアプリケ

ーションの一つであるNC機能を提供するサブシステムである。各種の工具軌跡(CL)の計算の他に, 加工の手順や工程設計支援機能, CLの編集機能などを, CADCEUSの製品モデルと密結合した形態で実現している。大野順三はCAMサブシステムの中で, CAMサブシステム特有の概念と特徴的な機能について説明している。

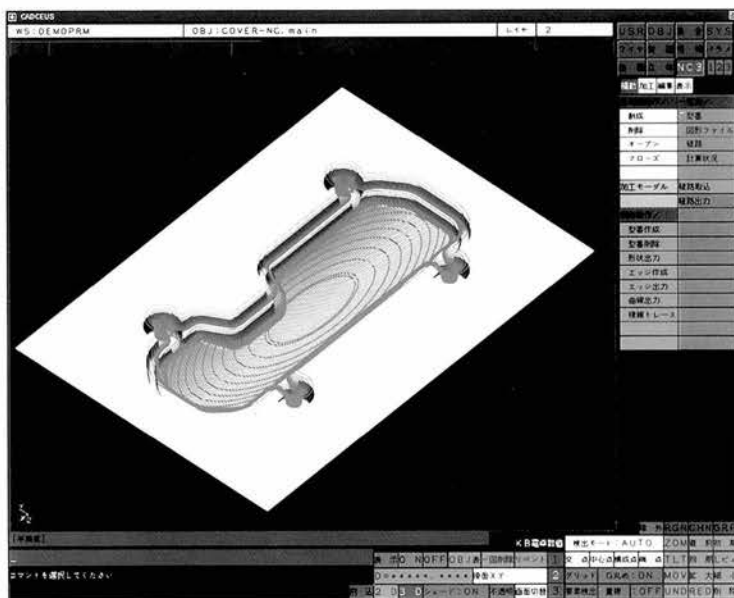
CADCEUSのCAEサブシステムでは, 製品モデルを各種の場でのFEM解析を行うためにプリ・ポストの一体化を目指した。プリプロセッサ部では接点・有限要素の自動分割機能/半自動分割機能, さらに, 荷重・拘束, 要素特性, 材料特性の定義等の機能を提供している。ポストプロセッサ部では解析結果を色々な角度から評価が出来る豊富な評価図を提供している。毛利明はCAEサブシステムの中で, 本サブシステムの狙い, 特徴, 適用事例について説明している。

CADCEUSのCGサブシステムは, レンダリング機能, ペイント機能, 画像データのファイリング機能と画像データの入出力機能から構成される。レイトレーシングやラジオシティ方式によるレンダリングでは効率の向上と高い画像品質を実現した。レンダリングにより2次元化された画像に対するペイント機能では, 画像の部品化・階層化やモーフィングにおけるベジェ曲線による画像の補間により高品質の画像処理が可能である。大平昌明のCGサブシステムは, これらの機能の概要を説明している。

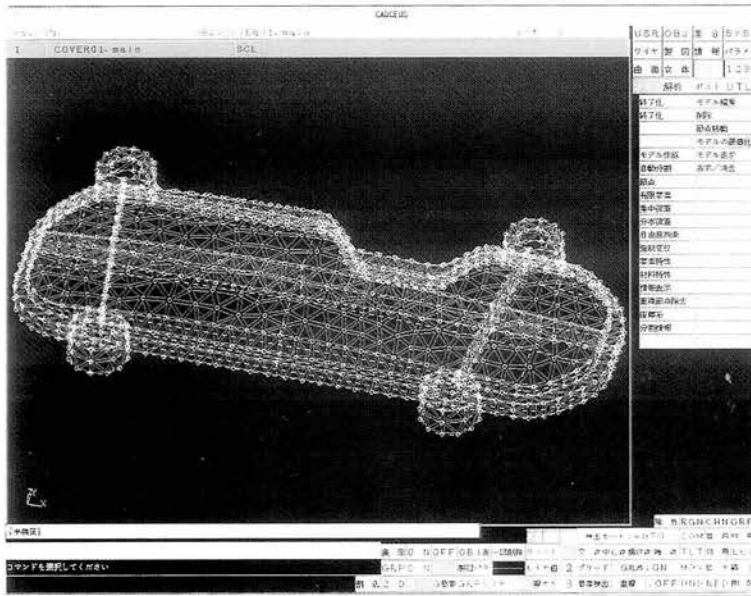
CADCEUSのフレームワークは, CAD, CAM, CAE, CG, データ交換等のアプリケーションの基盤ソフトウェアである。フレームワークの共通化により統合されたデータベースと統一的な操作環境を実現している。フレームワークは, データベース, モニタ, 表示の各モジュールから構成される。中辻等・笹尾忍・古沢裕一・板東司・小竹正之はCADCEUSのフレームワークの中で, 各モジュールの概要とCADCEUSの操作性を左右するフレームワークの効率についてデータベースと表示を中心に説明している。



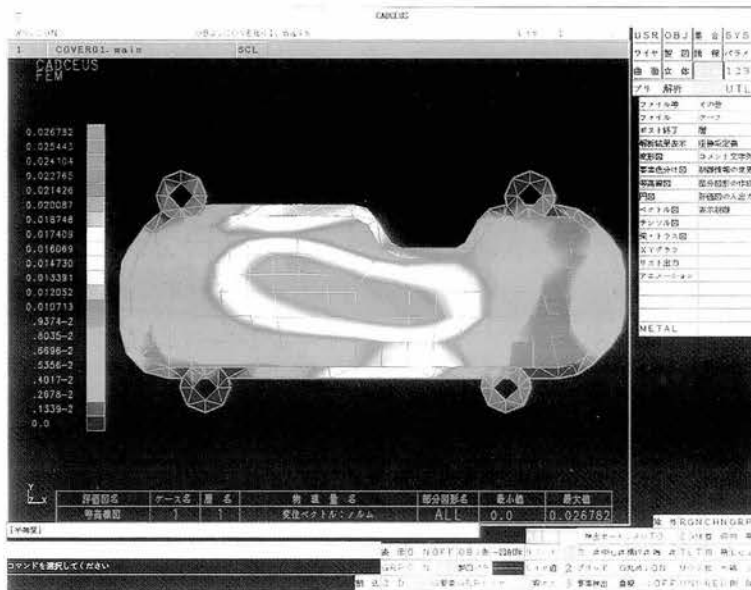
口絵1 ソリッド・モデリング
 詳細は、本文「形状モデリング」に掲載。



口絵1 工具軌跡
 詳細は、本文「CAM サブシステム」に掲載。



口絵1 C/FEM自動分割によるメッシュ図



口絵2 C/FEM変位の等高線図

詳細は、本文「CAEサブシステム」に掲載。



口絵1 ビンと水と氷



口絵2 スピーカと影

詳細は、本文「CGサブシステム」に掲載。



口絵3 椅子とホイール



口絵4 ビンのモーフィング変形例



原画像

ディザ画像

口絵5 フルカラー画像の疑似濃淡化(256色)

詳細は、本文「CG サブシステム」に掲載。

特集「CADCEUS」の発刊によせて

稲 葉 聰

平成3年秋に新聞発表した次世代統合CAD/CAMシステム「CADCEUS」の開発は、その技術的なハードルの高さ等から困難を極め大幅なスケジュール遅れとなり、お客様はもちろんのこと、社内外の方々に大変ご迷惑をかけたことを冒頭にお詫びしなければならない。

CADCEUS (Computer Aided Design, manufacturing and engineering for Concurrent Engineering by Unisys System) は、その名前にあるようにお客様におけるコンカレント・エンジニアリングの実現を目指して開発してきた。開発当初の構想段階から数えると5年を経たことになる。その間開発したプログラムは500万行に及んだ。プログラムの大きさは少しも自慢にはならないが、OSであるUNIX*を除いて全て新規開発をしたことになる。開発担当組織は若手中心に編成し、将来への技術基盤の維持・強化に努めてきた。その若手SE達も今や中堅に成長し、これから客先への展開に中心的な役割を果たすことが期待される。次世代システムとしての完成度を高めるためには、なお一層の努力が必要であるものの、日本ユニシスが総力を挙げて開発してきたCADCEUSの機能や実装技術がコンカレント・エンジニアリングの実現の基盤となることを確信している。

今、製造業を取り巻く環境は大変厳しく、とくに海外を有力な市場とする日本の製造業にとり急激な円高は小手先の改善だけでは対処しきれない状況で、21世紀に向けて何か変革を起こさなければならないという危機感で一杯である。変革とは仕事の仕方や進め方の改革である。その一つの技術として、コンカレント・エンジニアリングが最近しきりに議論されてきている。後工程の作業を前倒しして同時併行的に作業を進めることにより、製品の開発期間の短縮と質の向上を目標にしている。このような業務形態では各工程間で情報の共有や伝達が重要な要件となる。従来の図面のように誰が見ても同じ解釈になる情報がCAD/CAMシステムにおいても必要となる。CAD/CAMで言う処のデータベースのモデルがこれに相当し、CADCEUSでは「製品モデル」がこれに当たる。「製品モデル」としたのは、設計・生産の対象である製品の情報をできるだけ忠実にモデリングすることにより、正確かつ迅速な情報伝達を実現することを目指しているからである。立体(Solid)モデリングによる形状表現技術や形状が持つ機能的な特徴(形状特徴: Form Feature)のモデリング、また設計者の意図の一つである形状を決定する拘束条件(幾何拘束や手順)のモデリングが製品モデルの基盤技術となる。製品モデルの実装と製品モデルの応用であるCAE, CAM, CG, データ交換のアプリケーションが開発できたからコンカレント・エンジニアリングが実現できるとは言えないが、必要条件は満たしたと考える。

* UNIXはX/Openカンパニーリミテッドがライセンスしている米国ならびに他の国における登録商標である。

られる。日本ではその国民性からか、人間系における気配りと努力ですでにコンカレント・エンジニアリングを実現している例は多く見られ今更の感もあるが、生産拠点の海外進出など物理的な場所の分散や技術者が外国人である場合の文化の違いなどを考えると、今までのような人間系だけでは限界が見えてきている。さらに格段の情報量の増加を考えると、どうしてもシステム的なアプローチが必要となる。このような動向を見据えて「製品モデル」を中核として開発されたのが CADCEUS である。現在 CADCEUS は一応の機能の整備はできたが、まだ応用機能の充実が必要な状態である。非多様体、幾何拘束、形状特徴等の新技術に対し、その利用法の想定をして開発してきたが、まだ現実での事例はない。これから各客先で導入され実用が始まるにつれて顕在化するであろう開発時の想定と実用上の要件との差異の調整をしながら、より良いシステムに仕上げていきたい。先回の技報 (Vol. 13 No. 1, 1993 年 5 月) では CADCEUS の特徴について概説したが、今回の特集では CADCEUS の製品モデラを中心に全サブシステムの機能と実装技術について説明するとともに、これらサブシステムを支えるフレームワークについても併せて紹介をする。

最後に、本特集が CADCEUS の特徴の理解に役に立つことを願うと共に、今後のシステム開発のためにも忌憚のないご意見を頂ければ幸いである。

(製造工業システム第一本部 本部長)

CADCEUS の概要

An Overview of the CADCEUS System

酒 井 喜 嗣

要 約 CADCEUS は機械分野全般を対象とした、設計の初期段階から生産準備までの製品開発工程を支援する CAD, CAM, CAE, そして CG の統合システムである。CADCEUS は製品モデル、形状特徴、幾何拘束等の先端技術を実装することにより、設計・生産の品質向上、工期短縮を狙いとしている。

本稿では CADCEUS の主要な概念、特徴的な機能について概説する。

Abstract CADCEUS is an integrated CAD/CAM/CAE/CG system designed to support all the product development process from conceptual design to manufacturing preparations. Its target objects are all types of mechanical products. Equipped with advanced technologies that manipulate product models, form features and geometric constraints, CADCEUS aims to attain a drastic quality improvement in design and manufacturing, and an extensive reduction in lead time for product development.

This paper briefly describes its system configuration, major concepts and characteristics.

1. はじめに

CADCEUS は、自動車、機械、精密、電気等の製造業の設計から生産準備までの製品開発工程を総合的に支援する CAD, CAM, CAE, および CG の統合システムである。

CADCEUS (Computer Aided Design, manufacturing and engineering for Concurrent Engineering by Unisys System) の語源は、ローマ神話の神々の使者 Mercury の杖という意味の英語: Caduceus であり、設計や生産に携わる技術者の強い味方になるという願いが込められている。

製造業は市場における要求の多様化、円高など様々な課題に対応するために、更なる品質の向上、コスト削減、製品開発期間の短縮を迫られている。また、21 世紀に向けて設計・生産方式の画期的な革新を迫られている。開発・生産・販売という企業活動全体にわたる情報を、統合化し一元管理する事により企業運営の効率向上を図るための CIM 構築と、開発工程の同時並行作業によるコンカレント・エンジニアリングの実現が課題である。CADCEUS はこれらの傾向や要請に対応するために、当社が独自に開発した次世代統合システムである。

本稿では 2 章で CADCEUS の狙いについて述べ、3 章で特徴、4 章でシステム構成、5 章で機能についてその概要を述べる。

2. CADCEUS の狙い

製造業では、開発工程のリードタイム短縮を目的に CAD/CAM 化が進められてきた。しかし、各工程個々の自動化や合理化が限度であり、大幅なリードタイムの短縮は望めないのが現状である。そこで各工程の CAD/CAM システムを改良するのは当

然のこととして、今後は個別に導入されたために生じた自動化の島を有機的に結合すること、つまり「統合化」と各工程のシステム間で伝達される「情報の充実」が必要となる。前工程からの情報が不十分であると、後工程は前工程で決められた事項でも再検討しシステムへの再入力が必要となり、重複作業が発生してしまう。このことは、生産性を悪化させるばかりか、図面やモデルの削減が実現できず、作業の前倒しによる並列化が見込めなくなる。CAD/CAM システム導入以前は、図面や作業指示書、人と人とのコミュニケーションにより前工程の意図を伝達できていた。現状の CAD/CAM システムはこれら情報のうち、形状だけを主体に伝えるのみで、形状に込められた意図、機能的特徴、属性は伝えることができない。

一方形状の表現は、ワイヤフレーム、サーフェス、ソリッドと現実の物に近づける進展はしてきた。しかし、あくまでも形状のみで、形状に込められた意図などはモデリングされておらず、図面等が必要となるのは以前と同じである。これらを解決するために形状の他に製品が持つべき情報や、設計から生産までに製品が変遷する間の情報、つまり設計・解析・加工に関する情報も併せ持つ「製品モデル」が提唱され、研究界や ISO で議論されてきた。

CADCEUS はこの「製品モデル」を実装することにより、モデルを中核としたシステムの統合化、データの一元化、自動化の推進等の要請に応えることを大きな狙いとする。さらに幾何拘束、形状特徴等の新技術を組み合わせることにより、モデリング環境の革新、設計意図の継承、自動化の推進、設計変更への対応力の強化を図る。

3. CADCEUS の特徴

CADCEUS の特徴は、統合データベースと統一ヒューマンインタフェースを実現した「CAD, CAM, CAE, CG 統合システム」であり、設計から生産準備までの全工程を総合的に支援し、CIM の構築やコンカレントエンジニアリングの実現を支援する。

本章では、CADCEUS の特徴である製品モデルについて述べる。

3.1 製品モデルの位置づけ

CADCEUS では、「情報の統合」と「情報の充実」という観点から製品モデルを実装している。

「情報の統合」の観点からは、製品モデルの目的として、設計から生産に至る様々な開発工程で取り扱う情報を、同一の統合化されたデータモデルで表現しており、各開発工程間における情報の欠落を排除している。すなわち、設計された部品形状をそのまま利用して製造要件等の検討を行えるようになる。また、従来のシステムでは各工程間でシステムが異なる場合、個々のデータ表現の違いなどからデータの伝達が不十分で、データの再入力等が必要とされたが、それらは不要となる。

一方「情報の充実」の観点からは、製品モデルとして形状に対する情報の充実を図るために、形状に対する種々の設計意図を保持でき、これらの情報を活用して、各設計者間および各開発工程間で、形状を構成する機能部位に対する条件等の把握が可能となる。また、設計変更などに伴う形状の創成・変更が容易になる。

このような特徴を持つ製品モデルを中核にして、図1に示されるように、設計サイクルと製造サイクルが基本構想段階、詳細検討段階など各段階ごとに回り、設計で作

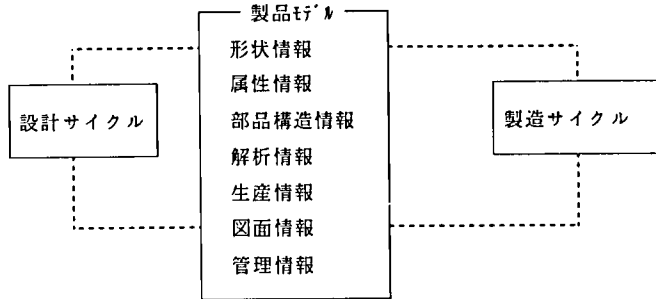


図 1 製品モデルの位置づけ

成された基本構想段階のモデルを利用して製造要件等の早期折り込みが可能となり、大幅な開発効率向上が期待できる。

3.2 製品モデルを構成する情報

CADCEUS では、製品モデルとして以下の情報を取り扱う。

1) 部品の形状情報

部品形状を規定する幾何情報，位相情報，生成情報，幾何拘束情報などから構成される。生成情報と幾何拘束情報は，設計意図を表現する情報である。

従来のシステムでは，形状の最終情報のみを保持しているのが大半で，形状がどの様に作成されたかなどの意図が不明であり，形状に対する変更操作が効率よく行えない。また，作成された部品形状は単なる図形の集まりであり，特徴的な機能部位形状の把握や抽出が困難である。これらを解消するための情報が形状の生成情報であり，モデリングにおける CADCEUS の持つ最大の特徴である。生成情報には，モデリングされた手順および条件などが操作単位ごとに形状と関連づけて保持されている。これらの情報により設計意図の伝達が実現されている。幾何拘束情報は，対象形状が満たすべき幾何学的な拘束条件(幾何拘束)，長さ，角度等の情報から構成される設計意図を表現する情報から成る。

また，形状表現はワイヤフレーム・サーフェス・ソリッドを区別なく統一的に操作（立体と面の集合演算など）できるように統合化されている。

2) 部品の属性情報

材質，肉厚，表面荒さ，面取り加工情報などを形状に対する属性として保持できる。

3) 製品を構成する部品の階層構造を示す情報

部品間の階層構造，位置関係，接続関係などに関する情報を保持できる。

4) 図面情報

図面情報は，形状と図面の連動を実現するために，形状情報と関連づけて保持できる。

5) 部品の種々の場（応力，熱，電/磁）での評価情報

FEM 解析モデル，解析条件，解析結果など FEM プリ・ポストプロセッサで取り扱う情報を保持できる。

6) 部品の加工情報

加工設計情報（加工法，加工条件など）と工具軌跡情報，加工残り情報などを保持できる。

3.3 製品モデルのデータ構造

製品モデルを構築する本システムにおけるデータベースは，ワークスペースとオブジェクトとから構成される。

1) ワークスペース

CADCEUS のデータベースは，設計作業の適当なまとまり（仕事）ごとに分割される。このまとまりの個々をワークスペースと呼ぶ。ワークスペースは階層を持たず，個々のワークスペースは独立である。一人の作業者が同時にいくつかのワークスペースを作業対象にしても良く，一つのワークスペースを複数の作業者が同時利用する事により，並行作業も実現できる。

ワークスペースは一つの部品，中間組立品，製品あるいは，一つの図面，図面内の投影図ごとに一つのまとまりを構成する。このまとまりをオブジェクトと呼ぶ。

ワークスペースは作業者の作業空間としても使用できるほか，共通に利用される標準部品を貯える場所としても利用できる。

2) オブジェクト

オブジェクトはワークスペースの下位概念であり，形状等様々な要素から構成される。

オブジェクトはその性質と用途から次の4種類に分類される。

- ・パート : 一つの部品に対応する。
- ・アセンブリ : 中間組立品や製品に対応する。
- ・シート : 一つの図面に対応する。
- ・プロジェクション : 図面を構成する一つの投影図（正面図等）に対応する。

ワークスペース内のオブジェクトは，オブジェクト同士で階層構造などのオブジェクト間関係を持つことができる。オブジェクト間の関係を活用して図2で示されている部品の配置構造を持つことができる。すなわち，オブジェクトには任意の位置に他のオブジェクトを配置することができる。配置されたオブジェクトの実体（形状などのデータ）は，全て一元管理されており，図2の例で部品Bの形状を変更すると，部品Aに配置されている二つのBも同時に変更される。図3は，製品の構成部品構造の例を示す。

図4は，図面と部品の配置例で，シート，プロジェクション，パートの各オブジェクトの関連を示す。図面と部品の構造化により，部品の形状を変更すると，そのまま変更内容が図面上に反映され，図面上の寸法も連動して変更される。

オブジェクトは，形状に関する要素，加工要素，解析要素など様々な要素で構成される。オブジェクトに含まれる要素を集約化する概念としてグループがある。グループは表示制御，形状処理などに利用できる。グループの階層は持たないが，一つの要素が複数のグループに所属することができ，データに対して種々の観点から集約化が可能である。

また，集約化する概念としてレイヤがある。レイヤはグループと異なり，複数のオ

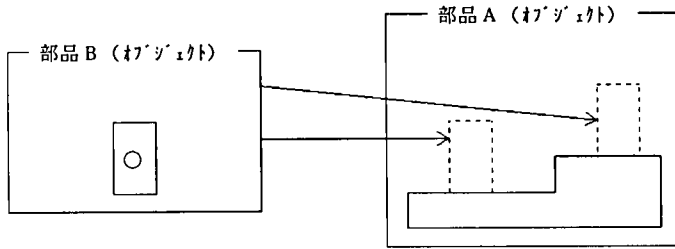


図 2 オブジェクトの配置

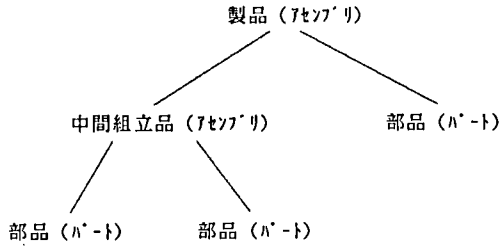


図 3 部品構成の例

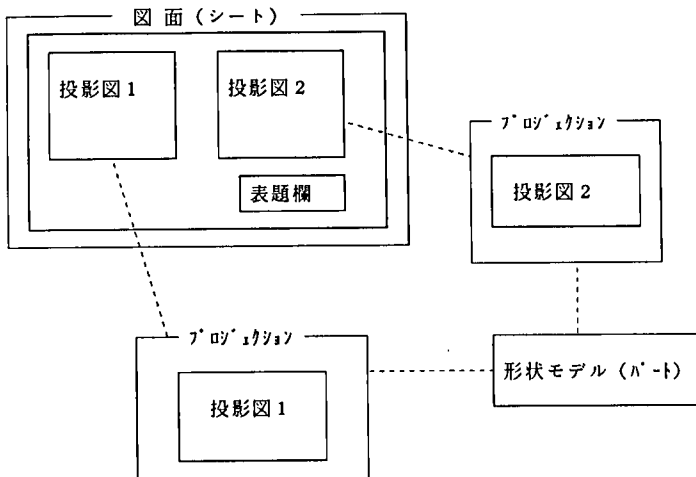


図 4 3次元モデルと図面の関係

プロジェクトにまたがる事が許される。レイヤも表示制御など種々の操作に利用できる。

3.4 製品モデルに対するグループ作業

製品モデルに対して複数の技術から成るグループで作業を並行して進めるグループ作業環境も重要である。すなわち、同一の製品・部品に対して複数の作業者が同時並行的に作業を進める(たとえば作業者 A は、作業者 B の中間検討結果を参照しながらそれに取り付く部品の設計作業を行うなど)ためのグループ作業を支援する機能を CADCEUS では提供している。

図 5 に、グループ作業環境の全体像を示す。実体空間には、ワークスペース、オブ

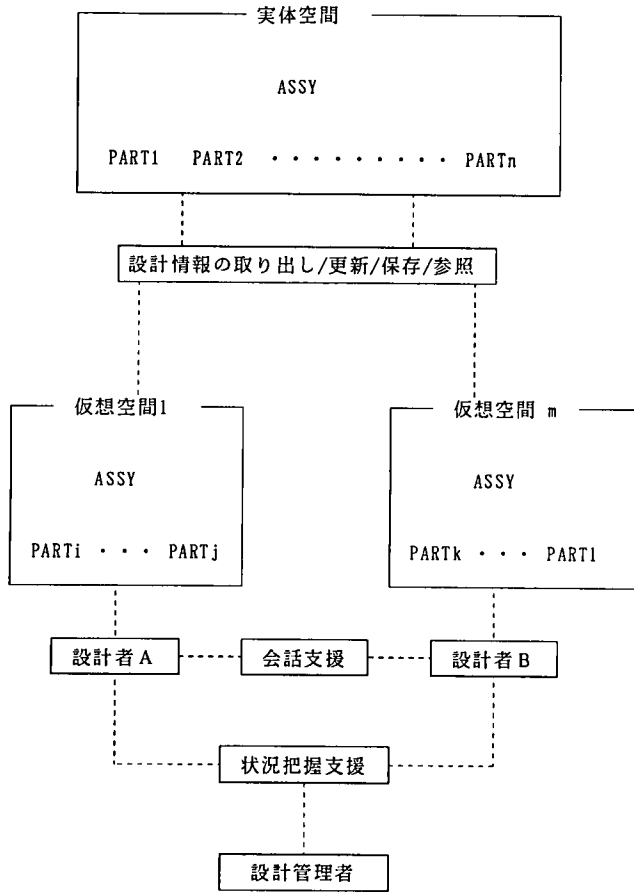


図 5 グループ作業の支援

ジェクト単位にその時点での製品・部品情報が格納されており、各設計者は、設計情報の取り出し/更新/保存/参照ができる。参照している情報は、仮想空間上で管理され実体空間との整合性が維持される。たとえば、関連する部品を参照して部品設計する際、部品間の構成情報・配置情報などの整合性が維持される。

4. システム構成

CADCEUS は、グラフィック・ワークステーション上で稼働する分散システムで、ホストコンピュータやサーバとネットワークを組むことでデータの集中管理を実現する。基本的な集中分散システムの構成は図 6 のとおりである。また、当社で開発したグラフィック・アクセラレータ (GA) を搭載した GWS 上では、光源のリアルタイム移動、半透明表示、高速リアルタイムシェーディングなどの GA の機能を最大限に活用することができる。

また、ソフトウェア構成は製品モデラを中核として各種サブシステムから構成される(図 7)。

- ① 形状と製図要素の連動、パラメトリック製図などの特徴を持つ製図サブシ

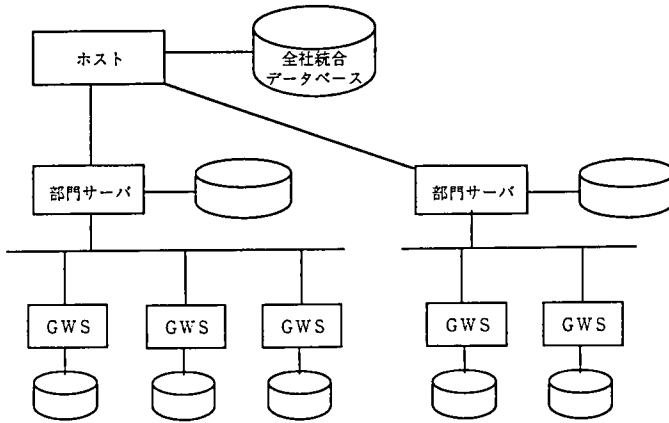


図 6 システム構成

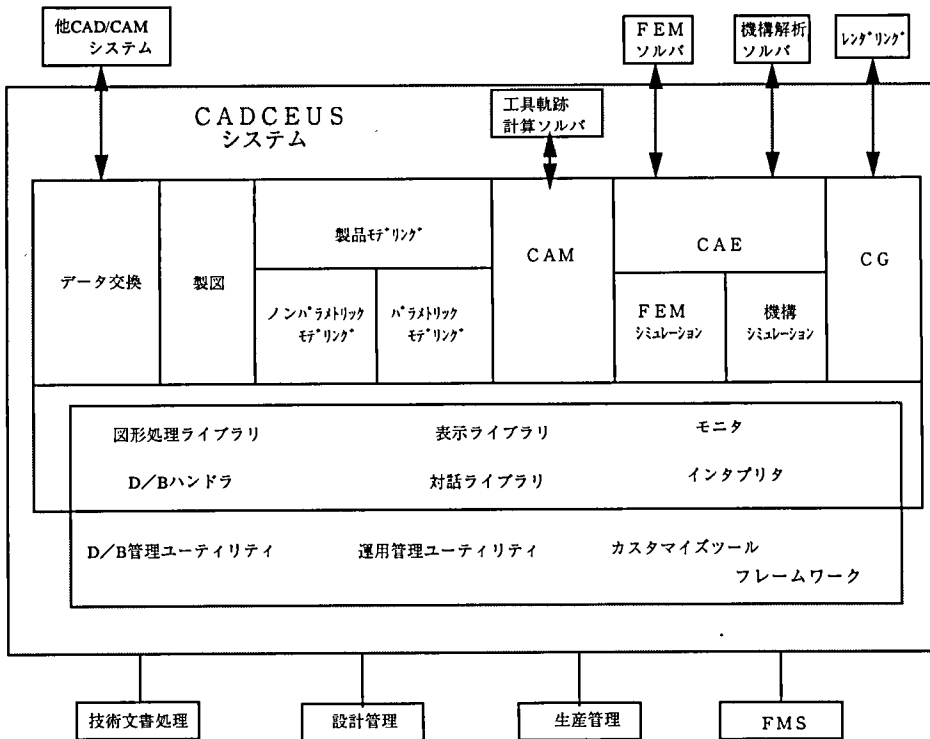


図 7 ソフトウェア構成

テム

- ② 加工設計，広範な加工法を支援する CAM サブシステム
- ③ 各種 FEM 解析を行うためのプリ・ポストプロセッサ機能を持つ CAE サブシステム
- ④ 製品モデルのプレゼンテーションのための CG サブシステム
- ⑤ 他 CAD/CAM システムとデータを授受するためのデータ交換サブシステム

これらの設計、生産準備活動を直接的に支援する機能のほかに、

- ① データベース管理などの運用管理のための各種ユティリティ
- ② 使用者固有なシステムとして構築するためのカスタマイズツール

などが用意されている。

また、PDM(Product Data Management)を実現するため、製品モデルに関する図面、技術文書などの管理システムとのインタフェースも用意されている。

5. 機能

CADCEUS には、製品モデルを中核に設計から生産を支援するための各種応用機能がある。本章では、特徴的な機能について説明する。

5.1 モデリング

初期設計から生産準備の各開発工程におけるモデリング作業は、開発検討内容により様々であり、それらを画一的な一つのモデリング形態で実現するには限度がある。

基本断面、主要断面などを設計する作業、標準形状などを組み合わせて基本形状を組み立てていく設計作業、部品のレイアウトする設計作業、金型加工用の精密なモデリング作業、部品を加工するための生産設備の作業など様々である。

これら様々なモデリングに対応するため CADCEUS では、以下のような特徴を持つモデリング機能を提供している。

1) 幾何拘束モデリング

対象形状を形状要素の集まりとして直接表現する従来の手法とは異なり、対象形状が満たすべき幾何学的な拘束条件(幾何拘束)、長さ、角度等の可変なパラメータとパラメータ間の種々の関係をシステムが記憶しておき、可変パラメータに実現値を与えると、拘束条件およびパラメータ間の関係を満足する形状をシステムが自動的に生成する手法を幾何拘束モデリングと呼ぶ。拘束条件としては、水平、鉛直、並行、直行、長さ、角度などがある。幾何拘束条件を容易に定義するために、スケッチ機能が用意されている。

幾何拘束モデリングは、従来の手法に比べ設計者の意図を直接モデルに対して保存できる利点があり、基本断面、標準形状などを各種条件から様々な案を検討する設計作業、類似部品の設計作業、標準部品の登録・利用が主体となる設計作業において有効である。幾何拘束モデリングにより作成されたモデルは、サーフェス、ソリッド等の基準線として利用できる。また、図面を構成する形状としても利用できる。利用された幾何拘束モデルの可変パラメータを変更すると、後述のパラメトリックモデリング機能により、形状の自動変更も行うことができる。

2) パラメトリックモデリング

各開発工程において、各種代替案の検討および設計変更等で形状の変更作業が頻繁に発生する。これらの変更操作を強力に支援する機能がパラメトリックモデリングである。

また、前工程のデータを有効に活用できるように、形状の生成手順等の設計意図の伝達もパラメトリックモデリングの目的である。

パラメトリックモデリングは、モデリング過程における形状の生成手順および

条件等を形状操作の単位ごとにシステムが記憶しておき、形状の生成条件の変更(寸法など)および生成手順の変更に対してシステムが自動的に影響する部分を把握して、形状操作を再実行させることにより、形状を再生するモデリング機能である。パラメトリックモデリングは、ソリッドモデルのみならずワイヤフレーム、サーフェスのモデルに対しても同様に利用できる。

3) 形状特徴モデリング

形状特徴とは設計者が意識する機能単位に対応する形状群であり、たとえば、ボス、リブ、フィレット、穴等が典型である。形状特徴単位に、形状モデルの創成・変更などの操作を支援する機能が形状特徴モデリングである。形状特徴モデリングは前述のパラメトリックモデリングと連動して、形状特徴を維持したまま形状の変更操作が可能である。形状特徴は、本質的に応用依存である。すなわち、システムで標準的に用意される形状特徴のみでは不十分であり、使用者が自由に形状特徴を定義できることが重要である。

CADCEUS では、形状モデルの一部を使用者固有な形状特徴として登録できる機能を備えている。

4) 従来型モデリング

形状モデル全体を、前述の幾何拘束、パラメトリック、形状特徴により組み立てていくには限度があると考えられる。たとえば基本的な機能を示す部位は、前述のようなモデリング機能に適しているが、機能部位間を繋ぐための形状は従来のように、部分的にワイヤフレーム/サーフェス/ソリッドを組み合わせてモデリングしていかざるを得ない場合もある。また、金型形状のように複雑な形状に対して、パラメトリックモデリングで全ての形状変更を自動的に行うにはまだ技術的に限界があり、部分的に従来のようにワイヤフレーム/サーフェス/ソリッドモデリング機能で形状の変更をせざるを得ない場合もある。

CADCEUS では、従来のワイヤフレーム/サーフェス/ソリッドモデリングに対して、より操作が簡便にできるように(たとえば面のトリム操作、面と立体との集合演算、ぬき勾配掛け、フィレット掛けなど)、様々な機能を提供している。

5.2 製 図

製図機能の特徴は、以下のとおりである。

1) 複数の製図規格に準拠

JIS, ISO, ANSI などの製図規格に準拠した製図を行うことができる。

2) 複数の単位系

形状モデルの長さの単位系に合わせて、ミリ系やインチ系の単位系の寸法表記ができる。

3) 形状モデルと図面の関連性

3次元形状モデルに対する製図では、製図の各面図(ビュー)を3次元モデルの投影図(プロジェクション)として取扱い、3次元モデルとプロジェクション関係をシステムが認識する。このプロジェクション機能により、形状モデルの変更が自動的に図面に反映される。また、各プロジェクション(投影図)に対して、3次元形状モデルを構成する各要素単位に線種などの見え方を制御することができ

る。見え方として形状要素の一部を別の線種などで表示すること（部分線種）も可能である。ソリッドモデルに対しては、自動隠線消去の機能も用意されている。

4) 部品表の創成

表操作の機能を利用して部品表の作成ができる。また、モデルの階層構造から部品の数量を自動的に算出することもできる。

5) パラメトリック製図

幾何拘束モデルと一般のワイヤフレームモデリング機能を組み合わせてパラメトリック製図作業ができる。すなわち、寸法を制御パラメタとし、寸法を変更することにより形状を自動変更する寸法駆動のパラメトリック製図が可能である。

5.3 CAM

複雑な自由曲面形状で構成される部品の加工、穴加工、領域加工などの機械加工やワイヤカット加工などの加工法を支援するCAMサブシステムの特徴について、以下に述べる。

1) 加工設計支援機能

形状モデルに対して、加工箇所、加工範囲、加工方法、加工条件などを使用者が設定していくための支援機能である。

2) 加工残りを考慮した工具軌跡計算機能

輪郭加工や稜線加工などでは、粗加工から仕上げ加工まで一連の工具に対して、前工程の加工残りを認識して加工効率の良い工具軌跡データを算出することができる。

3) 加工技術の蓄積・活用

加工手順、加工条件など種々の加工技術情報を、加工技術ファイル上に登録でき、登録されている加工手順などを利用して加工指示操作ができる。これにより加工設計の効率向上を図ることができる。

5.4 CAE

CAEのプリプロセッサの特徴としては、FEM解析用理想化形状創成のためのパラメトリック機能による形状特徴操作の活用が挙げられる。すなわち、解析において不必要な微小な穴やフィレットなどを一時的に消去して理想形状を創成できる。解析モデル作成については、サーフェス、ソリッドに対する自動メッシュ分割機能、適合化メッシュ機能などが用意されている。

解析プログラム（ソルバ）としては、NASTRAN, MARC, ARGUS（パネルの非線形解析）、Applied Structure（感度解析、最適解析）、JOH-DYNA（衝撃解析）などのほかに、当社独自開発のMELTFLOW（樹脂の流動解析）、CAST（樹脂の凝固解析）、METALFILL（湯流れ解析）など、目的に合わせて最適のものを選択できるように用意されている。

ポストプロセッサは、変形図、等高線図、矢印図、XYグラフなどの通常の出力形態に加え広範なアニメーション機能が特徴である。

5.5 CG

製品開発における意匠設計を支援するサブシステムで、レイトレーシングやマッピング

ングなどのレンダリング機能や、画像の合成等のペイント機能がある。さらに画像のファイリングや各種メディアへの入出力も可能である。

5.6 データ交換

データ交換サブシステムは、図 8 のように中間ファイルを核として以下のような各種インタフェースをとるプロセッサなどから構成される。

- ・CADCEUS インタフェース ・UNICAD インタフェース
- ・IGES インタフェース ・JAMA-IS インタフェース
- ・市販 CAD データ形式インタフェース
- ・自動車メーカーデータ形式インタフェース

各種プロセッサは、共通のデータ構造を持つ中間ファイルを介して変換処理がされる。

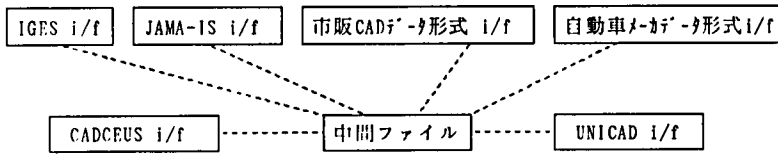


図 8 データ交換サブシステムの構成

5.7 カスタマイズ

CADCEUS の標準的に提供される機能をもとに、ユーザ固有の操作環境の設定、機能の追加および自動化推進のために、各種カスタマイズを可能とする次のような仕組みが用意されている。

- ・画面レイアウトの変更
- ・メニューレイアウトの内容/構成の変更
- ・メッセージの変更
- ・ユーザコマンドの追加/登録
- ・ユーザサブシステムの追加/登録

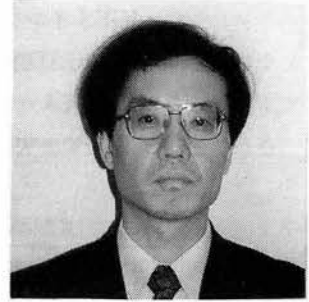
6. おわりに

CADCEUS の持つ特徴的な概念や機能を紹介したが、これら機能は設計環境の改善・自動化の推進に充分寄与できると期待している。モデリングにおける先進的な機能（パラメトリック、幾何拘束、形状特徴）は、今ようやく実用の緒についたばかりで、今後さらに実用的な評価を重ねて機能の充実を図りたい。また、CADCEUS に CE (Concurrent Engineering), PDM (Product Data Management) を実現していくために、周辺機能の充実にも積極的に取り組んでいく必要がある。

- 参考文献 [1] 木村文彦,「生産の革新を実現する計算機支援技術」,ユニシス技報 Vol. 13 No. 1.
[2] 鈴木宏正 「プロダクトモデルを用いた情報処理技術」,ユニシス研究会,第14回 UNICAD 分科会例会資料,平 3.3.11.
[3] 大高哲彦,「次世代 CAD/CAM システム:CADCEUS」の概要,ユニシス技報 Vol. 13 No. 1.
[4] 白川忠彦,「CADCEUS のデータ構造」,ユニシス技報 Vol. 13 No. 1

執筆者紹介 酒 井 喜 嗣 (Yoshitsugu Sakai)

昭和 24 年生, 47 年早稲田大学工学部電気工学科卒業。
同年日本ユニシス(株)入社。以来, CAD/CAM システムの
開発に従事。現在, CAD/CAM システム部に所属。



形状モデリング

Geometric Modeling

谷本茂樹

要約 CADCEUS の製品モデラにおける形状モデリング機能の特徴は、サーフェスマデラとソリッドモデラとの統合である。統合は、曲面と立体に関するデータ表現と演算を統一し、複合面処理を強力にすることにより実現されており、使用者に曲面と立体の区別を意識させず広範な機能を提供している。CADCEUS の提供するモデリング環境と、モデラ開発の基本的な考え方を明らかにすることを目的として、モデラの扱うデータと特徴的なモデリング機能について述べる。

Abstract The goal of geometric modeling functions in the product modeler of CADCEUS is to integrate a surface modeler and a solid modeler. The integration has been realized by unified data structure and operations for a complex surface and a solid and by enhanced operations for complex surfaces. The user of CADCEUS can utilize various functions without any distinction of a complex surface from a solid. This paper describes the data structure and characteristics of the modeling functions to clarify the modeling environment and the design concept of the modeler.

1. はじめに

3次元形状のモデリング形態には、サーフェスマデリングとソリッドモデリングがあり、それぞれ独立に発展してきた^[4]。

サーフェスマデリングは、隣接関係を持たない面の単位で形状を生成する。通常、四辺形の曲面を創成し、対象物の表現に必要な部分を閉線列で区切り、トリム面と呼ばれる部分面を作る。その部分面を集めて対象物の表面形状を表現する。

一方、ソリッドモデリングでは隣接関係を持つ面の集合として立体を表現する。ソリッドモデラのモデリング形態には、プリミティブを創成、配置し、プリミティブ同士の集合演算により必要な形状部分を集める形態（集合演算型ソリッドモデリング）や、土台になる立体を作り、押し出し等の局所変形により形状生成を行う形態（局所変形型ソリッドモデリング）がある。従来の形状モデラは、特定のモデリング形態を支援してきた。しかし、実際には複数のモデリング形態を組み合わせる形状を生成することが多い。

- ・自動車車体外板のモデリングでは、隣接関係を付けず個々の面単位に形状生成することが多い。しかし、複数の面にわたるフィレット掛けや、スプリングバックのように連結した面群の変形、複数の面へのビードの取り付け等、連結した複数の面を演算の対象とすることがある。
- ・自動車のエンジン等の機能部品に対して、設計から生産準備までの各工程に一貫したCADシステムの適用を考えると、製品設計段階では集合演算型ソリッドモデリングが適する。試作、生産準備段階では、サーフェスマデリング、集合演算型ソリッドモデリング、局所変形型ソリッドモデリングを組み合わせさせた

形態が適する。しかも、設計と生産準備の間の形状データの流れは一回限りの一方的なものではなく、何度も行き来する。設計と生産準備を同時並行的に進めるためには、設計と生産準備の間で、形状データと演算の共通化が必要である。

このような要求から、形状モデラに多種のモデリング形態を支援することが求められる。CADCEUS では、さまざまな業務への適用が想定されており、上に述べたモデリング形態を支援できるようにしている。その特徴はサーフェスマデリングとソリッドモデリングの統合である。統合は複合面処理を強力にすることにより実現した。以降に CADCEUS の形状モデラの特徴を複合面処理中心に説明する。

2. 形状モデラの特徴

CADCEUS の形状モデラの特徴は、形状表現の統合、モデリング機能の統合、自由曲面等の自由形状に対する演算が安定していることである。

2.1 形状表現の統合

単面を 1 構成面から成る複合面、立体を表面形状だけに注目して閉じた複合面とみなすことにより、単面、開複合面、立体を、すべて複合面として表現し、同等に操作対象、演算対象とする。そのため、曲面モデルと立体モデルの間のデータ変換は不要であり、形状データを一元管理できる。さらに、複合線も複合面と同様のデータ構造で表現し、複合面や複合線の連結体として、非多様体を表現する。

2.2 モデリング機能の統合

サーフェスマデリングとソリッドモデリングに必要な機能を、一つのコマンド体系の基に統一する。そのため、操作者はモデリング形態の違いを意識することなく、形状生成を行うことができる。たとえば、ボスを取り付ける時に、ボスの各構成面を 1 面ずつ生成し、トリムし、繋ぎ合わせることも(サーフェスマデリング)、ボスのプリミティブを創成し、集合演算で付加することも(集合演算型ソリッドモデリング)、スケッチで面上に線を描き、局所変形的に押し出すこと(局所変形型ソリッドモデリング)もできる。

一つのコマンドで生成した構成図形(構成面、境界線、頂点)の集合を生成単位としてシステムが自動管理する。生成単位は、形状特徴に相当し、操作者の意図を表現する形状の単位である。生成単位ごとに生成パラメータや属性を保存でき、複合面の中から同種のコマンドで創成した生成単位を検索できる。

演算により変形した形状を、演算前の状態に戻すために、演算により消滅する形状をシステム内部で保存する。また、形状生成に用いたパラメータも保存する。そのため、パラメータの値を変更すれば、操作の履歴が再実行されて、形状を変形できる。

形状特徴機能やパラメトリック変形機能は、ソリッドモデラ固有の機能と考えられることが多いが、CADCEUS では、サーフェスマデリングやワイヤフレームモデリングでもソリッドモデリングと同様にパラメトリック変形機能を利用することができる。しかも、操作履歴情報の採取/非採取を操作者が実行時に制御できる。

2.3 自由形状対応

自由形状を安定的に処理するように、以下の点を考慮して CADCEUS を開発した。

- 1) ソリッドモデラの自由形状処理の不安定さは、境界線と構成面の離れ等の形状の持つ誤差に起因することが多い。CADCEUSは、形状の持つ誤差や、境界線の最小長さ等の許容誤差、制限値を統一的に管理する。
- 2) 形状の中には精度の重要な部分と、あまり重要でない部分とがある。CADCEUSでは構成面や境界線がどのように生成されたかにより、精度の重要度を自動的に（たとえばフィレット面は精度があまり重要でない）判断し、必要な精度を保持するように演算する。

3. 形状データ

形状データの体系を図1に示す。

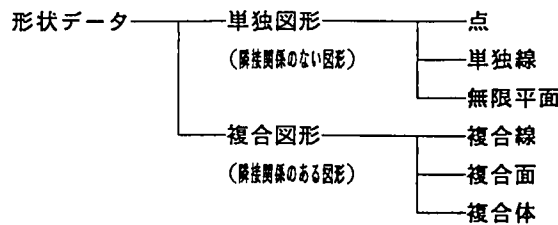


図1 形状データの体系

3.1 複 合 線

図2に示すような、分岐のない端点が順に繋がる線の列を複合線と呼び、複合線を構成する個々の線をパス構成線と呼ぶ。複合線は閉じていても開いていてもよいが、複合線全体で1本の折れ線のように扱われる。複合線は向き付け可能な1次元多様体である。

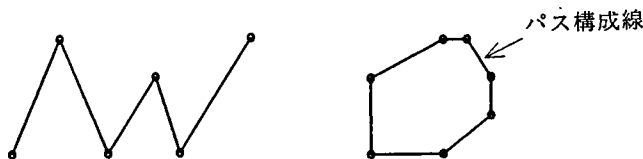


図2 複合線

3.2 複 合 面

分岐のない構成面の集まりを複合面と呼ぶ。分岐がないとは、すべての境界線が一つまたは二つの構成面と隣接することを意味する。三つ以上の構成面が一つの境界線で接続すると、後述する非多様体になる。

複合面の外周（隣接面が一つの境界線）の境界線列を外郭と呼ぶ。複合面の中で、

- ・外郭を持たない複合面、すなわち閉じた複合面をとくに、立体と呼ぶ。
- ・外郭を持つ複合面、すなわち開いた複合面をとくに、開複合面と呼ぶ。
- ・開複合面の中で、1構成面から成る複合面をとくに、単面と呼ぶ。

複合面は、2次元多様体である。立体は境界のない2次元多様体であり、開複合面は境界付き2次元多様体である。

開複合面と立体の違いは、複合面として開いているか、閉じているかだけである。

図3のように、開複合面を貼り合わせて面が閉じれば自動的に立体になり、立体から構成面1枚を取り除けば自動的に開複合面になる。複合面には表裏の区別があり、複合面の表側が物体の外側に対応する。単面、開複合面、立体を区別せず、複合面として操作、演算の対象とするため、データ表現、操作方法を統一することができる。

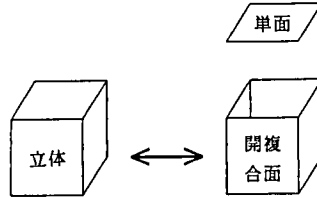


図3 立体と開複合面の変換

3.3 複合体(非多様体)

図4のように、複合線や複合面の間に接続関係をつけた図形を複合体と呼ぶ。複合体は非多様体を表現する。CADCEUSでは、非多様体を複合線(1次元多様体)や複合面(2次元多様体)の結合体^[1]として表現する。複合線や複合面の間の接続関係を非多様体接続関係と呼び、複合線や複合面の内部の隣接関係と区別する。非多様体接続関係には、

構成面間非多様体接続関係 (構成面同士的一致)

構成線間非多様体接続関係 (境界線やパス構成線同士的一致)

頂点間非多様体接続関係 (頂点同士的一致)

がある。

図4(a)は、立体と開複合面が境界線を介して、立体と複合線が頂点を介して接続する例である。(b)は、二つの立体が構成面を介して接続する例である。(c)は、構成面内の孤立頂点と複合線の端の頂点が接続する例である。

現実世界に存在する対象物は多様体であり、対象物の形状をそのまま計算機で表現するなら、非多様体を表現する必要はない。しかし、類似部品の表現のための多重表現や、解析を目的として対象物を理想化する簡略化表現等^{[2][4][5]}のアプリケーションで非多様体の表現が求められることが多い。

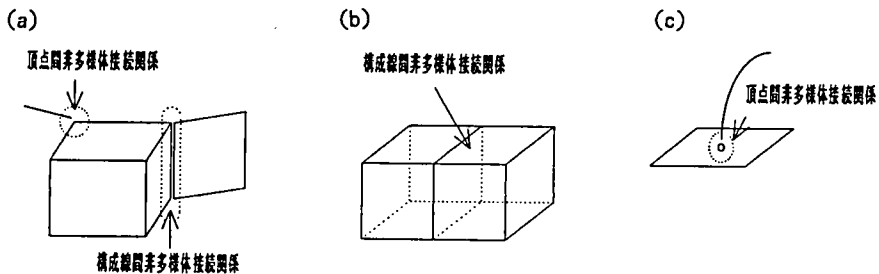


図4 非多様体

CADCEUS では、多様体内の隣接関係と非多様体の接続関係とを区別するが、非多様体の表現方法として広く知られているラジアルエッジ(radial edge)構造¹⁰⁾等では、多様体内の接続関係と非多様体の接続関係を同一の接続関係で表現する。多様体である複合面の表現にラジアルエッジ構造を用いると、多様体の代表的な表現方法であるウイングドエッジ(winged edge)構造に比べ複雑な表現をとるため、データ量が多くなり演算時間を多く要するという問題がある¹⁴⁾。通常モデリング操作では、対象となる形状は多様体であり、非多様体を操作することは少ないと考えられる。非多様体と多様体と同じデータ構造で表現することにより、本来単純な構造で表現できる多様体を、複雑な構造で表現することは避けたい。CADCEUS では、多様体を表現するのにウイングドエッジ構造を基にしたデータ構造を採用し、非多様体を多様体の結合体として表現する。

3.4 構成図形

複合図形は構成図形からなる。0次元の構成図形が頂点、1次元の構成図形が境界線とパス構成線(境界線とパス構成線を総称して構成線と呼ぶ)、2次元の構成図形が構成面である。複合面は、互いに密に隣接関係の付いた構成面、境界線、頂点の集合として表現され、同様に複合線はパス構成線と頂点の列として表現される。

3.5 消滅形状

任意の集合演算を取り消したり¹⁷⁾、集合演算やフィレット掛けをする以前の形状に戻す³⁾ために、集合演算やフィレット掛け等の演算で消滅する形状(イナクティブ・シェル: inactive shell)を保存する。複合面と消滅形状の間に境界線を介して接続関係を付ける。複合面と消滅形状を結合すると非多様体になる。

複合体のように、操作者が意識して非多様体を作る場合と、消滅形状の保存のように、システム内部で自動的に非多様体を作る場合がある。前者を外部非多様体表現、後者を内部非多様体表現と呼ぶ³⁾。CADCEUS は、接続関係の種類を区別することにより、外部非多様体表現と内部非多様体表現を独立に表現し、複合体と消滅形状を混在して取り扱うことができる。すなわち、非多様体のデータ表現をとる複合体の生成や変形と、消滅形状の復元の両方が可能であり、複合体の形状復元も可能となる。

4. モデリング機能

CADCEUS のサーフェスマデリングとソリッドモデリングの機能体系を図5に示す。

4.1 複合面のモデリング

CADCEUS の操作の単位が複合面であるため、トリム、トリム戻し、交線、フィレット掛け、オフセット等の演算も複合面に対して行う。

たとえば、掃引面、N 辺ボカシ面のように一度の演算で複数の面を創成する場合、単面を扱うサーフェスマデラは、隣接関係のない独立な面を複数創成するが、CADCEUS は複数の構成面から成る一つの複合面を創成する。また、CADCEUS のトリム機能は、複合面を線列でトリムする。単面も立体も複合面なので、CADCEUS では、単面をトリムすることも、立体をトリムして開複合面にすることも可能である。

このように、CADCEUS では、主操作単位が複合面であり、単面、開複合面、立体

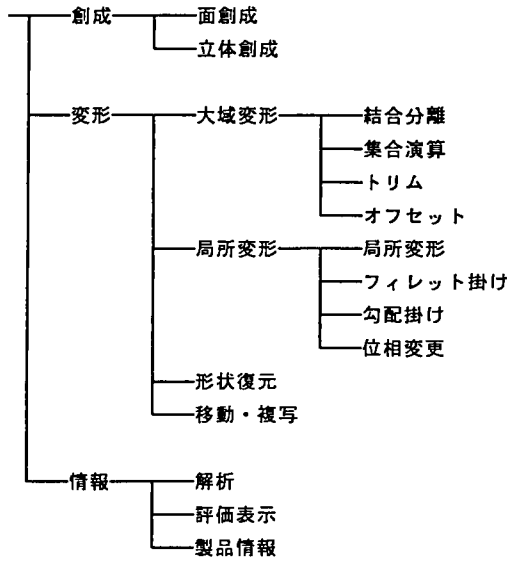


図 5 機能体系

を区別なく、演算の対象にできる。

自由曲面は格子状のパッチの集まりで表現される。同様に、複合面は分岐のない構成面の集まりで表現される。複合面と構成面の関係は、自由曲面とパッチの関係に似ている。すなわち、構成面は自由曲面を構成するパッチのように、複合面の部分領域を表現する構成要素であり、複合面を対象とするモデリングにおいては、独立な面として扱われない。

4.2 複合面の結合分離

開複合同士を、幾何的に一致する外郭線で結合することや、一つの複合面を二つに分離することができる。複合面の分離と結合を使えば、図6のように、立体を二分割し、分割後の形状に面を結合できる。この演算は、鋳型等の上下型分割や、見切り面の付加に利用できる。

図7のように、多数の開複合面を対象に外郭境界線の一致を検査し、一度に隣接関係を付け一つの複合面に結合することができる。逆に、一つの複合面を構成面ごとや



図 6 分離と結合

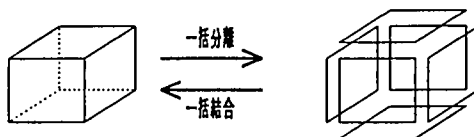


図 7 複合面の結合分離

生成単位ごとの独立な複合面に分割できる。この機能は、他のシステムから取り込んだ単面の集合を一度に隣接関係付けするのに有用である。

4.3 集合演算

CADCEUSのような境界表現を内部表現とするソリッドモデラでの集合演算は、立体表面を交線により分離したり、結合したりする演算である。操作者が実現したいのは立体間の集合和、集合差、集合積を求めること自体にあるのではなく、立体の必要な部分を交線により切り取り集めることであり、和・差・積は必要な部分を指示する便宜的な指示方法にすぎないとする。

CADCEUSは、立体と開複合面を区別せず複合面として扱う。開複合面の表側を立体の外側に対応させ、開複合面の外郭部に幾何のない面を補うことにより、立体同士の集合演算と同一の仕様で、立体と開複合面との集合演算を行う。交線は外郭に達しない限り閉じ、立体間の集合演算と同様に複合面の分割結合の処理を可能にしている。

立体と開複合面との集合演算を、集合演算本来の定義どおりに演算すると、非多様体を作ることになる⁶⁾。CADCEUSでは、この本来の集合演算を一般集合演算と呼ぶ。集合演算と一般集合演算の違いを、前面の開いた箱（開複合面）と円柱（立体）との和集合の例で図8に示す。

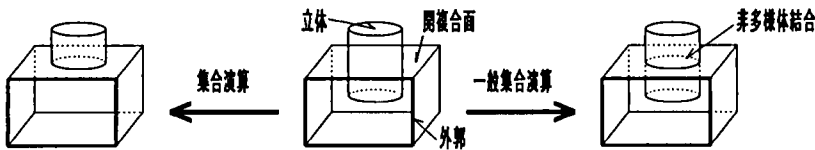


図8 集合演算と一般集合演算

図9のように、操作者が開複合面を立体の一部と考え難い場合には、和・差・積の指示は適さない。和・差・積は、演算後に残る部分を指示するためなので、和・差・積の指示が適さない場合のために、演算後に残る部分を直接指示する演算を用意した。この演算を複合面演算と呼ぶ。複合面演算も、集合演算と同様に、交線で互いの複合面を分割し、分割片の必要な部分を集め結び合わせる演算である。

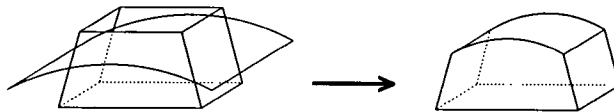


図9 複合面演算

図10のように、任意の分割片を組み合わせて結合し、非多様体を生成することもできる。

従来の集合演算では、複合面の中のすべての交線を演算に使用するが、CADCEUSでは操作者が演算に使用する交線を選択することができる。選択方法としては、交差する構成面組を指示する方法と、すべての交線を表示し、その中から操作者が交線を

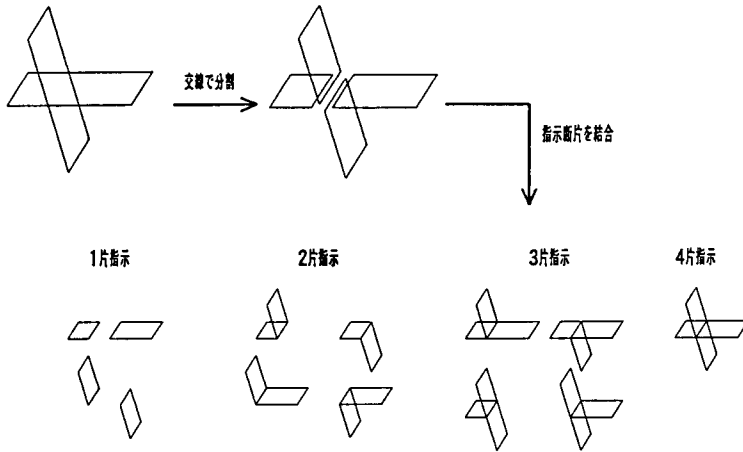


図 10 一般複合面演算

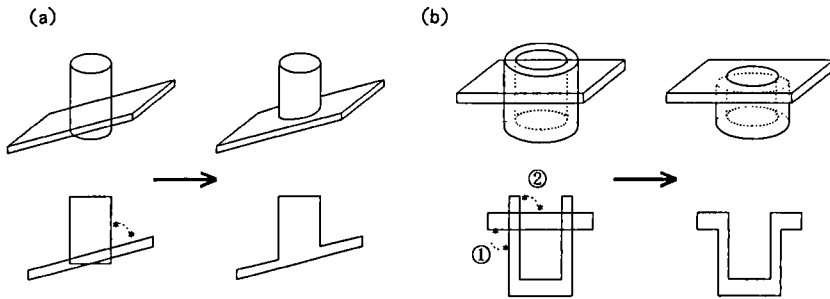


図 11 交線を選択

選択する方法がある。交線を選択することで、図 11 のような従来の集合演算では実現不可能な演算結果も生成できる。図 11 の*印は、交線計算を行う構成面を意味する。図 11(a)は、薄い立体の上部に円柱を取り付ける例である。集合和をとると、薄い立体の下部にも円柱が取り付け、交線を選択することにより、上部にだけ円柱を取り付けることができる。交線を選択する場合、演算後に残す分割片の採用に矛盾をおこすことがある。その例を筒の外側に立体を取り付ける例で図 11(b)に示す。要求する形状を作るためには、選択する交線の①では集合和を、②では集合差をとることになり、和・差・積の指示に矛盾が生じ集合演算ができない。この形状は複合面演算で生成できる。

4.4 フィレット掛け

CADCEUS のフィレット掛けでは、丸める境界線列と半径を指示するだけで、境界線列にフィレットを掛けることができる。境界線を 1 本指示すれば、それと接線連続に繋がる境界線列をシステムが自動的に丸め境界線として選択する。また、徐変半径や境界線通過などの特殊な条件のフィレット掛けも可能にしている。

フィレット掛けの演算は、フィレット面を創成する処理と、フィレット面を複合面に埋め込む処理からなる。フィレット面の創成と埋め込みに分けて説明する。

4.4.1 フィレット面創成

丸める境界線列の両側の構成面群の間にフィレットを掛ける。フィレット面と接触する構成面は、丸める境界線列に隣接する構成面と接平面連続な構成面群である。接平面連続な構成面を自動的に乗り移り、フィレットを掛ける。接平面不連続な境界に達すると、構成面の有効範囲を拡張することや、接平面不連続な境界線を通過するようにフィレットを掛けることができる(図12)。さらに、境界線を通過する場合には、図13のように、境界線に隣接する構成面に接するようにフィレット面を創成することもできる。

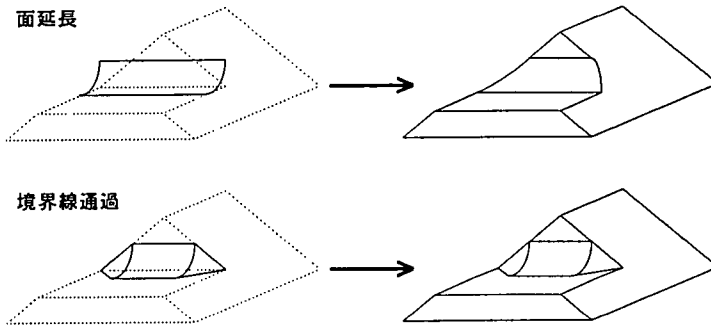


図12 不連続な部分のフィレット掛け



図13 線面フィレット

この他にも、CADCEUSのフィレット面創成機能は、次のような従来のソリッドモデラにはないサーフェスマデラのような詳細な形状生成指示を行うことができる。

- 1) 円弧生成方法に3種類ある。
 - ①丸め境界線に沿い、球を転がすときに作られる包絡面
 - ②丸め境界線の法平面内で接円弧を求め、接円弧を繋いで作られる面
 - ③指定方向に垂直な平面内で接円弧を求め、接円弧を繋いで作られる面
- 2) 折れる境界線ごとに(または一括して)、面延長、境界通過を指示できる。
- 3) フィレット端の円弧形状を、外部の線で指示することができる。
- 4) フィレット面を創成する範囲を指示できる。

4.4.2 フィレット埋め込み

図14にフィレット掛けの処理手順を示す。(a)まずフィレット面を創成し、(b)次にフィレットの掛かる部分とフィレット面をトリムする。フィレットに接触する構成面をフィレット面の境界線によりトリムし、停止面をフィレット面との交線によりトリムする。トリムすることにより、フィレットの掛かる部分に穴があき、開複合面になる。また、フィレット面も停止面との交線によりトリムする。(c)トリムされた面同士を結合する。

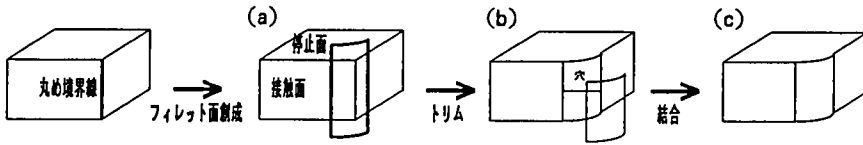


図 14 フィレット掛けの処理手順

フィレットが掛かることにより、通常、周りの構成面の有効範囲は小さくなるが、構成面の有効範囲が大きくなる場合もある。図 15 (a) は、フィレット端部の停止面が大きくなる例である。(b) は、円柱の突起物が存在しないものとしてフィレット面を創成し、埋め込み時に円柱側面を延長してトリムする例である。このような場合でも、構成面の有効範囲を自動的に変更する。

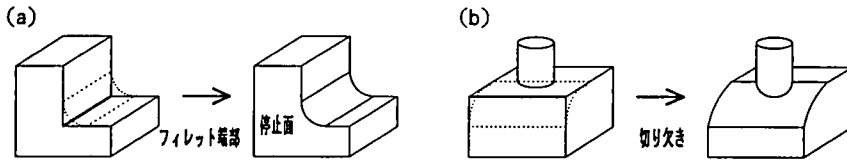


図 15 周りの構成面の拡張

操作者が望まないフィレット面の歪み等の形状が生じる場合、フィレット構成面の全体または一部を分離し、整形後埋め込むことができる。このようなサーフェスマデリングの手法を複合面に対して使うことができる。一般に、操作者の意図どおりのフィレット形状が得られないことが少なくない。CADCEUS では立体と曲面を同等に扱えるため、操作者が面の切り貼り作業をすることにより、フィレットが掛からないために生じる形状生成作業の中断という事態を避けることができる。

4.5 勾配掛け

鋳鍛造等では、素形材を金型から抜き取り易くするために、形状に勾配を掛ける。勾配面の形状は、尖点が基準線を通過する、軸の方向が一定の円錐の包絡面になる。CADCEUS の勾配掛け機能には、次の 3 種類がある。

- 1) プリミティブ立体 (立方体, 円柱, 平行掃引体等) に勾配を掛ける。

立体創成時に、同時に勾配を掛けることができ、また、創成後のプリミティブに対しても、勾配を掛けることができる。

プリミティブ単位で勾配掛けを行い、干渉や面間距離の検査を行うことがある。また、集合演算後の形状に勾配を掛けるより、プリミティブに勾配を掛ける方が、安定して高速に処理することができる。

- 2) 基準線を通過する勾配面、勾配体を創成する。

基準線、勾配方向、勾配角度から、勾配体または勾配面を創成する。境界線ごとに勾配角を変えることや、または頂点ごとに勾配角を指定して、その間を徐変させることもできる。

- 3) 複合面の一部の構成面群に勾配を掛ける。

境界線から勾配面を作り、複合面に埋め込む。周りの形状との整合を保つために、自動的に隣接面をトリムしたり、延長したりする (図 16)。

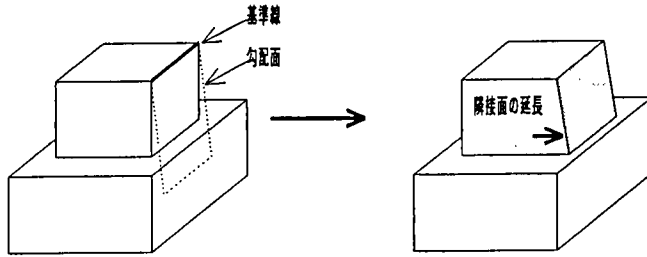


図 16 勾配掛け

4.6 形状復元機能

消滅形状を利用して、演算実行前の形状に戻す機能を説明する。この機能は、パラメトリック機能とは独立である。しかし、パラメトリック機能と組み合わせることにより、さらに有効な機能を実現する。以下に、形状復元の基本機能を説明する。

1) 消滅面復活

システム内部で保存している消滅形状を独立な複合面として取り出す。

2) 形状復元

他の形状と干渉していない部分を復元する。フィレットが重複して掛けられる場合、最後のフィレットだけを取り除くことができる (図 17)。

また、一度に干渉している部分すべてを復元することもできる。たとえば、あるフィレットより上に掛かるフィレットを一度に復元することができる。

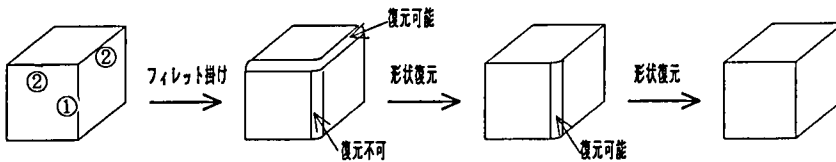


図 17 非干渉部の形状復元

3) 集合演算組み替え

集合演算で取り付けけた面群を取り出し、その集合演算で消滅した形状と結合し

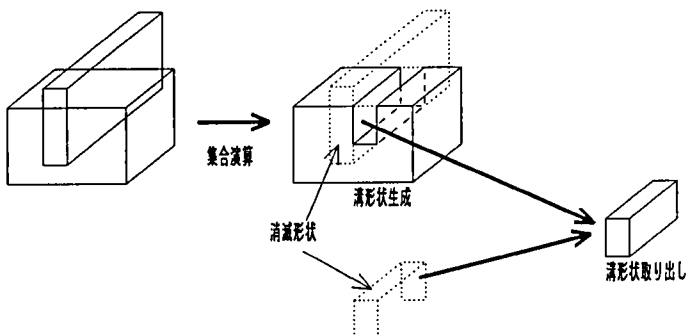


図 18 集合演算組み替え

複合面とする。1回の集合演算では、通常2組の消滅形状を生成する。その消滅形状のいずれかと結合する。図18は、溝の部分の形状を立体として取り出す例である。同様に、穴形状を取り出すことや、穴を埋めることができる。

4.7 非多様体表現の利用

1980年代後半には、非多様体に関する研究が盛んに行われ^{[11][8]}、多くの非多様体を表現するデータ構造が提案され、表現可能な範囲が競われた。市販の形状モデラにも、非多様体を表現するシステムが現れた。しかし、通常のモデリングに要求される形状は多様体である。非多様体をどのような応用分野で使用すると有効であるかが不明なため、非多様体のモデリングが産業レベルで普及しているとは言い難い。消滅形状を内部非多様体表現し、形状復元に利用する用途はあるが、ここでは外部非多様体表現について説明する。

CADCEUSでは、次の用途で非多様体を利用されることを前提に、非多様体モデリング機能を用意している。

1) CAE解析のための理想化表現 (図19(a))

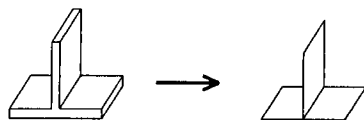
薄板立体を曲面で表現するなどの理想化するために、非多様体表現が必要である。

2) 有限要素データ生成のための小立体分割 (図19(b))

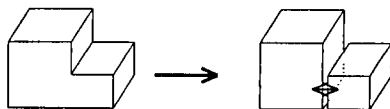
解析のための有限要素データを生成するために、有限要素データを生成し易い単位に、あらかじめ立体を分割する。分割面の一致関係を保存する必要があるため、分割された小立体の集合を非多様体表現する。

3) 多重表現 (図19(c))

(a) 理想化表現



(b) 立体分割



(c) 多重表現

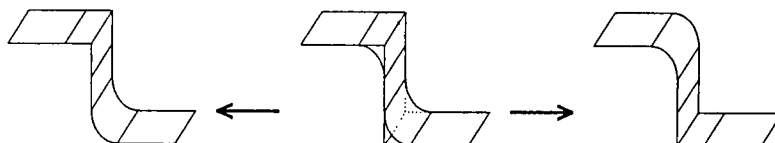


図19 非多様体表現の利用

非多様体の中の多様体部分をグループ化する。

5. モデリング例

二つのボス（円柱）をアーム（角柱）で繋ぐ機械部品の機能設計から、生産準備までの形状生成過程を例に、CADCEUS のモデリング機能の使い方を説明する。

<機能設計>

- ・ボスの軸間隔、ボスの半径、高さから、ボスのプリミティブを創成する。
- ・アーム形状のスケッチを描き、それを掃引して平行掃引体を創成する。
- ・ボスとアームを集合演算する（図 20）。
- ・マスペロパティを計算する。
- ・解析のための有限要素データ作成用のモデルを作成する（図 21）。
- ・パラメトリック形状再生成（図 22）

<生産準備>（図 23）

- ・部品の基本形状をプリミティブに分解する。
- ・加工代を付加し、プリミティブを再創成する。
- ・型抜き方向、見切り面を決め、プリミティブに抜き勾配を掛ける。

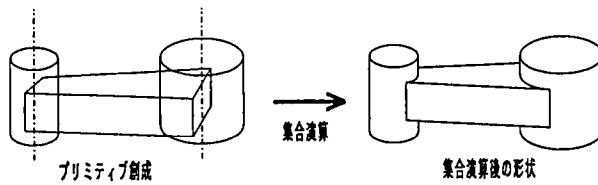


図 20 基本形状生成

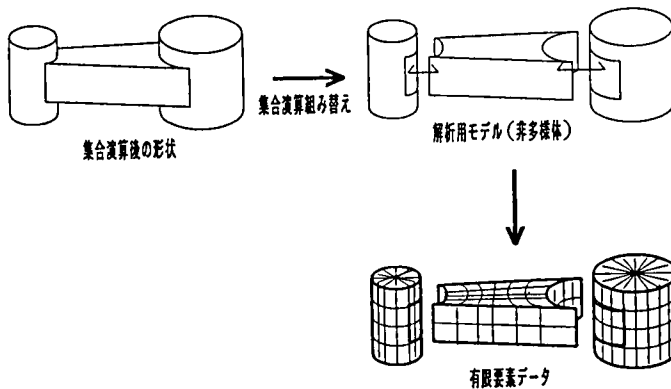


図 21 解析データ作成

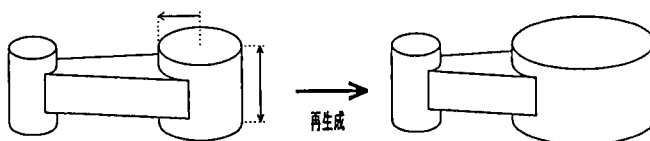


図 22 パラメトリック変形

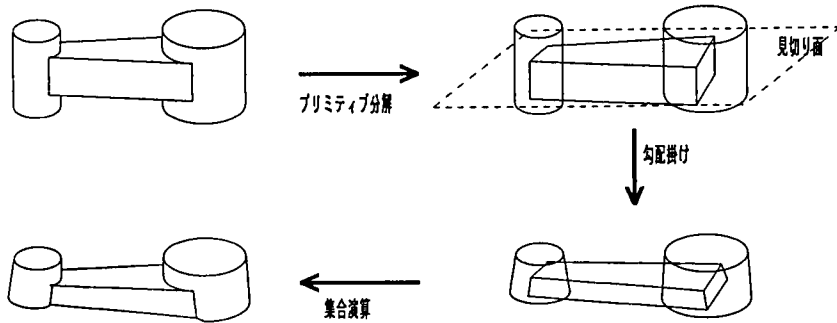


図 23 生産準備

- ・集合演算する。
- ・フィレットを掛ける。
- ・マスプロパティを計算する。

CADCEUS によるモデリングの実例（薄肉のケースにリブとボスを取り付け）を示す（図 24）。

- ① ケース外壁を『勾配面』として、底を『1 ガイド掃引面』として創成する。
- ② ケース外壁と底面を『複合面演算』で結合する。
- ③ 結合部にフィレットを掛ける。
- ④ 外壁を内側にオフセットし、平面で繋ぎ、薄肉のケースを作る。
- ⑤ 『リブ』と『ボス』を創成する。
- ⑥ リブとボスを『集合演算』で結合する。
- ⑦ リブとボスの結合体と薄肉のケースを『集合演算』で集合和をとり結合する。
ケースの外側にもリブとボスが付くため、交線選択の機能を使う。
- ⑧ リブ、ボスとケースの結合部にフィレットを掛ける。丸める境界線列の1か所を指示し半径を入力するだけでよい。

口絵1(ソリッド・モデリング)に、エンジン部品のモデリング例を示す。

6. おわりに

CADCEUS は、サーフェスモデリングとソリッドモデリングという伝統的な二つのモデリング形態を統合する形状モデラである。形状データは、単独の点、線、面から、隣接関係を持つ複合線、開複合面、立体、非多様体まで表現できる。幅広い形状表現範囲と、最新のモデリング技術を導入し、設計から生産準備までの実務で一貫して使えるシステムとしてして開発した。今後も、より使い勝手の良いモデラの実現、さらに演算の頑健性や効率の向上を目指して継続的に注力したい。

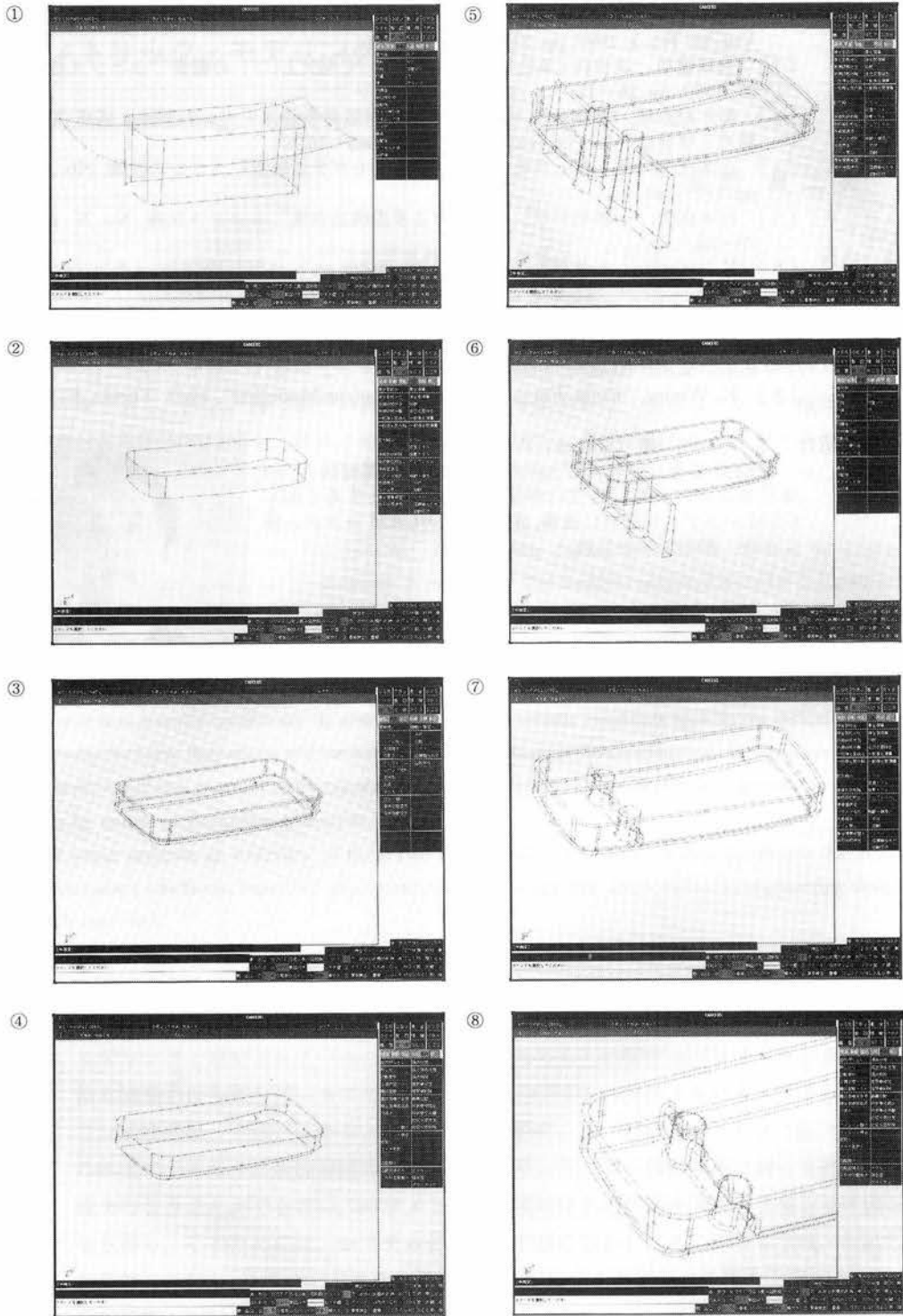


図 24 ケースのモデリング例

- 参考文献
- [1] 相沢民王, “CAE データベースのためのデータの胞複体鎖モデル”, 精密工学会誌, Vol. 55, No. 2, 1989, pp. 311~316.
 - [2] 大高哲彦, “次世代 CAD/CAM システム「CADCEUS」の概要”, ユニシス技報, No. 37, 1993, pp. 26~41.
 - [3] 鈴木建彦他, “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(第1報)”, 精密工学会誌, Vol. 59, No. 10, 1993, pp. 1665~1670.
 - [4] 谷本茂樹, “サーフェスモデラとソリッドモデラの統合”, ユニシス技報, No. 32, 1992, pp. 179~201.
 - [5] 松木則夫, “形状モデリングにおける多重構造表現”, ユニシス技報, No. 37, 1993, pp. 75~86.
 - [6] E. L. Gursoz et al, “Boolean set operations on non-manifold boundary representation objects”, CAD, Vol. 23, No. 1, 1991, pp. 33~39.
 - [7] H. Masuda et al, “A Mathematical Theory and Applications of Non-Manifold Geometric Modeling”, In Advanced Geometric Modeling for Engineering Applications, North Holland, 1990, pp. 78~92.
 - [8] K. Weiler, “Euler Formulas and Geometric Modeling”, PhD. Thesis, RPI, 1986.

執筆者紹介 谷本茂樹 (Shigeki Tanimoto)

昭和27年生。52年大阪大学理学研究科修士課程修了。同年日本ユニシス(株)入社。主に形状モデラを中心とするCAD/CAMシステムの開発に従事。現在、CAD/CAMシステム部に所属。精密工学会会員。



パラメトリック・モデリング

Parametric Modeling

荻野 富二夫

要約 近年、パラメトリックモデリングと呼ばれるモデリング形態の有効性が広く認められつつある。CADCEUSでは、「手順型パラメトリック」と「非手順型パラメトリック」と呼ぶ二つの異なる技術を採用した。前者は操作の手順も拘束条件とみなし、操作履歴の採取と履歴の再実行を動作原理とすることにより、寸法の変更や操作履歴の変更による形状の変形や、操作の取り消し、抑止、操作順序の変更などの機能を提供する。後者はスケッチ機能により定義される幾何拘束問題を、前向き推論方式により解析し条件を満たす形状を生成する。

本稿では、それぞれの手法の考え方、特徴、機能体系、実現法（データ構造、アルゴリズム）、応用について解説する。

Abstract Recently, the advanced functionality of parametric design has been recognized by a large number of engineers to improve productivity in modeling. The author's team has adopted two different types of technology: one is "history-based design" and the other "non-history-based design." In the former method, an operation sequence for modeling is regarded as a constraint, and is collected and reexecuted. Engineers can reconstruct geometric models by changing dimensional values or modifying some non-dimensional conditions. It also provides characteristic functions such as the cancellation or suppression of some operations and the exchange of operations within a sequence. In the latter method, the solver evaluates geometrically constrained models defined by its sketch and generates specified figures by means of geometric reasoning.

This paper presents an overview of these two theoretical foundations. It also illustrates the major characteristics, functional repertory implementation technology and applicability to engineering design of each approach.

1. はじめに

パラメトリック機能に関し、「寸法を変えるとそれに応じて形状が変化してくれる」モデリングと理解されていることが多い。もちろんこの解釈はパラメトリック機能の最も特徴的な性質を言い当ててはいるが、CADCEUSが実装するパラメトリックモデリング機能は「寸法」をより一般的な「設計要件」や「設計意図」にまで拡大する。これまでのモデルは最終形状のみが表現されていたため、設計変更に対して有効な支援を行なうことができない。パラメトリック機能はこの問題を解決する強力な手段となり得る。そのためには、システムには最終形状のほかに、その形状を生成・制約した条件を保持し、必要に応じてその条件を満たす形状を再構築する能力が要求される。その結果、設計者はこれらの諸条件を変更することにより、意図する形状を得ることができる。CADCEUSでは、寸法の変更だけではなく、最終形状を制約する様々な条件を保持し、その条件を満たす形状を再構築する能力を備えることにより、数値情報のみならず多様な設計変更に対応するための手段を提供する。

2. 手順型と非手順型パラメトリック

現在実用化されているパラメトリックモデリング機能には二つの異なる考え方がある。ここではこれを、「非手順型パラメトリック」と「手順型パラメトリック」と呼ぶことにする。現在のところ広く認められた用語はないが、前者を「variational」, 「non-history based」, 後者を「parametric」, 「history based」と呼ぶ文献も見受けられる。

手順型パラメトリックは、設計者のモデリング過程（操作の履歴）を記録し、再実行機構により形状の再生成を行う方式である。非手順型パラメトリックでは、モデルに対して設計者が設計手順とは別の制約条件を付与し、モデリング手順とは独立にある種のソルバを用いて同時に解決する。図1では、2次元と3次元のモデルを示すが、手順型ではそれぞれをモデリングした際に利用されたコマンドおよび入力したパラメタ類が記憶される。一方非手順型では、モデルを構成する幾何要素間に成立する条件が列挙されており（幾何拘束問題）、システムが用意したソルバは、連立方程式を解くように幾何拘束問題を解析し、条件を満たす幾何形状を決定していく。幾何形状が決まる過程は、実際にモデリングした手順とは異なる。図1の三角形の例では、非手順型の場合には寸法 d_2 の代わりに、 L_1 と L_3 の角度寸法を与えるなどの拘束づけの変更が可能であるが、手順型の場合には変更できない。CADCEUSでは、手順型、非手順型の両方の機能を実現した。設計者の使い方として、非手順は図面を作成する製図作業に、手順は一かたまりの図形群を配置したり集合演算により設計者の仕事の単位にも相当するモデリングに利用されることを想定している。一般的に前者は2次元で、後者は3次元の場合が多い。

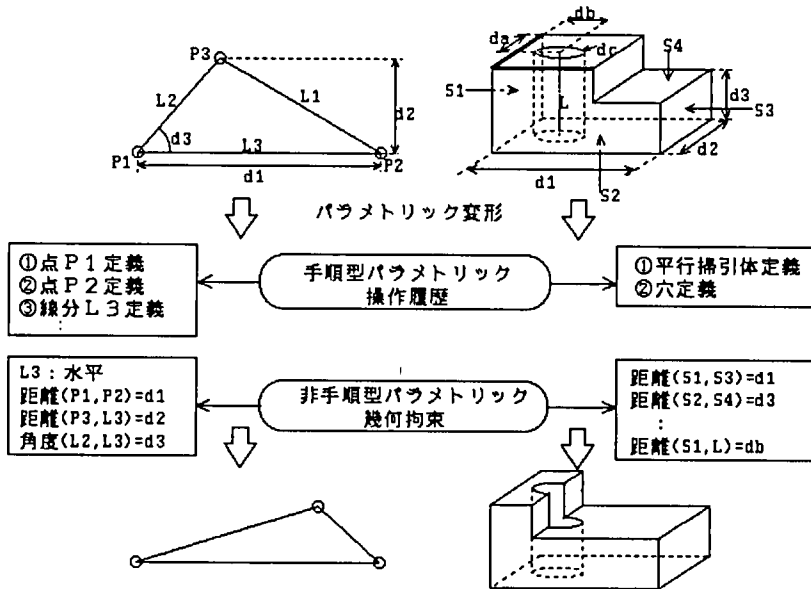


図1 手順型パラメトリックと非手順型パラメトリック

3. 非手順型パラメトリック

幾何拘束問題のソルバとしては、古くは Gossard らによる研究^[1]が挙げられる。これは幾何学的な拘束関係を、点の座標値を変数とする方程式で表し、非線形連立方程式をソルバとする数値計算解法である。しかしこの方式では数値計算の安定性や計算時間の問題のほか、後述(3.3 幾何推論エンジン)する幾何拘束問題の不完全性の問題への解決を与えない。2 番目の手法としては、幾何学的拘束関係を一階述語論理で表現し、幾何問題を解くための規則を知識表現し、これにより推論を行う方法^{[3][4][7]}がある。ほかに、幾何拘束問題を、形状要素をノード、制約条件をアークとするグラフで表現し、これを部分グラフへ分割していく方法^[2]がある。CADCEUS では、知識を強化していくことによりソルバとしての問題解決能力を徐々に強化していける点などから推論方式を採用した。

3.1 幾何拘束問題の定義

幾何拘束問題は、決定すべき幾何形状とそれらを束縛する拘束条件で構成される。CADCEUS では、幾何形状を「点」「トラック」「セグメント」に分類する(図2)。トラックは、無限直線や円など向きづけられた境界のない図形を、セグメントは、トラック上の2点で囲まれる有限部分を意味する。拘束条件は点とトラックに対して設定され、ソルバは点の位置とトラックの幾何形状を決定し、その後セグメント部分を抽出する。拘束条件は、述語名(引き数1, ..., 引き数n, 属性値)のように表現され、引き数には点またはトラックの識別番号を持つ。拘束条件は、水平、平行などの定性的、構造的な条件を表す「構造拘束」と、距離や半径などの定量的な条件を表す「幾何量拘束」に分類される(図3)。表1に拘束条件の一覧を示す。

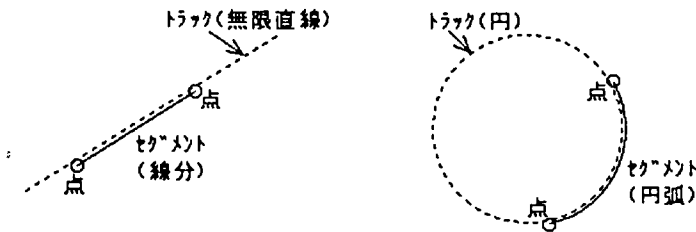


図2 点, トラック, セグメント

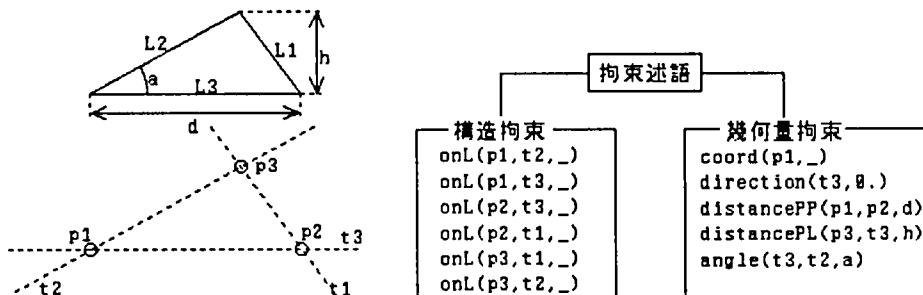


図3 幾何拘束問題の例

表1 幾何拘束述語の一覧

	述語名	引き数	属性値	意味
構造拘束	onL onC	点, 直線 点, 円		点は直線の上にある 点は円周上にある
	midpoint	点, 円		点は円の中心である
	parallel perpendicular	直線, 直線 直線, 直線		2直線は平行である 2直線は直交する
	symmetricP symmetricL symmetricC	点, 点, 直線 直線, 直線, 直線 円, 円, 直線		2点は直線に対して対称 2直線は直線に対して対称 2円は直線に対して対称
	tangentLC tangentCC	直線, 円 円, 円		直線は円に接する 2円は互いに接する
	angle	直線, 直線	角度	2直線間の角度
幾何量拘束	distancePP distancePL distanceLL	点, 点 点, 直線 直線, 直線	距離 距離 距離	2点間の距離 点と直線間の距離 2直線間の距離
	radius	円	半径	円の半径
	direction	直線	角度	直線の水平線に対する傾き
	coord shapeL shapeC	点 直線 円		点の座標値が既知 直線の形状が既知 円の形状が既知

3.2 幾何推論方法とルール

CADCEUS で採用した推論方式は、人間の思考形態を模倣した方式である。人間が幾何の問題を解決する場合、その問題に内包される条件を理解し、一般的な公理、定理などの知識を活用して新たな事実を順次導きながら最終解に到達する。幾何問題を構成する条件が計算機内部でどう表現されるかを前節で述べたが、ここでは問題を解決するための知識の表現法について述べる。

CADCEUS では、推論に利用される知識を幾何推論ルールと呼び、図4で示すような文法で記述する。個々の幾何推論ルールは、LHS 節 (Left Hand Side), RHS 節 (Right Hand Side), PROCEDURE 節を持ち、LHS 節に示される条件が成立した場合には、RHS 節に示す事実が導かれることを意味する。この二つの節には前節で述べた述語が並ぶ。複数の述語がカンマで区切られて並んだ場合は、論理積 (AND) を意味する。また、述語の引き数は、点またはトラックに対応する変数名を意味し、同一の変数名は同一の対象を示す。PROCEDURE 節には、RHS 節を実際に導出するための幾何演算処理プログラムを指定する。たとえば、図4のルールは、「ある直線トラック T の向きが定義されていて (direction), その上に2点 P1, P2 があり (onL), その2点間の距離 (distancePP) と一方の点の座標値 (coord) が判るのであれば、他方の点の座標値は決まる (RHS 節)」と読む。図3の三角形問題では、

$$T \leftarrow t3, P1 \leftarrow p1, P2 \leftarrow p2$$

と置き換えることにより、このルールの LHS 節を満たす述語の組が存在する (LHS 節が成り立つ) ことが判り、その結果 RHS 節より新たな述語 (事実) coord (p2, _) が得られる。推論の基本原理は、このように与えられた事実から、幾何推論ルールを用

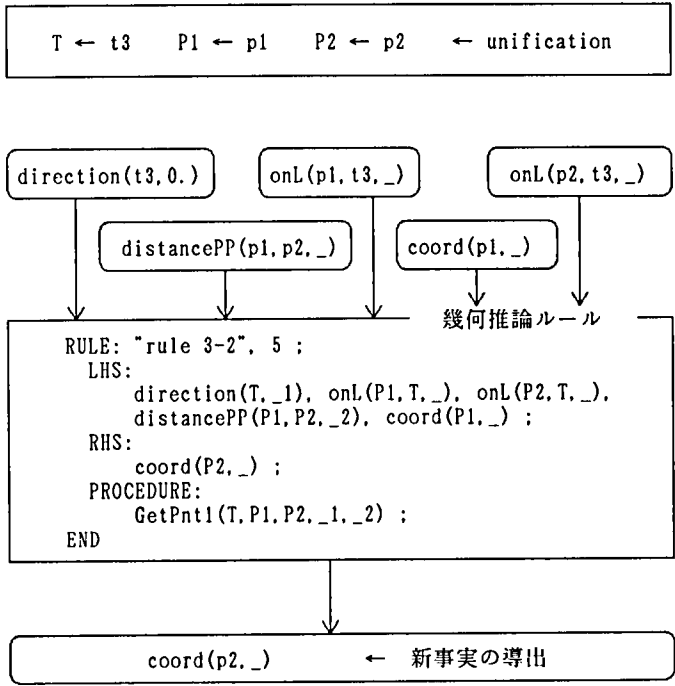


図 4 推論ルールとパターンマッチング

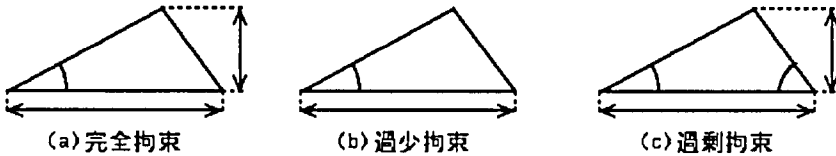


図 5 幾何拘束問題の完全性

いて新たな事実を導出し、さらにこの事実から他の事実を導出していくことである。推論のゴールは、幾何拘束問題を構成するすべての点の座標値とすべてのトラックの形状を決めること、言い換えると述語 coord, ShapeL, ShapeC を導くことであると言える。LHS 節を成立させる述語の組を見つける問題は、パターンマッチングアルゴリズム、あるいはユニフィケーション(unification)と呼ばれる方法が利用できる。ユニフィケーションの段階では、各述語の属性値(寸法値など)は一切評価する必要はない。先の例では、図 4 のルールにより点 p2 の位置が決まることが判るのが重要なのであり、実際にその座標値がどうなるかは後続する推論のステップには無意味である。CADCEUS では現在約 50 個のルールが用意されているが、知識不足が判明した時に、新たな知識を追加しソルバとしての解決能力を容易に強化していけるところがこの方式の最大の利点である。

3.3 幾何推論エンジン

推論は前向き推論で行う。図 5 の幾何拘束問題を見ると、(a)では必要十分な拘束条件が与えられていることが判る(完全拘束)。一方(b)では拘束条件が不足していて決まらない形状がある。言い換えれば条件を満たす解は無限に存在する(過少拘束)。

(c)は、拘束条件が多すぎるため寸法値にもよるが一般に矛盾をきたす(過剰拘束)。幾何拘束問題を定義することは設計者の仕事であるが、実際には完全な拘束条件を付与しようとするのが困難を感じる事が多い。この種のモデリング形態を支援するシステムには、設計者の与えた拘束条件の充足性を認識し、過少な場合には決まらない形状はどれか、過剰な場合にはどの条件が矛盾しているかを適切に示すことが必要である。後ろ向き推論では、完全拘束と過少拘束に対しては適切に処理できる。ところが過剰拘束に関しては原理的に対処できない。ある事実から一つの結論が導かれてしまえば、同じ結論を導く他の事実の存在には注意を払わない。前向き推論では条件の過剰性を認識できるので、CADCEUSの幾何推論では「前向き推論」方式を採用した。

パターンマッチングのアルゴリズムは、効率さえ無視すれば、いわゆる総当たり法と呼ばれる手法で容易に実現できる。しかし、問題が大規模の場合や、推論ルール数の増加に伴い爆発的なCPUを消費する。この問題を解決するための高速なアルゴリズムが昔から研究されてきた。CADCEUSではC. L. Forgyの研究によるReteアルゴリズム¹⁵⁾を採用した。この方式では、複数のルールの中の共通な述語の組を一つのノードとすることにより、ルール全体をネットワーク構造で表現する。図6は、ルール1, 2で構成される知識とそのネットワーク表現を示す。ルール1, 2の下線部は、同一の条件(第2項が一致する二つの事実b, cが存在すること)を示し、ネットワーク上では一つのノード⑤に集約されている。ノード⑥⑦はさらに別の事実が追加され

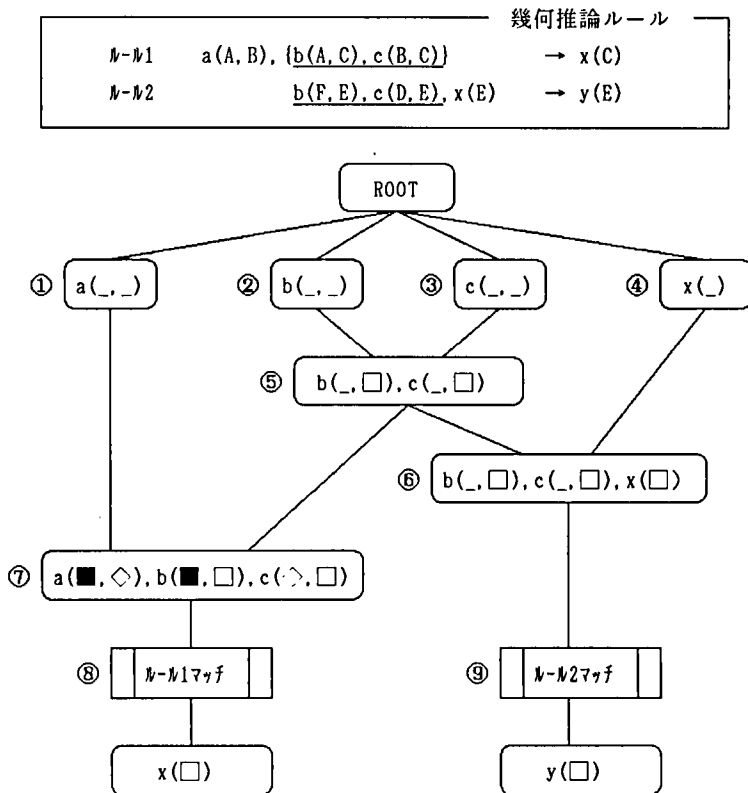


図 6 幾何推論ルールと Rete ネットワーク

たノードを表す。ここでは、□■◇などの記号で項の同一性条件を表し、_は、任意の対象とマッチすることを意味する。

事実の集合 $F = \{a(1, 2), b(1, 3), c(2, 3)\}$ が与えられているとする。推論エンジンはこのネットワーク上に、以下に示す方法で既知の事実を一つずつ流し込んでいく。

- 1) $a(1, 2)$ を ROOT に置く。これは、ROOT から伸びるパスの中で①のノード条件を満たすため、一旦この事実をここに滞留させる。
- 2) $b(1, 3)$ がノード②に滞留する。
- 3) $c(2, 3)$ がノード③に滞留する。ノード②にはすでに滞留している事実があるため、今③に到着した事実 $c(2, 3)$ とノード②にすでに滞留している事実 $b(1, 3)$ とのマッチングを行う。このペアはノード⑤の条件を満たすため、この事実の組をこのノードへ送りここに滞留させる。さらに①に滞留している事実と今⑤に到着した事実の組をマッチングすることにより、 $a(1, 2)$ 、 $b(1, 3)$ 、 $c(2, 3)$ の組がノード⑦に到達し、ルール 1 の LHS 節が成立したことを知る (⑧)。その結果新たな事実 $x(3)$ が生成される。
- 4) 事実の集合 F の評価は完了したので、(3) で新たに生成された事実 $x(3)$ がネットワークに投入されノード④に滞留する。ノード⑤に滞留している事実とのマッチングを行い、 $b(1, 3)$ 、 $c(2, 3)$ 、 $x(3)$ がノード⑥に移り、ルール 2 の成立を認識する。

基本的な推論の仕組は以上のとおりであるが、一般的には ROOT やノード⑤のように、一つのノードの下から複数のパスが連なり、それぞれに対するパターンマッチングが必要であり、バックトラッキングによりすべての可能性が検証される。初期に与えられた事実とその推論過程で生成された事実がすべてネットワークに投入された時、推論は終了する。ただし上の例からも判るとおり、推論ルール群からネットワークが一意に決まる訳ではない。図 6 のルール 1 の { } は、マッチングの優先順位を規定しているが、CADCEUS の推論処理系ではこの優先順位の変更指示がないと別のネットワークが生成される。一方、ネットワーク構造が推論の効率を大きく左右する。投入される事実の傾向により最適な構造も異なるものと思われるが、効率性の観点でネットワーク構造の性質を検証した研究は見あたらない。

CADCEUS では、このネットワークを仮想的なノイマン型計算機のプログラム (命令列) として生成し、推論処理系はこのプログラムのインタプリタとして動作する。表 2 に、この仮想計算機が扱う命令語を示す。

表 2 Rete ネットワークを表現する仮想的な機械語

FORK	jump 命令。各ノードの下位ノードへ分岐する。
TEQA	流れてきた述語とネットワーク上の述語の比較を行う。等しい時は次の行へ、等しくない時は FORK 命令に戻る。
MERGE	戻り番地をスタックし AND 命令へ飛ぶ。バックトラッキングのための特徴的な命令語。
AND	左右二つのノードのマッチングを行う。マッチした場合は次の行へ、マッチしない場合は MERGE 命令に戻る。
TERM	LHS 節の成立による RHS 節の導出を行う。

推論が終了した時、幾何拘束問題の目的である事実の一部でも導出されていなければ過少拘束である。導出されない事実と対応する幾何要素が未決の要素となる。一方すべての事実が導かれた場合、完全拘束なのか過剰拘束であるのかを判定するために、ATMS (Assumption based Truth Maintenance System) という方式^{[7][8]}を採用している。ATMS では、推論システムに初期に与えられた事実の集合(先の例の場合は F)を仮説と呼ぶ。推論処理系は、パターンマッチングにより新たな事実が導出されたときに、その推論に利用された仮説の集合を記憶、管理する。推論過程で同一の事実が何度も導かれることがあるが、これを導いた仮説の集合の包含関係により冗長性と独立性を判定する。冗長でない場合は過剰拘束である。与えられた幾何拘束問題が完全拘束なのか、過少あるいは過剰なのかを正しく判定するためには、あらかじめ用意された知識すなわち幾何推論ルールが完備である必要がある。知識が不足していれば、完全な拘束集合に対して過少と判定したり(知識がないために問題が解けない)、過剰拘束に対しては完全あるいは過少と判定したり(知識がないために別の条件でも決まることに気がつかない) することがある。

図7では、点Pにおいて線分L1(トラック T1)と円Cは垂直に交差している。表1で示した述語の分類ではこの条件を表現することができないので、CADCEUSでは、Pを通りT1に直交する直線トラックT2を自動的に補い、T1とT2の直交条件(perpendicular) およびT2と円Cの接条件(tangent LC)を生成する。このようにして表1の述語の組み合わせで多様な拘束条件を定義することが可能である。実際には、「perpendicular LC(直線, 円,)」のような述語を用意すれば、補助的なトラックも不要であるし、推論のステップ数も低減するが、この述語に関する推論ルールが必要になる。

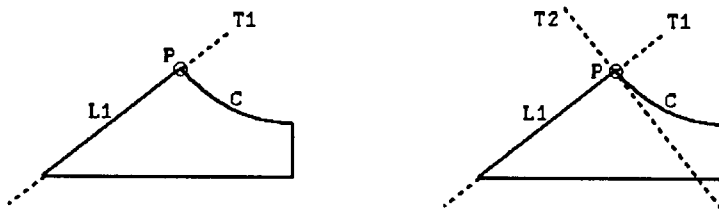


図7 表1の幾何拘束述語では直接的に表現できない条件

3.4 幾何の生成

推論が終了すると、ATMSによりゴールとしての事実がどの仮説の組とルールにより決定(導出)されたかの過程が記憶されている。この時点で、推論ルールの PROCEDURE 節に記述された導出手続きが順次呼び出され、実際に幾何形状を決定する。この処理を、形状算出モジュール(Executor)と呼び、推論の後処理として実行される。

図4で示した推論ルールの例において、図8(a)のように、coord(P2,)は一意には定まらないことが判る。このような多価の問題は、このルールだけではなく図8の他の例に示すとおり多くのルールでも発生する。この種の問題を推論処理系内部で扱おうとする研究もあるが、CADCEUSでは推論処理の効率化のため、推論ルールごとに多価問題を解決するための基準を設定し、設計者が与えた幾何拘束問題から基準値

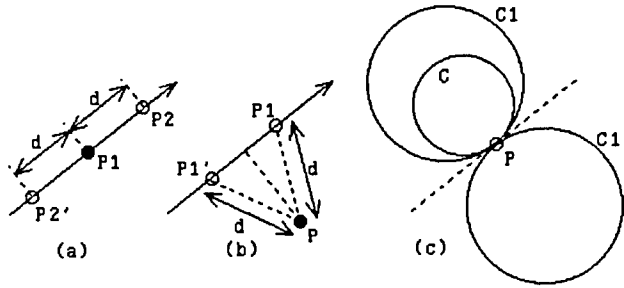


図 8 多価問題の例 1

を読み取り, Executor は必ずその条件を満たす方の解を得るようにしている。図 8(b)では「既知の直線上の点が、既知の点から距離 d にあることが判明している」場合、その条件を満たす点は 2 個あることを示しているが、この場合は直線の向きに対して「負側 (P_1')」か「正側 (P_1)」かを基準とする。図 8(c)では、「既知の円 C とこの円周上の点 P で接する半径 r の円」は 2 個あることを示し、この場合には接点 P における接線に対して円の中心が「同じ側 (C_1)」か「逆側 (C_1')」かを基準とする。このようにして、図 9(a)の幾何拘束問題の解が (b)とはならないことが保証される。

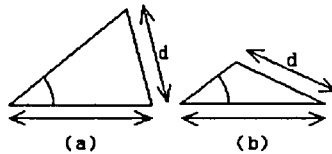


図 9 多価問題の例 2

3.5 幾何拘束ソルバ

図 10 に幾何拘束ソルバのモジュール構造と処理の流れを示す。寸法値のみが変更された場合、拘束条件による依存関係には何等変化はなく、形状が決まる順番は不変であるので推論をやり直す必要はなく、EXECUTOR による形状の再生成のみが行われる。

3.6 スケッチ機能

CADCEUS では、幾何拘束問題を定義したり、拘束条件を満たす形状群を生成する機能をスケッチ機能と呼び、従来のワイヤフレームモデリングのコマンド群とは別の体系の機能群として提供している。スケッチ機能により生成される幾何拘束問題をスケッチと呼ぶ。スケッチ機能では、設計者は対象形状を構成する点、線およびそれらの間の連結性のみ注意を払い形状自体は適当に定義する。これらの形状群を束縛する条件を付与することにより、システムが条件を満たす形状を生成する。常に厳密な形状を生成しなければならない従来のモデリングと比べると、設計者とシステムの仕事の役割りが異なる。

以下に、スケッチ機能を構成するコマンド群の機能を説明する。

3.6.1 スケッチ平面設定機能

スケッチを定義する平面を、そのスケッチ固有の座標系、図面、3次元空間などの中

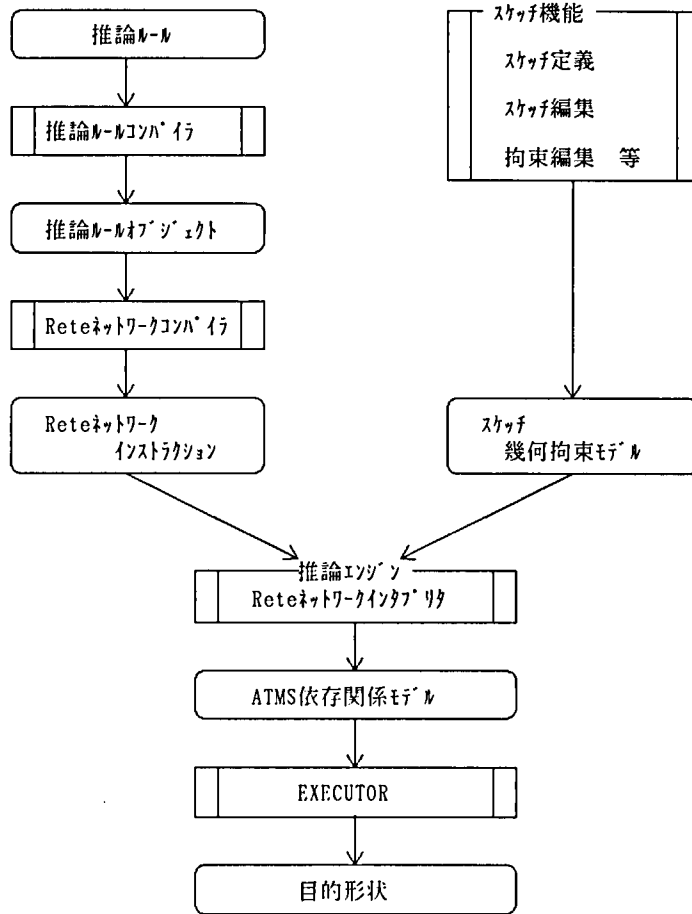


図 10 幾何拘束ソルバのモジュール構造

から選択し、スケッチ機能の利用の開始を宣言する。

3.6.2 スケッチ定義機能

点、直線、円/円弧などを定義する機能である。最も多用される機能であるため、コマンド体系や操作仕様は、以下の点に留意して設計されている。

- ① コマンドの数を極力減らすことにより、コマンドを切り換える手間を軽減すること。
- ② すべてのコマンドに共通した簡単な操作原理を設定し、操作マニュアルを参照しなくても、実際に操作しながら機能を習得できること。
- ③ スケッチを定義する過程で、構造拘束を確認しつつ同時に定義できること。

すべてのコマンドを通じて、カーソル位置が既存の点や線分、円弧の端点、円の中心と一致、水平、鉛直の状態にあるとき、その旨のエコーがリアルタイムに表示される(基本自動拘束(図 11))。ここで…や□は拘束のエコーを、⊕はカーソル位置を示す。このほかに、コマンドごとに用意された自動拘束(拡張自動拘束(図 12))がある。自動拘束で設定できない条件は、拘束づけの対象の上でロングクリック(マウスボタンを長めに押す)することによりポップアップメニューを表示し、この中から条件を選

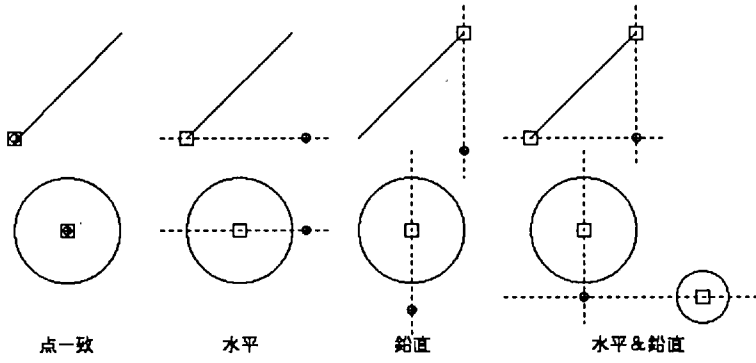


図 11 基本自動拘束

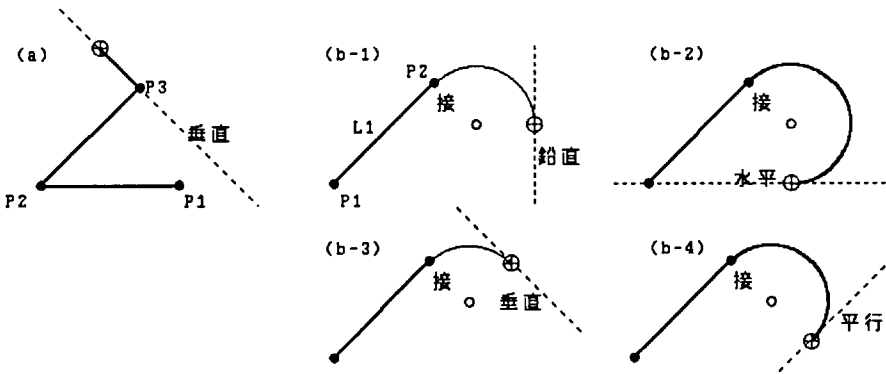


図 12 拡張自動拘束 (連続直線コマンドの例)

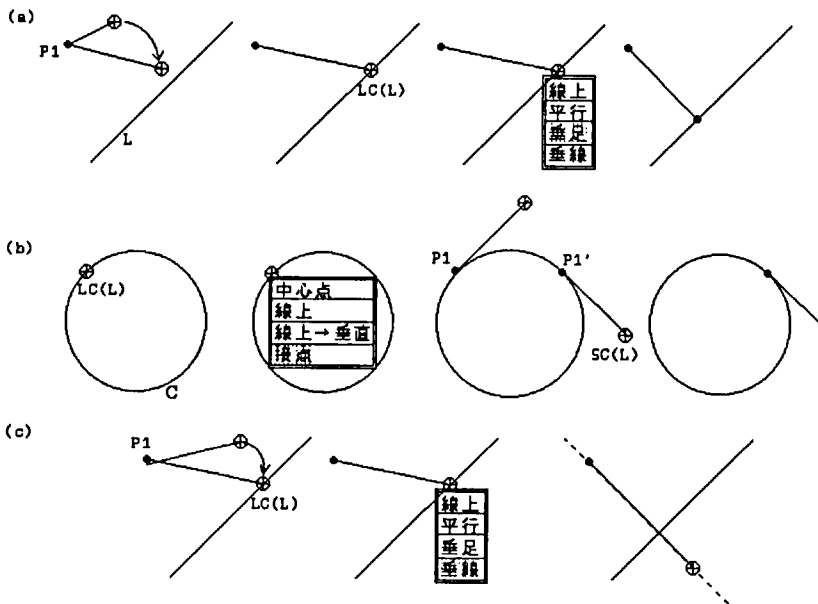


図 13 指定拘束

択する（指定拘束（図 13））。ポップアップメニューにより表示される拘束条件は、利用しているコマンドの種別やその時の状態、対象図形の型により異なり、その時点で適切（設定可能）な条件のみが表示される。指定拘束設定時の操作には、図 13 に示すとおり三つの種類がある。

- (a) メニューの選択と同時に確定する場合
- (b) メニューの選択で仮決めされる場合
- (c) 拘束線上に拘束され次の操作が必要な場合

表 3 にはマウスの基本操作を示す。

表 3 ロケート装置の基本操作

フリー状態	マウスボタンが何も押されていない状態
拘束の選択操作	LC(L) 左(L)ボタンによる Long Click
確定操作	SC(L) 左(L)ボタンによる Single Click
連続操作の終了	SC(M) 中(M)ボタンによる Single Click
キャンセル	SC(R) 右(R)ボタンによる Single Click

3.6.3 スケッチ編集機能

R 掛け、面取り、移動、複製、削除、マルチトリム、スプリットなど、スケッチ定義機能により定義された幾何要素を編集、加工する機能である。

3.6.4 拘束編集機能

寸法定義、寸法値変更、構造拘束操作（定義、解除、表示など）、拘束評価など、幾何量拘束や構造拘束を設定、確認、変更する機能と拘束条件を満たす形状を生成する機能である。主な拘束条件は、スケッチを定義する過程で自動的に設定されるため、ここでの設定、変更は補助的な手段として利用される。寸法を定義する場合には図 14 のとおり、指定した図形の種類やカーソル位置に応じて適切な種類の寸法が仮定され、ラバーバンドが表示される。

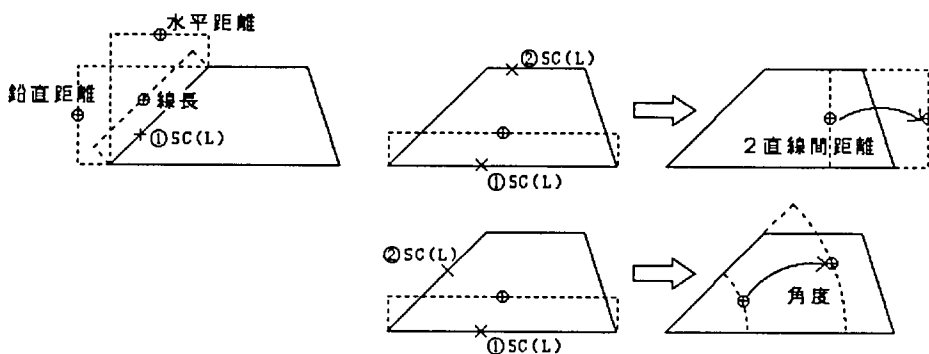


図 14 寸法定義の例

拘束評価の結果、過少拘束と評価された場合は未決の幾何要素が、過剰拘束とされた場合は冗長な寸法と幾何要素がエコーされる。このような基本機能のほかに、過少拘束の場合にシステムが自動的に不足している寸法を補うことや、システムが幾何要素を決定した過程を逐次的に画面上に表示する機能などにより、幾何拘束問題を完成させる作業を支援する。このほかに、スケッチの任意の点を移動することにより、構

造的な拘束は不変に保持したままシステムが自動的に寸法値を調整しスケッチを変形する（ピン止め機能）ことも可能である。

3.6.5 基本操作

スケッチ定義時に設定される拘束条件を制御したり自動拘束の認識の感度を調整したりする環境設定機能や、作成したスケッチを他のデータベースに保存したり、他のデータベースに保存されているスケッチを呼び出したりする機能などからなる。

3.6.6 応用操作

スケッチを図面上や3次元空間上に配置する機能、主要な可変寸法を表(テーブル)形式に定義し標準部品としての取り扱いを可能とする機能、寸法間に関係式を定義する機能などからなる。表形式で標準部品化した場合、この表に直接寸法値の組と呼び名を定義することにより新たな規格品を定義したり、呼び名を指定してその形状を生成(インスタンス)することが可能である。関係式の最も基本的な利用法は、寸法名を項とする式を定義することである。式は一般的な四則演算だけでなく、sqrt(), sin(), cos()などの組み込み関数が利用できる(表4)。

表4 関係式の演算子と組み込み関数

算術演算子	+(加算) -(減算) *(乗算) /(除算) %(剰余)	
代入演算子	=	
関係演算子	== > >= < <== !=	
論理演算子	&(論理積/AND) (論理和/OR) !(否定)	
組み込み関数	sin(), cos(), tan()	三角関数
	asin(), acos(), atan()	逆三角関数
	sinh(), cosh(), tanh()	双曲三角関数
	sqrt()	平方根
	ln(), log()	自然対数/常用対数
	exp()	eを底とする指数関数
	abs()	絶対値

また、関係演算子や論理演算子を用いた論理式と、IF, THEN, ELSE, ENDIFなどの構文を利用したプログラムとして定義することや、使用者の手で新たな関数(使用者定義関数)を定義しそのプログラムから引用することも可能である。

スケッチは2次元図面上の標準部品などの部分形状や、3次元形状を生成するための断面形状として利用されることを想定している。図面全体を一つのスケッチとして定義することも考えられるが、大量の図形に完全な拘束を与えるのは現実的でない。過少拘束に対してシステムが拘束を補うことをしたとしても、最終的には人が完全な拘束を与えなければならない。人による拘束設定が可能な適切な規模のモデルは、100要素程度の比較的小規模なモデルだと思われる。

図15に示すとおり、スケッチはスケッチポートと呼ぶ専用のポートに定義することや2次元図面上に直接定義すること、3次元空間上の平面をスケッチ平面としてここに直接定義することなどが可能である。このようにして定義したスケッチを、自身のデータベースや、外部のデータベースに保存することができる。また保存されたスケッチを専用ポートに呼び出して利用したり、図面上や3次元空間上に配置することが可能である。外部のデータベースに保存する場合は、複数の使用者で共用可能な標準

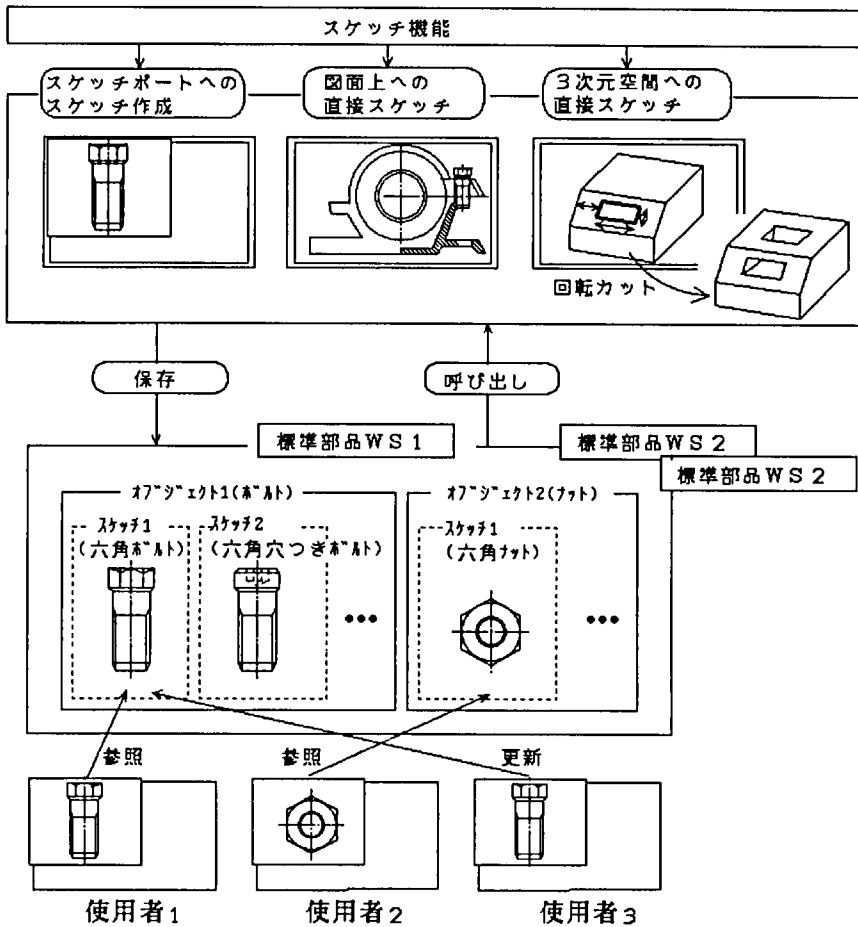


図 15 スケッチの利用

部品データベースとして利用することができる。更新権は唯一の使用者にしか与えられないが、複数の使用者が同時に同一の標準部品データベースを参照することは可能である。

4. 手順型パラメトリック

手順型のパラメトリックでは、モデルを生成した過程が履歴として記憶され、これが再実行されることによりモデルの再構築が行われる。初期のモデリング時に与えた設計要件を変更することで、新たなモデル形状を容易に得ることができる。CADCEUSではパラメトリックな性質をもつ幾何モデル(パラメトリックモデル)だけでなく、従来のCADと同様パラメトリックな性質をもたないモデル(非パラメトリックモデル)を生成することができる。非パラメトリックモデルはパラメトリックモデルに比べデータ量の点で有利であるが、当然パラメトリックの機能は利用できない。表5のとおり、データベースの型や実行モードによりどちらのタイプのモデルが生成されるかが決まる。データベースの型は割り当て時に設定する静的な属性であり、実行モードは実行時に切り換えが可能である。CADCEUSのワイヤフレーム、サーフェス、

表5 幾何モデルの型と生成条件

	非パラメトリックモード	パラメトリックモード
データベースの型	非パラメトリック型	非パラメトリックモデル
	パラメトリック型	非パラメトリックモデル
		パラメトリックモデル

ソリッドのすべてのコマンドはこれらの条件に応じて適切なモデルを生成する。

4.1 機能

4.1.1 形状定義条件の変更

コマンドに対して入力したパラメタの変更を行う。CADCEUS のモデリングコマンドは、数値パラメタに対しては可能な限り3次元寸法としての代替表現を与える。このような寸法を特別に「形状駆動寸法」と呼ぶことがある。これに対して、従来の製図コマンドにより定義される寸法を「参照寸法」と呼ぶ。設計者は必要な形状駆動寸法を表示し、新たな寸法値を入力することにより変更することができる。一方、寸法により代替表現することがふさわしくない数値パラメタや、非数値パラメタの変更のため、「履歴編集」と呼ぶ機能を提供している。CADCEUS のコマンドは、「操作一括メニュー」や「ダイアログボックス」により、個々のコマンドに対して入力すべき（入力が可能な）パラメタが表形式で一覧表示され、入力したパラメタがこの表の中に埋め込まれる。入力値の変更は、該当する欄（フィールド）を指定し、再入力することで可能である。この「履歴編集」機能では、当該コマンドを実行した時と同じ操作一括メニューやダイアログボックスが表示されるため、通常の実行時と同様の操作で条件の変更を行なうことができる。

4.1.2 順番の変更

手順型パラメトリックでは操作の順番も重要な設計意図であると考えられる。図16では、4番目の手順(D)で貫通穴が定義されたが、これよりも後の操作でそれを遮る形状(E)が生成されても、これには貫通穴は作用しない。CADCEUSでは「操作順番変更」と呼ぶ機能により、手順5のリップ創成操作(E)を、手順4の貫通穴創成手順(D)の前に移動することにより、このリップに貫通穴を作用させることができる。

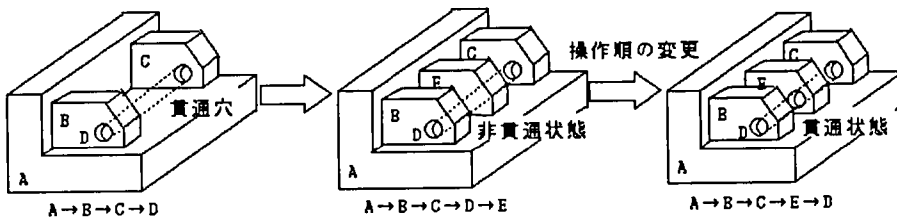


図16 操作順の変更

4.1.3 取り消し

一旦創成した形状を取り消したいことがある。この場合、創成された幾何要素を削除するだけでなく、一般にはその操作により変更を受けた部分の修復が必要になる。CADCEUSでは、「取り消し」機能により、指定された操作の実行前の状態を自動的に復元することができる（図17左図）。一方、工程や目的に応じて同一モデルを異なる

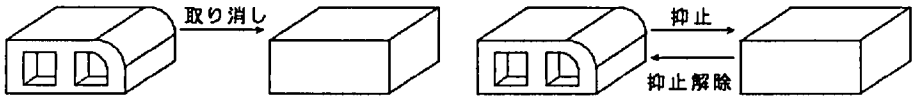


図 17 取り消しと抑止/抑止解除

視点で扱いたいことがある。図 17 右図では、粗取り加工に際してはフィレットや溝形状のない状態で切削経路を計算し、仕上げ加工では考慮したい。CADCEUS の「抑止」機能では、指定された操作をキャンセルすることができる。しかし「抑止解除」機能により、抑止中の操作を再び呼び戻すことができる点で「取り消し」とは異なる。抑止機能は、このような用途以外にも、設計対象部位以外を抑止することにより、その部位のみの設計に集中したり、表示や再生効率の適正化などの目的で利用することも可能である。

4.1.4 基準の変更

前工程から基準データが支給され、これを元にモデリングを行うような場合には、基準データの設計変更は頭の痛い問題であった。先に述べた「履歴編集」機能を用いて、元の基準データを参照していた操作の履歴をすべて変更することで新たな基準データへの参照モデルを再構築することも考えられるが、そのような操作をすべて見つけ出すことも困難であるし大変な手数を伴う。CADCEUS の「置き換え」機能を利用すれば、置き換え前と置き換え後の幾何要素の対応を指示するだけで所定の効果を得ることができる (図 18)。

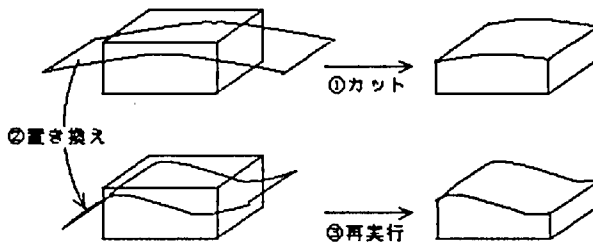


図 18 置き換え

4.1.5 再生機能によるモデルの再構築

設計要件を変更した時、瞬時に形状が再構築されるのが理想である。しかし、モデルの再構築が、関連するコマンドの再実行であることを考えると、モデリングコマンドの応答性はこの要請を満たす程は効率的ではない。そのため、「再生」機能を用意し、必要な設計変更をすべてシステム側に指示した上で、この機能を呼び出すことにより形状の再構築を行なう方式を採用した。再生には、図 19 に示すとおり、「全再生」と「部分再生」という二つの方式がある。全再生方式では、モデルを作り上げたすべての操作が順に再実行される。部分再生方式では、設計変更の結果、影響を受ける操作のみが再実行される。この場合、対象となる個々の操作の再実行に先立ち、その操作前の状態が復元される。また、再実行は操作 (コマンド) 単位に行われることから、一つの操作の部分的なやり直しを行うことはできず、常にその操作により創成されたす

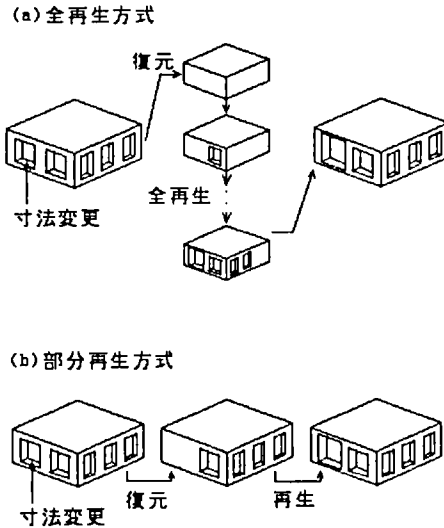


図 19 全再生方式と部分再生方式

すべての幾何要素がすべて削除され、その操作により変更を受けたすべての箇所が修復された後、その操作（コマンド）のすべての処理が実行される。明らかに効率的には部分再生が有利である。ただし、全再生では、一気にすべての操作が実行される方式（一括再生）のほかに、人の介入により1手順ごとに再実行していく方式（ステップ再生）があり、他の設計者が作成したモデルや、過去に作成したモデルなどに対して、設計手順自体を再確認したいような場面では有効に利用できる。

4.1.6 取り消しと再操作によるモデルの再構築

システムによる自動的な再実行機能のほかに、設計者自身で変更すべき対象操作を取り消して、再操作することが有効な場合もある。鋳造部品の製品形状のモデリングのあと、型形状にするために必要な部位に抜き勾配を掛けたり、プレス型の座やビードなどの付属的な形状の設計変更などでは、寸法や履歴を変更して再実行するよりは、対象形状を取り外して、必要ならばその形状に変形を加えたり（図 20(a)）、その形状自体を新たに作り直して再取り付けする操作（図 20(b)）の方が操作性がよい場合がある。ここで、取り消す対象は面や境界線などの幾何要素で指示するが、原則として指示した対象要素を初期に作りだした操作が選択される。図 20 では、ボスの構成面や内部境界線を指示するとボスを創成した操作が取り消され、同時にその後の集合演算も取り消される。一方、ボスと土台形状の間の境界線は集合演算により創成されたものであるため、これを指示すると集合演算が取り消されボス自身は集合演算前の状態に復元される。

4.2 データ構造

パラメトリックモデリングでは、データベースには形状データと図 21 に示す構造が生成される。OP (Operator) は、利用した操作に対応し、コマンドの識別番号を保持する。CI (Command Instance) は、コマンドに対して与えた処理条件、すなわち入力パラメタなどを意味する。この操作により生成された幾何形状はすべて PS(Pseudo

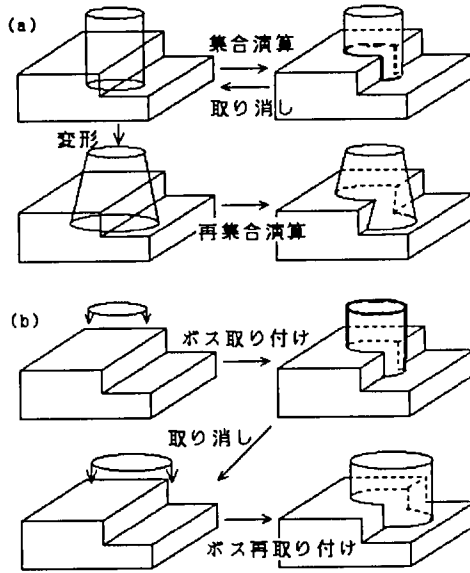


図 20 取り消し&再操作方式

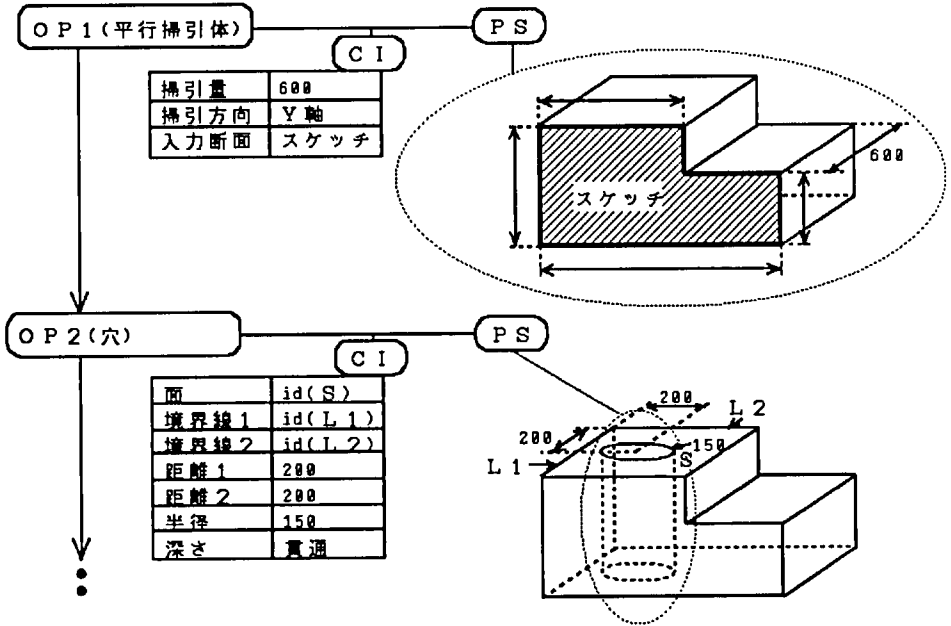


図 21 パラメトリックモデルのデータ構造

Shell)の下に構造化される。寸法や履歴を表示する場合、幾何形状を指示することで、これを生成した操作を特定することができる。この時、指示された幾何要素からその上位のPSが検出され、さらにOPが認識される。PSにより束ねられた幾何要素群を(その操作による)生成単位と呼ぶ。また、OP自体は双方向リストの構造をなし、操作時系列と呼ぶ操作順序が表現される。

部分再生や取り消しを行う場合、影響が及ぶ範囲を認識する必要がある。図21の

OP 2 (穴創成) は, OP 1 (平行掃引体) が創成した境界線を参照することにより穴の中心位置を規定している。OP 2 は OP 1 に参照 (依存) しているという。ある OP が再生対象と指定されたとき, 直接的あるいは間接的に参照している OP も再生される。OP 2 は, OP 1 の生成単位の一部である構成面を変形 (トリム) している。OP 2 は OP 1 に干渉 (依存) しているという。ある OP が再生対象と指定されたとき, この干渉先の操作は復元されなければならない。また, 再生対象の操作に対して干渉している操作も再生対象となる。図 22 でフィレット 5 はフィレット 1~4 のそれぞれに対して干渉している。フィレット 1 の径が変更されたとき, フィレット 1 のほかにフィレット 5 も復元され再実行される。CADCEUS では, この二つの依存関係を OP 間の関係として述語表現する。

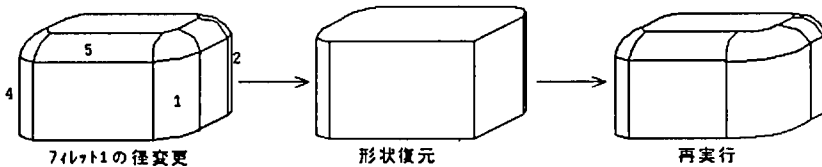


図 22 干渉形状の復元

PS で束ねられた幾何要素群を形状特徴 (Form Feature), 依存関係をフィーチャグラフとして捉えることができる。参照依存, 干渉依存は, 時系列上で常に後ろの操作から前の操作に対する依存関係である。寸法や履歴の変更により条件が変更された時, OP に更新マークが設定される。部分再生では前処理として, 更新 OP から参照/干渉関係により間接的に再生対象となる OP を認識し, それらの復元処理を行い再生対象 OP に加えられ, 時系列順にコマンドの再実行が行われる。コマンドは初期の実行か再実行かを何ら意識することなく処理を行う。CI の中には参照した要素の識別子 (id) が保持されていることが多く, id の不変性を保つことが必要である。データベース処理系は, 幾何要素に対し表 6 に示す状態を管理する。初期実行の場合には, コマンドが生成した幾何要素は「有効」状態となり PS 下に要素の型ごとのリスト構造が形成される。再実行に先立ち, 再生対象コマンドが生成した幾何要素は「空白」状態となり旧 id が保持される。再実行により幾何要素が生成されるときには, PS 下のリストから先頭の「無効」状態の要素が検索され, ここに幾何要素の実体が割り当てられ「有効」状態に変化する。

表 6 幾何要素の状態

有効状態	有効な幾何実体として存在している状態
無効状態	削除されて実体が存在しない状態
空白状態	再実行待ちの状態

4.3 復元方式

部分再生や取り消し処理の実現には, 操作単位の取り消しにより, その操作の実行前の状態にモデルを復元する必要がある。この形状復元の問題に関しては多くの研究があるが, ほとんどがソリッドモデリング, しかも集合演算の取り消しにのみ注目し

ている。考え方としては最終形状を、集合演算で残された部分と消滅した部分の離散的な和で表現する方法⁹⁾などが見られるが、CADCEUSでは、形状復元の対象操作を集合演算やソリッドモデリングに限定するのではなく、ワイヤ、サーフェス、ソリッドの統合モデリング環境で利用される一般操作に適用可能な復元方式を実現した。

形状復元には以下の技術が要求される。

- ① 幾何形状と位相状態が生成され、変更され、ある場合には消滅していく過程が認識できること
- ② ある操作により変更を受けた操作と幾何形状が認識できること
- ③ それらを操作前の状態に戻すこと

CADCEUSでは、単独線や複合面、また複合面を構成する構成面 (Face)、境界線 (Edge)、頂点 (Vertex) などの構成図形がトリムや変形などの変更を受けた場合には、形状変化の履歴情報が生成され、それが変化の進行に伴ないリスト形式にデータ表現されることにより、変化の歴史が管理される。変化の形態は、「削除」「修正」「分割」「分離」「縫合」「融合」「反転」「併合」の八つに分類され、それぞれの型ごとに復元原理をもつ。ある要素が変更を受けた時には、変化の型に応じた「干涉履歴要素」と呼ぶ要素が生成され、必要に応じて変更前の幾何属性を保持する。変更対象要素にはデータベース id は不変なまま新たな幾何属性が与えられ、干涉履歴要素との間に相互のリンクが生成される。変更が多重に行なわれた場合には、その都度干涉履歴要素が生成され、「一般干涉履歴リスト」と呼ぶリスト構造が構築される。図 23 では要素の幾何属性の変化を「○」「●」「◎」で、干涉履歴要素を「□」で、「□(○)」は干涉履歴要素が変更前の幾何属性を保持していることを示す。

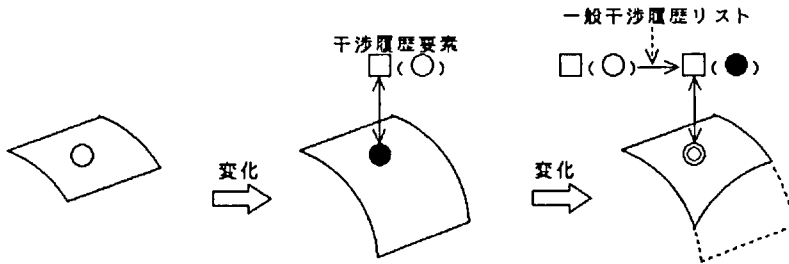


図 23 干涉履歴要素と一般干涉履歴リスト

干涉履歴要素と変更された要素は、変化の型ごとに特有の構造をもつ。これは、復元の原理と深く関連している。以下に、それぞれの型の構造と復元原理を示す。

4.3.1 削 除

削除された対象は無効 (状態の) 要素となり、「削除」型の干涉履歴要素とリンクされる。無効要素は一般のアプリケーションからは検索や参照のできない不可視な要素である (図 24)。復元は、干涉履歴要素が削除され無効要素が有効要素に戻ることで実現される。

4.3.2 修 正

「修正」型の干涉履歴要素が生成され、ここに変更前の幾何属性が保持される。修正前の要素には、データベース id は不変なまま変更後の幾何属性が埋め込まれ、干涉履

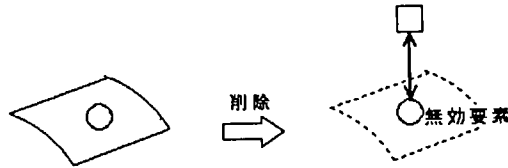


図 24 「削除」の干渉履歴

歴要素とリンクされる(図 25)。復元は、干渉履歴に保持された幾何属性○が要素●に再設定され、干渉履歴要素が削除されることで実現される。

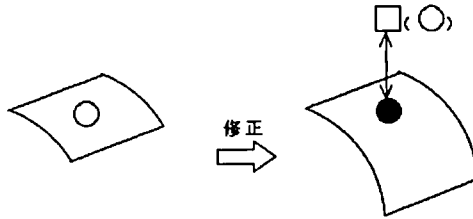


図 25 「修正」の干渉履歴

4.3.3 分割

「分割」型の干渉履歴要素が生成され、ここに変更前の幾何属性が保存される。分割後の二つの要素が新たに生成され、その一方(●1)に元のデータベース id が割り当てられ、それぞれがこの干渉履歴要素とリンクされる。図 26 は面にのみ注目しているが、実際には境界線 L1, L2 も同様に变化する。復元は、分割後に id が引き継がれない要素(●2)が削除され、干渉履歴要素に保存された幾何属性○が要素●1に設定され、干渉履歴要素が削除されることで実現される。

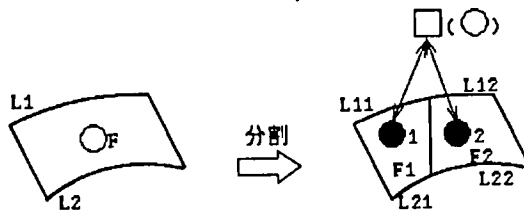


図 26 「分割」の干渉履歴

4.3.4 分離

一つの複合面を、境界線を境として二つの複合面に分解する操作では、対象境界線とその上にある頂点は複写され、それぞれの複合面の構成図形として埋め込まれる。この変化を分離と呼ぶ。「分離」タイプの干渉履歴要素と、同一の幾何属性をもつ新たな要素が(複写)生成され、その一方(●1)に元のデータベース id が割り当てられて、それぞれがこの干渉履歴要素とリンクされる(図 27)。復元は、分割後に id が引き継がれない要素(●2)が削除され、干渉履歴要素が削除されることで実現される。

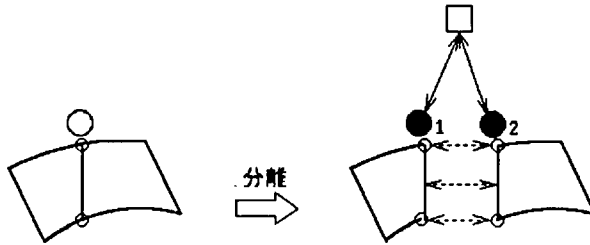


図 27 「分離」の干涉履歴

4.3.5 縫 合

端点で接線連続な関係にある二つの線を一つの線にまとめる操作に対応する。元の二つの要素のうち的一方(●1)に縫合後の幾何属性が設定され、他方は無効要素となる。また「縫合」タイプの干涉履歴要素が二つ生成され、それぞれの幾何属性を保持し元の要素とリンクされる。二つの干涉履歴要素の間には対応を示す特別な双方向のポインタが設定される(図28)。復元は、無効要素(●2)が有効要素となり、それぞれの干涉履歴要素に保持された幾何属性が再設定され、干涉履歴要素が削除されることで実現される。

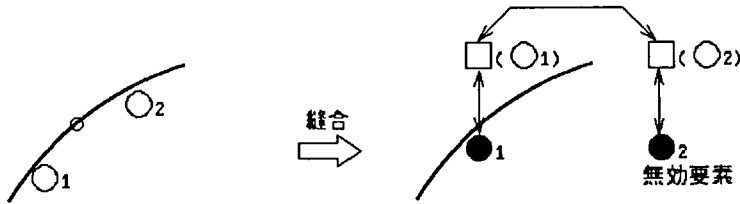


図 28 「縫合」の干涉履歴

4.3.6 融 合

二つの複合面を、幾何的に一致する境界線を介して結合し、一つの複合面にまとめる操作では、境界となる(幾何的に一致していた)境界線と頂点は、一つの要素にまとめられる。この変化を融合と呼ぶ。一つの要素(●1)は有効要素、他方の要素(●2)は無効要素となり、「融合」タイプの二つの干涉履歴要素が生成され、これらの要素とリンクされる。二つの干涉履歴要素の間には対応を示す特別な双方向のポインタが設定される(図29)。復元は、無効要素(●2)が有効要素となり、干涉履歴要素が

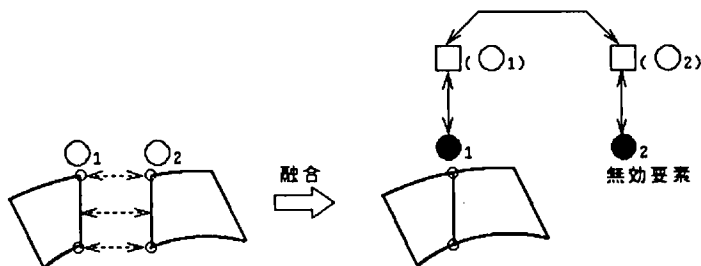


図 29 「融合」の干涉履歴

削除されることで実現される。

4.3.7 反 転

複合面の表裏反転に対応する。集合演算の差演算 (A-B) を行った場合は、第2オペランド側の複合面は表裏反転される。また開複合面の状態でモデリングを行う場合には、複合面結合や複合面演算などで二つの複合面が一つに結合される際に、副作用として表裏反転が発生することが多い。この場合には、複合面を構成する構成面や境界線の向きが一齐に反転するが、実際には複合面(要素)の反転履歴のみ保存する。すなわち「反転」型の干涉履歴要素が生成され、単にその複合面要素との間にリンクが生成される(図30)。復元は、干涉履歴要素が削除され、その複合面を構成する構成面、境界線などが実際に反転されることで実現される。

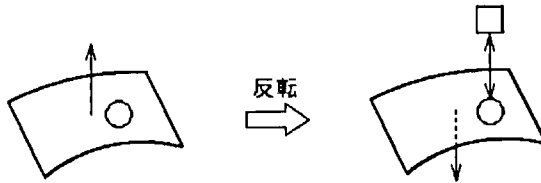


図 30 「反転」の干涉履歴

4.3.8 併 合

非連結な二つの複合面を論理的に1複合面にまとめる操作に対応する。CADCEUSの複合面は任意の構成面から位相情報を元に他の構成面に到達できないような分離状態を認める。これにより、中空部(cavity)を持つ立体も一つの複合面として表現することができる。これも「反転」と同様、複合面要素の変化として記録される。すなわち、一つの複合面要素(●1)は有効要素、他方の要素(●2)は無効要素となり、「併合」型の二つの干涉履歴要素が生成され、これらの要素とリンクされる。二つの干涉履歴要素の間には対応を示す特別な双方向のポイントが設定される(図31)。復元は、無効要素(●2)が有効要素となり、干涉履歴要素が削除されることで実現される。

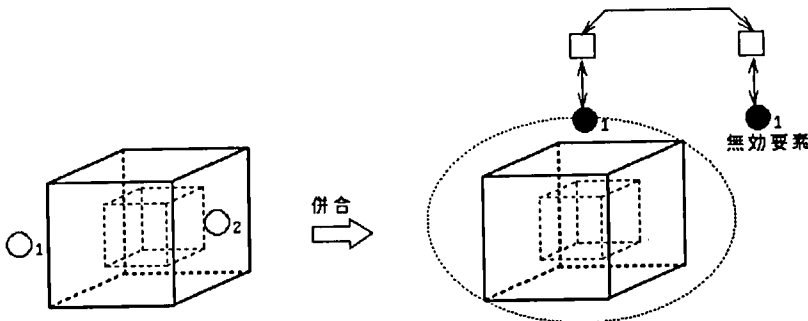


図 31 「併合」の干涉履歴

4.3.9 事 例

「フィレット掛け」コマンドを例に、これにより生成される干涉履歴を順番に説明する(図32)。

- ① フィレット面の生成

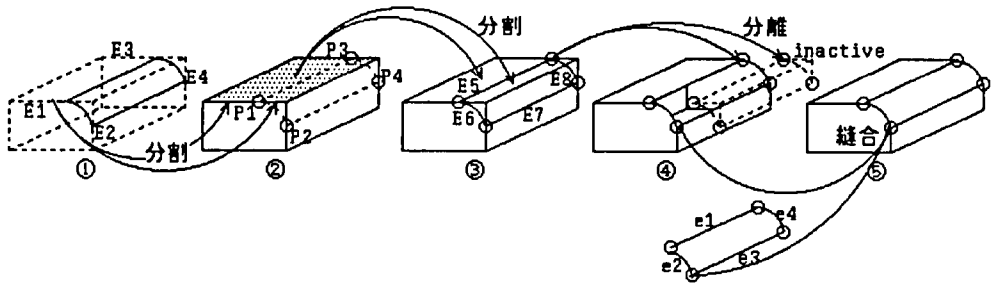


図 32 フィレット掛けにより発生する干渉履歴

四つの境界線で囲まれる1構成面からなる複合面としてフィレット形状が生成される。これらはフィレットに対応するOPの下に生成される。

② 境界線の分割

直方体の境界線 ($E_1 \sim E_4$) 上に、フィレット面の境界上の頂点对応する頂点 ($P_1 \sim P_4$) を生成し、これにより境界線を分割する。元の境界線の変更は「分割」による干渉履歴で表現される。

③ 境界線の生成による構成面の分割

直方体の構成面上に、フィレット面の境界線に対応する境界線 ($E_5 \sim E_8$) を生成し、これにより構成面を分割する。元の構成面の変更は「分割」による干渉履歴で表現される。

④ 不要部分の分離とイナクティブ化^{[11][12]}

直方体を境界線 ($E_5 \sim E_8$) で分離し、斜線を付した側の複合面をイナクティブ (inactive) 状態とする。この状態の複合面や構成図形はデータベースの検索対象からは除外される。これらの境界線とその間の頂点および元の複合面は「分離」による干渉履歴で表現される。

⑤ フィレット面の融合

直方体の境界線 ($E_5 \sim E_8$) と、フィレットの境界線 ($e_1 \sim e_4$) を融合し、一つの複合面とする。これらの境界線とその間の頂点および元の二つの複合面は「融合」による干渉履歴で表現される。

①～⑤の過程で生成された干渉履歴要素は生成された順番に、フィレットのOPからリスト構造でリンクされる。これを「オペレータ干渉履歴リスト」と呼び、形状復元の際に、復元すべき対象を高速に検索するために利用される。そのほかに、フィレットのOPから直方体のOPへは「干渉依存関係」が設定され、変更の影響が及ぶOPを高速に検索するために利用される。

フィレット径の変更や、フィレットの取り消しの際の復元処理は以下の手順で行われる。

- ① フィレットのOPからオペレータ干渉履歴リストをたどり、すべての干渉履歴要素を検索し、干渉履歴の型ごとに分類し、「融合」→「分離」→「分割」の順に、それぞれリストの逆順に(新しいものから順に)②～⑤のように復元処理を行う。

② 融合干涉履歴の復元

「融合」型の干涉履歴を持つ有効な境界線を連結し、融合境界線列として並べ、これにより複合面の分離を行う。この結果フィレット面が分離される。

③ 分離干涉履歴の復元

「分離」型の干涉履歴を持つ境界線から、相手の複合面を検索する。この場合は、フィレット掛けにより発生したイナクティブな複合面が見つかる^{[11][12]}ため、これをアクティブ化する。

④ 分割干涉履歴による構成面分割の復元

分割干涉履歴を持つ境界線のうち、その時点で有効で、左右の構成面が同一の分割干涉履歴を持つ場合、その境界線を削除し左右の構成面を1構成面とする。

⑤ 分割干涉履歴による境界線分割の復元

分割干涉履歴を持つ頂点のうち、隣接する境界線が同一の分割干涉履歴を持つ場合、その頂点を削除し隣接する境界線を1境界線とする。

4.3.10 部分再生の課題

再生処理は全再生よりも部分再生の方が効率上は有利である。しかし現状では、部分再生した結果と全再生した結果が異なる場合がある。以下に代表的な例を示す。

1) 貫通穴のような集合演算の差を行う場合

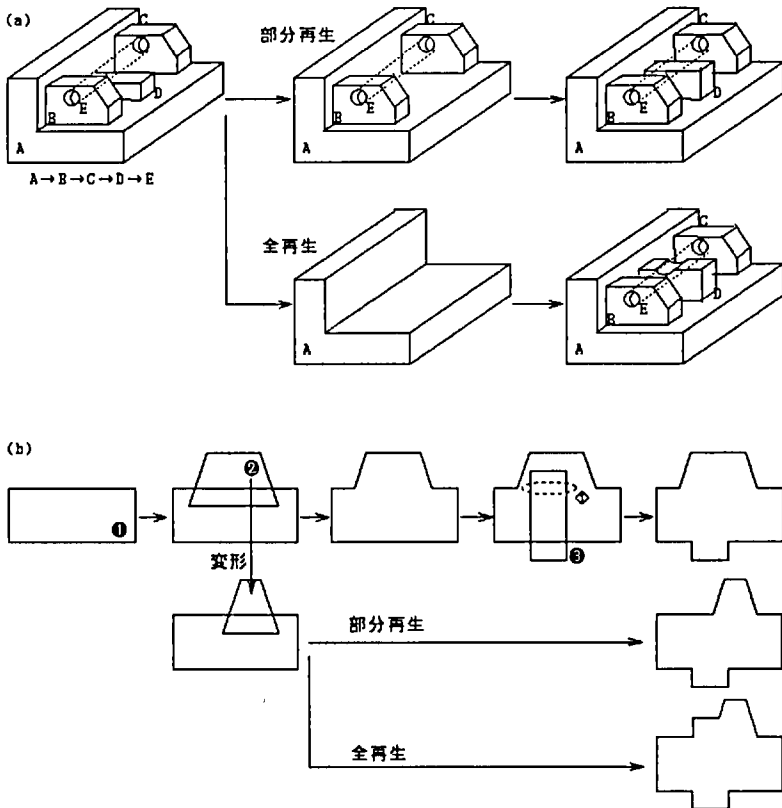


図 33 部分再生と全再生で結果が異なる場合の例

図 33(a)で、中央のリブが変形し貫通穴を遮る位置にきたとき、操作手順の意味からすれば、このリブにも穴が作用すべきである。ところが現状ではリブを生成する過程で貫通穴への干渉は発生しないためその認識ができず、結果として穴は空かない。全再生した場合には当然穴が空く。これを解決するためには、差の立体を別途用意し形状創成時には常にこれらの立体との干渉検査を行なうなどの考慮が必要である。

2) イナクティブへの干渉が発生する場合

図 33(b)でポスト②が変形したとき、部分再生と全再生では得られる結果が異なる。現在の集合演算は有効な構成面同士の交線計算しか行わないため、ポスト③を取り付けた時に④の交線は算出されない。従って、③の操作から②の操作に対しては干渉依存関係も、オペレータ干渉履歴リストも生成されないためである。

5. おわりに

CADCEUSのパラメトリックモデリングの考え方や機能と実装法を説明した。ワイヤフレーム、サーフェス、ソリッドの統合モデリングという自由度の高いモデリング形態にパラメトリックや復元機能を適用したシステムはほかに見られないため、応用機能の拡がりや限界について不明な部分や課題も多い。非手順型パラメトリックでは推論ルールの整備を行い実用レベルの問題を確実に解く実力を備えることと推論処理の効率化が、手順型では、再実行および復元処理の頑健化が課題であると考えられる。また、業務に即した形状特徴生成機能の開発や、CAM、解析などの応用機能への形状特徴を介した設計意図の伝達による工程間のインタフェースの改善なども重要な課題の一つであるが、現在 CADCEUS に実現されている技術はそれらの基盤となる^{[10][13]}。

-
- 参考文献 [1] R. A. Light, D. C. Gossard, "Modification of Geometric Models through Variational Geometry", Computer Aided Design, vol. 14, No. 4, pp. 209~214, 1982.
- [2] J. C. Owen, "Algebraic Solution for Geometry from Dimensional Constraints", Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications edited Jaroslaw Rossignac and Joshua Turner, ACM press, 1991.
- [3] B. Aldefeld, "Variation of Geometries Based on a Geometric-Reasoning Method", Computer Aided Design, Vol. 20, NO. 3, 1988.
- [4] Hiromasa Suzuki, Hidetoshi Ando, Fumihiko Kimura, "Geometric Constraints and Reasoning For CAD Systems", Comput. & Graphics, Vol. 14, No. 2, pp. 211~224, 1990.
- [5] C. L. Forgy, "Rete, A Fast Algorithm for the Many Pattern/Many Object Pattern Match Problem", Artif.Intell., Vol. 19, pp. 17~37, 1982.
- [6] D. Roller, "An approach to computer-aided parametric design", Computer Aided Design, Vol. 23, No. 5, pp. 385~391, 1991.
- [7] 鈴木宏正, 木村文彦, 佐田登志夫, "プロダクトモデルに基づく幾何学的拘束関係の記述と寸法処理への応用", 精密工学会誌, Vol. 52, No. 6, 1986.
- [8] 乾正知, 木村文彦, "依存情報を用いたモデル作成過程の表現とその可変ソリッドモデリングへの応用", 情報処理学会誌, Vol. 31, No. 7, pp. 1038~1050, 1990.
- [9] 増田宏, 嶋田憲司, 川辺真嗣, "非多様体形状モデルにおける取り消し操作一境界表現における基本立体の保存", 精密工学会誌, pp. 845~846, 1989.
- [10] 大高哲彦, "次世代 CAD/CAM システム「CADCEUS」の概要", ユニシス技報, Vol. 13, No. 1, pp. 26~41, 1993.
- [11] 谷本茂樹, "形状モデリング", ユニシス技報, Vol. 14, No. 4, pp. 15~30, 1995.

- [12] 片平正成, “位相処理モジュール”, ユニシス技報, Vol. 14, No. 4, pp. 129~139, 1995.
- [13] 荻野富二夫, “形状特徴に基づくモデリング”, 設計工学会誌, Vol. 29, No. 7, pp. 7~12, 1994.

執筆者紹介 荻野 富二夫 (Fujio Ogino)

昭和29年生, 54年東京工業大学大学院修士課程修了, 同年日本ユニシス(株)入社, CAD/CAMシステムの開発, 客先への適用支援業務を担当, 現在, CAD/CAMシステム部に所属.



製図サブシステム

Drafting Subsystem

有 田 淳 一

要 約 CADCEUS のサブシステムの一つである製図サブシステムの機能と特徴を説明する。製図システムは操作性が重要な課題である。CADCEUS においても操作性向上のためのラバーバンドやナビゲーションなどの機能の実現や、形状と寸法の連動を実現している。製図には JIS や ANSI などの各種の規格に加えた客先固有の規格もあり、その対応にシステムとして柔軟性が不可欠である。CADCEUS では規格により変動する条件を約 100 項目からなるパラメタとして使用者に解放し、そのカスタマイズにより各種規格に対応している。

Abstract This paper is intended to discuss the functions and features of the drafting subsystem positioned as one of the CADCEUS subsystems. The key point of the subsystem lies in operability and usability. For improved usability, CADCEUS itself also provides functions for rubber-band display and navigation as well for the linkage of geometric models and dimensions. The fact that there exist a number of different drafting standards such as JIS, ANSI, users' own standards at times, and the like makes it absolutely inevitable for the subsystem to be flexible enough to respond to those requirements. CADCEUS deals with a variety of standards by providing users with some 100 differing parameters for the conditions that vary depending on standards and through the customization of them.

1. は じ め に

製図の規格は JIS だけでなく、客先固有の規格、海外の規格など各種あり、一つに統一されていないのが現状である。CADCEUS 製図サブシステムを開発するにあたり、まず各種規格に柔軟に対応できること、製図機能はあくまでモデラの 1 アプリケーションとして位置づけ、モデルと製図との密な連動ができること、さらに次の機能を開発し、製図作業の徹底した効率化を目指した。

- 1) JIS に加え、ANSI や ISO などの諸規格に準拠
- 2) 形状モデルの変更や削除に対し、自動的に製図要素を追従させる連動機能。
- 3) コマンドのマンマシン・インタフェースにラバーバンドを採用し、操作性を向上
- 4) 一般的な寸法や記号要素に加え、面の肌記号、溶接記号、表を用意し、表現能力を向上

以降、第 2 章では製図サブシステムの特徴的な機能の概要、第 3 章では諸規格への対応、第 4 章では連動機能についての説明をする。

2. 特 徴

CADCEUS は、大きく製品モデラと各種サブシステムとから成り、製図サブシステムはその 1 サブシステムである。製図サブシステムは、モデラにより生成された 2 次元、または 3 次元の形状モデルに対して図面作成を行う機能を備えている。

図面作成機能には、製図要素の創成や変更、投影図や部分拡大図の創成や配置、プロッタなどの製図機への図面の出図機能などから構成される。

2.1 製図要素

操作の対象となる製図要素は、対象物の大きさ、位置、姿勢、幾何公差、および面の肌などの属性情報を図面上に表記するための要素であり、次の四つに分類される。

1) 寸法要素

形状モデルの長さや角度を表すための要素である（図1参照）。

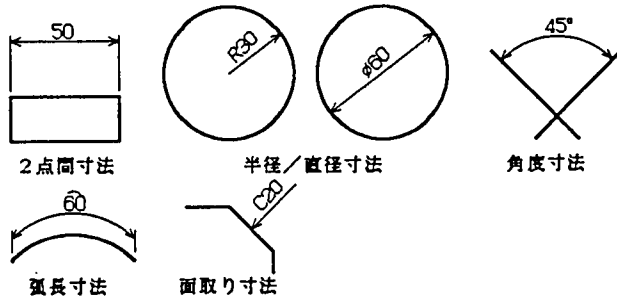


図1 寸法要素の例

2) 記号要素

図面の内容を補足したり形状モデルの属性を表す要素である（図2参照）。

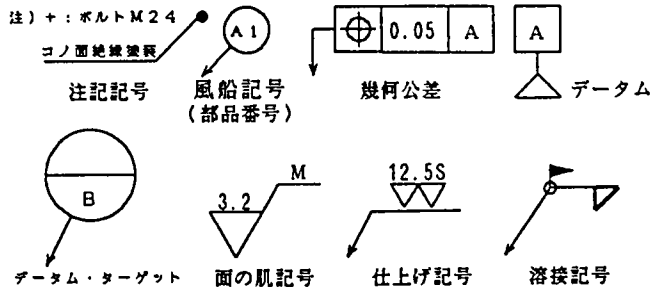


図2 記号要素の例

3) 表要素

図面に記載される表題欄* や部品表などを表す要素である。

一般的に、表題欄の形式は使用者により異なるため柔軟な形式を組めなければならない。本サブシステムの表要素は、その最小単位であるセルを構成要素とした2次元配列として定義しており、縦/横の枠線をセル単位で制御できる。

セル単位での枠線の線種/線幅/可視性の制御と行列幅の変更ができるので、図3のような表題欄も表現可能である。

また、セル単位で情報の入出力が可能なので、専用言語を用いてプログラムを組むことにより、簡単な表計算を行うことも可能である。

プログラミング例を図4に、実行例を図5に示す。

さらに、図面内の風船記号を積算し、指定セルへ数量を自動的に記入する部品

* 表題欄：図面の管理上必要な事項、図面内容に関する定型的な事項などをまとめて記入する欄¹⁾。

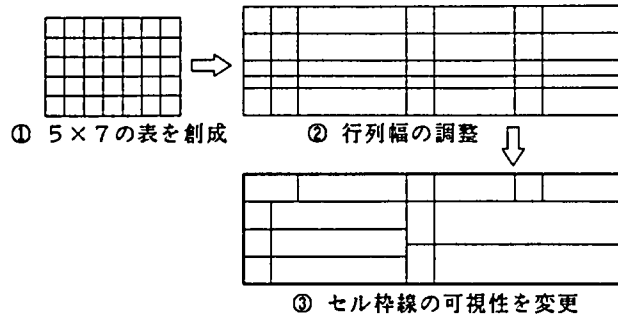


図 3 表 題 欄

```

        )
SUH = 0          /* 合計値の初期化
DO LINE = 2, 4 /* 2～4 行目までループ
    CALL GETCELL( TBLID, LINE, 1, DATA) /* LINE 行, 1 列のセル文字列を GET
    SUM = SUM+ATOI( DATA) /* 数値に変換して合計値に足し込む
ENDDO
CALL PUTCELL( TBLID, 5, 1, ITOA( SUH)) /* 5 行, 1 列のセルに文字列へ変換した
                                        /* 合計値を PUT
        )
    
```

図 4 プログラミング例

合 計	
給油口フタ	1
軸受キャップ	1
軸 受 台	1
品 名	個数

合 計	3
給油口フタ	1
軸受キャップ	1
軸 受 台	1
品 名	個数

図 5 実 行 例

表作成のための支援機能や、スプレッド・シートなどの他アプリケーションとの入出力のために、表の内容をテキスト・ファイルとして出力できる機能も提供している。

4) ハッチング要素

断面などの領域を明示するための要素である (図 6 参照)。

ハッチングの線群を一つの要素としてシステムは認識するため、ハッチングの表示制御など一括した処理単位で操作が可能である。また、線種/線幅/間隔/角度などを任意に設定し、ハッチング・パターンとして登録可能である。

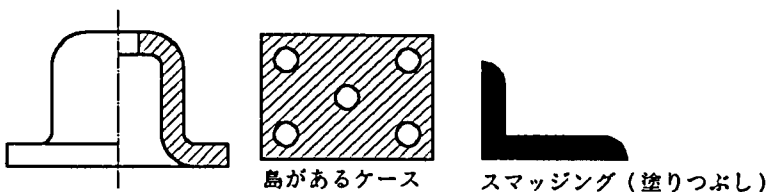


図 6 ハッチングの例

2.2 マンマシン・インタフェース

図面の作図段階では、「この辺に注記を記入したら見やすいだろうか?」、「この辺に寸法値を移動させたらもっと図面が見やすくなるのでは?」というような、使用者の感覚による操作ができることが大切である。このような要求を満たすために、マンマシン・インタフェースとしてラバーバンド表示機能を実装した。

寸法や記号要素の創成や変更時に本機能を採用することにより、コマンドの実行を待たずに実行結果を視覚的に確認でき、リアルタイムに変化する要素形状を見ながら試行錯誤を繰り返すことが容易にできる。

本機能の特徴を以下に示す。

1) 実行結果の忠実なプレビュー*

寸法や記号要素を表示するために必要な製図パラメタ**を全て参照して、描画データを作成するので、忠実なプレビューが可能である。

2) 適時にガイド線を表示するナビゲート機能

図面の作図段階において製図要素を記入する場合、その図面内での水平方向、鉛直方向は非常に重要な意味を持っている。たとえば、2点間の長さを水平方向で測定したり、引き出し線を鉛直方向に引き出したい場合などが考えられる。

引き出し線を例にとると、グリッドなどの補助機能を利用すれば水平または鉛直方向に引き出し線を引き出すことができる。しかし、引き出し線の指示位置(最初の1点目)がグリッド上に乗っていないと目測に頼るしかない。

ナビゲート機能により、記号要素の引き出し線の方向が水平または鉛直方向に近い場合にガイド線を表示し、そのガイド線が表示されている時に座標値を決定すると近い方の軸に座標値が丸められる(図7参照)ので、グリッドなどの補助機能を利用しなくても、正確な方向の引き出し線を引き出すことが可能である。

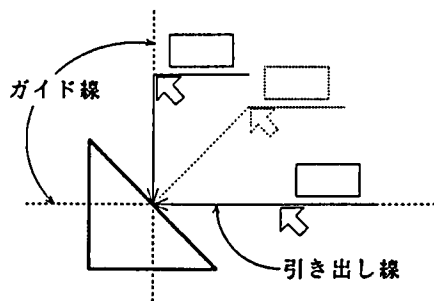


図7 水平/鉛直方向のガイド線の例

3) ラバーバンド表示中の選択メニューによる入力パラメタの切り替え

コマンドの入力に選択形式の項目がある場合、ラバーバンド表示中でも図8のような選択メニューを表示し、項目の選択をすることができる。

* プレビュー：コマンドの実行以前に、そのコマンドの実行結果を表示させること。

** 製図パラメタ：製図要素を創成、表示するときの製図要素の文字、記号の大きさ、構成線の形状などを決定するために使用される値。

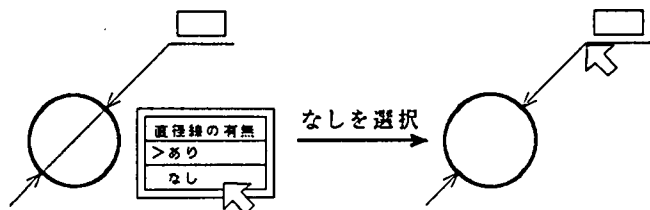


図 8 選択メニューの例

2.3 図面編集機能

3次元の形状モデルを利用して製図を行う場合、2次元の紙である図面上での表現方法が必要となる。そのための支援機能として、投影図の創成や配置、投影図ごとの線種設定機能（プロジェクション線種）が用意されている。

投影図の創成や配置により、形状モデルを任意のビュー（方向）で投影した図を図面上の任意の位置へ配置でき、一つの形状モデルから複数の投影図を創成や配置することもできる（図9参照）。本機能で創成される投影図の実体は一つの形状モデルなので、形状モデルの設計変更は直ちに図面上でも反映される。

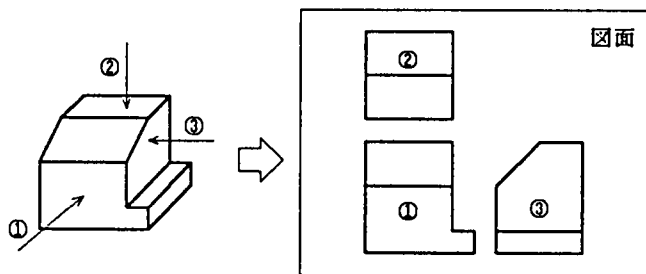


図 9 投影図の創成と配置

さらに、プロジェクション線種機能により、一つの投影図に特有の線種で形状モデルを表現することができるので、実体である形状モデルに影響を与えることなく隠線表示が行える。このほかにも、図面上の特定部分だけを拡大して表示する部分拡大図機能（図10参照）などが用意されている。

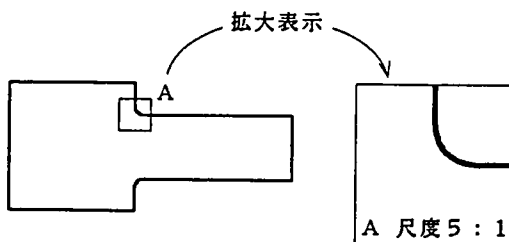


図 10 部分拡大図

3. 諸規格への対応

本サブシステムでは、国内規格として JIS、海外規格として米国の ANSI を基本にしているが、使用者独自の規格もまだ多く見受けられる。これら複数の規格に準拠し

た図面作成を可能にするために、使用者に規格をカスタマイズするための要件（製図パラメタ）を解放している。製図パラメタとは、製図要素の文字や記号の大きさ、形状を決定するために使用される約 100 項目からなるパラメタ群であり、個々に製図パラメタ値と呼ばれる実数、または整数(フラグ/タイプ)値から構成される(表 1 参照)。

表 1 製図パラメタの項目とパラメタ値の例

項目	パラメタ値		
	①寸法文字列の位置	寸法線上	寸法線分断
②寸法文字列の傾き	寸法線沿い		常に水平
③端末記号	矢印	黒矢印	白矢印
④寸法文字高さ	4.0 mm		
⑤	4.0 mm		
	60.0 度		

図 11 に製図パラメタの例を示す。

これら製図パラメタ値の組み合わせにより、諸規格へ準拠した製図を行うことができる。また組み合わせを替えることにより、既存図面の規格を変更することも可能である(図 12 参照)。

さらに、単位系の変更も製図パラメタの設定により行うことができる。用意されている単位系の種類はミリ系とインチ系の 2 種類で、既存図面の相互変換も可能である(図 13,14 参照)。

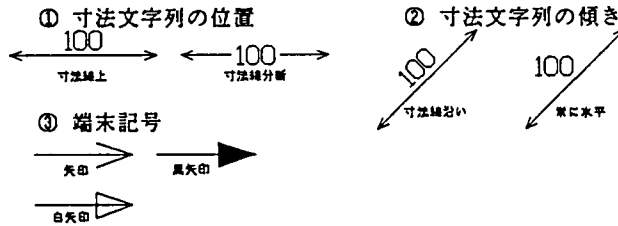


図 11 製図パラメタの例

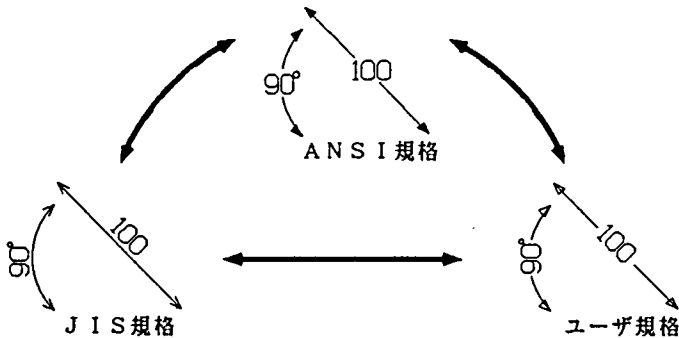


図 12 パラメタ・セットによる諸規格への対応と相互変換

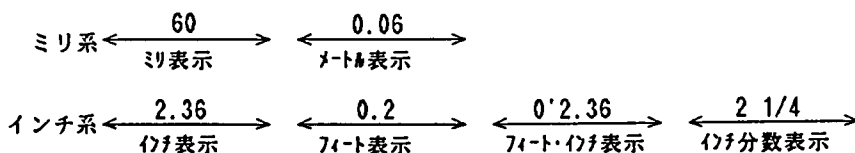


図 13 単位系の種類と表示単位の種類

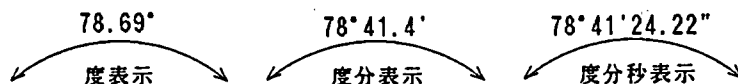


図 14 角度の表示単位の種類

4. 形状モデルと寸法の連動

製図要素は形状モデルに対して付加されるが、設計変更や設計中の試行錯誤により、形状モデルが変更される場合がある。この場合、付加されている製図要素の変更も必要となるため、製図要素を削除し、新たに製図要素を創成し直す作業が発生する。

連動機能とは、形状モデルの変更や削除の際、自動的に製図要素を追従させる機能であり、寸法修正のような手間を最小限に抑えることを目的としている(図 15 参照)。

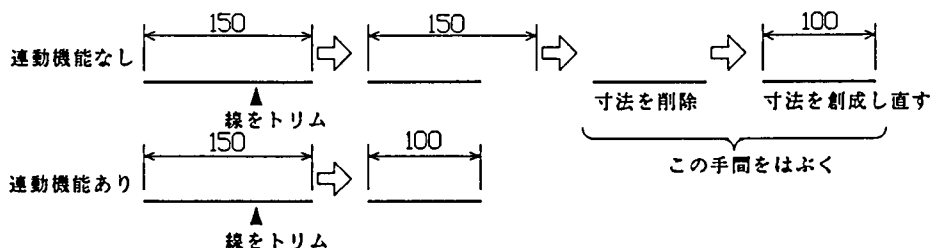


図 15 連動機能

4.1 連動関係

このような機能を実現するために、製図要素と形状モデルとの間に『連動関係』という関係付けをしている。連動関係は、形状モデルを指示して製図要素を創成したときに自動的に創成され、以下に示すような関係情報を保持している。

- 1) 幾何要素への識別子 (連動対象の形状モデル)
- 2) 製図要素への識別子 (連動する製図要素)
- 3) 特徴点タイプ
 - ① 形状そのもの
 - ② 線上点
 - ③ 円/円弧の中心点
 - ④ 円/円弧の接点
- 4) モデル形状上の位置パラメタ

この中で、『特徴点タイプ』は製図要素の創成意図を示している。図 16 の例では「接点」という意図が引き継がれれば期待する寸法が得られる。

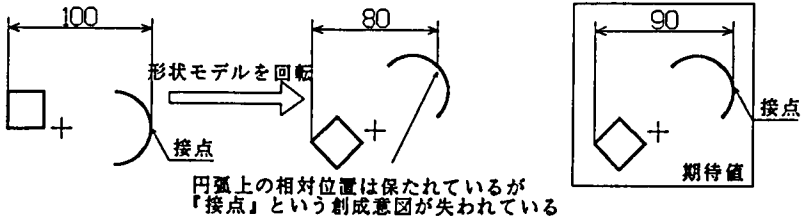


図 16 特徴点

4.2 連動処理

連動処理は、『連動関係の創成』と『関係保守』および『再計算』に大きく分けることができる。関係保守とは、形状モデルの変更や削除時に、関係情報の更新や連動関係そのものの削除を行い、情報としての整合性を保つことである。関係保守では製図要素の更新や削除は一切行わず、製図要素の更新や削除は『再計算』で行う。

再計算とは、連動関係の付いている製図要素を、関係情報を元に更新や削除を行う(図 17 参照)。

図 18 に連動の例を示す。

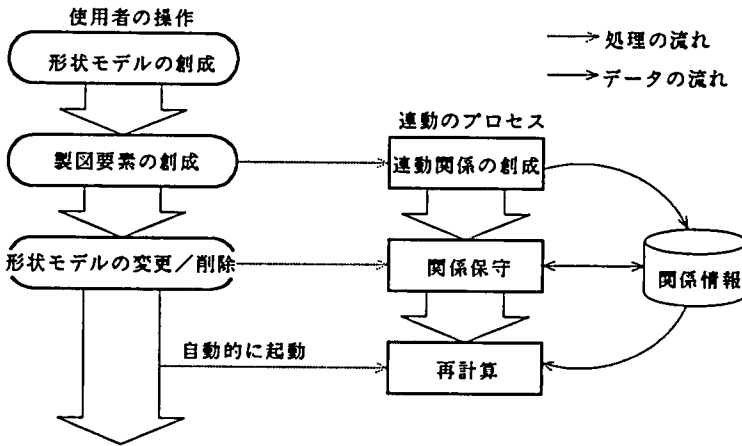


図 17 連動処理

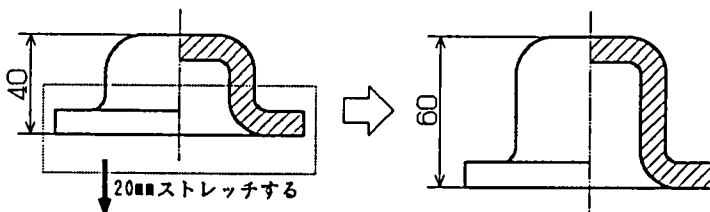


図 18 連動の例

5. おわりに

製図サブシステムでは、いかに少ない手数で図面を作成できるかを考慮して、操作ミスを防ぎ、操作ミスによるやり直しの手数を削減するための「ラバーバンド」、設計変更による寸法修正などの手数を削減するための「連動機能」などを開発した。

今後は、サーフェス/ソリッド・モデルから直接 N 面図を作成し、隠線処理までを自動で行う機能などの充実や操作性の向上に努めていきたい。

参考文献 [1] 「JIS ハンドブック製図-1991」, (財) 日本規格協会.

執筆者紹介 有田 淳一 (Jun-ichi Arita)

平成元年 甲南大学理学部応用物理学科卒業。同年日本ユニシス・ソフトウェア (株) に入社。CAD/CAM システムの開発・保守に従事。現在、日本ユニシス・ソフトウェア (株) 製造流通統括部 CAD/CAM システム部開発三課に所属。



CAM サブシステム

CAM Subsystem

大野 順 三

要 約 CAM サブシステムは、CADCEUS のアプリケーションの一つである NC 機能を提供するサブシステムである。本サブシステムでは 2 次元、3 次元の区別なく統一的に各種加工機能が利用できる。加工方法の設計において、CL (Cutter Location: 工具軌跡) を工具や加工条件単位で集合化したり順序づけを可能にするデータ構造を採用している。また、加工条件に関する技術情報 (工具、ワークサイクルなど) は使用者ごとの生産技術やノウハウとして加工技術ファイルに蓄積し高度な自動化や加工の標準化を支援している。

各種加工機能 (CL 計算) のうち、とくに 3 次元の領域加工では治工具の干渉除去や削り残しの判定など加工設計の自動化や加工の効率向上のための充実が図られている。

Abstract CADCEUS's CAM subsystem for NC applications has realized the integration of 2D and 3D machining capabilities. It supports a data structure which enables the grouping and ordering of CL (cutter location) data according to tool types and machining conditions. All customers can store into its database their own technical information about cutting conditions such as tool shapes, work cycle definitions, and so forth. It contributes to a higher-level automation and standardization for increased manufacturing productivity.

Especially, 3D milling is discussed in this paper, covering the detection of interference between tools and fixtures, and recognition of the regions left uncut.

1. はじめに

CADCEUS の CAM サブシステムは主に NC の機能を提供する。各種の工具軌跡 (CL : Cutter Location) の計算の他に、加工の手順や工程設計支援機能、CL の編集機能などを、CADCEUS の製品モデルと密結合した形態で実現している。以下に CAM サブシステム特有の概念と特徴的な機能について説明する。

2. 特 徴

CAM サブシステムでは 2 次元、3 次元の区別なく統一的に各種加工機能を提供する。各加工においても加工の手順や方法をきめ細かく設計ができるように、加工設計機能の充実や加工ノウハウを体系的に蓄積する加工技術ファイルを実現している。以下に CAM データの構造とそれらを元に設計する加工設計について述べる。

2.1 CAM データ

CAM サブシステムでは 1 本の CL を最小単位に、加工の手順や方法により順序付きで CL を集合させることにより各種の加工方法に対応している。以下に CAM 特有のデータの集合概念を説明する (図 1)。

1) 加工工程

1 加工領域を 1 本の工具で 1 加工機能を利用して加工する単位である。

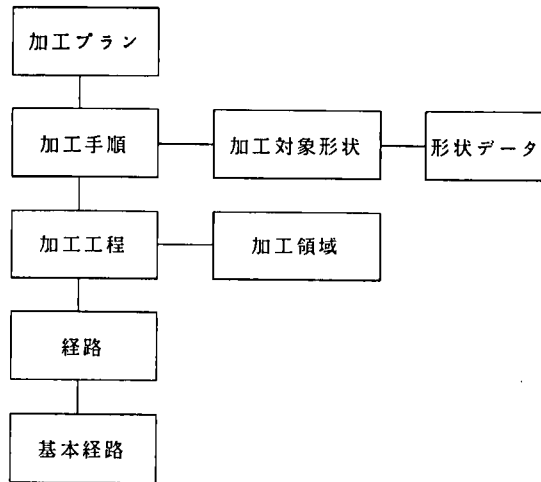


図 1 CAM データ構造

2) 加工手順

加工の順序を意図した複数加工工程の組（加工技術ファイルのワークサイクルに相当）。

3次元加工の加工指示は、領域加工では荒・中・仕上げの順序で行い、稜線加工では工具径の大きい順で行う。このような加工手順の単位で加工指示ができれば操作性の向上になる。加工技術ファイルに格納すれば加工ノウハウが蓄積できる（図2）。

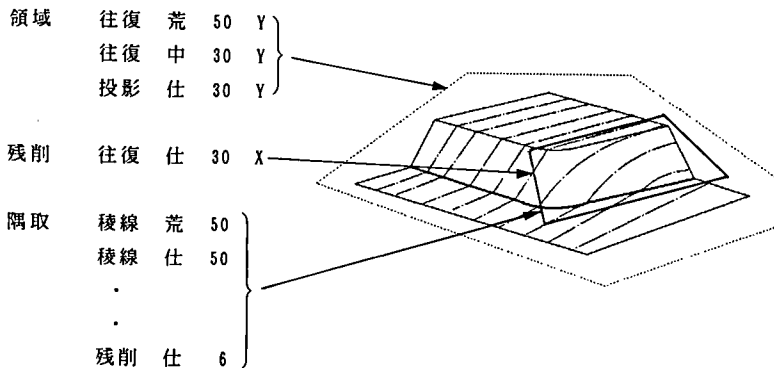


図 2 3次元加工の加工手順

さらにデータベース内に加工手順を格納することにより類似部品の加工に利用できる。

3) 加工プラン

複数の加工手順を束ねる概念（加工技術ファイルの加工方案に相当）である。

加工手順を組み合わせるにより、より大きな単位での加工指示ができる。

2.2 加工技術ファイル

使用者や加工法に依存するデータをCAMサブシステムのプログラムから分離しプログラムの汎用性を確保した。これらのデータは、多岐に及ぶ情報（加工方法、加工

条件, 工作機械, コントローラの種類等) を体系的にファイルすることにより, 加工の標準化やノウハウの蓄積ができるように考慮されている。加工技術ファイルは以下のデータから構成されている。

データ種類	内 容
加工方案	ワークサイクルの集合
ワークサイクル	加工工程の集合
加工工程	加工機能を作動するためのパラメタ
工具	工具形状
ホルダ	ホルダ形状
アタッチメント	アタッチメント形状
工具セット	工具とホルダまたはアタッチメントを含む組み合わせ
動作パラメータ	穴あけ動作専用のパラメタ
工作機械	工作機械仕様, コントローラ仕様の定義
加工条件	素材材質や工具の種類より算出される主軸回転数, 切削速度

2.3 加工設計

加工設計とは, 加工対象形状に対し工具と加工機能の選択により加工工程を作成し, その加工工程を加工順序により組み立てることである。CADCEUS/CAM では加工工程を決めるための加工工程設計機能とその準備作業である加工設計支援機能を提供している。

2.3.1 加工工程設計

加工工程設計は, 最初からの加工工程組み, 加工技術ファイルのワークサイクル利用, 加工技術ファイルの加工方案利用, 設計済データ利用の方法で行える。

1) 加工工程定義

図3のテーブル1行が1加工工程を示している。加工工程には使用する工具と加工機能およびその機能を作動するためのパラメタが記述されている。新たに加工工程を作成するには **新規** を指示した後, 工程番号を指示すると加工機能一覧, 加工機能ごとの画面が表示され入力が可能になる。工程内容を変更するには **工程内容** を指示する。

2) 加工工程組み

加工工程行を **挿入** **複写** **削除** を指示して編集し組み立てる。

3) ワークサイクルの利用

読込 加工技術ファイルより指示されたワークサイクルを読み込む。ワーク

▽ 加工工程設計

加工手順名

ワークファイル名

No	経路名	加工法	工程	工具	工具径	補正量	ピッチ	計算

図 3 加工設計画面

サイクルに定義されている加工工程全てが表示される。

現在の加工工程設計内容を加工技術ファイルに登録する。

4) 経路計算指示

指示された工程のみ経路計算する。

加工手順の全工程を経路計算する。

2.3.2 加工設計支援

加工設計を行う上で選択した工具，加工法による加工結果の良否（たとえば加工残り）を事前に調べる機能が加工設計支援機能である。

1) 工具選定機能

① 工具非接触領域

切削残しを最小にする工具径の選択を支援する機能である。指定工具では加工できない範囲を計算して示し，使用者が最適な工具選択をできるように支援する（図4）。

② 工具長 MAP

切削負荷を最小にする刃長，首下長さを持つ工具選択を支援する機能である。複数本の工具について首下長さやホルダ形状をもとに首下長さの短い順に加工可能な範囲を計算して示し，使用者が最適な順番で加工できるように支援する。

2) 加工機能選定機能

どの加工機能を利用し，どの方向から工具を当てるのがより加工効率を上げるとともに，仕上げ工数を少なくすることが可能かの検討を支援する機能である。

① 等高加工粗接触領域

斜面において削り残しを最小にする加工方法（等高加工または往復加工）の

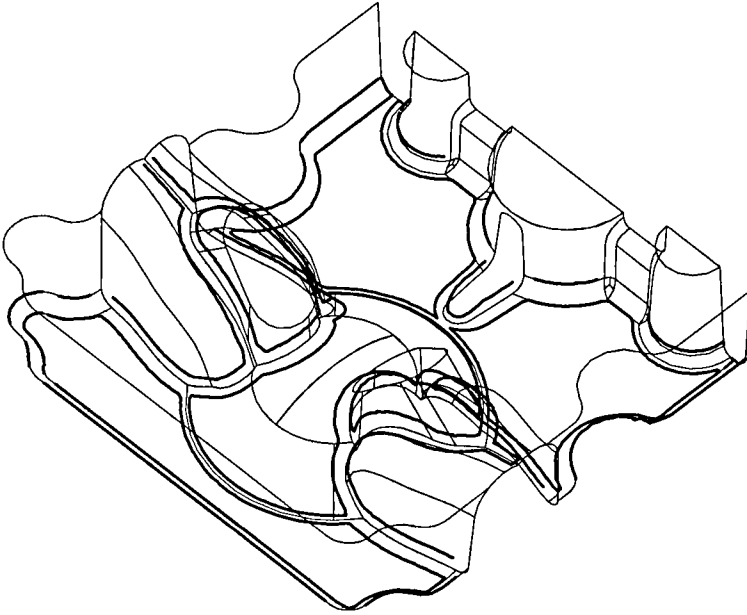


図 4 工具非接触領域

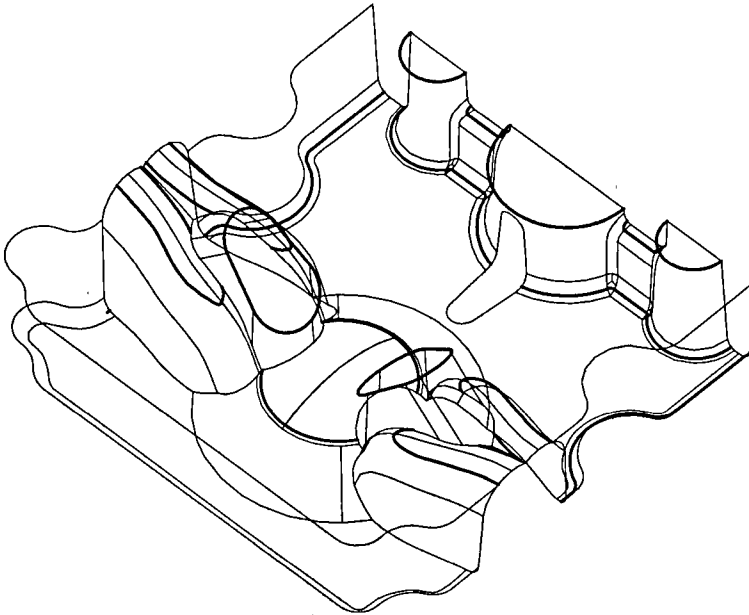


図 5 等高加工粗接触領域

決定を支援する機能である。ピッチにも依存するが斜面の角度から、等高加工で期待できる加工可能範囲を計算して示し、使用者が加工方法の選択をできるように支援する (図 5)。

② 往復加工粗接触領域

往復加工において、削り残しを最小にする加工方向の決定を支援する機能で

ある。加工方向とピッチから3次元的に経路が粗になる領域を計算して示し、使用者が最適な加工方向の選択をできるように支援する。

3) 次加工領域抽出機能

加工設計支援機能で求めた領域は全て次加工工程のための加工領域として利用できる。本来の支援機能とは目的を異にしているが加工領域指示の操作性向上のための機能を紹介する。

① 稜線自動抽出

工具半径以下のフィレット面稜線および角面稜線を求める。求められた線は後に稜線加工や隅取り加工の加工領域として使用されることを前提としており、ダウンカット方向にループを形成するように並べられる。

② 稜線トレース

稜線自動抽出で正しく求められない場合の補助機能である。稜線の開始、方向、終了位置を指示しその間をトレースした線を求める。

3. ソフトウェア構成

CAM サブシステムはCADCEUSの共通基盤ソフトウェアであるフレームワーク上の1アプリケーションである。サブシステムは全体を制御するCAM マネージャを中心に各種経路計算プログラムやポストプロセッサと工作機械や加工方法、使用者の加工ノウハウを蓄積するための加工技術ファイルから構成される(図6)。

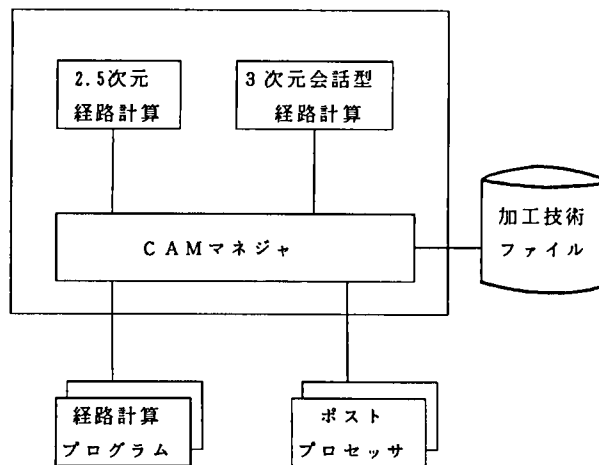


図6 ソフトウェア構成

4. 2 1/2次元加工機能

4.1 穴あけ加工

1) サイクルコード

NC コントローラに用意されている固定サイクルまたは使用者が独自に組み立てるサイクル動作(ユーザサイクル)を作成する。

- 2) 多段穴
最大5段までの段付きの穴を加工する工具軌跡を求める。
- 3) 工具自動選択
穴の形状情報から最適な工具をシステムが自動で選択する。

4.2 輪郭加工 (図7)

- 1) 径補正機能の利用
輪郭形状を加工する際、NCコントローラに用意されている径補正の機能を利用する工具の側端軌跡を求める。
径補正の機能を利用しない工具の中心軌跡を求めることもできる。
- 2) 削り残し部の自動加工
指定された工具で削り残した部分をより小さい工具で加工する軌跡をシステムが自動で求める。

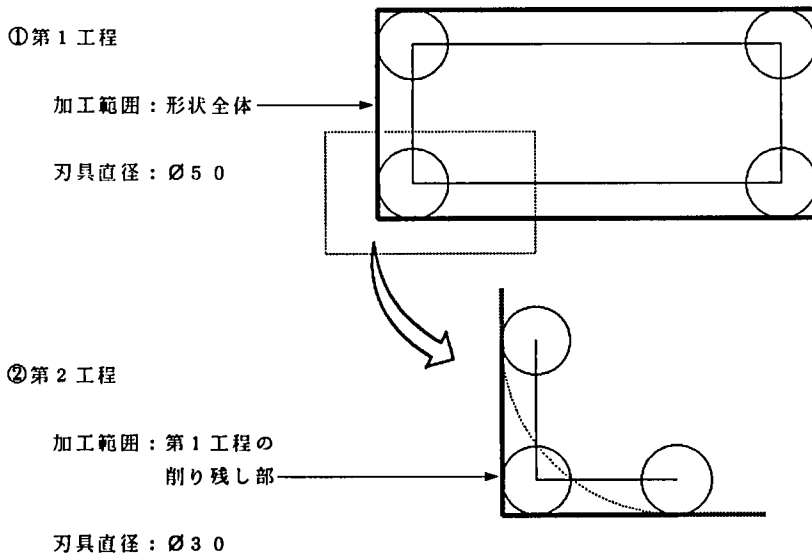


図7 輪郭加工の切削残し

4.3 領域加工

- 1) スキャン加工
閉領域内を走査するように加工する工具軌跡を求める。
- 2) オフセット加工
閉領域内を渦巻き状に加工する工具軌跡を求める。
- 3) 開口部加工
閉領域の一部を開口部とし開口部を見込んで工具半径分はみだして加工する工具軌跡を求める。
- 4) 島残し加工
閉領域内に島（干渉不可領域）を設定し島に干渉しない工具軌跡を求める。

4.4 ワイヤカット加工

1) 中抜き加工

輪郭形状の内側をスクラップとし外側を製品とする加工で粗取りのファーストカット、ポーズカットと仕上げのセカンドカットがある。

2) 中残し加工

輪郭形状の内側を製品とする加工で粗取りから仕上げまでのシェイプカットと最終の切り落としのポーズカットがある。

3) テーパー加工

輪郭形状全体に一定のテーパー角度をかける全体テーパー加工と部分的に角度を変更する部分テーパー加工がある。またコーナ円弧部を上下同一半径あるいは円錐半径として加工するワイヤの軌跡を求める。

4) コアレス加工

中抜き加工でスクラップをだすことなく輪郭形状の中心部から渦巻き状に加工するワイヤの軌跡を求める。

5. 3次元加工機能

3次元加工機能は複数の曲面から構成される加工対象形状から加工範囲内で工具干渉を除去した同時3軸用の工具軌跡を求める機能である。

使用可能な工具はソルバの計算方式により異なるが、ボールエンド工具、フラットエンド工具およびテーパー・ボールエンド工具である。工具軸方向（経路計算方向）は任意方向が指定できる。

5.1 粗取り機能

1) 突き加工

ドリル工具により形状まで深穴動作で加工する。突き位置としては点群を指定する。工具の素材外、池への突込み防止のための下降限界平面を指定できる。また、固定サイクル動作を使用せずに工具の上下移動動作の経路を出力する。

2) 等高粗加工

高さ一定の平面上で対象形状と素材の間を削る粗取り経路を作成する。平面で切断した場合に形状が開いていたり島や池が複雑に入り組んでいてもよい。高さの指定は等間隔だけでなく形状に合わせて不等間隔の高さを指定することができる。池領域に対する下穴経路の作成や高さ間をスパイラルやジグザクに切り込む経路の作成もできる。

作成できる経路には以下の種類がある。

① 輪郭経路

② フライス/スキャン経路……領域内で一方向かジグザグ方向

③ フライス/スキャン経路+輪郭経路……輪郭経路を先にするか後にするかを指定可能

④ フライス/オフセット経路……輪郭経路を順にオフセットした経路の作成

⑤ フライス/RECT 経路……池のない形状で素材外部からワークを離れないで素材を順にオフセットした一筆書きの経路作成

5.2 領域加工

1) 往復加工（スキャン型）

工具軸方向から見て工具が直線的に動く経路を作成する。工具半径分オフセットした多面体を作成し、切断する形で経路計算するため工具はボールエンドに限られる。範囲指定は以下の三つの方法がある。

- ① 2点とベクトル
- ② 閉じた折れ線とベクトル
- ③ 閉じた曲線とベクトル

2) 往復加工（投影型）

求められる経路はスキャン型と同一であるが、各経路点で工具と加工物の干渉計算を行う。工具を接触させる計算方法を採用しているため工具はボールエンドに限らない。

5.3 部分領域加工

1) 投影型

工具軸方向から見た工具の動きを曲線や経路として規定し、対象形状上に投影した経路を作成する。任意の曲線が指定できるため形状に合わせた自由な経路が作成できる。範囲指定は工具の動きを規定する曲線や経路を直接指定する方法と、点や曲線から工具の動きを規定する曲線を自動的に発生する方法がある。自動発生機能には次のような種類がある。

- ① 多角形内を埋める直線群
- ② 放射状直線群
- ③ 渦巻曲線群
- ④ 1本の曲線に直交する直線群
- ⑤ 2本または4本の曲線に囲まれた領域を埋める曲線群

2) パラメータ一定加工

指定された複合面のパラメータ一定線に沿って面沿い一定ピッチで加工する経路を作成する。面沿い一定ピッチであるため加工残しの均一な経路となる。面積の広い面や工具軸方向に垂直に近い面の加工に適している。

3) 壁加工

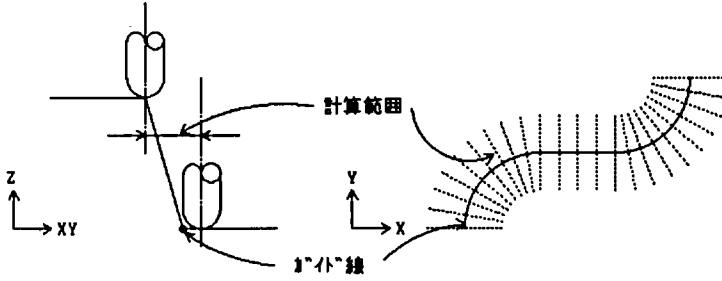
対象形状上の2本の曲線や経路に挟まれた領域を面沿い一定ピッチで加工する経路を作成する。面沿い一定ピッチであるため加工残しの均一な経路となる。立て壁を壁沿いに加工する場合やなだらかな形状を加工するのに適している。

また、本機能は工具接触点を領域としているため、削り残し領域加工にも応用できる。

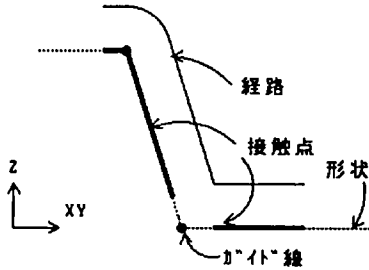
5.4 等高仕上げ加工

高さ一定の平面上で対象形状沿いの輪郭仕上げ経路を作成する。平面で切断した場合に形状が開いていたり島や池が複雑に入り組んでいてもよい。高さの指定は等間隔だけでなく形状に合わせて不等間隔の高さを指定することができる。対象形状の起伏が大きい場合の仕上げに適した加工方法である。

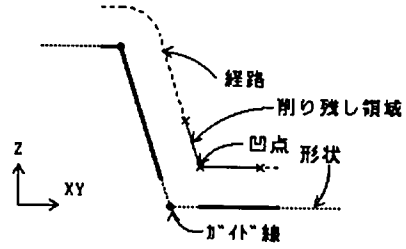
①指示されたガイド線に垂直な方向で経路計算する断面を決める。



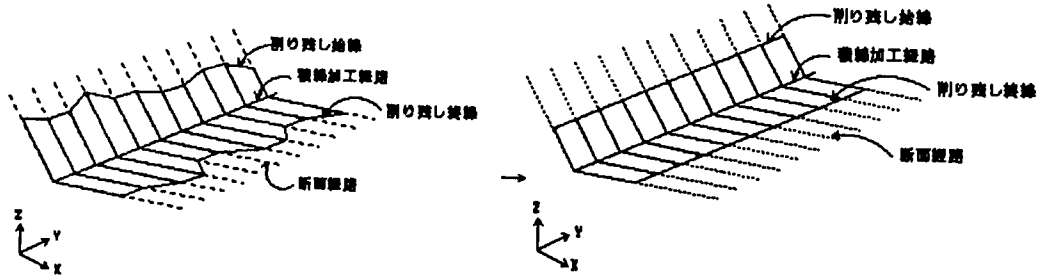
②各断面ごとに経路計算を行う。



③各断面内で削り残り部分を求める。



④1本の曲線に直交する直線群



⑤2本または4本の曲線に囲まれた領域を埋める曲線群

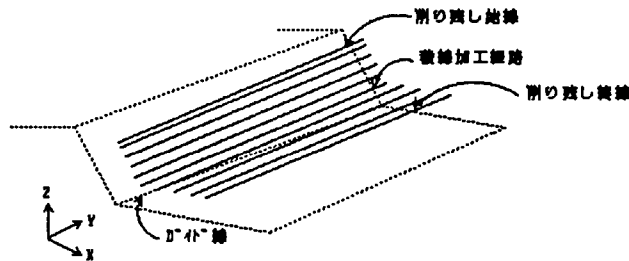


図 8 隅取り加工経路計算

5.5 稜線加工

1) 凹稜線加工

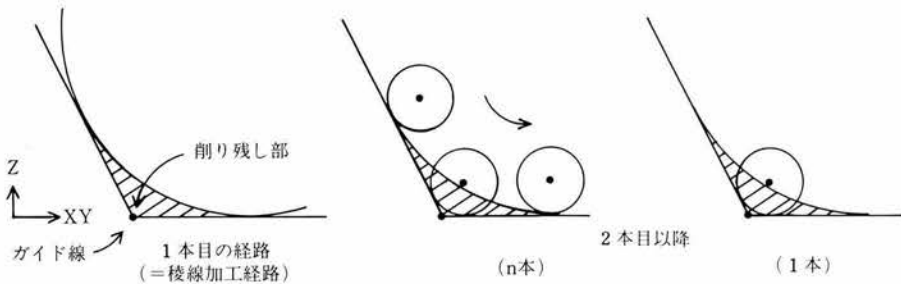
凹稜線の両側の形状に同時に接した凹稜線加工用経路を作成する。対象形状と凹稜線を指定するだけで曲面間を自動的に乗り移る経路を作成する。

2) 稜線加工

1)と同様の機能であるが凹稜線だけでなく凸や平坦な稜線も指定できる。

5.6 隅取り加工 (複合機能)

凹稜線沿いに前工程での削り残し部分を加工する経路を一度に複数工具分作成する。凹稜線と複数工具を指定することにより内部で削り残し部分を自動認識し面沿い一定ピッチで加工する経路を求める。



隅取り加工経路計算の概要を図8に示す。

6. おわりに

各種 NC 加工用機能の実現はできたが、形状特徴やモデル変更時におけるモデルと経路の連動など未だ開発すべき機能が多い。今後も加工技術の進歩に耐えられる信頼性の高いシステムにすべく開発を継続したい。

執筆者紹介 大野 順三 (Junzo Ohno)

昭和25年生。46年沼津工業高等専門学校機械工学科卒業。同年日本ユニシス(株)入社。CAD/CAMシステムの開発や客先の適用支援業務を担当。現在、CAD/CAMシステム部第三課課長。



CAE サブシステム

CAE Subsystem

毛 利 明

要 約 CADCEUS の CAE サブシステムでは、製品モデルを各種の場での FEM 解析（静解析、動解析、熱解析、電磁場解析等）を行うためにプリ・ポストの一体化を目指した。プリプロセッサ部では節点・有限要素の自動分割機能を、また半自動分割機能も提供する。さらに、荷重・拘束、要素特性、材料特性の定義などの機能も提供している。ポストプロセッサ部では解析結果を色々な角度から評価できるよう豊富な評価図を提供している。

本稿では FEM サブシステムの狙い、特徴、適用事例について説明する。

Abstract The CAE subsystem of CADCEUS is designed to support the FEM analyses of product models in various fields (such as static, dynamic and heat transfer analyses as well as electric/magnetic field analysis). The subsystem's pre-processing function provides automatic FEM mesh generation and semi-automatic mesh generation. It also defines loads, constraints, element properties and material properties. The post-processing function provides various forms of graphical visualization for the analyzed results. This paper briefly describes the purpose, characteristics, advantages and actual applications of the CAE subsystem.

1. はじめに

CADCEUS の CAE サブシステムは、モデラでモデリングされる製品モデルに対し、各種の場（力、熱、電磁場等）での FEM 解析（静解析、動解析、熱解析、電磁場解析等）を行うためのプリ・ポストプロセッサとソルバとのインタフェースから構成される。プリプロセッサ部では節点・有限要素の自動分割機能を、またマップドメッシュ法に代表される半自動分割機能も提供している。さらに、荷重・拘束、要素特性、材料特性の定義などの機能も提供している。ポストプロセッサ部では解析結果を色々な角度から評価できるよう豊富な評価図を提供している。

本サブシステムは従来の APPEX のような独立のプリ・ポストプロセッサとは異なり、CADCEUS のサブシステムと位置づけられるため、製品モデルの持つ位相構造、形状特徴や各種属性を活用することにより画期的に使いやすいシステムを実現することができた。

以下に特徴的な機能を中心に説明する。

2. 特 徴

2.1 製品モデル情報の利用

モデラで作成した製品モデルを応用することにより次の特徴が挙げられる。

- 1) 形状モデル、解析モデル、解析結果を統一的にファイリング
解析結果を評価し、形状モデルの変更が可能になる。
- 2) 位相情報

形状モデラにより作成された位相情報から境界の認識を行い、共有辺や共有面上の節点を重複することなく生成することができる。

3) 形状特徴機能

FEM 解析には不要な微小穴や微妙なフィレットを省略するなど、形状モデルの抽象化が容易である。

4) パラメトリック機能

設計変更に対し自動的にメッシュ分割、荷重定義、拘束定義、要素特性定義などが行える。つまり使用者が一度 FEM モデルを作成すれば、形状変更後のモデルについても FEM 解析用の節点・有限要素などの作成、解析および評価が行え、一貫した設計・解析ができる。

2.2 豊富なメッシュ分割機能

本来、FEM 解析に必要なとされるプリプロセッサは、設計者が創造したモデルを直接、解析するための容易性を提供する側面と、特定部分を専門的にかつ詳細に、その特性を解析するための機能を提供する側面との両面性がある。CAE サブシステムでは自動分割機能などで簡便性を、マップドメッシュ機能で詳細な解析を行えるようにシステムの自由度を高め、両要請を満足させるように開発した。

また、本サブシステムとインタフェースがとれる解析プログラムは表 1 のとおりである。

表 1 解析プログラムの種類

	解析プログラム名	用途
構造解析	NUL NASTRAN	汎用構造解析プログラム
	MARC	非線形構造解析プログラム
	DYNA3D	非線形衝撃解析プログラム
	ITAS	板成形シミュレーション
流動解析	METAL FILL	金属湯流れ解析プログラム
	MELT FLOW	樹脂流動解析プログラム
	CAST	凝固解析プログラム

2.3 豊富な評価図

解析結果を色々な角度から評価できるよう各種の評価図を用意している。変形図、要素色分け図、等高線図、円図、ベクトル図、テンソル図、梁・トラス図、XY グラフ図、パーティクル図、ひび割れ図等である。また、画面に解析結果の数値を出力するリスト出力機能やアニメーション機能等がある。

3. プリプロセッサ

プリプロセッサは節点、有限要素、荷重、拘束、要素特性、材料特性等が定義できる。

1) 節点・有限要素の定義

- ・幾何要素の面、立体の表面または内部に節点を発生し、板または立体の有限要素で分割する。分割法について、3.1 節以下に述べる。生成できる有限要素

の種類は図1のとおりである。

- 2) 分割情報の定義
 - ・節点の粗密を制御するための情報
 - 幾何要素の頂点, 境界線, 境界面等に自動分割時の要素サイズを付加できる。
- 3) 荷重・拘束の定義
 - ・集中荷重, 分布荷重, 自由度拘束, 強制変位
 - 幾何要素全体や幾何要素の部分(境界線や境界面)に荷重・拘束を定義できる。
 - また, 個別に節点や有限要素に指定することもできる。
- 4) 要素特性・材料特性の定義
 - ・板厚, ヤング率, ポアソン比, 熱伝導係数, 参照温度など。
 - 要素特性も幾何要素全体に指示できる。また, 有限要素単体に指示できる。

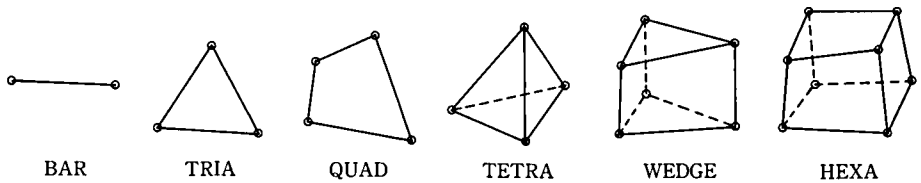


図1 有限要素種別一覧

3.1 曲面の自動分割

曲面の自動分割法^{[1][2]}は, Triquamesh 法, Delaunay 法, Quadtree 法, 柘原の方法等がある。本サブシステムでは3角形板要素への自動分割に柘原の方法, 4角形板要素への自動分割に Quadmesh 法を採用した。

3.1.1 3角形板要素への自動分割方法(柘原の方法)

- ① 対象となる曲面の境界線上に指定されたメッシュサイズで節点を発生させる(図2)。
- ② 節点を2次元の平面に投影する。
- ③ 平面を, 正方形のマスで区切り, 既存節点を各マスに入れる(図3)。
- ④ 指定されたメッシュサイズに応じて必要ならマス内部に節点を発生させる。
- ⑤ 左側に領域を見ながら境界上の節点をたどり, 境界上の1辺を底辺とする3角形板要素の候補点を選ぶ(図4)。
- ⑥ 底辺以外の2辺で新たに境界になりうる候補を残し, 内部方向に3角形板要素を作り, 境界がなくなるまでこの処理を繰り返す。
- ⑦ 平面上の節点を元の曲面に逆変換し, ラプラシアン法を使用して節点の平滑化をする(図5)。

3.1.2 4角形板要素への自動分割方法(Quadmesh 法)

- ① 対象となる面の境界線上に指定されたメッシュサイズを条件に節点を発生させる(図6)。
- ② 節点を2次元の平面に投影する。

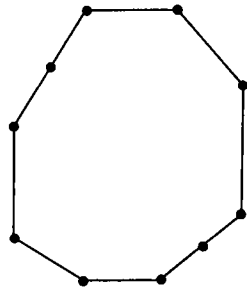


図 2 境界上の節点

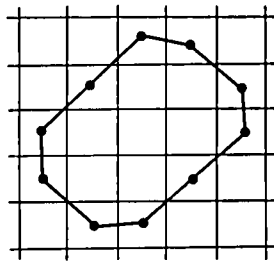


図 3 正方領域内の節点

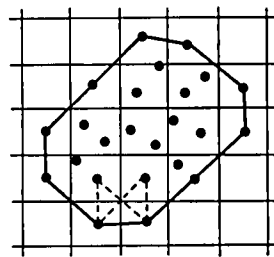
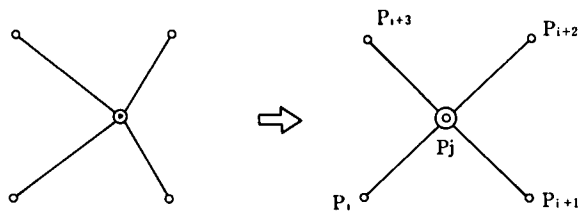


図 4 候補点



P_i : P_j に接続する節点
 X : 節点座標値
 $X_{pj} = (\sum X_{pi})/n$

図 5 節点の平滑化

- ③ 対象領域を、凸領域になるように分割できる領域分割線を選んで、分割線上に指定されたメッシュサイズで節点を発生させる (図 7)。領域分割線は、着目した節点と他の節点を直線で結び、この直線と境界線のなす角度 $(\theta, \theta, \theta_k, \theta)$ 、境界を囲む長方形領域の対角線の長さ L_0 と候補領域分割線の長さ L_1 直線の

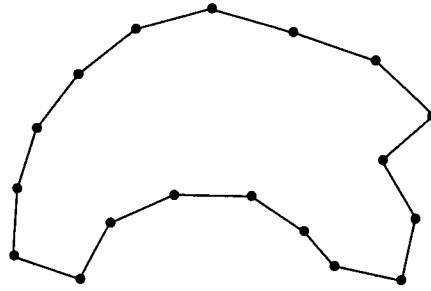
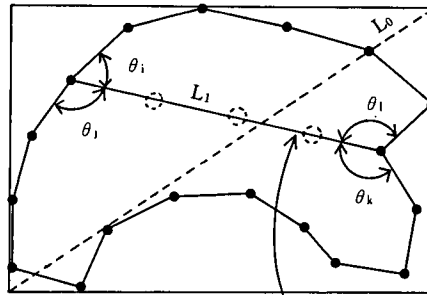


図 6 境界線上の節点



候補となる領域分割線

図 7 領域分割線

比などから決める。

- ④ 以上の操作を領域が6節点からなる凸領域になるまで繰り返し、図8に示すパターンで分類し有限要素を作成する。これにより4角形分割が終了する。
- ⑤ ラプラシアン法を使用して節点の平滑化を行う(図5)。
- ⑥ 2次元平面上の節点を逆変換して3次元曲面に戻す。

3.2 立体の自動分割

立体の自動分割には Octree 法^{[5][6]}、Delaunay 法などいくつかの方法がある。本サブシステムでは外接球法および Delaunay 法を採用した。Delaunay 法の特徴は、Delaunay 3 角錐の中に他の点が入らないことにあるが、複雑な形状に対して FEM ソルバにとって形状の良くない 4 面体要素を作成することがある。一方、外接球法の特徴は、モデルの表面形状が保証される、Delaunay 法よりも FEM ソルバにとって形状の良い(正 4 面体が最も形状が良い)4 面体ができる。また、複雑な形状でも確実に分割できるといった長所がある。しかし両分割法とも、分割するモデルに対して、「物体は複数個存在しても良いが物体同士が交差してはならない。」という条件が必要である。

3.2.1 外接球法

- ① 立体を覆っている曲面に栖原の方法を用いて 3 角形を発生させ表面とする(図 9)。
- ② 表面 3 角形を底辺として高さ h (h はメッシュサイズ)の 4 面体の外接球を作

	パターン1	パターン2	パターン3	パターン4
6 節点からなる領域				
凹領域				
内角が180°以下の領域				
一つの内角が180°の領域				
二つの内角が180°の領域				
三つの内角が180°の領域				

図 8 分割パターン

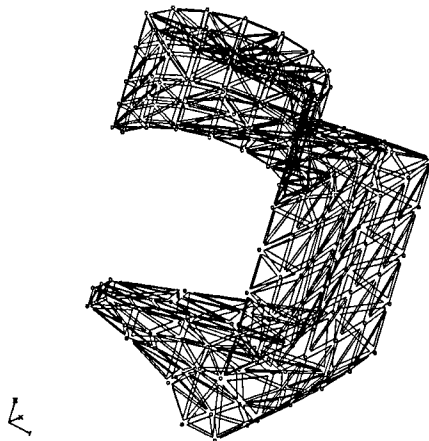


図 9 表面上の3角形要素

る (図 10)。

- ③ この外接球の内部に頂点となる節点があるかどうか調べる。候補節点がない場合、新しい点を作り頂点とする (図 11)。
- ④ 3角錐の底面以外の3角形を新たな表面とし、表面3角形を更新する。
- ⑤ 以上の操作をモデルの表面から内部方向に表面3角形がなくなるまで繰り返す (図 12)。

3.2.2 Delaunay 法

- ① 立体を覆う曲面に柘原の方法を用いて3角形を発生させ、表面とする (図 9)。
- ② 表面の全節点を含む一つの4面体 T1 を作り、T1 を含む外接球を計算し、中

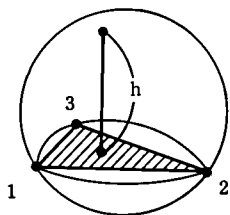


図 10 外接球

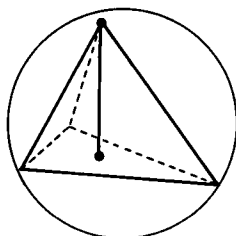


図 11 三角錐の頂点

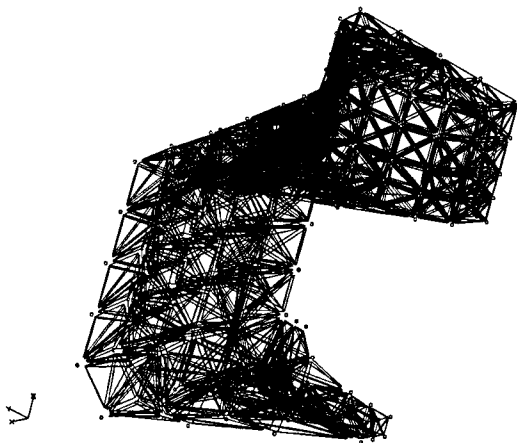


図 12 分割後のモデル

心と半径を求める (図 13 a).

- ③ 表面上の節点の一つを P とする ($m=1$).
- ④ 4 面体 T_i ($i=1, m$) のなかで, その外接球が点 P を内部点とする 4 面体を T_j ($j=1, n$) とする.
- ⑤ 4 面体 T_i から T_j を除去し, T_k ($k=1, h$) とする.
- ⑥ 4 面体 T_j の表面 3 角形 D_l ($l=1, w$) と節点 P から 4 面体 T_{dl} ($l=1, w$) を作る (図 13 b).
- ⑦ 4 面体 T_{dl} ($l=1, w$) の外接球の中心と半径を求める.
- ⑧ 4 面体 T_k ($k=1, h$) と新しい 4 面体 T_{dl} ($l=1, w$) を新しい 4 面体 T_i ($i=1, m$) とする. 但し, $m=h+w$.
- ⑨ ④から⑧の操作を全ての表面節点 P について繰り返す (図 13 c).

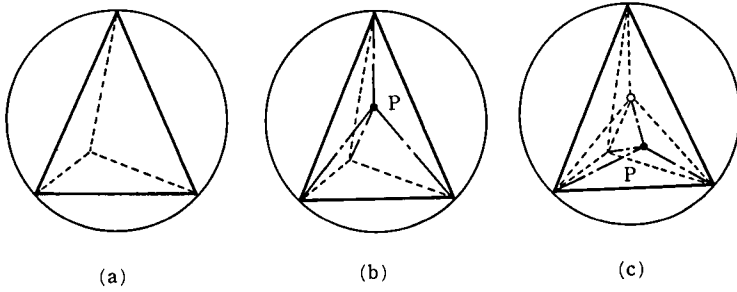


図 13 4面体

- ⑩ 4面体 T_i ($i=1, m$) から表面3角形の外側にある4面体を除去する。
- ⑪ 立体の内部に節点を生成し、③から⑩の操作を4面体の大きさが十分小さくなるまで繰り返す。

3.3 半自動分割機能

本サブシステムは、分割数指定によるマップドメッシュ法の有限要素分割機能も提供している。以下に、曲面、立体それぞれの分割方法を説明する。

3.3.1 曲面の半自動分割

- ① 3辺ないし4辺からなる曲面を、 uv 空間に投影し、さらに正規化された2次元のパラメタ空間に投影する(図14)。

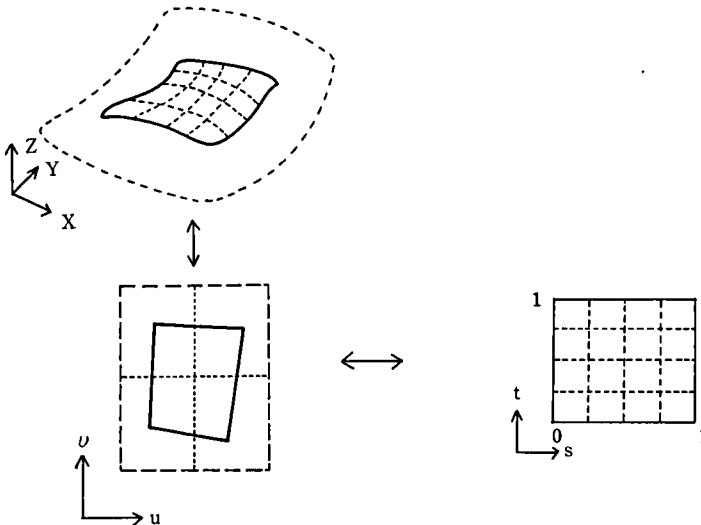


図 14 面上の節点発生

- ② パラメタ空間上で、指定された分割数に応じた規則格子を作る。
- ③ 規則格子の交点のパラメタ値を元の曲面に逆変換し節点を発生させる。
- ④ 節点を接続して指定された種別の有限要素を生成する。

3.3.2 立体の半自動分割

- ① 4面ないし6面で覆われた立体の各面について曲面の半自動分割の方法によ

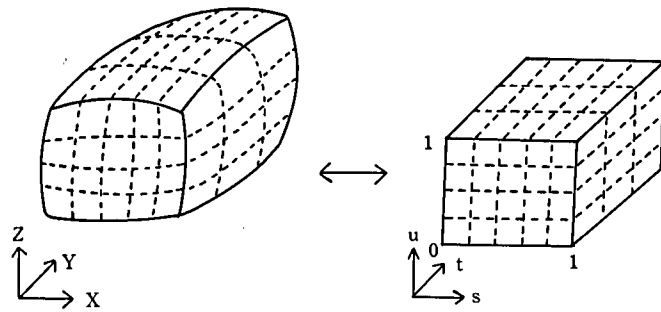


図 15 立体上の節点発生

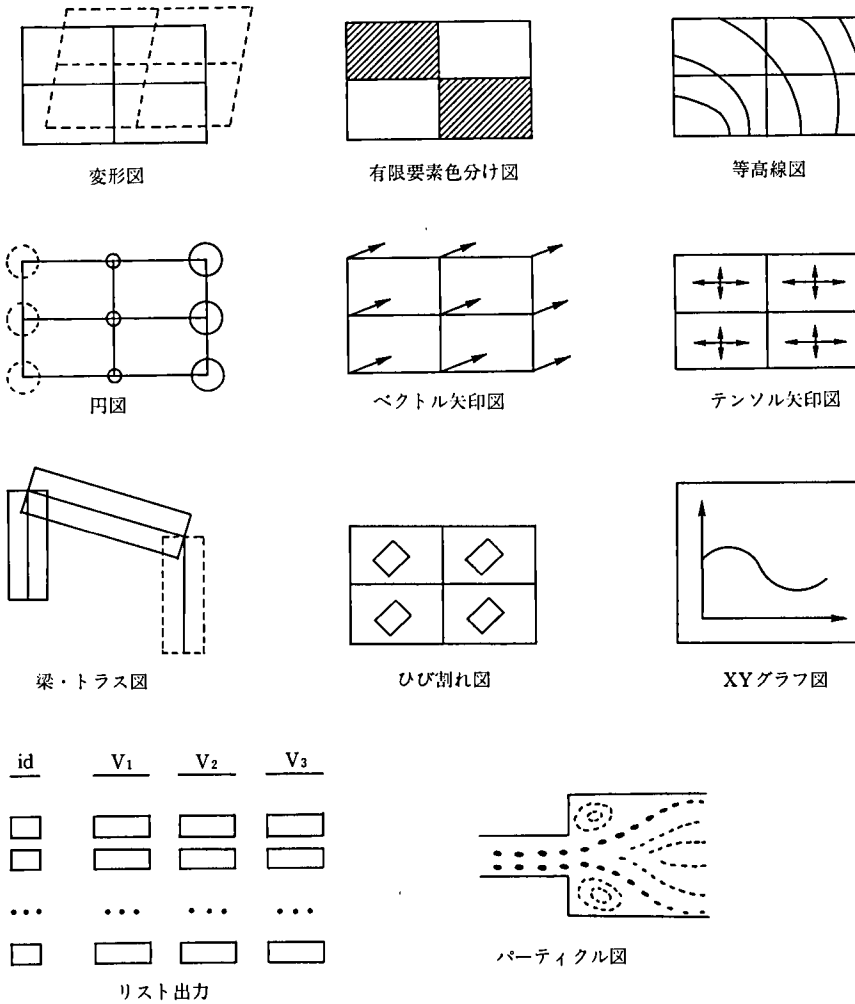
り4角形に分割し、各点を正規化された3次元のパラメタ空間に投影する(図15)。

- ② 向かい合う面上の対応する点同士を結び、立体内の線分の交点に節点を発生させる。
- ③ 立体内の節点を元の立体に逆変換する。
- ④ 節点を接続して指定された種別の有限要素を生成する。

4. ポストプロセッサ

ポストプロセッサには解析結果を多角的に評価できるように各種の評価図作成機能を備えている(図16)。これらの評価図は形状モデラで作成した幾何要素の上に重ねて表示できる。また、解析結果のみ保存している使用者に対しては、変換プログラムを通して中立結果ファイル形式に変換することにより本サブシステムで評価図を作成できる。評価図の種類を以下に示す。

- 1) 変形図……変位ベクトルを用いて、解析対象物の変形状態を形状図として表示する。変位ベクトルの内、並進成分のみを用いて、変形量を強調して表示する。
- 2) 有限要素色分け図……有限要素に関して計算されたスカラ量の値の分布状況を、多色で塗り分けることによって表示する。スカラ量の値域をいくつかの区間に分け、値が同一の区間内にある有限要素を同一のグループとして、区間に割り当てられた色で塗り分ける。
- 3) 等高線図……節点に関して計算されたスカラ量に対して、その値の連続的な分布状況を等高線により表示する。
- 4) 円図……スカラ量に対して、その値の分布状況を円によって表示する。円の中心が計算された位置を、半径がスカラ量を、線種または色が値の正負をそれぞれ表す。
- 5) ベクトル矢印図……ベクトル量について、その大きさと方向の分布状況を矢印で表示する。
- 6) テンソル矢印図……テンソル量について、その分布状況を矢印によって表示する。ベクトル矢印図の場合と同様に、テンソルが計算された位置に矢印を表示する。テンソルの成分を双頭の矢印によって表示し、矢印の方向がその成分の方向を、矢印の長さが大きさを、矢頭の向きが値の正負を表す。



変形図	変形状の表示
要素色分け図	有限要素の色分けによる表示
等高線図	コンター図による表示
円図	円による表示
ベクトル図	ベクトル量の矢印表示
テンソル図	テンソル量の矢印表示
梁・トラス図	梁の解析結果をトラス図にして表示
XY グラフ図	XY グラフによる表示
パーティクル図	拡散された粒子の追跡図
ひび割れ図	亀裂の方向と大きさを表した図
アニメーション	評価図のアニメーション表示
リスト出力	数値リストの表示

図 16 評価図一覧

- 7) 梁・トラス図……梁要素に対して出力される軸力，せん断力，ねじりモーメントおよび曲げモーメントを図示する。
- 8) XY グラフ図……スカラ量とスカラ量の相関関係を XY グラフ上の折れ線として表示する。
- 9) リスト出力……指示された項目をキーとしてソートし，指示された範囲にある

ものの数値を画面に表示する。

- 10) パーティクル図……流れの表示法として流れに乗った粒子の追跡図を表示する。粒子の色は温度等により定まる。
- 11) ひび割れ図……塑性変形した有限要素の亀裂の大きさと方向を表示する。
- 12) アニメーション機能……時刻歴応答や衝突シミュレーションなどの時刻や解析結果ごとに作図した評価図を保存し、連続して表示する機能。コマ撮り、昇順/降順の連続表示などができる。変形図、等高線図など任意の評価図が可能である。
- 13) XY グラフ値の入出力機能……この機能を使用して実験結果と解析結果のXY グラフ図の同時表示ができる。
- 14) 輪郭線表示機能……モデルの輪郭線を表示することができる。
- 15) n 倍表示機能……面対称位置への表示ができるので、対称形状を1/4 モデルで解析した場合でも1/1 モデルで表示できる。

5. 適用事例

当社の NASTRAN による乗用車エンジンのヘッドカバーの静解析の事例を示す。節点と有限要素の自動分割の結果を口絵 1 に、変位の等高線図を口絵 2 に示す。節点と有限要素はそれぞれ、節点数 980、有限要素数 713 である。

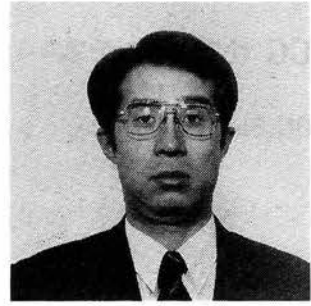
6. おわりに

本サブシステムでは、従来の APPEX に比べて機能の充実や操作性の改善を実現できた。しかし、CADCEUS の CAE サブシステムが目指す目標の実現への第 1 歩に過ぎない。最適化機能の開発や適合分割、6 面体要素自動分割、対辺不等分割などの機能の充実が今後の課題である。

-
- 参考文献 [1] K Ho-Le, Finite element mesh generation methods:a review and classification, Computer-Aided Design, Vol. 20, No. 1, 1988, pp. 27~38.
- [2] L. Sezer et al, Automatic Quadrilateral/Triangular Free-Form Mesh Generation for Planar Regions, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 32, 1991, pp. 1441~1483.
- [3] Jeffrey A. Talbert, Alan R. Parkinson, Development of an Automatic, Two-Dimensional Finite Element Mesh Generator using Quadrilateral Elements and Bezier Curve Boundary Definition, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.29, 1990, pp. 1151~1567.
- [4] James C.Cavendish, David A. Field, Willam H. Frey, An Approach to Automatic Three-Dimensional Finite Element Mesh Generation, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 21, 1985, pp. 329~347.
- [5] Mark A. Yerry and Mark S. Shephard, Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Modified-Octree Technique, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.20, 1984, pp. 1965~1990.
- [6] Mark A. Yerry and Mark S. Shephard, Automatic Mesh Generation for Three-Dimensional Solids, Computers & Structures, Vol. 20, No. 1~3, 1985, pp. 31~39.

執筆者紹介 毛利 明 (Akira Mouri)

昭和 29 年生。55 年工学院大学大学院機械工学専攻修了。
同年日本ユニシス(株)入社。CAE 関連プログラムの開発、
サポート業務を担当。現在、CAE システム部に所属。日本
機械学会会員。



CG サブシステム

CG Subsystem

大 平 昌 明

要 約 CADCEUS の CG サブシステムは、レンダリング機能、ペイント機能、画像データのファイリング機能と画像データの入出力機能から構成される。レイトレーシングやラジオシティ方式によるレンダリングでは、効率の向上と高い画像品質を実現した。特に材質感に関しては、各種材質の他への影響度を分析整理し、非常に実体感のある画像を実現している。レンダリングにより2次元化された画像に対するペイント機能では、画像の部品化・階層化やモーフィングにおけるベジェ曲線（曲面）による画像の補間により高い品質の画像処理が可能である。

Abstract The CG subsystem of CADCEUS consists of rendering, painting, image data filing and image data I/O handling capabilities. For rendering, the subsystem has realized improved performance and higher screen image quality by using ray-tracing and radiosity approaches. For the visuality of materials in particular, the analyzed degree of impacts on other materials has helped provide the highly realistic visualization of material surfaces. The painting function for the two-dimensional images created by rendering supports a variety of image editing operations by adopting a segmented hierarchical image data structure and Bezier curve (surface) interpolation for morphing.

1. はじめに

CADCEUS の CG サブシステムはモデラで生成された製品モデルに対し、実体感のある表示を行う画像処理システムである。製品モデルとして定義されている形状データと、形状データに対する材質などの属性や光などの環境条件をもとに、2次元の画像にするレンダリング機能と、2次元の画像に対して画像処理を行うペイント機能が主な機能である。以降に機能の概要と特徴的な処理やデータ構造について紹介する。

2. 機 能

CG サブシステムは、レンダリング機能、ペイント機能と画像データのファイリング機能、さらに画像データの入出力機能から構成される。

レンダリング機能は、3次元の形状データに対して色付けや影付け（シェーディング）、模様張り付け（テクスチャ・マッピング）を行う。

ペイント機能は、2次元の画像に対して画像合成や補筆を行う。以下に機能の概要を説明する。

2.1 レンダリング

色、透明度、シェーディングの方式、視点・光源の位置などの諸条件をもとに以下に示す画像処理を行う。なお、シェーディング方式には、ランバート(Lambert)、フォン(Phong)、ブリン(Blinn)、クック・トーランス(Cook Torrance)、レイトレーシング(Ray tracing)などがある。

- Phong 鏡面反射
- レイトレーシングによる映り込みやガラスによる歪み表現
- 背景画像と色の混合による半透明表現
- 疑似的な映り込みを表現して金属的な反射効果を出すリフレクション・マッピング
- 疑似的な屈折を表現してガラス的な歪み効果を出すリフラクション・マッピング
- 輪郭部分のギザキザ（ジャギ：jaggy）を滑らかにするアンチエイリアシング
- 本影・半影の表現
- 背景画像との合成

2.2 ペインティング

ペンの色、線種、形（円、正方形）、太さ、素材（透明度）などの諸条件をもとに以下に示す画像処理を行う。

- 画像の回転、変形、拡大、縮小、鏡像、複写
- 複数の画像（下絵画像、部材画像）の合成
- 色調を調整するコントラスト強調、階調補正、ネガポジ反転
- 画像のノイズ除去
- 輪郭の強調、単色化、アンチエイリアシング
- ベクトル図形の描画

2.3 画像ファイリング

画像に識別子、タイトル、日付け、説明文、検索キーなどを付与し種々の検索を可能にしている。

2.4 入出力

マッピングや画像合成のための画像をスキャナなどの入力装置で読み込む機能と、画像処理の結果をカラープリンタなどに出力する機能からなる。

- 入力装置：スキャナ、電子カメラ、ディスク、テープ
- 出力装置：カラープリンタ、ディスク、テープ

3. レイトレーシング

レンダリングは3次元の形状データに光を当てた状態を作り出し、画素の色や濃淡の計算をして現実感のある画像を作り出す機能である。言葉の意味ではレンダリングは精密描画を意味し、シェーディングは陰影付けを意味する。レンダリングの中から代表的なレイトレーシングの材質感について紹介する。

レイトレーシングの一般式は次のとおりである。

照度 I は

$$I = K_s \cdot P_s + K_d \cdot P_d + K_a \cdot P_a \quad (3-1)$$

ここで、

I : 照度

K_s : 鏡面反射係数

Phong 式の場合、 K_s は鏡面反射指数に比例する。

K_d : 拡散反射係数

Ka：環境反射係数

Ps：鏡面反射光

Pd：拡散反射光

Pa：環境光

である。

レイトレーシングの計算式の係数が材質感の表現に与える影響を表1に示す。

表 1 照明モデルと材質感と係数

材質感と係数 照明モデル	材質表現の特徴 (鏡面反射成分のモデル化に特徴がある)	物体の色	拡散反射係数	鏡面反射係数	屈折率	分布標準偏差	打球偏平率	反射小面勾配	透過率	吸収率	データ	張り付け強度	張り付けサイズ
Phong	感覚的光沢	○	○	○									
Blinn	物性的光沢	○	○	○	○	○	○						
Cook	光学的光沢	○	○	○	○			○					
ライトレフティング	反射・透過	○	○	○	○				○	○			
テクスチャマッピング	表面模様										○	○	○
ノーマルマッピング	凹凸										○	○	○
ラジオシティ	相互反射	○	○	○	○				○	○	○	○	○
ボリュームマッピング	内部模様										○	○	○

さらに、材質感が影響される項目を表2に示す。

口絵1「ビンと水と氷」は、ガラスの容器に水と氷と褐色の液体を入れた様子を、レイトレーシングで反射・屈折を繰り返して表現した例である。口絵2「スピーカと影」にレイトレーシングによるハイライトの表現と影が半影と本影に分けられてぼけて見える例を示す。

4. ラジオシティ (Radiosity) 法

ラジオシティ法は放射熱伝導理論 (Thermal theory for radiative heat transfer : 物体相互の熱伝導作用の理論) をもとにして、光のエネルギーの相互作用を仮定している。1978年にシーゲル (Siegel) が色の決め方についてこの方法を提案し^[4]、1984年にゴラール (Goral)^[5]、1982年に中前^[6]、1983年にカジャ (Kajiya)^[7]によりコンピュータ・グラフィックスで使われ、1988年にミッチェル (Michael)、シェンチェン (Shen-

表 2 材質感と影響要素

材質感	影響要素			光り方		表面		
	透過	反射	光沢	色彩	模様	凹凸	形状	
水	○	○		○				
氷	○	○						
ガラス	○	○				○		
アクリル	○	○		○				
プラスチック（透明）	○	○	○	○				
プラスチック（不透明）		○	○					
ラバー（ゴム）			○	○				
磁器		○	○					
金属		○	○	○				
木材					○			
大理石					○			
繊維					○	○	○	
皮革					○	○	○	
紙							○	

chang), ジョン(John), ドナルド(Donald)などにより計算時間を削減した実用的な方法が発表された^{[8][9]}。この手法の特徴は光源と物体の区別がなく、観察者が光源と物体を見ることができる。落ちついた色調の穏やかな表情の画像が表現できる。次の式はエネルギー平衡状態にあるパッチ*i*（ポリゴン平面として良い）のラジオシティ・エネルギーを表している。エネルギーは単位面積、単位時間あたりの量である。式の第一項は自分自身の放射エネルギーで、第二項は自分自身以外のパッチから受けるラジオシティ・エネルギーの総量である。

$$B_i \cdot A_i = A_i \cdot A_i + P_i \sum_{j=1}^n B_j \cdot A_j \cdot F_{ji} \quad (4-1)$$

B_i : パッチ*i*のラジオシティ・エネルギーである。

A_i : パッチ*i*の面積である。

F_{ji} : パッチ j からパッチ i に達するエネルギーの割合である。

p_i : パッチ i の反射率である。

n : パッチ数である。

これをパッチ i とパッチ j の対称性を考慮して、

$$A_i \cdot F_{ij} = A_j \cdot F_{ji}$$

これを (4-1) に代入して、

$$B_i = E_i + p_i \sum_{j=1}^n B_j \cdot A_j \cdot F_{ji} \quad (4-2)$$

ここで、 $E_i = A_i \cdot A_i$

さらに、パッチ i からパッチ j の方向に放射されるラジオシティ・エネルギーは

$$B_j = p_j \cdot B_i \cdot F_{ji}$$

であるので、さらに次のように改良できる。

$$B_j = p_j \cdot B_i \cdot F_{ij} \cdot A_i / A_j \quad (4-3)$$

この式の特徴は、 F_{ji} の項を無くすことにより計算の作業領域を少なくできることである。

さらに、本サブシステムは前述の方程式を直接解くのではなく、光束を光源から追跡し、反射光追跡処理が影処理を多くするようにして収束を速めている。また、3次元形状を透視変換後に計算し、計算量を少なくしている。

口絵3「椅子とホイール」は壁の色が相互に反射して、壁が互に変色している例で、プラスチック、アルミ、木材の材質感が表現されている。この処理は並列処理により、処理時間を大幅に短縮している。

5. 画像のデータ構造

ペイント機能の一つであるレイアウト機能では、機械の組立部品のように、1枚の画像はいくつかの部品となる画像が組み合わせられて（配置されて）構築されると考える。配置とは位置決めだけでなく、回転、拡大、縮小、透明度などの加工も併せて行うことができる。つまり、画像は配置される画像と配置する時の加工情報の対でレイアウトされ、加工された画像どうしをさらに加工（合成）して新たな画像を合成できる（図1）。

6. モーフィング (morphing)

リタッチの代表的な機能である2次元モーフィングについて説明する。モーフィングという言葉はメタモルフォーゼ (metamorphosis 変形) という言葉に由来する。2次元モーフィングとは、ある画像から他の画像へと連続的に変形や補間を行う機能である。本サブシステムでは変形前の画像に格子状の網目を割り付け、その網目で縁取られる四辺形を変形・変色させる。さらに、網目は3次ベジエ曲線式で表現して、この曲線の端点や制御点の移動により画像を連続的に変形させる。たとえば、 $M \times N$ の網目をピンの画像にかぶせ、ピンの輪郭形状に合うように端点や制御点を移動して、網目を当てはめる。網目の変形や微調整はラバーバンド (rubber-band: ゴムのバンドを操作するように伸び縮みする) で処理する。この方法を拡張して、双3次ベジエ曲面を

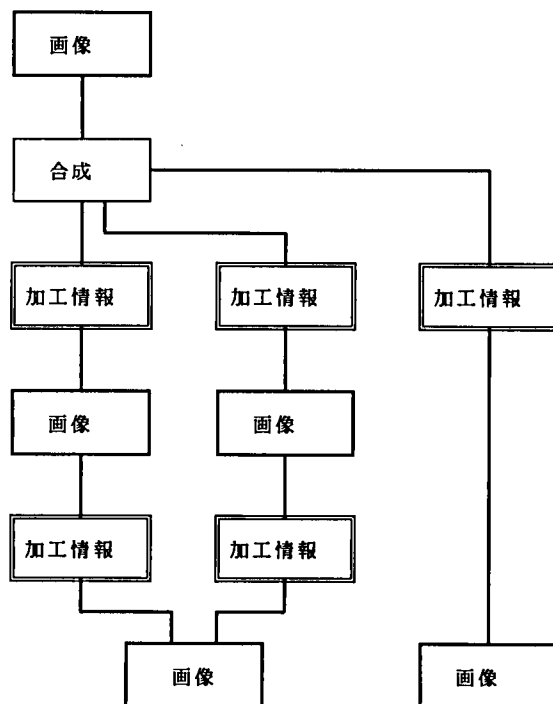


図 1 画像のデータ構造

利用することにより網目の中ほどの画素も移動変換することができる。変換後の画素の色を求める時に、変換前の画素周辺の画像に対して、それらの色に重み付けを行う方法で実現している。この方法は平滑化フィルタを利用した方法で、印刷物を作る時の網点処理（印刷物は網状の点群で画像の濃淡を表現する。この網模様を作り方のこと）と同じ方法である。

モーフィングの結果例を口絵 4「ビンのモーフィング変形例」に示す。

7. 画像の疑似濃淡法

フルカラー（一般に $1677 \text{ 万} = 2^{24} = 2^8 \times 2^8 \times 2^8$ 色、光の三原色の赤・緑・青ごとに 2^8 色で、これらの組み合わせである）が表示できない表示装置にフルカラーの濃淡画像を再現したい場合に、画像内のデータの割合を変化させ階調を再現させる方法を面積階調法^[2]という。

本サブシステムでは疑似的にフルカラーを表現するために面積階調法と限定色表示方式とを実装している。面積階調法には各種の方法（表 3 面積階調法の分類）があるが、本サブシステムではディザ法の平均誤差最小法を採用している。この方法にすると縞模様がでるが、処理が速く、赤、緑、青の割合を画像の状況により変え易い利点がある。

口絵 5 に「フルカラー画像の疑似濃淡化」の例を示す。

表 3 面積階調法の分類

方 法	説 明
濃度パターン法	画素を分割した空間の濃淡の面積率で表現
ディザ法	
条件付決定法	
平均誤差最小法	画素のしきい値と周辺画素の誤差の重み付け平均をとる
平均値制限法	画素のしきい値と周辺画素の平均を用いる
グレイスケールしきい値法	画素の濃度を周辺8画素と一定濃度値を比較し2値化
独立決定法	
乱数発生型ディザ法	画素毎に乱数を発生させ、その値をしきい値として2値化
組織的ディザ法	画素濃度と分割空間のしきい値と比較し2値化
画素分配法	
マトリクス内画素分配法	原画像をマトリクス分割し、濃度値の大きい画素から順に黒点を分配
多段分割量子化法	原画像の濃度総和を求め画像の四分分割を繰り返し2値化

8. お わ り に

CG分野は最近の計算機のめざましい能力向上により、現実感のある画像処理の世界を実現可能にしてきた。また、システムが扱う画像の大きさはこの1年で4倍以上の大きさになり、今まで静止画で見ていたCAEの解析結果などをアニメーションで表現することも盛んである。さらに、ゲームなど娯楽の分野でもCGの技術は盛んに取り入れられ、要素技術を知らなくても、容易に道具が入手可能な傾向にある。しかし、より高性能で高精度の画像処理の追求には要素技術を正確に捕らえてブラック・ボックス化しないための努力が必要であると考え、今後も要素技術の研究・開発を継続的に続けていきたい。

- 参考文献 [1] 大平昌明, 最新ビジュアルライゼーション技術の探求とCADCEUS/CG, ユニシス技報, 第37号, 1993年5月発行, pp. 146~165.
 [2] 高木幹雄, 下田陽久監修, 「画像解析ハンドブック」, 東京大学出版会.
 [3] J. D. Foley, Computer Graphics, Addison-Wesley Publishing Company.

- [4] Robert Siegel and John R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, Hemisphere Publishing, 1978.
- [5] Cindy M. Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg and Bennet Battail, Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces., Computer Graphics (Proc.SIGGRAPH 84), vol. 18, no. 3, pp. 213~222, July 1984.
- [6] 西田, 中前, 複数光源による照明分布のカラー透視図表現法, 照明学会誌, no. 66, 1982, pp. 150~156.
- [7] Kajiya, James T., New Techique for Ray Tracing Procedurally Defined Objects, Computer Graphics, (Proceeding SIGGRAPH 83) vol. 17, pp. 91~102, 1983.
- [8] Michael F. Cohen and Donald P. Greeberg, A Radiosity Solution for Complex Environments., Computer Graphics(Proceeding SIGGRAPH 85) vol. 19, no. 3, pp. 31~40, July 1985.
- [9] Michael F. Cohen, Donald P. Greenberg, David S. Immel, Philip J. Brock, An Efficient Radiosity Approach for Realistic Image Synthesis, Computer Graphics and Applications, vol. 6, no. 3, pp. 26~35, Mar. 1986. (邦訳: 日経 CG)

執筆者紹介 大平昌明 (Masaaki Ohhira)

昭和23年生, 45年日本大学文理学部応用数学科卒業, 同年日本ユニシス(株)入社. UNICAD/SOLIDなどのCADやCGシステムの開発を担当, 現在, CGシステム部部长.



CADCEUS のフレームワーク

The Framework of CADCEUS

中 辻 等, 笹 尾 忍, 古 澤 裕 一
板 東 司, 小 竹 正 之

要 約 CADCEUS のフレームワークは, CAD, CAM, CAE, CG およびデータ交換などのアプリケーションの共通基盤ソフトウェアである。アプリケーションおよびハードウェアからの独立性と応答性が設計要件である。アプリケーションとハードウェアからの独立性は, データモデルの三階層化, 標準グラフィックライブラリの採用, 対話操作とカスタマイズの統合制御などの実装技術で解決した。応答性については, データベースの高速化, 表示モジュールの高速化により CADCEUS システム全体の効率に貢献している。

Abstract The framework of CADCEUS is infrastructure software commonly used for applications such as CAD, CAM, CAE, CG and data exchange. For its design requirements, importance has been attached to its independency from both applications and hardware, as well as to its higher performance in response. The independency from applications and hardware has been solved through the new availability of three-layered data models, the adoption of a standard graphic library and the implementation of integrated control for interactive operations and customization. Quicker response has been achieved through the improvement in speed of data base management and display module manipulation, thus altogether contributing to the improved performance of the CADCEUS system as a whole.

1. はじめに

CADCEUS のフレームワークは, CAD, CAM, CAE, CG およびデータ交換など CADCEUS アプリケーションの共通基盤ソフトウェアである。フレームワークを共通化することにより統合されたデータベースと統一的な操作環境を実現している。フレームワークは, データベース, モニタ, 表示の各モジュールから構成される (図 1)。

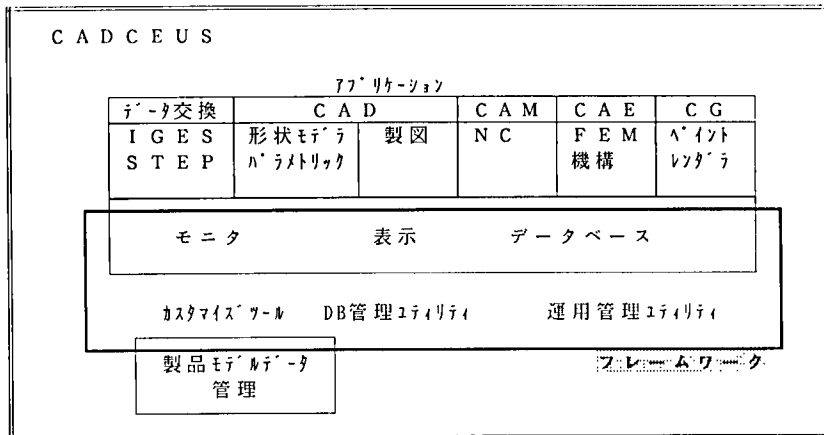


図 1 ソフトウェア構成

以降にフレームワークの各モジュールの概要と CADCEUS の操作性を左右するフレームワークの効率についてデータベースと表示を中心に説明する。

2. フレームワークの構造

フレームワークはアプリケーション共通であるが、各アプリケーションには使用者が必要とする機能の最小限が実行可能になればよい。CADCEUS ではアプリケーションを別プロセスとして分離し、CAD, CAM, CAE など各アプリケーションごとに最小限のプログラムを実行可能にしメモリなどの資源を有効利用している。

フレームワークは、データベース、モニタ、表示の各モジュールから構成される(図2)。モニタ・モジュールと表示モジュールをあわせて対話部と呼ぶ。

データベースは論理モデルから物理モデルまでを3階層モデルで表現している。モデルの階層に対応してデータベースのモジュール構成も3階層である。

表示モジュールは、幾何要素等をグラフィックス上に表示する表示出力部(VGIF)、およびメニューの入出力、ウィンドウ制御、入力制御を行うツールキット部(VGUI)からなる。

モニタ・モジュールはスクリプト・マネージャを中核として、コマンドの入力操作のためのアイテム・ハンドラ、アプリケーション・コマンドとのインタフェースをとるコマンド・マネージャ、ツールキットとのインタフェース部(アテンション・マネージャ)などからなる。コントローラはシステム全体の制御を行う。履歴再実行エンジンは、パラメトリック・モデリングでの履歴採取/再実行などの履歴の蓄積、検索および整合管理を行う。

アプリケーション・プロセスとフレームワーク・プロセス間の通信は、通信マネジ

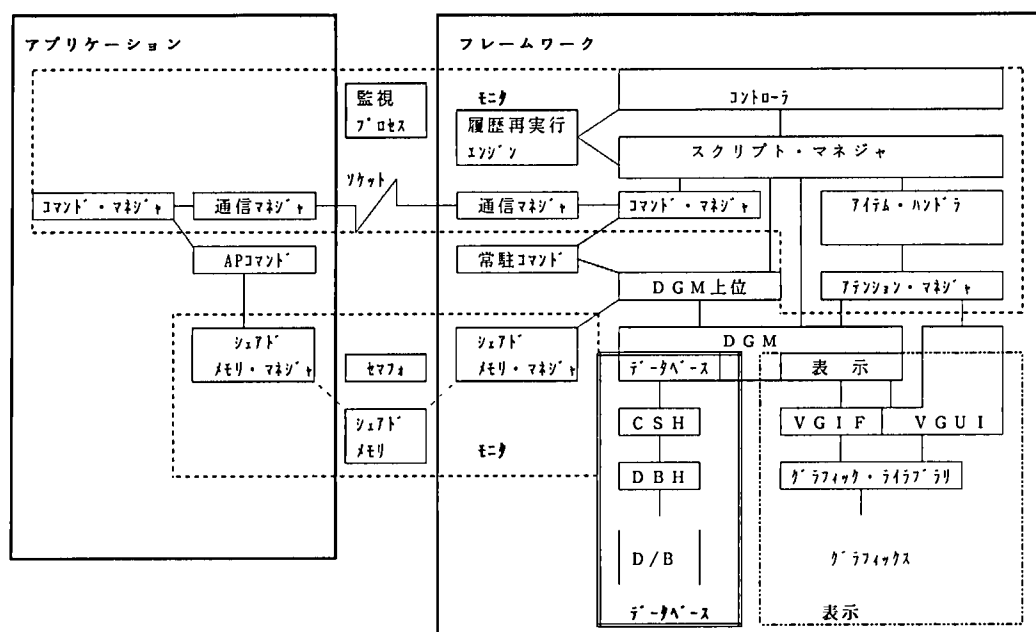


図2 フレームワークの構造

ャがソケットを使用して行う。大量データはシェアド・メモリを介してプロセス間で相互に参照するが、セマフォを利用して排他制御を行う。なおアプリケーション・コマンドにはこれらの機構は隠蔽されている。

2.1 データベース

CADCEUS で取り扱うデータモデルと、これを操作するデータベース系モジュールのソフトウェア構成について説明する。

2.1.1 データモデル

CADCEUS のデータモデルは、図 3 に示す 3 階層のデータモデルとして実現されている。

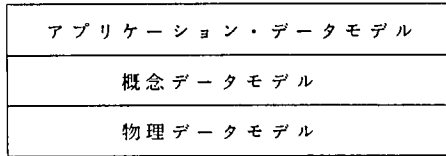


図 3 3階層データモデル

1) アプリケーション・データモデル

CADCEUS で取り扱う全てのデータであるワークスペース、オブジェクト、グループ、レイヤ、座標系、幾何要素、幾何要素間関係、配置、使用者属性、などのデータであり、以下の特徴がある。

- ① 製品モデルを構築している。
- ② 設計から生産準備までの全ての応用分野を通じて一貫したデータモデルで実現している。
- ③ サーフェス/ソリッドなどのモデリング形態で共通したデータモデルである。
- ④ 形状特徴によるモデリングを実現している。
- ⑤ 並行設計作業を支援している。

ここで、ワークスペースは使用者の作業空間であり、オブジェクトはワークスペース内の個々の部品または図面と対応させることを想定している。また、オブジェクト内の個々の要素図形は、幾何要素や加工要素などの実データである (図 4)。

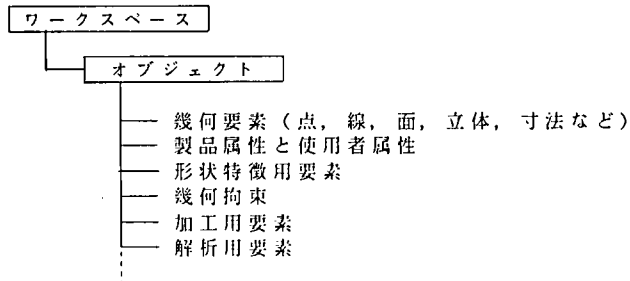


図 4 オブジェクトの構成データ

2) 概念データモデル

アプリケーションや、ハードウェア、オペレーティング・システムに依存しない概念上のデータモデルであり、以下の論理的なレコードから構成されている。

- ① ファイル：要素，集合，述語を格納する領域。
上位データモデルのオブジェクトがこれに相当する。
- ② 要素：論理的に 1 個の要素として識別されるレコードであり，1 個の可変長属性値と複数個の固定長属性値，および外部名を持つことができる。
上位データモデルの幾何要素，加工用要素などがこれに相当する。
- ③ 集合：要素，あるいは集合の集まりを表現するレコードであり，1 個の可変長属性値，複数個の固定長属性値，外部名，およびメンバとなる要素または集合を持つことができる。
上位データモデルのレイヤ，グループ，座標系などがこれに相当する。
- ④ 述語：要素間，集合間，および要素と集合間の関係を定義するレコード。
上位データモデルの要素間の関係がこれに相当する。

3) 物理データモデル

以下の物理レコードにより構成される。

- ① ファイル：レコード，述語表，外部名表，テーブルレコードを格納する領域。
- ② レコード：物理的に 1 個の連続する領域を表し，可変長の属性値や，外部名を持つことができる。
- ③ テーブルレコード：連続するレコードの識別子に対応する固定長の配列領域。
- ④ 述語表：一定個数の項*の集まりを表現するレコードであり，B-tree 方式のレコード群として実現される。
- ⑤ 外部名表：外部名の集まりを持つレコードであり，外部名からレコードを検索する場合に用いる。

上位データモデルは，これらの組み合わせで実現される。たとえば，集合は，レコード（集合の属性値とメンバの識別子群），外部名表（集合名），および述語表（メンバとオーナの関係）で実現される。

2.1.2 ソフトウェア構成

CADCEUS のデータベース系フレームワークのソフトウェア構成を図 5 に示す。

DGM (Database and Graphics Manager) は，アプリケーション・データモデルを処理する層である。DGM の役割は，CADCEUS のデータ操作，データモデルの整合性の維持，データベースと表示の整合性の保証である。ここで取り扱う操作対象は，前述のモデルの全てと，ポート，ビューなどの表示系での操作対象である。

CSH (Conceptual Schema Handler) は，概念データモデルを処理する層である。アプリケーション・データモデルとの対応は，外部スキーマ**により定義する。CSH

* 項：識別子，整数値，および倍精度実数値

** 外部スキーマ：外部スキーマ CSH では，スキーマコンパイラと呼ぶ専用の DDL (Data Definition Language) を用意している。

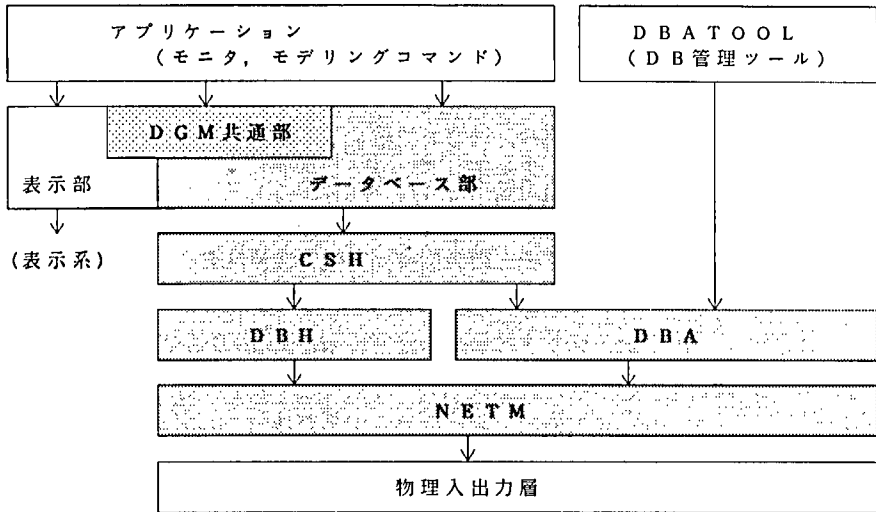


図5 データベースのモジュール構成

は、アプリケーションに固有な上位層（ここではDGM）とハードウェアやオペレーティング・システムに固有な下位層（DBH）の仲立ちを行うほか、

- ・汎用性の高い集合概念
- ・高速な述語処理
- ・容易な外部スキーマの拡張

等の特色があり、CADCEUS以外のアプリケーションからも有効に利用できる。

DBH (DataBase Handler) は、物理データモデルを処理する層であり、レコード、述語表などを高速に処理する。

DBHには、

- ・大きさに制限のないレコード
- ・レコードの更新や、データベースの圧縮時にも不変な識別子
- ・識別子だけでなく整数値や倍精度実数値を持つことができる述語表
- ・UNDO/REDO*

などの特色がある。これらは、CADCEUSだけでなく一般のCADのデータモデルの要請にも対応できる。

DBA (DataBase Administrator) は、データベース全体の管理を行うモジュールであり、ワークスペースの生成、保存、COLD START, WARM START**などの処理を行う。

NETM (Network Module) は、ネットワーク管理および仮想ファイルの入出力を行う層である。

図6に、2点間の距離寸法を創成するコマンドを例に、各階層での振る舞いを示す。

* UNDO/REDO: データベースをコマンドの実行単位ごとに戻す (UNDO) または、進める (REDO)。

** COLD START, WARM START: CADCEUSの開始方法には、保存データから実行を開始するCOLD STARTと、前回実行時の作業データから開始するWARMSTARTがある。

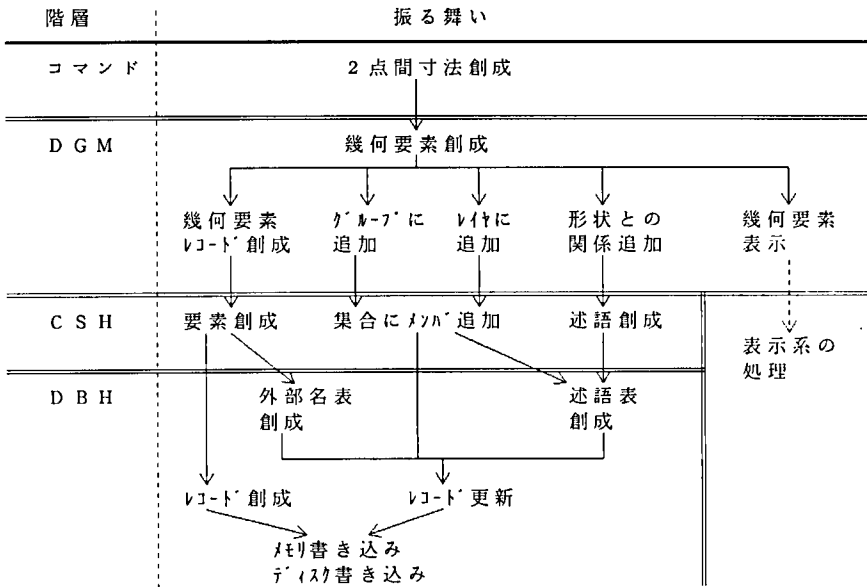


図 6 各階層での振る舞い

2.2 表示

CADCEUS の表示系フレームワークの構成と、オープン化への取り組み方について説明する。

2.2.1 ソフトウェア構成

CADCEUS の表示系フレームワークのソフトウェア構成を図7に示す。

表示系の下位モジュールは、主にメニュー操作やウィンドウ操作などのユーザーインタフェースをつかさどるモジュール (VGUI: Virtual Graphical User Interface) と、ウィンドウ内のグラフィック画面への図形表示をつかさどるモジュール (VGIF: Virtual Graphics Interface) から構成される。VGUI/VGIF は、装置独立、アプリケー

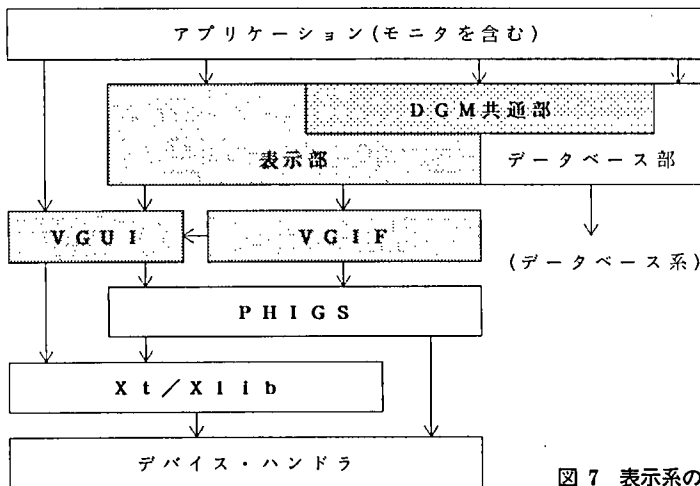


図 7 表示系のモジュール構成

ション独立なインタフェース群からなり、CADCEUS の可搬性を確保している。

VGIF の下位のグラフィック出力 API (Application Program Interface) には PHIGS (Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System: ISO/IEC 9592) を採用し、また VGUI の下位のウィンドウ操作 API として Xlib および Xt (X Toolkit Intrinsic) を採用している。

CADCEUS のデータ構造を実装し、アプリケーションからのデータ操作/表示操作を受け持つモジュールが、DGM (Database and Graphics Manager) である。DGM は、オブジェクトの創成/削除/オープン/クローズから幾何要素の創成/変更/削除まで、CADCEUS の扱うすべてのデータ・モデルへの操作を提供し、データベースの状態と表示の状態を矛盾なく維持/整合管理する。なお、DGM は共通部/表示部/データベース部の三つのサブ・モジュールから構成されるが、呼び出し側ではどのサブ・モジュールを使用しているのかを意識する必要はない。

2.2.2 グラフィック・ライブラリとしての PHIGS

CADCEUS では、プログラムの可搬性を考慮して、グラフィック出力 API に PHIGS を採用している。以下では、PHIGS をグラフィック・ライブラリとして使用する上での留意点について述べる。

1) 標準化と PHIGS

PHIGS は、ISO で定めた 3 次元グラフィック・インタフェースの世界標準 (IS) であり、PHIGS に準拠すれば可搬性の確保を期待できる。しかし、標準外の機能 (ESCAPE ファンクション) を公認していることや、PHIGS を提供している各社で規格を拡大解釈している例も見受けられるため、PHIGS 準拠であれば、再コンパイルだけで異なるハードウェアに移植可能なわけではない。また、PHIGS の仕様は広範で自由度が高い分、効率面で不利な面が多い。

CADCEUS では、最下層の API として PHIGS を採用しているが、将来的なハードウェア可搬性を考慮して、アプリケーションから直接 PHIGS を呼び出すことは避けている。すなわち、アプリケーションと PHIGS の間に汎用的なグラフィック・インタフェース層 (VGIF) を設定し、PHIGS の各種方言や異なるライブラリとの接続に備えている。

2) PHIGS の評価

PHIGS は汎用性が高く、また NURBS プリミティブやシェーディングなど比較的最近の技術にもとづく機能を提供している。このため、CAD/CAM に限らず、多種多様な 3 次元アプリケーションのグラフィック・ライブラリとして採用することができる API といえる。しかし、実用上は、以下のような汎用的であるがゆえの弱点がある。

- ① 同じ目的を達成するための選択肢が多すぎる。たとえば、可視性や色などの表示属性を制御する方法がいく通りもあり、どの方法が最適なのか、開発者が頭を悩ますことがある。
- ② 「エレメント・ポインタ」という考え方が、CAD/CAM アプリケーションに馴染みにくい。CAD/CAM の特性として、一度絵を出したらそのままということとは非常にまれで、修正や削除が発生することを考慮しなければならない。そ

の操作は通常データベース上の識別子が検索キーとなるので、PHIGS の使用者が識別子とエレメント・ポインタとの間の翻訳をしなければならなくなる。エレメント・ポインタは識別子のように絶対的なものでないため管理が煩雑になる。

- ③ ストラクチャ*構造の組み方しだいでは、画面の再描画時間およびストラクチャ内の操作時間が大きく異なる。これまでの経験では、
- ・ストラクチャ数が多いと、再描画時間がかかる。
たとえば、現在 CADCEUS では 10 要素で 1 ストラクチャとしているが、これを 1 要素 1 ストラクチャとすると、2~4 倍再描画効率が低下する。
 - ・可視性、検出性、強調性の制御にフィルタ機構**を用いると、再描画速度が著しく低下する。特に、描画量を減らすために可視性をオフにしたのに再描画速度が逆に低下するのでは、CAD/CAM システムとしての有効性は低い。
- ④ 表示画面の制御方法に、全体書き換えや部分書き換えが用意されているが、部分書き換え時の属性変更や消去の処理などは、実装方法に依存しがちである。③で示したように、再描画時間にかなり注意しても、設計対象が複雑となり、増大する一方の表示データ量では、画面更新のたびに全体書き換えを行う訳にはいかないで、ハードウェアごとの適切な制御が必要となる。
- ⑤ 2次元のプリミティブも存在するが、実質的には3次元の描画重視の仕様のため、2次元の図形を効率良く表示することができない。
- ⑥ 画面への出力には、必ずストラクチャを介さなければならない。一時的なメッセージ表示などでもわざわざストラクチャを作成し、ストラクチャ構造にちなぎ込まなければならないので、煩雑であり、また効率が良くない。
- ①②④については使いにくさ、分かりにくさの問題であり、開発者が工夫すれば、アプリケーションとしては大した問題ではないかも知れないが、可搬性の面では問題を生じる部分である。また、③⑤⑥の表示効率の問題は、CAD/CAM システムでは障害となる。

3) CADCEUS での PHIGS の使い方

PHIGS の問題点を踏まえ、CADCEUS が採用している VGIF のインタフェースは、以下の点を特に考慮して設計されている。

- ① PHIGS の自由度に制限を設けること。とくに、表示データの構造化を行うこと。

表示データ構造には、

- ・XY や YZ などの投影図を表現するためのビュー
- ・CADCEUS のオブジェクト N 階層を展開するための配置空間とインスタンス

* ストラクチャ：PHIGS で表示対象を格納する箱。ストラクチャからストラクチャを“参照 (Execute)”することができ、ストラクチャを組み合わせて階層的な表示データ構造を作成することができる。
SunPhigs の場合、GA 8000 シリーズの PEX では、150 要素で 1 ストラクチャとしている。

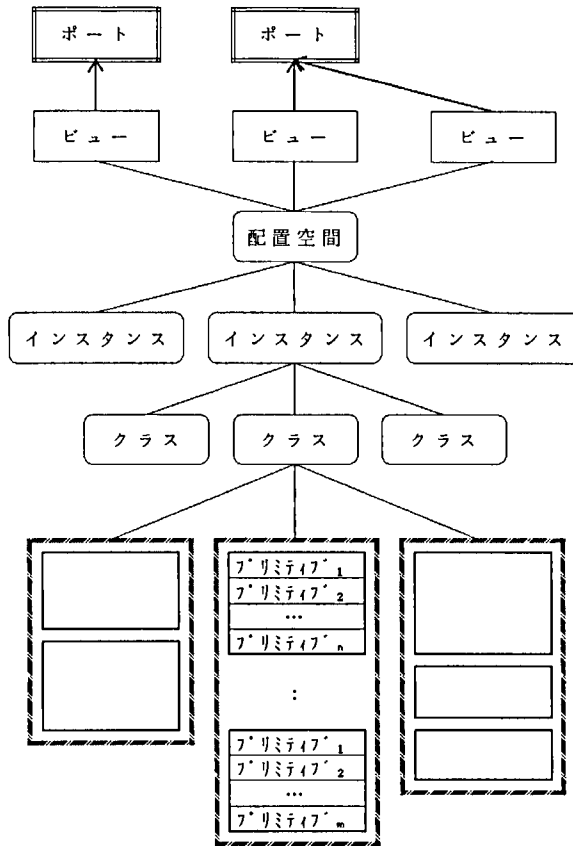
** フィルタ機構：PHIGS では、ネーム・セット (Name Set) という集合と、これらに対するフィルタ (Filter) の機構で、可視性、検出性、強調性を制御する。

タンス

- 要素の区分ごとの構造化のためのクラス
- 2)の③の問題を解消するためのエレメント・ブロック
- 1要素を表現するためのエレメント

という階層構造を設けた (図 8)。

- ② 表示構造の操作は、識別子で統一すること。
 ①で設けたそれぞれの構造単位の操作は、「エレメント・ポインタ」ではなく、それぞれに付与することのできる識別子で行えるようにした。
- ③ 表示属性に関して必要十分な設定単位および操作方法を提供すること。



凡例 :

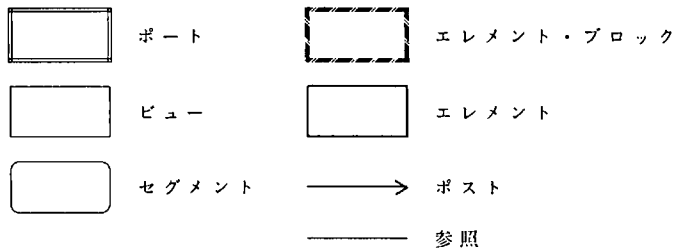


図 8 VGIF の表示構造

エレメント単位での可視性、色、線属性（線種、線太さ）の設定・変更を可能とし、またクラス単位での可視性の制御を可能とした。

4) PHIGS と PEX

今までは、X ウィンドウ*上での PHIGS の実装は、各社ごとに独自に行われてきたが、現時点では PEX (PHIGS Extensions to X) として統一されつつある。PEX とは、X ウィンドウのプロトコルに対して 3 次元拡張されたプロトコルのことを指し、X ウィンドウの特徴であるサーバ・クライアント方式を継承している。しかし、PEX はプロトコルを規定しただけであり、グラフィック出力部分の API は依然として PHIGS そのものを用いることが多い。これまでに示したように、PHIGS は小回りが効かないことやストラクチャを介さず図形表示ができないことから、ウィンドウ操作部分の API である Xlib/Xt との抽象化レベルの差が大きいことから、各社独自の抜け道が設けられ、標準化の妨げとされてきた。

しかし、今日では PEXlib として標準化の方向にある。PEXlib は Xlib 同様低レベルな API であり、ストラクチャを介さずに図形を表示する「イミディエート・モード」も提供している。なお、PHIGS は PEXlib の上位レベルの API に位置し、PHIGS との互換性は、PEXlib に移行しても確保されていることになる。CADCEUS でも、当面は PHIGS を使用していくが、PEXlib が標準として確立されたい PEXlib 化を検討する予定である。

2.2.3 CADCEUS と Motif

今日的な GUI は、マルチ・ウィンドウ・システム抜きには成り立たない。CADCEUS でも、X ウィンドウ環境下で、VGUI という装置独立、アプリケーション独立な GUI 機能を用意し、独自のマルチ・ウィンドウ環境を提供している。しかし、世の中の動向として、“Look&Feel (見た目と使い心地)”も標準化の流れがあり、CADCEUS としても考慮する必要がある。

OSF/Motif** (以降 Motif) は、Xlib/Xt を使用し、Look&Feel を統一した GUI であり、今日では事実上の標準 GUI とされている。CADCEUS の開発着手当初は、X ウィンドウ以外をウィンドウ・システムとして採用しているハードウェアも存在していたことから、VGUI を設け、異機種および異ウィンドウ・システムへの依存性を吸収し、VGUI 独自のインタフェースを提供していた。これにより、VGUI を使用するアプリケーション上位層は、使用する装置およびウィンドウ・システムを意識する必要がなく、操作者においても装置に依存する使い方をする必要がない。しかし、Motif が事実上の業界標準 GUI とされる現時点では、他の周辺システムが採用している Motif と Look&Feel が異なるという不都合が生じてきた。このため、CADCEUS でも事実上の標準 GUI である Motif の実装を検討している。

2.3 モ ニ タ

モニタ・モジュールのソフトウェア構成と、モニタ・モジュールの中核である統合制御機構について説明する。

* X ウィンドウは米国 M.I.T. の登録商標である。

** OSF/Motif は米国 OSF (Open Software Foundation) 社の登録商標である。

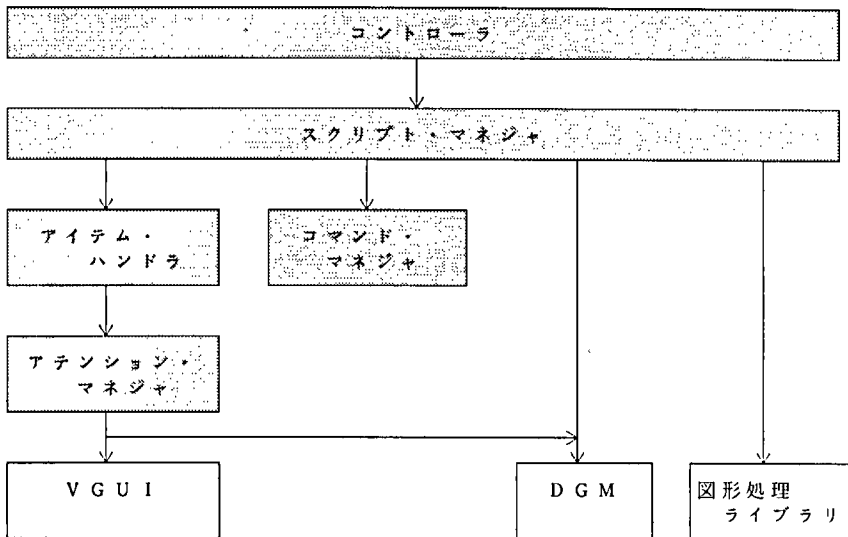


図 9 モニタ系のモジュール構成

2.3.1 ソフトウェア構成

CADCEUS のフレームワークの中でのモニタ・モジュールの役割りは、システム全体の制御、コマンドの対話操作、アプリケーションの実行制御などである。

CADCEUS のモニタ・モジュールのソフトウェア構成を図9 に示す。

モニタ・モジュールは、次のサブ・モジュールから構成されている。

- ① メニュー選択によるコマンドの決定処理など、システム全体の制御を行うコントローラ・モジュール
- ② 専用言語で記述されたコマンドを逐次解釈し対話操作、アプリケーション・プログラムの実行、他コマンドの実行、データベース入出力、図形処理ライブラリ呼出し、ファイル入出力など実行制御を行うスクリプト・マネジャ・モジュール
- ③ 入力操作メニューの表示や入力データのキャンセル処理など、対話操作の制御を行うアイテム・ハンドラ・モジュール
- ④ ガイダンス表示、表示要素特定や特定要素の強調表示など、GUI ツールキットや DGM 表示モジュールとのインタフェースをつかさどり、座標値などの入力結果をコマンドが設定した条件に変換するアテンション・マネジャ・モジュール
- ⑤ アプリケーション・プログラムとコマンドとのデータ授受を行うコマンド・マネジャ・モジュール

これらのサブモジュールの中で、コマンドの実行制御を行うスクリプト・マネジャ・モジュールが中核として機能している。

2.3.2 統合制御機構

CADCEUS では、コマンドの対話操作や動作を専用言語（スクリプト）で記述している。使用者がカスタマイズするコマンドも同一の専用言語により記述することがで

き、CADCEUS のコマンドと同一のユーザーインタフェースを作成することが可能である。データベース検索、図形処理、CADCEUS コマンドのマクロ実行も専用言語により記述でき、ユーザーコマンドとして登録ができる。また、パラメトリックな動作をするコマンドも他のコマンドと区別することなく作成できる。

これらの対話操作、ユーザーカスタマイズ、パラメトリック機能を統合して制御しているのがスクリプト・マネージャである。

1) 対話操作

CAD/CAM システムでは、表示要素の特定などの対話操作が頻繁に行われる。この特定操作に関しても、指示要素の種類特定、エコーバックの動作、特定位置の検索などさまざまな処理が必要となる。CADCEUS では、これらの処理をアプリケーション・プログラム単位で行うのではなく、専用言語で『なにが特定対象で、特定後なにをする』という設定をするだけで、実際の処理はアテンション・マネージャのみが行う。このため対話操作がコマンドごとにばらつくことを無くすることができる。

対話操作で得られた入力パラメタは、専用言語の変数を経由してアプリケーション・プログラムに渡される。また、パラメトリック・コマンドであれば、入力パラメタはデータベースに保存される。対話操作の制御とデータの流れを図 10 に示す。

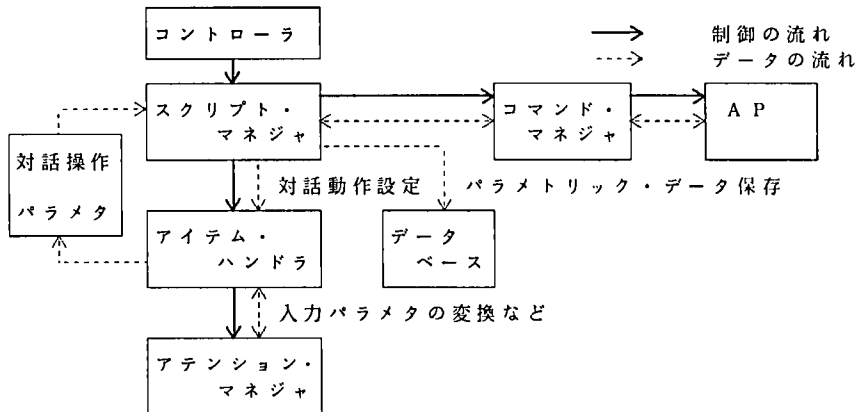


図 10 対話操作の流れ

2) ユーザーカスタマイズ

ユーザーがコマンドをカスタマイズする上での要件として、次の項目があげられる。

- ① 独自の対話操作ができる。
- ② データベースの検索ができる。
- ③ 図形処理ができる。
- ④ CADCEUS のコマンドを実行し、その結果を得ることができる。

対話操作については、ユーザーカスタマイズ・コマンドの動作を専用言語で設定することにより、CADCEUS のコマンドと同様に振る舞うことができる。

データベース検索機能は、スクリプト・マネージャが直接 DGM モジュールを使用し、入力データのチェック、データの変換などマクロ的な処理を行い、使用者カスタマイズ・コマンドと CADCEUS システムとのインタフェースをとる。

図形処理機能は、専用言語の関数として交点計算やパラメタ計算などを提供するほか、CADCEUS システムの図形処理ライブラリを使用することができる。図形処理ライブラリ呼出し機能もデータベース検索機能と同様にスクリプト・マネージャが制御している。

CADCEUS コマンドの実行は、メニュー選択によるコマンド起動ではなく、コマンドから別なコマンドを呼出す機能である。呼出されたコマンドの入力パラメタを CADCEUS コマンド呼出し機能の引数として記述することができる。呼出されたコマンドは、呼出し側のコマンドが設定した入力パラメタを対話操作で得られる結果の変数に展開し、対話操作を省略する。また、実行結果を出力引数として設定することにより、呼出し側のコマンドとのデータ授受を行う。

CADCEUS コマンド呼出しの制御とデータの流れを図 11 に示す。

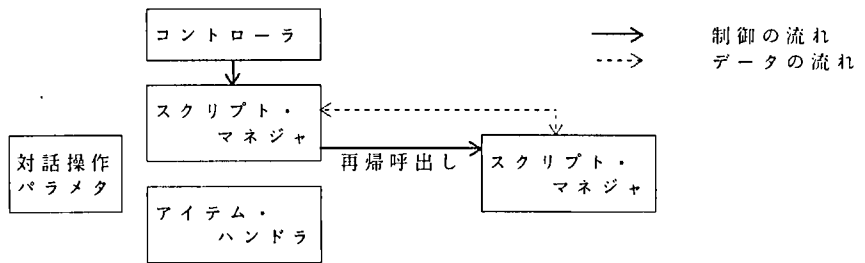


図 11 CADCEUS コマンド呼出しの流れ

3) パラメトリック機能

パラメトリック機能では、アプリケーションがパラメトリック・モードを意識することなく動作できることが要求されるので、モニタが特別な動作を行う。パラメトリック機能のモニタ制御としては、コマンド実行時の入力パラメタのデータベース保存、保存された入力パラメタの変更機能、保存された入力パラメタを元にしたコマンドの再実行機能があげられる。

入力パラメタのデータベース保存は、とくに他のコマンドとの区別はなく、コマンド実行の最後にパラメタのデータベース保存を行うだけである。

入力パラメタの変更機能は、保存された入力パラメタを保存時と同様の対話操作で変更を行う機能である。コントローラが対象コマンド決定時にデータベースを検索し、入力パラメタをコマンド実行の引数としてスクリプト・マネージャに渡す。スクリプト・マネージャはすでに対話操作で入力があり、その入力途中である状態を作りだし、アイテム・ハンドラに制御を渡すことで同一の制御系で実現している。変更結果は再度データベースに保存される。

入力パラメタの変更機能の制御とデータの流れを図 12 に示す。

コマンドの再実行機能は、データベースに保存された入力パラメタをコマンド

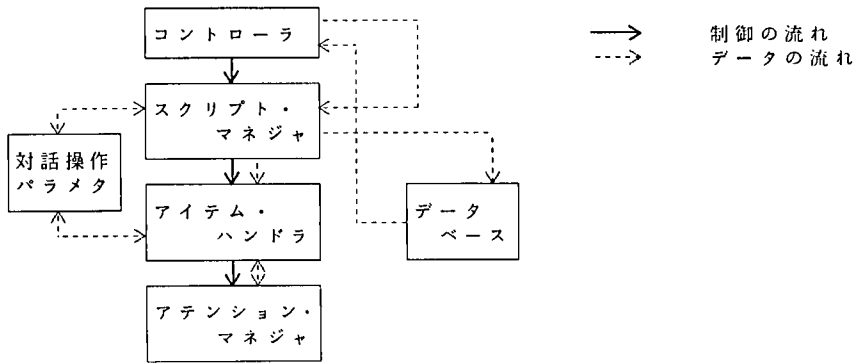


図 12 入力パラメタの変更機能の流れ

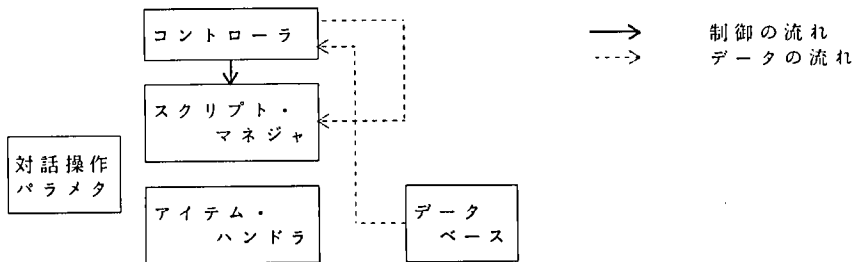


図 13 コマンドの再実行機能の流れ

の入力データとして実行する機能である。これは、入力パラメタの変更機能と同様に、コントローラが対象コマンド決定時にデータベースを検索し、入力パラメタをコマンド実行の引数として渡し、スクリプト・マネージャが対話操作を省略することにより実現している。

コマンドの再実行機能の制御とデータの流れを図 13 に示す。

以上のように、スクリプト・マネージャを中核とした統合制御機構により、アプリケーションの負担を軽減し、アプリケーションに依存しないモニタ・フレームワークを実現している。

3. フレームワークの効率

CADCEUS の目指す製品モデラを実現するにはフレームワークの高速化が必須である。大量データの高速処理が要求されるソリッド/パラメトリックなどのアプリケーション実現には、データベースの高速化が前提となる。1 節ではデータベースの効率を規定するデータベースハンドラの高速化を中心に説明する。

アプリケーション機能の高度化に伴い、1 回の処理単位で表示する図形量は増大する。特にソリッドやパラメトリックはその傾向が強い反面、同一図形に対する変更や削除が多い特性がある。同一図形に対する操作を簡約化することで高速化を実現できる。

対話操作で図形を特定する応答時間は、システムの操作性を決める大きな要因の一

つである。しかしアプリケーション機能の高度化に伴い、この応答時間を左右するデータ量は増大する。またより洗練された操作性は、この応答性の向上なしでは実現できない。

3.1 データベースの効率

CADCEUS のデータベース・ハンドラは、アプリケーション・レコード処理とデータベースと表示の整合性管理層である DGM-データベース部、概念レコード処理層である CSH、および物理レコード処理層である DBH の 3 階層により構成されている。

CADCEUS に期待されるアプリケーションの高度化や、処理データ量の増加に備え、システム全体の効率を左右するデータベースの高速化について、DBH におけるデータ管理構造を中心に説明する。

3.1.1 高速データベースハンドラ

データベースハンドラにおいて最も基本的かつ重要な性能である以下の 3 点について説明する。

- ① 識別子からデータアドレスへの変換
- ② 属性の読み込み
- ③ 関係の検索

1) 識別子からデータアドレスへの変換

CADCEUS の基本的な識別子は、図 14 に示す形式の 32 ビット非負整数値である。

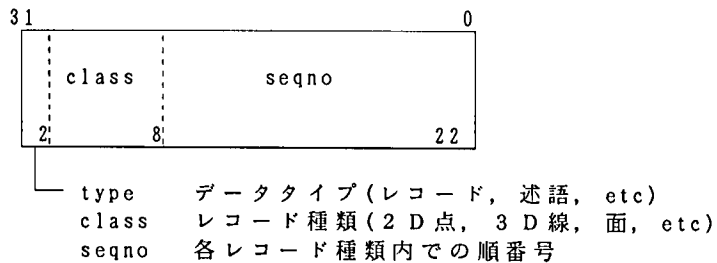


図 14 識別子の形式

この形式では、最大 255 個のレコード種類に対して、最大 400 万個のレコードを識別することができる。CADCEUS システムの対象とする部品点数が、数万点から数十万点であることから、数量的には十分であるといえる。

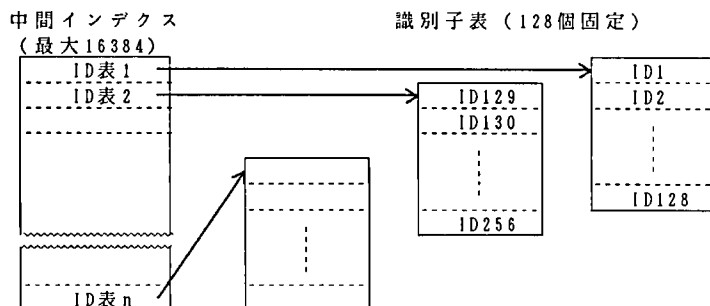


図 15 識別子表

DBH では、識別子からデータアドレスを得るために、データベース中に識別子表と呼ぶレコードを用意している(図 15)。識別子表の各エントリは、レコード識別子と、そのレコードがファイル上およびメモリ上の何処に位置しているかを示す情報、およびそのレコードの状態を示す情報から構成されている。

識別子形式中の順番号(seqno)を、識別子表配列の添え字とすることで高速化を実現している。最大 400 万個分の配列を持つことは、大量のメモリを占有し実用的ではないため、この値を分割し、2 段階(最大 16384 個の中間インデクスと 128 個の識別子表)とすることで不要なメモリの消費を回避している。これにより、識別子からデータアドレスへの変換を数回の論理演算と、シフト演算のみで実現できている。

また、一度大量のレコードを創成した後、削除を繰り返し、識別子表上に虫喰い状態が発生した場合は、識別子表のエントリに設けた削除識別子チェーンにより識別子を再利用することで無駄な領域の消費を回避している。

2) 属性の読み込み

CADCEUS のデータレコードの中で、最も数量的にもファイルおよびメモリを占有する領域的にも大きな部分を占めるものは、点・線・面などを表現するための幾何要素とこれらの基底線・基底面を表現する図形要素である。これらのレコードの属性を読み込む回数は多く、この処理を高速化することは全体の効率向上に寄与する。

1 個の論理レコード(幾何要素, 図形要素)は、使用頻度の高い部分(固定長部)と、それ以外の部分(可変長部)の複数の物理レコードに分割している。この固定長レコード(テーブル型レコード)に前述の識別子表と同様の配列方式を導入することで、データページ*のページング回数を減少させ、連続する幾何要素属性読み込み処理の高速化を実現している(図 16)。

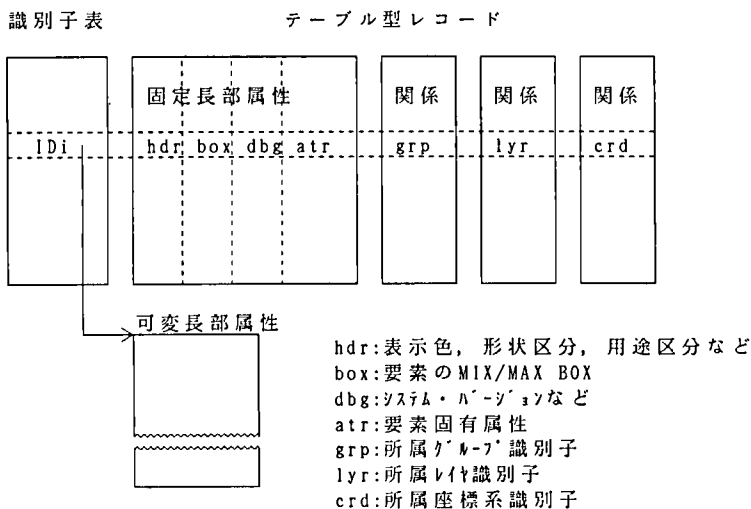


図 16 幾何要素のデータ構造例

* データベース・ファイルは、32KB×n (n=1...) のページの集合である。

テーブル型レコードは、所属する識別子のレコード種類により、複数個の定義を可能とすることで、多様なデータ型に対しても無駄な領域を占有することなく保持可能である。

1個のテーブル型レコードには、レコードの先頭に128ビットの定義フラグを設け、以降に続く各固定長部属性データの有無をビットのON/OFFにより表現している。全ての定義フラグがOFFとなる場合には、そのテーブル型レコード自体を削除・解放することで領域を有効利用している。

3) 関係の検索

基本的な関係の表現方法は、述語と呼ばれる一定個数の項*の集まりを納めたレコード（述語表レコード）により実現している。述語表レコードは、B-tree方式のレコード群である。

B-tree方式は、検索の確実性が高く、範囲検索に適しているが、レコード数が増加した場合に階層が増加し、レコード検索回数が増える。すなわち、レコード数の増加にともない関係検索時間が増加する恐れがある。このため、頻繁な検索が予想される関係、個数が大量となると思われる関係に対して、述語表レコードによる表現ではなく、前述のテーブル型レコードを使用することで検索効率の向上と、レコード数に左右されない安定性を実現している。

3.1.2 多項関係の検索効率

通常の関係表現は、述語表レコードのB-tree方式による。たとえば、プロジェクション線種関係**のスキーマ定義上の表現は、図17のとおりである。

```

PRED      D2PRTLIN                /* P R J 線種 */
          TERM      1      D1OBJHDR/* オブジェクト */
          TERM      2      D1INS  /* インスタンス */
          TERM      3      DIGEO  /* 幾何要素 */
          TERM      4      INT    /* 線種 */
          TERM      5      INT    /* 線太さ */
          TERM      6      INT    /* 方向タイプ */
          TERM      7      REAL   /* 開始パラメタ */
          TERM      8      REAL   /* 終了パラメタ */
          KEY       1                /* オブジェクトからの検索 */
          KEY       3                /* 幾何要素からの検索 */
          CPLXKEY  3, 1             /* 幾何要素・オブジェクト */
END-PRED

```

図17 プロジェクション線種関係述語

CSHでは、この概念述語レコードを、図18に示す物理述語レコード群に分解する。4項以上の述語は、述語実体とその実体を検索するための検索用述語に展開される。この場合の検索処理は、検索用述語に埋め込まれた述語順番号*** (predseq)を検索し、これにより述語実体を検索する、2段階の検索により行う。CSHでは、アプリケーションの検索方法により、どの項を、あるいはどの項とどの項の組み合わせをキーとして関係検索を行うかを記述できるようにしたことで、過剰な検索用述語の創成を防ぎ、アプリケーションの用途に合致した効率的な検索方式を提供している。

* 項には、識別子、整数値、倍精度実数値がある。

** プロジェクション線種関係：要素の見え方を、配置されたオブジェクトの見方ごとに変えるための関係レコード。

*** 述語順番号：同一述語種類の述語レコードに付加される識別子。

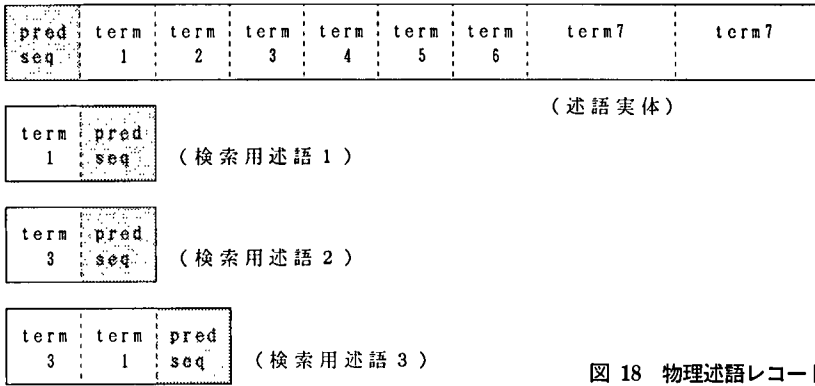


図 18 物理述語レコード

3.2 対話系の効率

ソリッド・モデリング、パラメトリック・モデリングで要求される効率を満たすために、CADCEUS の対話系で特に考慮した点を説明する。

3.2.1 表示のスタックとフラッシュ

ソリッド・モデリングやパラメトリック・モデリングにおける表示では、2次元設計製図や、曲面モデリングと異なり、以下のような特徴がある。

1) 1回の表示タイミングでの表示データ量が極めて大量となる

たとえば、ソリッド・モデリングにおいて、複雑な形状どうしの集合演算を行うと、数10～数100の面および境界線が創成/削除/変更される。

また、パラメトリック・モデリングにおいて、手順上かなりさかのぼる部分の形状が変更されると、変更の伝播範囲しだいでは、数100～数1000の要素が創成/削除/変更される。

2) 同一データに対する操作が繰り返される

製図や曲面モデリングでは、データベースおよび表示上の更新回数を必要最低限に抑えることを意識した形状処理手法を組むことは可能ではある。しかし、ソリッド・モデリングでは、位相の整合性を保ちながら形状処理を行うなど、一般に位相処理主導（オイラ操作等）となり、データベースや表示の更新回数を形状処理アプリケーションが制御するのは難しい。

たとえば、集合演算の過程では、交差面が分割され新しい面ができ、形状変更を受けた後に、演算種類により削除されるということが頻繁に発生する。

また、パラメトリック・モデリングでは、一度操作が取り消され、再実行されるという処理過程を経るため、同一データが複数回操作されることは避けられない。

CADCEUS では、これらを効率良く処理するために、表示のスタックとフラッシュの機構を開発した。

従来の表示系では、表示モジュールに対するアプリケーション・プログラムからの操作は、いわば「一個処理」であり、1操作（1要素の創成/変更/削除）ごとにグラフィック・ライブラリを経由してグラフィック・ディスプレイまで更新要求が渡されていた。スタック/フラッシュの機構では、表示モジュールに対する操作を、一時的に貯

表1 操作種類

操作種類	内 容
創 成	要素の創成, アクティブ化, ビジブル化
削 除	要素の削除, イナクティブ化, ヒドゥン化
形状変更	要素の幾何形状の変更
属性変更	表示オン/オフ, 色変更, 線種変更など
エコー・オン	エコー色表示
エコー・オフ	エコー色表示の解除

め込み (スタック), 適切なタイミングで一度に更新 (フラッシュ) する。適切なタイミングとは, 一般には入力待ち時点であるが, コマンドの処理途中で強制的にフラッシュすることもある。この過程で, 同一データに対する複数回の操作が『圧縮』される。また, 同時に, 大量の表示データごとのグラフィック・ディスプレイに対する更新要求が『集約』される。この圧縮と集約の結果, 操作順に依存しない必要最低限の表示更新を可能としている。

1) 圧 縮

圧縮は, 要素の操作種類を体系付けて分類し, スタック時にこれらの組み合わせを考慮して行われる。その概要を表1に示す。

たとえば,

① 創成+形状変更

→ 創成: フラッシュ時に, 変更後の形状で創成する。

② 創成+形状変更+削除

→ 何もしない

③ 形状変更+削除+エコー・オフ

→ 削除: エコーも同時に消えることになる。

のように圧縮可能である。

2) 集 約

PHIGS は, ストラクチャ数が多いとストラクチャの操作負荷および画面更新負荷が共に高くなる。このため, CADCEUS では複数個の要素を, 1 ストラクチャ内に出力している。しかし, ストラクチャとして集約されていても, 操作が『一個処理』であれば, ストラクチャ数ではなく, 要素数に比例してグラフィック・ライブラリへの要求が必要となる。CADCEUS では, スタック側でストラクチャ単位で管理をして, フラッシュ時にストラクチャ単位で操作することにより, 操作の『集約』を可能としている。

PHIGS では, ストラクチャ内の要素を操作するためには, ストラクチャをオープンし, 要素を操作し, 再度ストラクチャをクローズする, という手順を踏む必要がある。N 個の要素を操作するのに, 『一個処理』方式では, 必ず $3 \times N$ 回の呼び出しが必要になるが, 『集約』の効果により, $N + 2 \times$ (操作ストラクチャ数) で済むことになる。

たとえば, 50 要素を操作し, その 50 要素が四つのストラクチャに分散してい

ば、『一個処理』では 150 回の PHIGS 呼び出しが必要になるが、『集約化』で 58 回に軽減することができる。

表示のスタックとフラッシュにより、①大量データ表示、②重複データ操作を高速化できる。さらに、スタックされている要素数に応じて、表示更新を画面全体書き換えとするか、部分書き換えとするかを選択することにより、画面書き換えのために生じる不必要なちらつきが抑えるという副次的な効果も得ることができる。

3.2.2 ピックの高速化

ピックとはマウスのカーソルが線などの幾何要素の上にある時に、マウスボタンをクリックすることによりその要素を検出することである。

以下に高速ピック機能の概要と、高速化により実現できたピック機能の拡張について述べる。

1) ピック高速化の概要

CAD/CAM システムの入力ではピックは頻繁に使用され、その応答はシステムの操作性に大きな影響を与える。ピック処理はグラフィック・ライブラリの機能を使用することが多い。ここではグラフィック・ライブラリが提供するピック機能を標準ピックと呼ぶ。

標準ピックは表示データに文字データが多い場合には応答性が悪い。これは文字データの場合、グラフィック・ライブラリは内部で文字のストロークを線群に展開して検査しているので、同じ 1 要素である線に比較して数十倍の負荷となるためである。

製図の表示データは寸法、注記など多量の文字データを使用しており、数万の要素が表示されている場合もある。このような場合におけるピックの応答が数秒になることもあり操作性を著しく悪くする。

そこでピック処理をグラフィック・ライブラリにまかせず、アプリケーションがデータの意味に応じて最適な検査を行うことにより高速なピック処理を実現できる。

2) 効率比較

1 回あたりの処理時間は 0.5 秒程度だが、これにはエコーやベルを鳴らす時間も含まれており、ピック処理自身の時間は 0.3 秒程度である(表 2)。

表 2 効率比較

ピック方法	標準ピック	高速ピック
実績(単位秒)	2.8	0.5

測定方法：図形 8000+寸法 2000 の合計 1000 要素のピック

3) ピック機能の拡張

高速化だけでなく、アプリケーション側で制御しているために標準ピックでは実現できない様々な付加機能を加えることが可能となる。以下にピック機能の拡張として実現した機能を述べる。

① 特徴点のプレビュー

CADCEUS では要素の特徴点を使用して座標値を得る際に、どの特徴点を選

択するか（たとえば線分をピックして端点を取るか、中点を取るか）のモードとして座標値検出モードがあり、常駐メニューに表示されている。この方法ではモードを切り替えるために頻繁にメニューを選択しなければならず操作性が良くない。

スケッチャでは特徴点の近傍にカーソルを動かすと特徴点の種類に応じてマーカーが表示されるプレビューの機能を提供しており、新しいインタフェースとして注目されている。この機能を通常のコマンドの座標値入力にも拡張し、座標値検出モードによらずマウスカーソルを近傍に持っていくことで適切な点を検出できる。スケッチャに比較してデータ量が圧倒的に多いことから高速なピック処理が必須となる。また特徴点を得るためにはその座標値を知ることが必要になるが、アプリケーションがピック処理の制御をしているため可能となる。

② 面のプリセレクトハイライト

面の表示の際にはグラフィック・ライブラリに対して面自身の幾何ではなく、その境界線と面シンボル（面上に表示される十字線）を指示しているため、標準ピックでは境界線または十字線近傍を指示する以外に面の検出はできない。一方高速ピックではアプリケーションが要素の検出を行うため、面の幾何自身を知ることが可能であり、面上の任意位置で面を検出することができる。そして高速性を生かして、マウスカーソルの動きに追従させてカーソルが面上にある面の境界線と面シンボルをハイライトすることにより、要素が混雑している所での面の認識と検出を容易にした。また正確にマウスカーソルを固定しなくても、大まかなマウスの動きで希望の要素を検出できる利点もある。

4. おわりに

アプリケーションやハードウェアに依存しない共通基盤ソフトウェアであるフレームワークの実装技術について効率を中心に説明した。フレームワークとしては効率だけでなく拡張性や信頼性なども、フレームワーク上の各種アプリケーションに多大な影響を与えることになる。CADCEUSがコンカレントエンジニアリングの実現を目指して機能の充実が進められるのに伴い、フレームワークに対してもより操作性の良いシステムの実現が要請される。今後も効率、信頼性の両面で改善を継続していきたい。

-
- 参考文献 [1] 白川忠彦, “CADCEUS のデータ構造”, ユニシス技報, Vol. 13 No. 1, 1993, pp. 42~56.
 [2] 日本ユニシス, [CADCEUS 使用説明書 専用言語編].
 [3] ISO/IEC 9542-1~4, [Information processing systems - Computer graphics - Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System (PHIGS)].
 [4] Tom Gaskins, [PHIGS Programming Manual], O'Reilly & Associates, Inc.
 [5] 鈴木良太郎, “CADのためのユーザ・インタフェースの提案”, ユニシス技報, Vol. 13 No. 1, 1993, pp. 117~145.
 [6] Dan Heller, [Motif プログラミング・マニュアル], SOFTBANK BOOKS.
 [7] Tom Gaskins, [PEXlib Programming Manual/3D Programming in X], O'Reilly & Associates, Inc.
 [8] 河合哲也, “Key Technology 講座: COSE で採用された三次元グラフィックスの新標準 PEX”, UNIX USER, Vol. 2 No. 6, Jun 1 1993, pp. 69~74.

執筆者紹介 中 辻 等 (Hitoshi Nakatsuji)

昭和 26 年生, 51 年東北大学大学院理学研究科修士課程修了, 同年日本ユニシス入社, 55 年より CAD/CAM システムの開発に従事, 現在 CAD/CAM システム部に所属,

**笹 尾 忍 (Shinobu Sasao)**

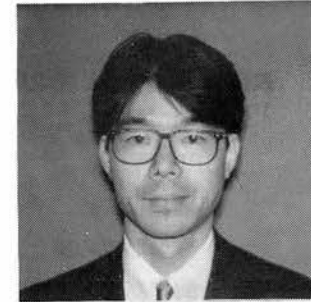
昭和 33 年生, 56 年慶應義塾大学工学部数理工学科卒業, 同年日本ユニシス入社, 同年より CAD/CAM システムの開発に従事, 現在 CAD/CAM システム部に所属,

**古 澤 裕 一 (Yuichi Furusawa)**

昭和 33 年生, 56 年東京理科大学工学部経営工学科卒業, 同年日本ユニシス入社, 同年より CAD/CAM システムの開発に従事, 現在 CAD/CAM システム部に所属,

**板 東 司 (Tsukasa Bandoh)**

昭和 34 年生, 57 年上智大学理工学部数学科卒業, 同年日本ユニシス入社, 同年より CAD/CAM システムの開発に従事, 現在 CAD/CAM システム部に所属,

**小 竹 正 之 (Masayuki Kotake)**

昭和 34 年生, 57 年広島大学理学部数学科卒業, 同年日本ユニシス入社, 平成 2 年より CAD/CAM システムの開発に従事, 現在 CAD/CAM システム部に所属,



幾何処理モジュール

Geometric Module

宮 地 恵 美

要 約 CADCEUS の幾何処理モジュールは、C 言語のプログラムから利用できる関数ライブラリである。このライブラリは、線と線の交点、面と面の交線、図形間距離、マトリクス演算等を行う。

本稿では、幾何処理ライブラリとしての特色を、幾何データの表現形式とインタフェースを中心に述べる。

Abstract The geometric of CADCEUS is a function library with C language bindings. This library provides geometric calculation functions for the intersection points of curves, the intersection curves of surfaces, the distance between figures, matrix operation, and so on.

This paper describes the characteristics of the geometric library focusing on the expression of geometric entities and the concepts of application program interfaces.

1. はじめに

CADCEUS の幾何処理モジュールは、データベース形式や位相構造とは独立に幾何のみを扱うモジュールである。このモジュールは、CADCEUS 以外の C 言語のプログラムからも呼び出すことができ、幾何データの生成、変更、演算、検査、ベクトル・マトリクス計算を行う図形処理ライブラリとして利用可能である。

以下にこの図形処理ライブラリの特徴を、幾何の種類と表現データ形式、機能という観点から説明する。また図形処理で常に課題となる接触、連続性について、本ライブラリの対応方法について述べる。

2. 幾何要素の種類と表現形式

図形処理ライブラリでは点、線、面を扱い、そのデータ形式を標準形式と呼ぶ。CADCEUS では、立体は点、線、面から構成される位相構造データとして扱い、その幾何処理には、点、線、面を扱う本ライブラリを使用する。

標準形式の線と面は、基底線と線、基底面と面という概念で図形の種類を問わず統一的にパラメタ表現されている。

線、面ともに周期的な図形(円、楕円、周期的自由曲線、円柱、円錐、球、回転面、周期的自由曲面)を継ぎ目なしに表現できる。

2.1 基底線と線

線は、幾何形状を定義する基底線とその一部を表すパラメタ区間で表現される。基底線と線の間係を表 1 に示す。基底線としての直線は無限直線を意味する。

線分は始点と終点の座標値で表現することができるが、本ライブラリでは、線分は定義域無限の基底線である直線 $C(t)$ と有限なパラメタ区間 $[t_s, t_e]$ という組で表現する。

表 1 基底線と線

基底線	直線	円	楕円	自由曲線
線	線分 無限直線 半無限直線	円 円弧	楕円 楕円弧	自由曲線

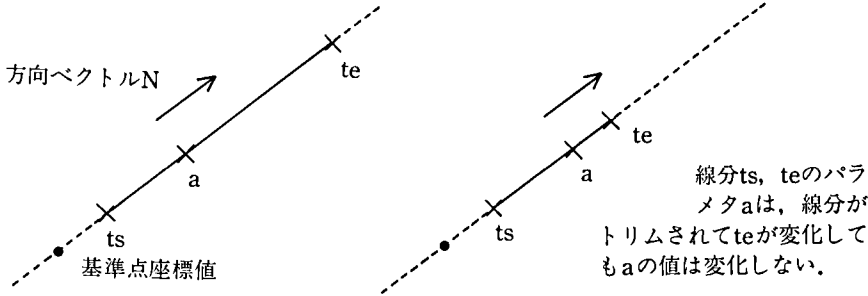


図 1 基底線と線の関係

直線の基底線 $C(t)=C+Nt$

C : 基準点座標値 (C_x, C_y, C_z)

N : 単位方向ベクトル (N_x, N_y, N_z)

t : パラメタ

パラメタ区間 $[t_s, t_e]$

もし線分を始終点座標値で表現し、その間を $[0, 1]$ 区間でパラメタ付けをしたとすると、線分をトリムするたびにそのパラメタ付けが変わることになる。本標準形式の表現方法だと線分をトリムしたとしてもそのパラメタ付けは変化せず、パラメタを保存して利用することが可能となる (図 1)。

円の基底線、楕円の基底線は t をラジアンパラメタとしてそれぞれ次のように表現される。

円の基底線 $C(t)=C+r \cdot \cos(t) \cdot X+r \cdot \sin(t) \cdot Y$

C : 中心点, r : 半径, X, Y は互いに直交する単位ベクトル

楕円の基底線 $C(t)=C+a \cdot \cos(t) \cdot X+b \cdot \sin(t) \cdot Y$

C : 中心点, X, Y は互いに直交する単位ベクトル

a : 長半径, b : 短半径

円、楕円を基底線とする図形 (円・楕円・円弧・楕円弧) も、線分と同じようにトリムしてもそのパラメタ付けは変化しない。

2.2 パラメタ表現

基底線が直線、円、楕円の線を解析線と呼ぶ。複数セグメントからなる自由曲線も解析線のときと同様、基底線全体を定義域とするパラメタ付けをする。基底線 $C(t)$ が自由曲線である場合、それは n 個の連結する m 次の有理/多項式曲線分 $C_i(t)$ の集まりとして表される。

各 $C_i(t)$ のことを基底線 $C(t)$ の第 i 番目のセグメントといい、 n をセグメント数という。

パラメタ t におけるセグメントの切れ目 t_0, t_1, \dots, t_n を成分とする $n+1$ 次元のベクトルを break point vector と称し

$$\{t_i\}_{i=0}^n \quad \text{と書ける.}$$

したがって、基底線 $C(t)$ の定義域は $[t_0, t_p]$ であり、セグメント $C_i(t)$ の定義域は $[t_{i-1}, t_i]$ である。

一般には図2のようにセグメント番号とセグメント内の $[0,1]$ パラメタの組みによる区分パラメタ付けが使用されることが多いが、本ライブラリではパラメタ t におけるセグメントの切れ目 t_0, t_1, \dots, t_n を成分とするブレイクポイントベクトルを内部表現として持ち、セグメント番号が陽に現われない形でパラメタ付けする。このようなパラメタ付けを全体パラメタ付けと呼ぶ(図3)。全体パラメタ付けと区分パラメタ付けとは、相互変換が可能である。

全体パラメタ付けをすることにより線分の例で述べたようなパラメタを保存した処理を自由曲線でも行うことができる。また、区間をまたがる収束計算等も行うことができる。

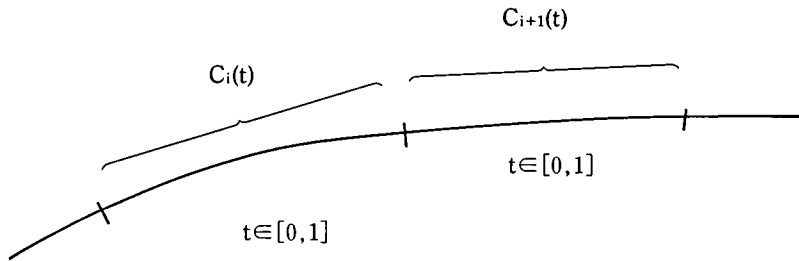


図2 自由曲線の区分パラメタ付け

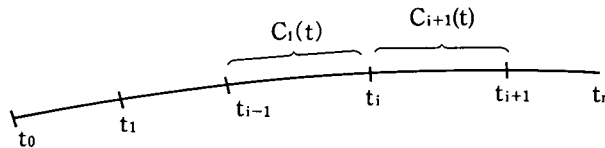


図3 自由曲線の全体パラメタ表現

2.3 基底面と面

面は面全体を定義する基底面と境界線の集まりで表現される。一般に境界線の集まりで表現する面は境界表現された面あるいはトリム面と呼ばれる。元となる面と境界線群の関係を位相として扱うシステムもあるが、本ライブラリの面標準形式では、向き付けされた線の標準形式のつながりにより、境界線群の関係を表現している(図4)。

元となる面(基底面)としては、解析面(平面、円柱、円錐、球、掃引面、回転面)と一つ以上のパッチで表現される自由曲面がある。基底面と面の関係を表2に示す。基底面としての平面、掃引面、円柱面、円錐面は各々無限平面、無限掃引面、無限円柱面、無限円錐面を意味する。また面としての平面は、有限な境界を持つ平面と無限

表 2 基底面と面

基底面	平面	掃引面	回転面	円柱面	円錐面	自由曲面
面	平面	掃引面	回転面	円柱面	円錐面	自由曲面

基底面：自由曲面
境界線：4本の線分

基底面：円柱
境界線：円

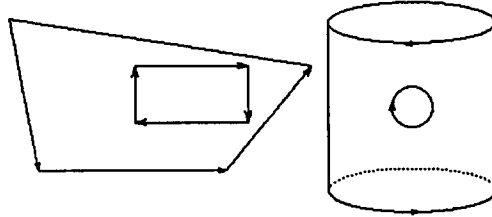


図 4 基底面と面

平面がある。

基底面も基底線と同様に、基底面全体を表現する全体パラメタ付けで表現され、パラメタを保存した処理で利用できる。

2.4 自由曲線と自由曲面

本ライブラリで扱う自由曲線、自由曲面は、任意次数の Non Uniform 多項式 B-spline 曲線、曲面および Non Uniform 有理 B-spline 曲線、曲面である。

一般によく使用される 3 次 Bezier 曲線、曲面は、この Non Uniform 多項式 B-spline 曲線、曲面でセグメント分割点での多重度が一様に次数 3 である場合である。

Non Uniform 有理 B-spline (NURBS) で表現することで、円錐曲線、2 次曲面も表現することができるが、本図形処理ライブラリでは処理効率やデータ量という観点から NURBS は自由曲線、曲面の表現にのみ使用し、解析図形はそれぞれ独自の表現形式を用いている。

2.5 周期的図形

基底線の円、楕円、周期的自由曲線、基底面の円柱、円錐、球、回転面、周期的な自由曲面では、パラメタの定義域を周期的に無限とすることにより、形状を継ぎ目なく表現することができる。

周期の切れ目をまたがる線、たとえばパラメタ区間が $3\pi/2$ から $5\pi/2$ までの半円などでも 1 本の線として表現することができる。もし基底線の定義域を 1 周期分のみの表現しか許さないとすると、この半円は、 $3\pi/2$ から 2π までの $1/4$ 円と 0 から $\pi/2$ までの $1/4$ 円という二つの円弧で表現しなくてはならない。継ぎ目なく周期的な図形を表現できることにより、継ぎ目を意識せずに収束演算が可能であり、円筒などに巻き付く面上線の表現もできる。

また図 5 に示すように円に周期の切れ目がある場合には、この切れ目を意識せずにトリム処理を行うと予期せぬ結果となることがある。本図形処理ライブラリでは周期の切れ目なく円を表現できるため、CADCEUS のトリムコマンドでは意図した結果を素直に得ることができる。

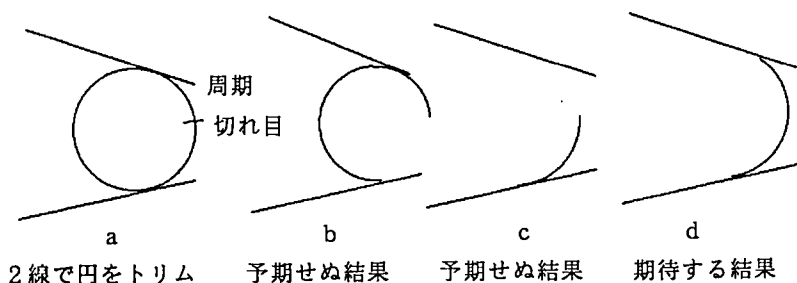


図 5 周期に切れ目のない表現による利点

2.6 全体パラメタ表現

自由曲線，自由曲面も解析曲線，解析曲面も定義域全体を同じようにパラメタ表現することができる。この表現方法は，線，面の種類を意識することなくライブラリを使用するために重要な役割を果たす。線と線との交点計算関数は，交点の座標値と共に各線の交点パラメタ値も出力する。たとえば自由曲線の場合はセグメント番号と $[0, 1]$ パラメタが出力され，線分のときは，線長のパラメタで出力されるという具合に，線の種類ごとに異なる出力形式であれば入力図形の種類を意識しないというわけにはいなくなる。

また，全体パラメタ表現方法では，基底線，基底面が同じであれば，線，面がトリムされてもパラメタ値は変化しないので，パラメタ値を保存してアプリケーション側で使うことができる。実際に CADQUES のトリム戻し等のコマンドで，この性質を利用している。

3. 幾何の補助情報

標準形式には，形状データに加えて，幾何処理の効率や安定性に寄与する情報も幾何の補助情報として含まれる。

3.1 線，面を外包する最小最大座標値データ

線，面を外包する最小，最大座標値データによる干渉検査は，線と線の交点，線と面の交点，面と面の交点などの基本的な関数の前処理として行われる。一般的には，交点計算などでおおまかな干渉検査が必要なたびに，入力線または入力面を外包する最小最大座標値データを計算することが多いが，同じ線，面に対して頻繁に交点計算等を行う場合には，同じ線，面に対して毎回検査用のデータを作成することは無駄である。

そこで本ライブラリでは標準形式データの中に線，面を外包する最小最大座標値のデータ（ボックスデータと呼ぶ）を含む。一度作られたボックスデータは，トリム，分割などで線，面の有効部の形状が変更されない限りそのまま利用できる。形状が変更される場合にはボックスデータは無効とするが，平行回転移動のような座標変換をする図形処理ライブラリ関数では，ボックスデータを更新する。CADCEUS では，ボックスデータが無効な面をデータベースに保存する際には，再計算したボックスデータをデータベースに保存している。

3.2 面の uv 境界線データ

面は基底面と境界線群から成る。面標準形式は、境界線群として3次元空間の境界線群と2次元 uv 空間でのパラメタ境界線群 (uv 線) を対でもつデータから構成されている。ここで uv 線とは、面 S のパラメタ (uv) 空間上の2次元曲線 $P(\tau)$ であり2成分から成る。

$$P(\tau) = \begin{cases} Pu(\tau) \cdots \cdots u \text{ 成分} \\ Pv(\tau) \cdots \cdots v \text{ 成分} \end{cases}$$

パラメタ曲線 $P(\tau)$ の3次元空間上の像は $S(Pu(\tau), Pv(\tau))$ である。

uv 空間の境界線 (パラメタ曲線) は面上点の内外判定等で利用するが、あらゆる面の処理が必要というわけではない。一般に面上の3次元線からパラメタ線を作る処理は負荷が重く、使用されるかどうかかわからないデータを常に持つことは無駄である。そこで面標準形式としては面境界のパラメタ曲線をもたない形式も許している。これを uv 線無効面と呼ぶ。

図形処理ライブラリは、uv 線無効面が境界パラメタ曲線を必要とする処理に入力された場合には、本来の処理に入る前に境界パラメタ曲線を作り面標準形式に設定し uv 線有効面とするようにしている。一度作られた境界パラメタ曲線はこれが変更されない限り利用することができる。変更された場合には uv 線無効面とする。

アプリケーション側で、uv 線無効面と有効面とを使いわけることにより処理効率を向上させることができる。

3.3 面縮退点情報

面標準形式は面縮退点情報をもつ。縮退点とは、円錐の頂点、球の両極のように基底面のパラメタ表現で u 一定あるいは v 一定のパラメタに対応する点が同一点になる箇所であり、図形処理上注意を要する点である。

面縮退点情報は縮退点の位置(3次元座標値、uv パラメタ値、uv のどの端位置にあるのか) および縮退点における代表法線ベクトルを持つ。縮退点での1階微分値から法線を計算できないときに、この法線ベクトルを使用することで、縮退点での処理の破綻を回避することができる。

4. 機能

4.1 インタフェースの階層

機能は、処理の内容により分類され、それらの機能は2階層のインタフェースで利用することができる。

線分、円弧、区分的な自由曲線の1セグメント、あるいは自由曲面の1パッチという基本的な図形の処理を、その図形の種類ごとに行うインタフェースを Z ルーチン、C 言語構造体で定義された線、面 (標準形式) を入力とするインタフェース群を Y ルーチンと呼ぶ。

Z ルーチンは、Y ルーチンの下層に位置し、その入力には円弧であれば、中心座標値と半径と始点と終点、線分であれば始終点というぐあいに構造体ではなく配列形式のデータとなる (図6)。

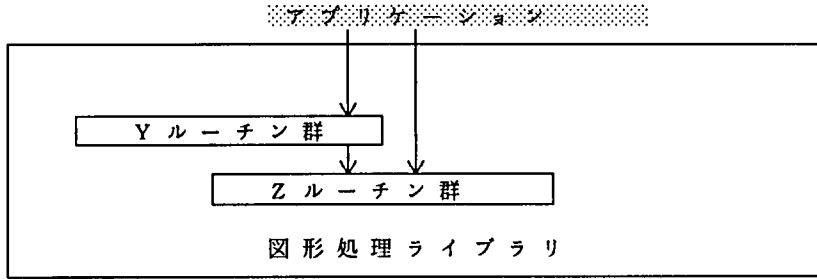


図 6 図形処理ライブラリの階層構造

4.2 機能の分類

機能は 30 種類に分類される。分類と機能を表 3 に示す。

表 3 機能分類

分類	機能例
交点・接点計算	線/線交点, 線/面交点, 線の自己交点
交線計算	面/面交線, 面/無限平面交線
垂線の足計算	点/線垂線, 点/面垂線
距離計算	点/線最近点, 点/面最近点, 円弧長
線上点計算	点/弧長移動, 点/直線距離移動
面上線計算	パラメータ定線, 面稜線
接線, 接平面計算	点/線接線, 面の指定方向接平面
円弧創成	3 点, 2 点/半径, 2 線/半径
線創成	自由曲線 (C1, C2 フィッティング)
面創成	バッチ境界線群から内挿した曲面創成, ルールド面創成, スローブ曲線創成
線操作	分割, 抽出, 反転, 結合, 延長
面操作	分割, 抽出, 反転, 延長
オフセット計算	線/指定方向, 線/面直方向, 線/面沿い, 面/面直方向
投影計算	線/指定方向, 線/面直方向
検査	線的一致, 面的一致, 点の面上検査, 線の面上検査, ベクトル平行性, ベクトル直交性
関数値の評価	線微分, 面微分
近似計算	線/折れ線近似, 面/多面体近似
ラフチェック	線・面外包 BOX 作成, BOX/BOX 干渉検査
座標変換	平行, 回転, 拡大縮小, 投影, ミラー
応用計算	表面積, 体積, 角度, モーメント
標準形式設定	直線, 円, 楕円, 自由曲線, 円錐, 掃引面, 回転面, 球面, 平面, 自由曲面
形式変換	線分→1 次自由曲線, 面→3 次 BezierCP 点列
ベクトルマトリクス計算	和, 差, 内積, 外積, 行列計算
基礎演算	2 元連立 1 次方程式, 2 次方程式
基底線概念操作	periodic 性, パラメタ値の正当性
線の概念操作	periodic 性, 線の有効区間

基底面の概念操作	標準区間, 縮退点情報
面の概念操作	C1連続性, 面境界/基底面の離れ検査
リージョン入力用検査	点/多角形内外判定, 線/多角形内外判定
NURBS 基礎演算	次数上げ, ノット挿入, ノット生成, セグメント分割, ベクトル値有理関数の微分

4.3 連続性

線・面のパラメタ表現においてパラメタによる左右微分値が r 階まで一致しているとき C^r 連続であるという。この概念は線・面のパラメタ付けに依存する概念である。パラメタ付けに依存せず幾何形状にのみ依存する連続性は G^r 連続性と呼ばれる。

G^1 連続とは、接線方向（線の場合）あるいは接平面（面の場合）が一致するような幾何的な連続性である。

線の G^2 連続性は、曲率および主法線方向が一致すること、面の G^2 連続性は、その点を通る任意の断面線が G^2 連続であることとして定義される。

一般に、注目している点で微分値が 0 にならなければ、 C^r 連続性は G^r 連続性を意味している。

本ライブラリが、全体パラメタ表現をしていることは前述したが本ライブラリではこのパラメタ付けについて C^1 以上の連続性を仮定している。しかしながら現実には、CADCEUS 以外のシステムでは、 C^1 連続性を保証せず、 C^0 連続（点座標値が一致するのみで接線方向が同じでない）あるいは G^1 連続（接線方向、あるいは接平面のみが同じ、接線の大きさは同じでない）の幾何図形が作られることがある。これらの幾何図形を CADCEUS に取り込んで正しく処理するために、基本的な関数ではできる限り C^1 連続性を仮定せずセグメント、パッチ単位で処理を行うようにしている。とくにニュートンラフソン収束計算では、 C^2 までの連続性を仮定しなければならない場合があるので、できるだけ幾何的な収束計算を行うようにしている。

4.4 接 触

一部あるいは全体が重なるような場合の線と線の交点、線と面の交点そして面と面の交線計算結果を表現できるような共通の出力データ形式が用意されている。

重なりを定義することは難しい問題である。たとえば距離の許容誤差程度の長さの線が、直交するように交差したとき、それは距離の許容誤差内で全体が重なると見なすのか、それともただ 1 点で交点を持つのかは、解釈のしかたが変わる。

現在のところでは、各関数ごとに、解析図形で重なり合うかどうか容易に判断できる場合や、複数個の交点が計算結果として得られて、複数個の交点間が重なるかどうかを調べることが可能な場合などでは、重なり区間を出力結果として返すようにしている。

5. おわりに

線、面の標準形式を対象とする Y ルーチン群では、使用者が線、面の種類を意識することなく使用できる。この Y ルーチン群を実装する際には、汎用性と効率という観点から実装方法を考えなければならない。データの抽象性を保持したまま一般的な処

理で結果を得る方法にするのか、処理の初期の段階で個々のデータの性質に依存する処理に分岐して結果を得る方法にするのかを判断しなければならない。

たとえば、円弧と円弧の交点を求める問題は、あくまで線と線との交点を求めるという一般的な収束計算で処理することも可能であるが、円弧という解析的な固有の情報を利用して解析的に解くこともできる。

実際には、線と線の交点計算のような使われる頻度が高く、高速な処理を要求される関数では、処理の初期の段階で内部的に線の種類ごとの専用関数に分別されて、入力データごとに最適な処理を行うようにしている。このように解析図形の場合には、解析図形の表現を利用して効率よく処理している。一方、ライブラリの保守、安定性を考えた場合には、できるだけ内部の作りを一般的にしておいた方が良い場合も多い。効率と汎用性とのバランスをうまく保持して、使用者から見ても、保守する側から見てもさらに安定した、扱いやすいプログラムにしていくことは、使用者が不特定の汎用ライブラリには重要な課題である。

-
- 参考文献 [1] 山口富士夫, 形状処理工学 [I], pp. 1~193, 日刊工業新聞社, 1982.
 [2] 山口富士夫, 形状処理工学 [II], pp. 1~218, 日刊工業新聞社, 1982.
 [3] G. Farin 著, 山口 泰監訳, CAGD のための曲線・曲面理論, pp. 1~330, 共立出版, 1991.

執筆者紹介 宮地 恵美 (Emi Miyachi)

昭和 32 年生, 57 年慶応義塾大学工学系研究科修士課程修了。同年日本ユニシス(株)入社。CAD/CAM システムの開発に従事。現在, CAD/CAM システム部に所属。情報処理学会会員。



位相処理モジュール

Topology Management Module

片 平 正 成

要 約 CADCEUS の形状モデラの処理系は、幾何処理と位相処理から成る。形状モデリングにおいて、面と面の交線計算などの幾何処理の結果生じる、面と面の隣接関係の変化などを扱うのが位相処理モジュールである。

CADCEUS における位相構造には、ワイヤフレーム・サーフェス・ソリッド・非多様体を統一的に扱うこと、単面・複合面・立体を同一のデータ構造で表現すること、効率とデータ量を考慮して位相情報と幾何情報とを一つの要素として扱うこと、などの特徴がある。

位相処理モジュールの API (Application Program Interface) は、オイラ (Euler) 演算子を使用せず、複合面を一括して操作できる機能を提供する。また、モデリングでは、単面、複合面、立体を区別なく操作でき、アプリケーションプログラムの開発の便利さと効率が考慮されている。

Abstract The modeling process of CADCEUS consists of geometric calculations and topology management. The topology management program module maintains the topological consistency of a geometric model which is modified by the geometric module. This paper discusses the following characteristics of the CADCEUS topological data structure:

- a. Unification of geometric representations for a wireframe, a surface, a solid and a non-manifold shape
- b. Assimilation of the data structure for a single surface, a complex surface and a solid
- c. Unification of geometrical and topological information.

The API (application program interface) of the topology management program module is a very high-level interface which enables the operation of a complex surface without Euler operators, and the treating of an object without any distinction between a single surface, a complex surface and a solid. This function serves to create the convenient, efficient environment for the development of application programs.

1. はじめに

CADCEUS の形状モデラは、ワイヤフレーム、サーフェス、ソリッド、およびワイヤフレーム/サーフェス/ソリッドの連結体としての非多様体を統一的なデータ構造^[1]で表現する。形状モデルの表現形式は、物体の表面形状を、点、線、面のデータとして陽に表現する境界表現 (boundary representation) 方式であり、データ構造としてウィングドエッジ構造^[2] (winged edge structure) を採用している。

形状モデリングの内部処理は主に、面と面の交線計算などの幾何計算と、幾何計算の結果、面と面の隣接関係の変化などを取り扱う位相処理から成る。前者を幾何処理モジュールが、後者を位相処理モジュールが担当する。

位相処理モジュールの主な役割は、形状モデルを表現するデータ構造の位相的な整合

性を維持，管理することである。以降に，位相情報を持つ唯一の形状データである複合図形と，複合図形を創成・変更する位相処理について説明する。

2. 形状モデル

形状データは単独図形，集合図形と複合図形の三つに分類できる (図 1)。これらのうち，位相構造を持つのは複合図形だけである。

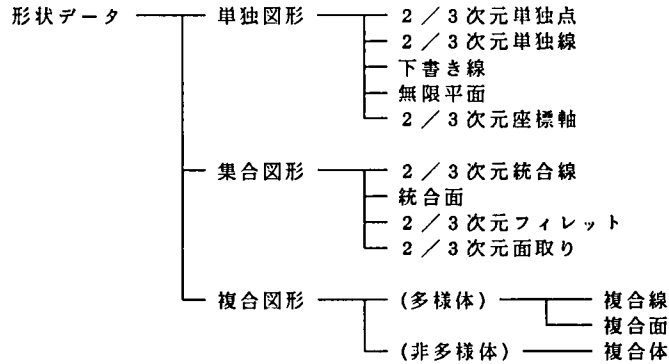


図 1 形状データの体系

以下，複合図形について説明する。

複合図形は，隣接関係を持つ点・線・面の集合で表現される。点・線・面は，位置と形状を表す幾何情報と隣接関係を表す位相情報から成る。CADCEUS では，概念上は幾何情報と位相情報を区別するが，計算機で実現する内部モデルとしては，データ量の削減と効率のために，幾何情報と位相情報を内部的に一つの要素として扱う。この要素を幾何要素と呼ぶ。

線・面の形状は，全体とその部分で表現する。全体を表すのは基底図形，その有効

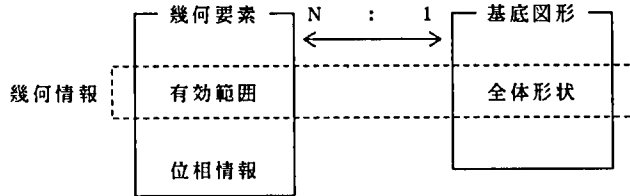


図 2 幾何要素と基底図形

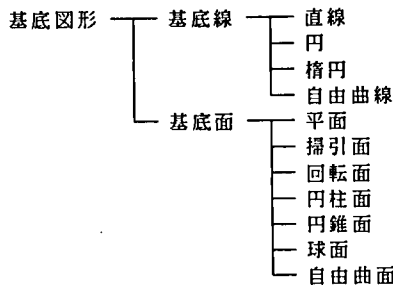


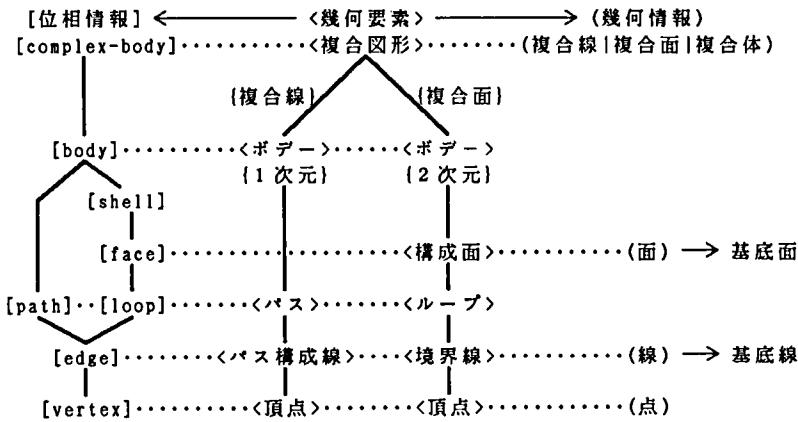
図 3 基底線と基底面

範囲を表すのが幾何要素である。基底図形は、幾何要素とは独立な要素である。図2に示すように、基底図形と幾何要素は一對多の関係を持つ。基底図形と関係付けられた幾何要素(構成面、境界線、パス構成線)は、基底図形が示す形状の有効範囲を持つ。線の基底図形を基底線、面の基底図形を基底面と呼び、基底線、基底面には、表現式の違いにより、図3に示す種類がある。

3. 複合図形

3.1 複合図形の幾何要素

複合図形の位相構造および位相と幾何の対応を図4に示す。[]に英字で示すのは、Braid^[9]らにより提案されている位相の概念名である。<>で示すのがCADCEUSにおける幾何要素、()で示すのがその幾何情報である。



注1. — は要素の親子関係を示す。...は位相と幾何の対応を示す。
 注2. ボデー間では幾何要素を共有しない。
 注3. ()は注記。

図4 複合図形の位相と幾何

CADCEUSにおける位相構造には、次の特徴がある。(1)位相情報と幾何情報とを一つの要素に持つ。(2)効率を考慮し、[body]と[shell]を一つの要素<ボデー>にする。(3)パス構成線は分岐がなく境界線よりも位相情報量が少ないため、データ量を考慮し、[edge]に対応するパス構成線と境界線を別の要素にする。

複合図形の位相構造は、複合線、複合面、複合体を表現する。一つの1次元ボデーから成るときが複合線、一つの2次元ボデーから成るときが複合面、複数のボデーから成るときが複合体である。

複合図形を構成する幾何要素は、次のとおりである。

- 頂点.....線の両端点に対応する。座標値を持つ。
- 境界線.....線に対応する。基底線と関係を持つ。
- パス構成線.....線に対応する。基底線と関係を持つ。
- ループ.....面の境界となる閉線列。
- 構成面.....面に対応する。基底面と関係を持つ
- パス.....パス構成線の列。

ボデー……………パス, または, 構成面群.

複合図形……………複合図形の位相構造における最上位の要素.

3.2 複合図形の表現方法と特徴

複合線, 複合面, 複合体の表現方法と特徴について説明する.

3.2.1 複 合 線

図5に示すように, 複合線は, 分岐のない, 端点が順につながる, 線の列である. 位相的には, 線分または円と同相な一次元多様体であり, 向きを持つ. 複合線を構成する個々の線は, パス構成線である. パス構成線は, 二つの頂点を端として一方(始点)から他方(終点)へと向き付けられる. 隣合うパス構成線は, 間の頂点を共有する. パス構成線の向きは, 同一方向に揃えられており, 複合線の向きは, パス構成線列の向きに対して, 正/逆の区別で表現する. パス構成線と頂点を, 複合線の構成図形と呼ぶ.

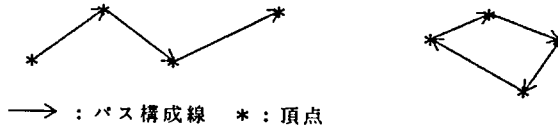


図5 複合線

3.2.2 複 合 面

図6に示すように, 複合面は分岐のない構成面の集まりである. 分岐がないとは, すべての境界線が一つまたは二つの構成面と隣接することを意味する. 図6(a)のような, 開いた複合面を開複合面と呼び, 図6(b)のような, 閉じた複合面を立体と呼ぶ.

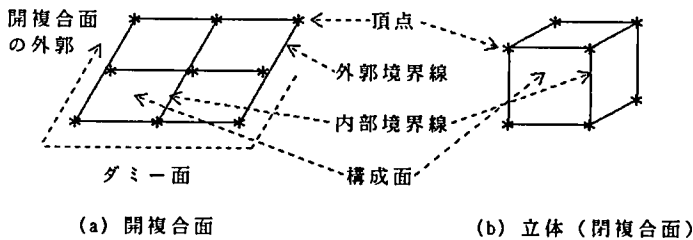


図6 複合面

一つの構成面から成る開複合面を特に単面と呼ぶ. 位相的には, 開複合面は, 境界を持つ二次元多様体であり, 立体は, 境界のない二次元多様体である. 複合面には表裏の区別があり, 複合面の表側が立体の外側に対応している. 複合面の表裏は構成面の表裏と一致する.

開複合面の外郭の境界線は, 外郭境界線と呼ばれ, 一つだけの構成面と隣接する. 開複合面の内部の境界線および立体の境界線は, 内部境界線と呼ばれ, 二つの構成面と隣接する. また, 開複合面の外側に, 外郭境界線列を境界とする, 幾何実体のない面を仮定する. この面をダミー面¹⁴⁾と呼ぶ.

従来, サーフェスモデルは面だけを, ソリッドモデルは立体だけを表現していた. しかし, ダミー面と構成面とを同等に扱うことにより, 単面, 開複合面, 立体を同一

の位相構造で表現でき、同等に演算対象にできる。そのため、サーフェスモデル、ソリッドモデルのデータ表現とモデリングに必要な位相操作を統合することができる。

構成面には、内部に“穴”をあけることができる。穴あきの構成面を表現するために、図7に示すように構成面の境界となるループが存在する。ループは、二つ以上の境界線から成る閉じた線列であり、向き付けられている。ループは、構成面の有効領域を定義する。構成面の最外周となるループを外周ループと呼び、穴となるループを内周ループと呼ぶ。また、構成面内の孤立頂点を表現するために頂点ループがある。頂点ループも内周ループの一つである。

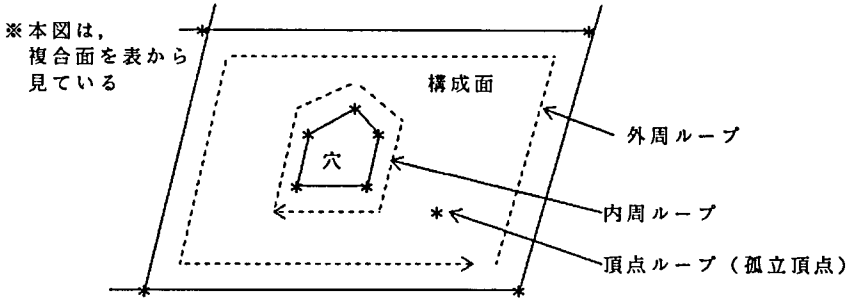


図7 構成面とループ

境界線は、二つの頂点を端として一方(始点)から他方(終点)へと向き付けられる。境界線の向きは、ループの向きとは独立である(図8)。境界線の両側が同一のループでもよい。このような境界線をスリット境界線と呼ぶ。スリットや孤立頂点は、解析用に理想化されたモデルの表現等に利用する。構成面と境界線と頂点を、複合面の構成図形と呼ぶ。

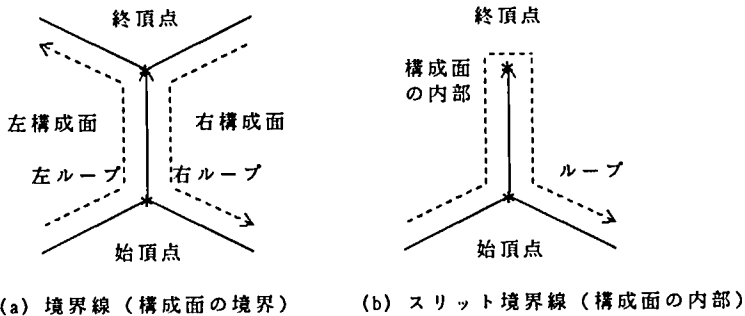


図8 境界線の隣接位相要素

3.2.3 複合体 (非多様体)

図9に示すように、複合体は、複合線や複合面が頂点、境界線、構成面で接続する図形である。この接続関係を非多様体メイトと呼ぶ。複合体は、多様体(複合線、複合面)の結合体として、非多様体を表現する。複合体の位相構造は、図4に示すように、複合線、複合面のボデーを集めて表現する。

3.3 消滅形状

トリムや集合演算を実行すると、複合面の一部が除去される。除去される形状を消

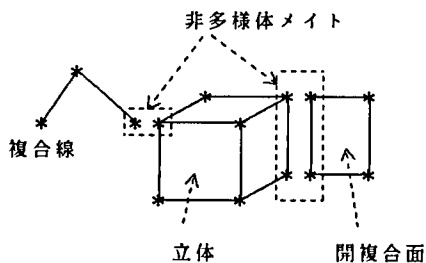
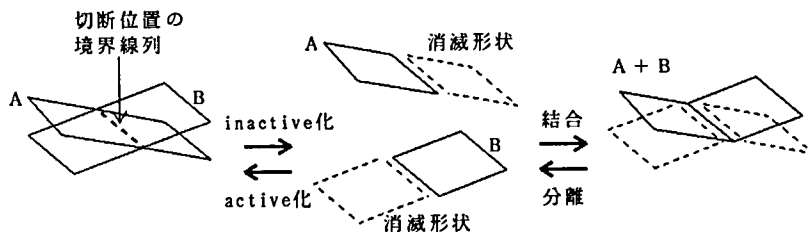


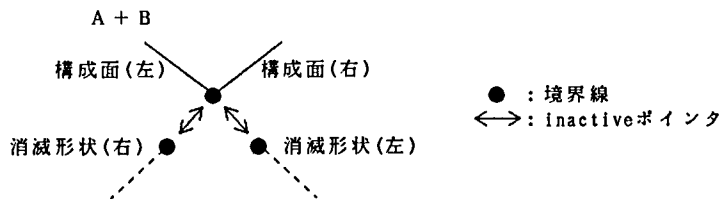
図 9 複合体

滅形状と呼ぶ。CADCEUS では、消滅形状をシステム内部で保存し、消滅前の形状を復元するために用いる。消滅形状は、開複合面と同一のデータ構造で表現する。消滅形状を作る操作を“inactive 化”と呼ぶ。逆操作は復元の際に行われ、“active 化”と呼ぶ。

消滅形状は、“inactive ポインタ”と呼ばれる境界線間の双方向ポインタにより、複合図形の切断位置と接続する。inactive ポインタにより、複合図形の境界線列と消滅形状の外郭境界線列とを結ぶ。一つの境界線に、inactive ポインタを左右一つずつ持つことにより、集合演算のように一つの境界線に二つの消滅形状が接続する演算でも、接続関係を表現できる(図 10(a))。また、左右の inactive ポインタは、境界線に隣接する左右の構成面と対応しており、消滅形状が元々接続していた構成面を指す(図 10(b))。



(a) 複合面の” inactive 化-結合”操作とその逆操作(分離-active 化)



(b) 境界線に隣接する左右の構成面と消滅形状

図 10 消滅形状の生成と接続関係

4. 機能

位相処理モジュールは、形状モデリング・コマンド(ワイヤフレーム, サーフェス,

ソリッド) の下位モジュールであり、DGM (Database and Graphic Manager) の上位モジュールである (図 11)。

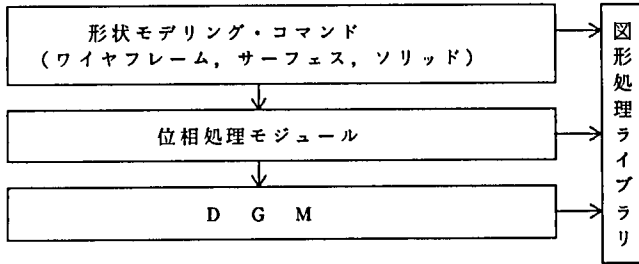


図 11 位相処理モジュールの位置付け

CADCEUS の位相処理モジュールの機能として、以下の特徴がある。

- ① オイラ (Euler) 演算子^{[2][3]}を使わずに、複合面を一括で創成したり、分割や結合操作を行える。オイラ演算子ではないが位相の整合を保つことを保証する。
- ② 位相の変更を行うと、基底図形の有効範囲も自動的に変更する。すなわち、位相だけでなく幾何の変更も行う。

これらの特徴はアプリケーションの作り易さと効率を考慮した結果である。

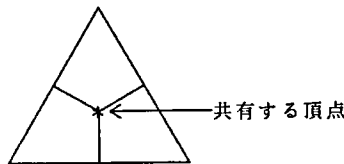
以下に特徴的な位相操作機能を説明する。



(a) N 辺の 1 面からなる複合面



(b) N x M 面からなる複合面



三つの 4 辺面からなる複合面

(c) 1 頂点を共有した N 個の 4 辺面からなる複合面

図 12 複合面位相創成

4.1 複合面位相創成

複合面位相創成は、複合面の幾何情報を定義せずに、位相構造だけを一括創成する機能である。幾何情報は、あとから、構成図形単位に定義する。

一括で作ることのできる位相構造の例を図 12 に示す。

4.2 頂点付加

頂点付加は、図 13 に示すように境界線上に頂点を付加し、境界線を二つに分割する機能である。分割後の二つの境界線のうち、一方は指示された境界線の形状を変更したものであり、他方は新しく創成した境界線である。分割後の二つの境界線は基底線を共有する。

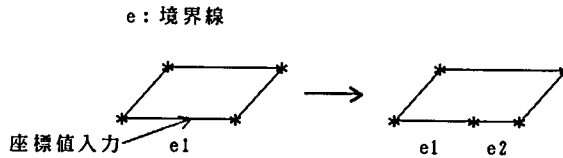


図 13 頂点付加

4.3 頂点除去

頂点除去は、図 14 に示すように指示された頂点を除去し、その頂点を共有する二つの境界線を、一つに縫合する機能である。二つの境界線のうち、一つは削除され、もう一つは縫合後の形状に変更される。ただし、二つの境界線は基底線を共有する必要がある。

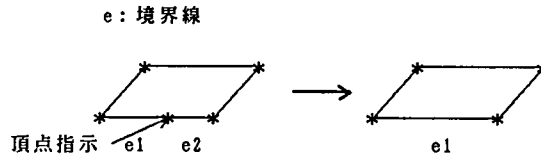


図 14 頂点除去

4.4 境界線付加

境界線付加は、一つの構成面に対して構成面の境界となる境界線を付加する機能である。境界線を付加することにより、構成面が二つに分割されることがある。両構成面は基底面を共有する。構成面が分割されない場合、付加した境界線は両側の構成面が同一になるためスリット境界線になる。境界線付加による位相変更を図 15 に示す。

4.5 境界線除去

境界線除去は境界線列を除去する機能である。境界線列の途中の頂点で境界線の分岐があってはならない。除去される境界線の両側の構成面が異なる場合、二つの構成面は一つの構成面に縫合される。ただし、除去される境界線の両側の構成面は基底面を共有する必要がある。図 16 に示すように、境界線を除去することにより位相変更を行う。

---> : 入力線データ s : 構成面 L : ループ

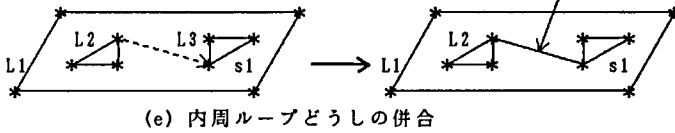
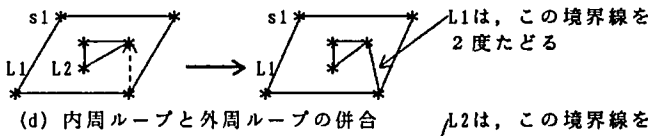
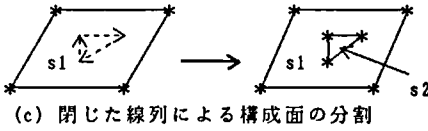
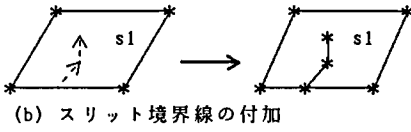
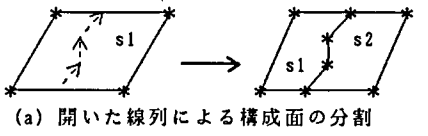


図 15 境界線付加

— : 入力境界線 s : 構成面 L : ループ

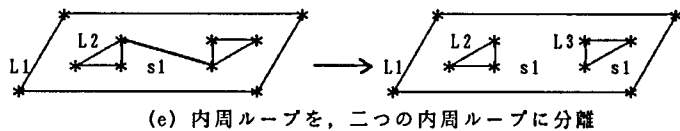
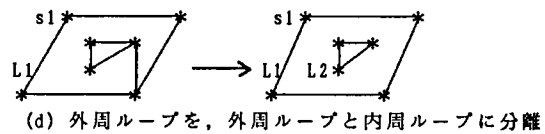
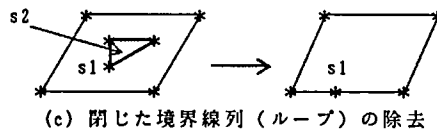
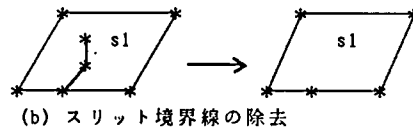
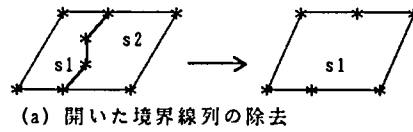


図 16 境界線除去

4.6 複合面分割

複合面分割は、図 17 に示すように、一つの複合面に対して指示された境界線列で複合面を分割し、二つの複合面に分ける機能である。

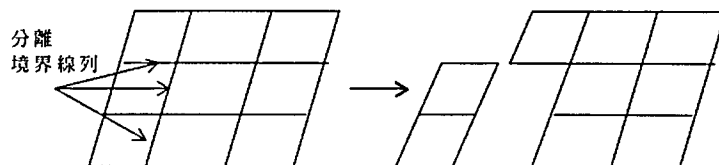


図 17 複合面分割

4.7 複合面結合

複合面結合は、図 18 に示すように、同一の複合面、または二つの複合面に対して、指示された対になる外郭境界線列で複合面を結合し、一つの複合面とする機能である。

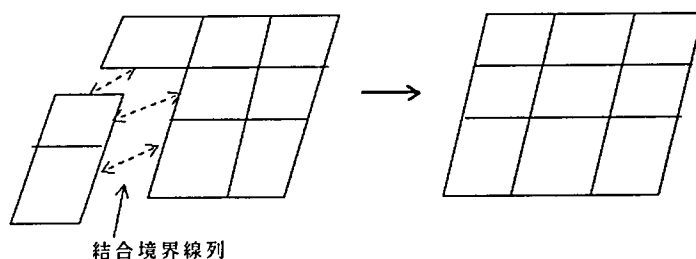


図 18 複合面結合

4.8 inactive 化

inactive 化は、図 19 に示すように、一つの複合面に対して、指示された境界線列で複合面をトリムする。トリムすることにより除かれる形状を消滅形状として保存する。指示境界線は外郭境界線となり、消滅形状と inactive ポインタで結ばれる。

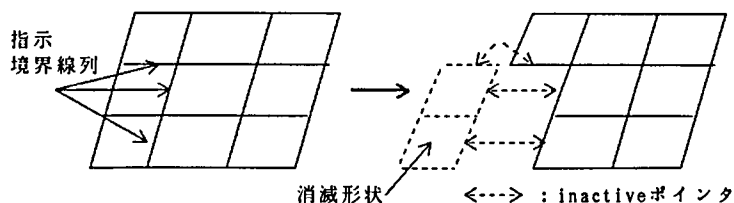


図 19 inactive 化

4.9 active 化

active 化は、図 20 に示すように、一つの複合面に対して、接続している消滅形状のどれか一つを指示する。指示された消滅形状を取り出し、複合面と融合することによ

り、元の形状を復元する。

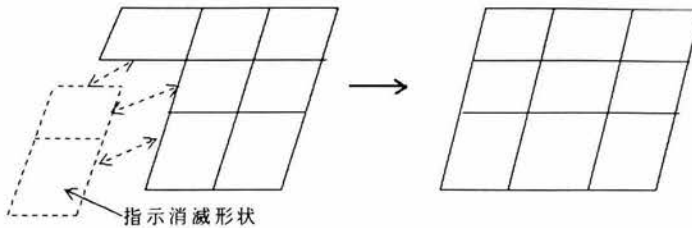


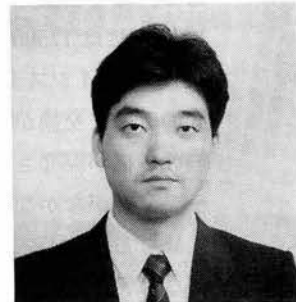
図 20 active化

5. おわりに

位相処理モジュールは、形状処理アプリケーションのプラットフォームとして位置付けられる。ワイヤフレーム/サーフェス/ソリッド/非多様体を含む形状モデルの構築に必要な機能を提供している。このモジュールの上位に位置付けられるモデリングコマンドの頑健性、効率や開発・保守の容易性は、位相処理モジュールの効率やアプリケーションインタフェースに影響される。今後、さらに、CADCEUSの使い勝手をより良くし、効率を改善する予定である。

- 参考文献 [1] 白川忠彦, "CADCEUSのデータ構造" ユニシス技報 No.37, 1993, pp. 42~56.
 [2] B. G. Baumgart, "Geometric Modelling for Computer Vision", Stanford Artificial Intelligence Laboratory Memo Aim 249, Computer Science Department Report No. CS-463, 1974.
 [3] I. C. Braid, R. C. Hillyard and I. A. Stroud "Stepwise Construction of Polyhedra in Geometric Modelling" Mathematical Methods in Computer Graphics and Design, Academic Press, 1980, pp. 123~141.
 [4] P. Wilson "Euler Formulas and Geometric Modeling" IEEE CG&A, 5, 8 (1985) 24.

執筆者紹介 片平正成 (Masanari Katahira)
 昭和41年生。平成2年茨城大学工学部精密工学科卒業。
 同年日本ユニシス(株)入社。主にCADCEUSシステムの
 開発に従事。現在、CAD/CAMシステム部に所属。



データ交換サブシステム

CAD Data Exchange Subsystem

藤 井 省

要 約 CAD データ交換の必要性は高まる一方であるが、円滑な CAD データ交換はなかなか実現されていない。CADCEUS のデータ交換サブシステムは、CADCEUS と IGES をはじめとする各種データ形式間のデータ交換の機能を提供する。その特徴は中間ファイル方式の採用による拡張性と保守性の高さにある。IGES データの交換では、不正な入力データ、IGES 仕様の不明確さ、あるいは図形処理演算の困難さから様々な問題に直面し、ソフトウェアの改善を重ねてきた。不正データの修復、CAD システムが持つ制約条件の考慮など、データ交換プロセッサが果たすべき機能範囲を明確にすることが重要である。

本稿では、データ交換サブシステムの概要を紹介するとともに、データ交換で発生する問題点とその解決策について考察する。

Abstract CAD data exchange has been increasingly important with the spread of CAD/CAM systems, but it has not been performed smoothly yet. The data exchange subsystem of CADCEUS serves to exchange data between CADCEUS and other data formats including IGES. The subsystem is characterized by translation via a neutral file which is easy to expand and maintain. In designing IGES data exchange, there have been various problems caused by invalid input data, ambiguous IGES definitions and difficulties involved in geometric calculations. It is important to define the responsibility of the translators for the recovery of invalid data and restrictions accompanied by a target CAD system.

This paper explains the characteristics of the subsystem and the author's experience with practical data exchange.

1. はじめに

CAD/CAM システムが普及するにつれ、CAD データ交換の必要性が高まる一方である。ある自動車メーカーでは、年間データ交換件数が1987年では3000件たらずが、1992年には17500件になり、5年間で6倍に増大しているという報告がある^[1]。同じCAD/CAM システム間でのデータ交換では問題ないが、異なるCAD/CAM システム間のデータ交換が行われるようになると様々な問題が発生してきた。多くのデータ交換の規格が開発され、変換プロセッサの開発・改善が行われてきたが、円滑なCAD データ交換がなかなか実現されていないのが現状である。

異なるCAD システム間でのデータ交換の問題は1970年代後半に認識されるようになり^[2]、1981年に米国において初めてのCAD データ交換規格であるIGESバージョン1.0がANSI規格として生まれた。その後、IGESは拡張され1991年にはバージョン5.1まで改訂されている。一方、ヨーロッパにおいても、SET(フランス)、VDAFS(ドイツ)、CAD * I (EC) など各種規格が開発されている^[3]。

IGESによるデータ交換が実用的な規格として普及するにつれ、IGESの仕様上の曖昧さや、CADごとくに扱えるIGES要素が異なるために、円滑なデータ交換ができない

ことが指摘された。この問題を解決する目的で、使用する IGES 要素の選定と IGES の運用規則を定めた IGES Subset という考えが、IGES を利用する側から生まれた。ドイツ自動車工業会が制定した VDAIS、日本自動車工業会の JAMA-IS が、この IGES Subset に該当する。

現在、IGES などで広く行われているデータ交換は、2次元製図モデルおよび3次元形状モデルの範囲である。しかし、CAD/CAM システムが技術的に発展してくるに従い、扱うモデルが単なる製図モデルや形状モデルではなく製品モデルへと変わりつつある。このような流れから、1984年よりISOのもとで製品モデルのデータ交換国際規格であるSTEPの開発が始められた。その後国際協同作業による開発が進められ、1995年初、STEPの第一版が制定される予定である。STEPの規格開発作業は今後も継続されるとともに、STEPによるデータ交換の実装実験が各国で行われている状況である。

また、これらのデータ交換の標準化とは別に、現実のデータ交換ではいくつかのデータ形式が使われている。一つは、広く普及している市販CADの外部インタフェース・ファイルであり、多くのCADがその外部インタフェース・ファイルを流用するようになり、実質的な標準形式とされてきた。パソコンCADのデータ交換で普及したのが有名である。もう一つは、特定企業が社内でのデータ交換のために作成したデータ形式が、取引関係のある企業との間のデータ交換でも使用されてきている。その例として各自動車メーカーのデータ形式が挙げられる。

当社においても、UNICAD/IGESの経験、STEPの標準化活動への参画などを背景に、CADCEUSのサブシステムとしてデータ交換サブシステムを開発した。CADCEUSは製品モデルを中核に据えて各種アプリケーションを統合したシステムである。その製品モデルはSTEPに準拠すべく設計されている。本稿で紹介するデータ交換サブシステムも、当然STEPを考慮したデータ交換システムであるが、開発当初まだSTEPの規格が未確定な状態で、その実現においてはCADCEUS独自の形態を採用した。以下その仕組みと、このソフトウェアを使用して知り得た数々の問題点について議論する。現状では、まだ製品データを交換するという状況ではなく、IGES相当の製図モデル、形状モデルのデータ交換にすぎないが、それでもまだまだ課題は多いため、それらについて特に3章、4章で説明する。

2. CADCEUS データ交換サブシステムの概要

本サブシステムは、次の特徴を持つ。

- ① CADCEUSをターゲットCADとし、各種データ形式とのデータ交換を可能にするために、中間ファイル方式を採用している。さらに、使用者の専用CADとCADCEUS間のデータ交換を容易に実現できるオープンな構造を持つ。
- ② 中間ファイル上に独自のデータモデルを持つ。

UNICAD/IGESはIGESとUNICAD間の直変換方式であるが、変換で問題が発生した場合、IGESの意味が正しく解釈できていないのか、それともUNICADへの変換が正しくないのか曖昧であり、原因追求を難しくしていた。中間ファイル上のデータモデルを設定することで、いずれの解釈に誤まり

があるかが明確になる。

③ CADCEUS と UNICAD 間のデータ交換を実現している。

2.1 中間ファイル方式

中間ファイル方式による変換は、直変換方式に比べ次のような長所を持つ(図1)。

1) CADCEUS への取り込みデータの品質を、同程度に保証できる。

直変換方式では、CADCEUS に取り込まれるデータの品質が、各変換プロセッサに依存する。しかし、中間ファイル方式では CADCEUS と中間ファイル間の変換は一つの変換プロセッサが受け持つため、取り込みデータの品質を同程度に保証できる。

2) 変換プロセッサの改善が容易になる。

不正な要素の修復処理あるいは特殊処理を追加するときに、一つの変換プロセッサで対応可能なため、使用者からの改善要望にも迅速に応えられる。

3) 交換プロセッサの追加が容易になる。

新規にデータ交換インタフェースを追加するときは、その CAD (CAD-a と呼ぶ) と中間ファイルとの間の変換プロセッサを追加すれば、CAD-a と CADCEUS 間、および CAD-a と UNICAD 間の変換が実現できる。直変換方式に比べ、開発・保守費が削減できる。

4) 変換元あるいは変換先のデータベース(データ形式)が変更されても、一つの変換プロセッサの変更で対応できる。

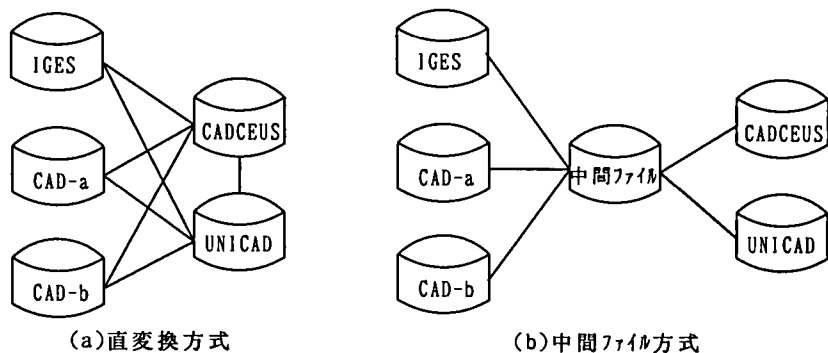


図1 直変換方式と中間ファイル方式

2.2 システム構成と機能

データ交換サブシステムのシステム構成を、図2に示す。

1) CADCEUS インタフェース

CADCEUS の外部ファイルである cfio ファイルと中間ファイル間の変換を行う。

2) UNICAD インタフェース

UNICAD の外部ファイルである UFIO ファイルと中間ファイル間の変換を行う。

CADCEUS インタフェースと UNICAD インタフェースにより、UNICAD から CADCEUS へのデータベースの移行、および UNICAD と CADCEUS が併存す

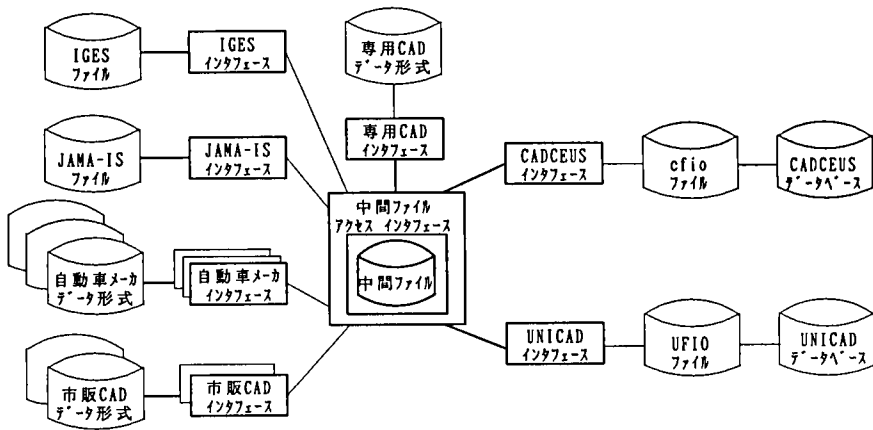


図 2 システム構成

る環境におけるデータ授受が行われている。OS 1100 上の UNICAD 3000 および UNICAD 2000 S とのデータ交換は、UFIO ファイルを UNIX* と OS 1100 間でファイル転送することで実現している。

3) IGES インタフェース

IGES バージョン 5.0 に準拠した IGES データと中間ファイル間の変換を行う。IGES 上の製図モデルおよび 3 次元形状（線・面）モデルと、CADCEUS あるいは UNICAD 間のデータ交換が可能で、現在最も多く利用されているインタフェースである。

4) JAMA-IS インタフェース

JAMA-IS の最新バージョン 1.03 に準拠した JAMA-IS データと中間ファイルの変換を行う。JAMA-IS に準拠した JAMA-IS インタフェースは、他社に先駆け 1994 年 2 月に提供開始した。

5) 自動車メーカインタフェース

現在、自動車メーカ三社のデータ形式と中間ファイル間の変換を行える、三つのインタフェースを提供している。

6) 市販 CAD インタフェース

二種類の市販 CAD 外部ファイルと中間ファイル間の変換を行える、インタフェースを提供している。

7) 専用 CAD インタフェース

当社が提供する中間ファイル・アクセス・インタフェースを利用して、使用者は専用 CAD と中間ファイル間の変換インタフェースを開発することができる。現在、数社でこの形態によるインタフェースが開発され、専用 CAD と CADCEUS とのデータ交換、あるいは CADCEUS データを利用した業務アプリケーションで利用されている。

2.3 中間ファイルのデータモデル

CADCEUS は製品モデルを表現する様々な情報を取り扱うが、現在のデータ交換で

* UNIX は X/Open カンパニーリミテッドがライセンスしている米国ならびに他の国における登録商標である。

授受できる情報は、IGES で表現できる情報が限界である。また、各種 CAD とのインタフェースが容易に追加可能であるためには、なるべく単純なデータモデルが望ましい。次の方針でデータモデルを規定した。

- ・表現できる情報が拡張しやすい構造とする。
- ・当面の実装は、IGES が扱える範囲とする。
- ・CADCEUS が扱う情報と中間ファイルが扱う情報との差は、CADCEUS インタフェースで整合性を保つ。たとえば、CADCEUS のソリッド・モデルは CADCEUS インタフェースがサーフェス・モデルに変換する。

1) 製品モデルの構造情報

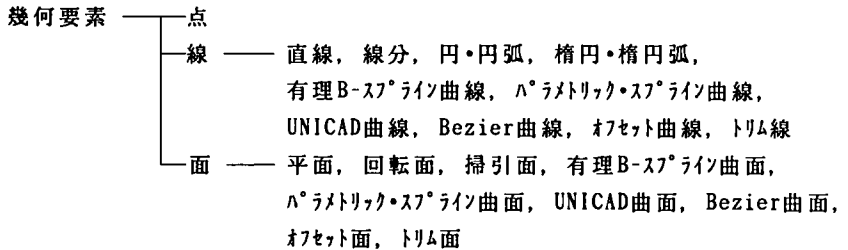
CADCEUS のデータの集合の概念である、ワークスペース、オブジェクト、グループ、レイヤが表現可能である。

2) 形状情報

幾何情報のみを持ち、位相情報、生成情報、幾何拘束情報などは持たない。

① 幾何要素の種類

自由曲線と自由曲面は、中間ファイルへはそのままの表現形式で取り込み、変換で発生する誤差を最小限にするために、各種形式を持たせている。また、Bezier 形式は、有理 B-スプラインに包含されるが、一般的によく利用される形式と考え、専用 CAD インタフェース開発者向けにあえて設けた。



② 幾何表現は、STEP および CADCEUS と同様にパラメトリック表現で統一した。

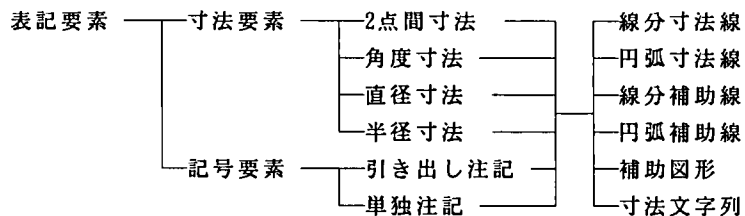
③ 幾何モデルとしては、STEP でいう GEOMETRIC_SET に相当する。

3) 製図情報

① 図面、投影図、形状間の関係は、オブジェクトとオブジェクト間関係で表す。

② 表記要素の種類

表記要素はなるべく種類を少なくし、各要素を構成する構成要素に展開する形で表現した。これは、極めて多様な表記形状を柔軟に表現でき、各インタフェースでの解釈誤りを最小限にするためである。



4) 属性情報

CADCEUS で使用者が自由に定義できる使用者属性を、中間ファイル上でもそのまま持てる。

2.4 中間ファイル・アクセス・インタフェース

現在公開してしているインタフェースは、次の観点から最上位インタフェースを提供し、要素単位での操作を可能にしている。

- 中間ファイルの整合性を保つ。
 - 細かなデータ構造を意識しなくて済む。
 - 中間ファイルのデータモデルの変更によるインタフェースの変更を最小限にする。
- 1) アクセス法を、中間ファイルへのモデルの創成のみを行うモードと、検索のみを行うモードに限定している。中間ファイルの更新を行うアクセス法は、公開していない。
 - 2) 創成関数

ワークスペース、オブジェクト、副座標、配置、レイヤ、グループ、幾何表記要素、あるいは使用者属性、などを創成する関数を提供している。オブジェクトの MIN/MAX 計算、幾何表記要素のグループへの登録などは、幾何表記要素の創成時にインタフェース内で行っている。
 - 3) 検索関数

オブジェクト一覧、レイヤー一覧、グループ一覧、オブジェクト内幾何表記要素一覧などの一覧検索関数と、オブジェクトの属性、オブジェクト内幾何表記要素の属性、使用者属性、などの属性検索関数を提供している。
 - 4) サービス関数

座標変換、各種曲線曲面の 3 次 Bezier 曲線曲面への変換、入力データの編集印書あるいは中間ファイル上の要素数集計、などの関数を提供している。
 - 5) アクセス・インタフェースは、C 言語ライブラリである。

3. IGES によるデータ交換で発生した問題

本サブシステムは、1992 年 4 月に IGES から CADCEUS への変換機能を提供以来、順次各インタフェースを追加し、各種データ形式とのデータ交換で使用されてきた。また、様々な問題を経験し変換プロセッサの改善が重ねられた。ここでは、従来から広く使用されてきた IGES データの交換に焦点を絞り、具体的な事例を挙げ、発生した問題とその対応について報告する。

3.1 相手 CAD から CADCEUS へのデータ交換で発生した問題

問題点は次の要因に分類される。

- ① 入力データが IGES 仕様を満たしていない。
- ② 入力データが何らかの誤りを持つ。
- ③ IGES 仕様が不明確である。
- ④ 図形処理演算の困難さ
- ⑤ 変換精度

3.1.1 入力データがIGES仕様を満たしていないために発生した問題

- 1) トリム面の境界線が、閉ループでない。
隣り合う境界線の端点間距離が、距離許容誤差(通常 0.01 mm)の10倍以内であれば端点を一致させ、閉ループとなるように修復している。
- 2) トリム面の境界線が、基底面の外にある。
基底面の外か内かは、距離許容誤差の10倍で判別し、判定値以内であれば面内に乗せるように修復している。
- 3) トリム面要素(144*)で外周ループが基底面の境界線と一致し、かつ内周ループを持つ場合に、外周ループへのポインタ・フィールドが無い。この問題は、修復できない。
- 4) 角度寸法が持つ2本の寸法線の向きは、1本目の寸法線は反時計回りに始まり、2本目の寸法線は時計回りに始まる、という仕様が守られていない。このようなデータがあると、寸法線が反対側に作られる。この問題は、修復できない。
- 5) 寸法補助線要素(106 f 40**)は3個以上の奇数個の点を持ち、偶数点から奇数点への補助線を引き、奇数点から偶数点へは補助線を引かない、という仕様が守られていない。このようなデータがあると、不要な寸法補助線が作られる。この問題は、修復できない。
- 6) IGES仕様で規定されている漢字の表現は、IGESバージョン5.0で採用されたフォント・コード2001のみである。また、それ以前に日本国内で暫定的に運用されていた、フォント・コード90~99がある。しかし、シフトJISコード、あるいはEUCコードで表現された漢字を含むIGESデータがある。この問題は、オプションが指定されれば修復している。

3.1.2 入力データが何らかの誤りを持つために発生した問題

- 1) 長さ0の線、面積0の面がある。
長さが距離許容誤差以下の線、基底面の4本の全ての境界線の長さが距離許容誤差以下の面は、取り込まないようにしている。
- 2) 実数値のフィールドに、文字列の"*****", "NaN", あるいは"Infinity"がある。IGESデータを作成するときに、異常に大きな実数値などを文字列化したために、このような不正な文字列が出力されたと考えられる。この問題は、修復できない。
- 3) シーケンス番号(行番号)が連続していない。
- 4) グローバル部で行を跨った数値項目、あるいは行の先頭にフィールド・デリミッタがある場合に、グローバル部の単位系が正しく読み取れない問題が発生した。この問題は、修復できない。
- 5) IGESデータが途中で途切れている。
この問題は、修復できない。

* IGESのEntity Type Numberを表す。以下同様に記す。

** IGESのEntity Type NumberとForm Numberを表す。106 f 40は、Entity Type Numberが106でForm Numberが40であることを意味する。以下同様に記す。

3.1.3 IGES 仕様が不明確なために発生した問題

IGES 仕様は、個々の要素を定義しているが、それらの要素を用いてどのようにデータモデルを表現するかは定義していない。送り出し側プロセッサは、独自の解釈に基づいて IGES データを作成し、受け取り側プロセッサは別な解釈で IGES データを取り込んでいるのが現状である。

- 1) 構成要素を持たないグループ要素 (402 f 7 など) は、許されるか。
- 2) 子図インスタンス要素 (408) を持たない子図定義要素 (308) は、許されるか。
- 3) 図面要素 (404) とビュー要素 (410) は、どのような意味付けを持つか。

図面要素とビュー要素により表現されるモデルに対しては、二つの解釈があり得る。ここでは、便宜的に「2D ビューモデル」、「3D ビューモデル」と呼ぶ。

① 2D ビューモデル

- ・図面要素は 1 枚の図面を、ビュー要素は図面上の一つの投影図を表す。これは、図面・ビュー関係がまさに図面そのものを表すことを意味する。
- ・IGES 仕様書の記述では、この解釈に立つものが多く見受けられる。

② 3D ビューモデル

- ・ビュー要素は 3 次元形状に対する一つの透視方向 (CADCEUS の副座標に相当する) を表す。図面要素は 1 枚の図面というよりは、3 次元形状を理解するのに必要な複数の透視方向を規定している (まとめている) にすぎないと考えられる。

ある IGES データが、2D ビューモデルか 3D ビューモデルのいずれの意味で作成されたかにより、取り込み側の変換方式が変わるのが通常である。しかし、IGES データの内容からその意味を判別するのは困難である。

この問題に対しては、二つの変換方式を提供し使用者に選択してもらうことで対応している。2D ビューモデルであれば、図面要素をシート・オブジェクトにビュー要素を一つのパート・オブジェクトに対応付け、オブジェクト間に配置関係を定義するように変換している。一方、3D ビューモデルならば、図面要素に対応するシート・オブジェクトと一つのパート・オブジェクトを作成し、一つのビュー要素をパート・オブジェクト内の副座標に変換している。

- 4) 自由曲面要素 (114 あるいは 128) を使用して、複合曲面を表現してよいか。

一つの自由曲面内で、隣り合うパッチが折れている、あるいは隣り合うパッチが離れている、データがときどき見受けられる。一つの自由曲面要素で、複数面から構成される一つの複合面を表していると考えられる。

この問題は、パッチ境界線上で隣り合うパッチが一致し、かつ折れていないことを調べ、そうでなければ複数面に分割している。

3.1.4 受け取りプロセッサにおける図形処理演算のために発生した問題

- 1) トリム面の境界線を基底面に投影する処理での問題

CADCEUS では、トリム面の境界線が距離許容誤差以内で面上に位置する必要がある。しかし、IGES データ上の境界線は必ずしもこの条件を満たしていないため、CADCEUS インタフェースで境界線を基底面に投影しているが、次のような面データのときに投影線が正常に求まらないことがある。

- ・境界線の長さが微小である。
長さが距離許容誤差の 10 倍以下の境界線は、間引くようにしている。
- ・トリム面の境界線が基底面の境界線に一致している。
投影計算前に基底面の境界線に一致するパターンかどうかを調べ、一致するときには投影計算をせずに基底面の境界線をそのまま使用している。
- ・基底面が非常に大きな（一辺 200000 mm）1 パッチ曲面で、有効領域が小さな（一辺 2 mm）トリム面である。
- ・糸のように細長いトリム面である。

2) 面のオフセット処理での問題

IGES のオフセット面要素 (140) は、CADCEUS にはオフセット面要素が無いため CADCEUS インタフェースで面のオフセット処理を行うが、次のような面データのときにオフセット面が正常に求まらないことがある。

- ・三角面である。

3.1.5 変換精度に関連して発生した問題

- 1) 曲面モデルの交換で変換精度を調べると、相手 CAD (変換前) と CADCEUS (変換後) とで誤差が大きい。

この種の問題は原因追求が難しいが、誤差が発生する可能性はいくつか考えられる。

- ・相手 CAD から IGES 要素への変換処理。
- ・IGES 上での数値表現が十分な桁数を持たない。
- ・IGES 要素から CADCEUS 要素への変換処理。

開発当初は、IGES 要素から CADCEUS 要素への変換処理による精度落ちがあったが、現在では最大 2/1000 程度の誤差に落ちついている。

- 2) パラメトリック・スプライン曲面 (114) で変換誤差が大きい。

パラメトリック・スプライン曲面は 3 次式の係数列で表現されるが、3 次係数が小さなきに発生しやすい。

3.2 CADCEUS から相手 CAD へのデータ交換で発生した問題

問題点は次の要因に分類される。

- ① IGES 仕様にしたがって取り込んでいない。
- ② 特定要素が取り込めない。

3.2.1 受け取り側の IGES プロセッサが IGES 仕様に基づいて取り込んでいない。

- 1) パラメトリック・スプライン曲面の無効パッチデータを参照しているために、取り込み後の形状が不正になる。
- 2) 有理 B-スプライン曲線の有効区間データを考慮していないために、曲線全体が取り込まれ曲線が長くなる。
- 3) グローバル部の文字列がカンマ (,) を含んでいるとき、そのカンマをフィールド・デリミッタとして解釈しているために IGES データが読み込めない。
- 4) トリム面が UV 線を持っていると、取り込めない。

3.2.2 受け取り側の IGES プロセッサが IGES の特定要素を受け取れない

- 1) 有理 B-スプライン曲線・曲面が受け取れない。

この問題は、IGES インタフェースが IGES データを作成するときに、有理 B-スプライン曲線・曲面をパラメトリック・スプライン曲線・曲面に変換する特殊処理で対応している。

2) 回転面、タブシル面が受け取れない。

この問題は、IGES インタフェースが IGES データを作成するときに、回転面、タブシル面を自由曲面に変換する特殊処理で対応している。

4. データ交換システムとして検討すべき問題

円滑なデータ交換を実現するためには、データそのものの問題だけでなく、データ交換システムの変換方針として検討すべき問題がある。以下に変換プロセッサの役割、変換結果の検証、および使用者にとっての問題を挙げる。

4.1 データ交換プロセッサの役割に関連する問題

問題点は次のように分類される。

- ① 不正な入力データの修復
- ② CAD の制限事項への対応
- ③ 変換対象とする情報の範囲
- ④ CAD のカスタマイズ項目の変換

4.1.1 不正な入力データをどこまで修復すべきか

入力データに誤りがあるときには、まず相手 CAD に対して誤りを通知している。本サブシステム側は、次のような考え方で対応している。

- 1) 不正な入力データに対する適切なメッセージを出力しそのデータを捨て、後続データの変換処理を続行する。

しかし、IGES データの形式的な誤りの場合には、処理の続行が困難なことがある。また、どのような不正データが入力されるかは予測しにくいので、後付けの対応にならざるを得ない。

- 2) 不正なデータが入力されても何らかの形で CADCEUS に取り込み、CADCEUS 上で手操作による修復が可能なようにする。

たとえば、IGES 上のトリム面データで不正箇所があると、いくつかの修復を試みるが、それでもトリム面として整合性が保てないときには、基底面を単独面、境界線を単独線として出力している。また、CADCEUS での手修正を容易にするため、CADCEUS 側での確認および修正が必要なデータは、特定のレイヤに出力している。トリム面として取り込めない面はレイヤ 255 へ、オフセット面として取り込めないときはレイヤ 254 へ、有理 B-スプラインの変換で十分な変換精度を保証できない面はレイヤ 253 へ出力している。

このような修復作業をどこまで実装するかで、変換プロセッサの負荷は大きく変わる。

4.1.2 CAD が持つ制限事項をどこまで考慮すべきか

CAD システムではいくつかの制限事項、たとえば数量的な制限を持つことがある。取り込みプロセッサは、取り込み先 CAD が持つ制限に抵触しないように変換する必要があるが、この制限事項への対応処理により一部の情報は失われる。失われる情報

を最小限にして、取り込み後の操作での支障を最小限にする工夫が必要となる。

CADCEUS から UNICAD への変換で行われる、UNICAD 制限事項を考慮した特殊処理を例示する。

- 1) ブロック内要素数の最大値に制約があるため、この制限値を超えるときにはブロックを分割し、それらのブロック間に直列の配置関係を持たせている。
- 2) 自由曲面のパッチ数の最大値に制約があるため、この制限値を超える自由曲面は複数面に分割している。トリム面のときには、トリム面の有効領域を含む基底面が制限値を超えなければ基底面を切り取りトリム面として変換している。それでも制限を超えるときには、基底面を分割し単独面と単独線に変換している。
- 3) 一つの要素が複数のグループに所属できない制限があるため、一つのグループのみに所属させ、それ以外のグループには所属しないようにしている。この処理により、構成メンバを持たないグループが発生する可能性があるため、メンバを持たないグループの変換処理が必要になる。
- 4) CADCEUS の寸法文字は、全角または半角で文字の高さと幅を持てる。一方、UNICAD の寸法数字は、全角のみで文字の高さと幅は同じである。CADCEUS 上の寸法数字が半角であるときには全角に変換しなければならないが、文字の高さを保つように変換すると寸法文字列全体の長さが長くなり、寸法文字と寸法補助線が重なる、寸法文字列に比べ寸法線が短い、などの不整合が生じる。文字の幅を保つように変換すると、文字が小さくなる。現在の変換仕様では、寸法文字が小さくなり図面の誤読が発生することを防ぐために、文字の高さを保つ方式を採用している。また、寸法線の長さを補正している。

4.1.3 変換対象とすべき情報の範囲はどこまでとすべきか

CAD が持つ情報のうち、データ交換として変換すべき範囲に関しても十分検討する必要がある。IGES 変換するのであれば IGES が表現できない情報、あるいは UNICAD へ変換するのであれば UNICAD が表現できない情報は、当然変換対象から除外される。しかし、変換対象にすれば渡せる情報でも、受け取り側に誤って解釈されないようにとか、データ量を少なくするという観点からは、変換対象にしない方が良くと考えられる情報もある。これらは、CAD 上で一時的な操作のための情報、または動的なモデルを表現する情報である。たとえば、非表示状態の要素や、形状復元のための一時的な消滅形状（無効面）の要素が考えられる。

4.1.4 CAD が持つカスタマイズ項目をどこまで考慮すべきか

CAD システムは各種のカスタマイズ項目を持つが、データ交換プロセッサがこれにどう対処するかも実用上大きな問題である。また、これはデータ交換プロセッサが CAD のカスタマイズ環境と深く関わることを意味する。現状は、なるべく CAD のカスタマイズ環境とは切り離して稼働できるようにするため、次のように対応している。

- 1) 距離許容誤差は、データ交換プロセッサ実行時にパラメタとして与えられるようにしている。微小な線あるいは面の間引き処理に距離許容誤差を使用しているが、微細モデルのデータ交換で有効な線までが間引かれる問題を経験した。
- 2) CADCEUS では、要素の分類別（たとえば、線、面）に表示色をカスタマイズできる。一方、IGES 上では各要素が表示色を持てるが、IGES 上の表示色をその

まま CADCEUS へ引き継ぐ変換法と、CADCEUS でカスタマイズされた表示色に変更して取り込む変換法が考えられる。両方の要求があり、現状は、データ交換プロセッサ実行時にパラメタとして要素分類別に表示色を指定できるようにしている。

- 3) 製図に使われる外字は、標準で提供されている標準外字と、使用者が自由に定義できる使用者定義外字がある。標準外字は IGES では、フォント・コードを使い分けることで表現できるが、あるデータ形式へは文字コードとして出力できないため線分などの幾何要素に分解して出力している。ただし、使用者定義外字は、CADCEUS カスタマイズ環境の外字定義ファイルを参照する必要があるため、空白に置き換えて出力している。

4.2 データ変換結果の検証に関連する問題

- 1) 変換結果が正しいかどうかの判断時に発生する問題

変換結果の妥当性に関しては、変換された要素数あるいは変換されなかった要素数による確認、CAD での表示あるいは出図による確認、あるいは面モデルの変換誤差の測定などが行われる。しかし、膨大な表記要素からなる図面、あるいは膨大な幾何要素からなる形状を、細かく調べることは極めて困難である。データ交換システムとして、変換結果の検証をどのように支援すべきかは重要な問題と考えられる。現状では、全く解決されていない問題である。

- 2) 問題が発生したときの原因追求を難しくする問題

変換結果に問題が発生した場合、送り出し側の問題なのか、受け取り側の問題なのかが、判別しにくい場合がある。とくに、曲面モデルでトリム面がトリム面として渡らない場合や、曲面モデルで変換誤差が発生した場合である。変換誤差の場合には、誤差の測定方法に問題があることも考えられる。

4.3 データ交換プロセッサの使用者に関連する問題

CAD の使用者には、データ交換はとても分かりにくい問題に思える。CAD の使用者インタフェースは、あくまで各種のモデリングなどのコマンドであり、データベースの内容ではない。一方、データ交換の機能は、送り出し側 CAD のデータベースから受け取り側 CAD のデータベースへの変換であり、変換仕様の定義もそのような記述になる。実行結果の要素数に現れるのは、データベース上の要素の個数であり、使用者が創成した数とは必ずしも一致しないため直感的に確認できない。

5. おわりに

CADCEUS のデータ交換サブシステムが持つ特徴と現実のデータ交換で遭遇した問題点について紹介した。

STEP も順次規格化されつつあり、位相付き形状モデルの交換などは規格化が進んだが、形状特徴などは現在も盛んに議論されている状況である。本サブシステムとしても、STEP で規格化された部分を順次反映する目的で、STEP インタフェースの実装実験を開始した。STEP が持つ特徴である、形式的言語による定義、適用分野の視点から仕様を定義するアプリケーション・プロトコルの採用により、仕様定義の不明確さが排除され、紹介した問題点のいくつかは解決されると期待できる。しかし、図

形処理演算の困難さ，変換精度，およびデータ交換システムとして検討すべき問題点は，実装法に依存する問題であり今後も解決に向け努力する必要がある。

-
- 参考文献** [1] 間瀬俊明，“自動車業界のSTEPへの取り組み”，STEP セミナテキスト：応用分野への利用が開始された製品モデル国際規格，日本コンピュータ・グラフィックス協会，1994.3.
- [2] M. S. Bloor, J. Owen, “CAD/CAM product-data exchange: the next step”, computer-aided design, Vol. 23 No. 4, 1991.5.
- [3] 大高哲彦，“CAD/CAM データ交換国際規格：STEP,第一報-STEPの全体構成と形状表現-”，UNISYS 技報，Vol. 11 No. 4, 1992.2.

執筆者紹介 藤井省 (Satoru Fujii)
昭和26年生。52年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年，日本ユニシス(株)入社。CAD/CAMシステムの開発に従事，現在CAD/CAMシステム部に所属。



ユニシスのエンタープライズ・データサーバ
DataCentral 1000 シリーズ

1. 開発の背景, 狙い

コンピュータの利用形態は技術の進展とユーザのニーズにそって変化している。ビジネス処理においてはメインフレームと言われた汎用機を中核にした業務処理が行われてきた。基幹系あるいは勘定系処理等といわれている処理である。

しかし、企業間の競争が厳しく激しくなってくるに伴って、さらなる競争力の強化が追求されるに至り、コンピュータ利用面からは基幹系業務を処理するだけでなく、最新の情報をタイムリに効果的に分析利用することによって“攻め”の経営が展開できるように情報を利用することが、これからの企業の勝ち残りのために必要な戦略となっている。

すなわち、基幹系情報システムに蓄積されて刻々と変化する膨大なデータを素早く検索・分析することによって、新しいサービスの提供や新規市場の開拓、新規購買層の発掘等を迅速に追求していくことが重要な課題となっている。従来情報系システムと呼ばれるシステムがこの課題に対応

するために利用されてきたが、この場合情報系のための専用DBを持ち基幹系DBとは区別されて運用されてきた。変化する情報を素早く取り込んで対応するシステムは、まだできていなかった。それらの情報を使用したDSS(意思決定支援システム: Decision Support System)にも利用し鮮度の高いデータに基づく迅速な意思決定、戦略立案、マーケティング支援を実現すること、またそのデータを多数の利用者(クライアント)が容易にアクセスできることが要求されるようになって

いる。ユニシスの「DataCentral」はまさにこれらを実現するものであり、多数のオープンなクライアントと一体となったDSS処理とそのための迅速なデータ更新処理とを実現する最先端の並列処理技術を採用したエンタープライズ・データサーバである。

2. 特 徴

- 1) 大規模大量データ検索とデータ更新を同一データベース上で高速・並列に処理

DataCentralは大量データ検索処理とリアルタイムなデータ更新処理という相反する特性を持った二つの処理を一つのシステムで、かつ同一データベース上で、互いの性能に影響を与えることなく同時に実行する技術を確認している。

しかも大量データ検索処理とデータ更新処理はそれぞれ並列処理技術に基づき処理されるために高いスループットと高速処理を実現している(図1)。

- ① 大量データ検索処理の並列処理

複数のCPUや多数のRISCによる並列処理と並列IO処理ベースのストライプド(並列)IO機能を実現している。この機能によりIO処理待ち時間を限りなくゼロにすることが可能である(図2)。

さらに条件設定による範囲指定データ検索処理は、データ・アクセラレータとよばれるキャッシュ・メモリ上にインデックス情報をもつことにより、DataCentralでは一段と高速化する独特のメカニズムを持っている(図3)。

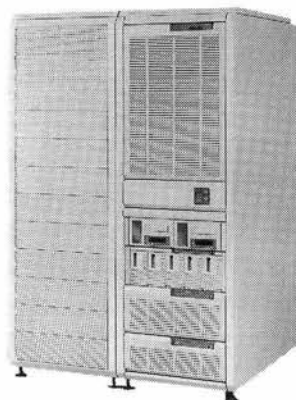


写真1 DataCentral

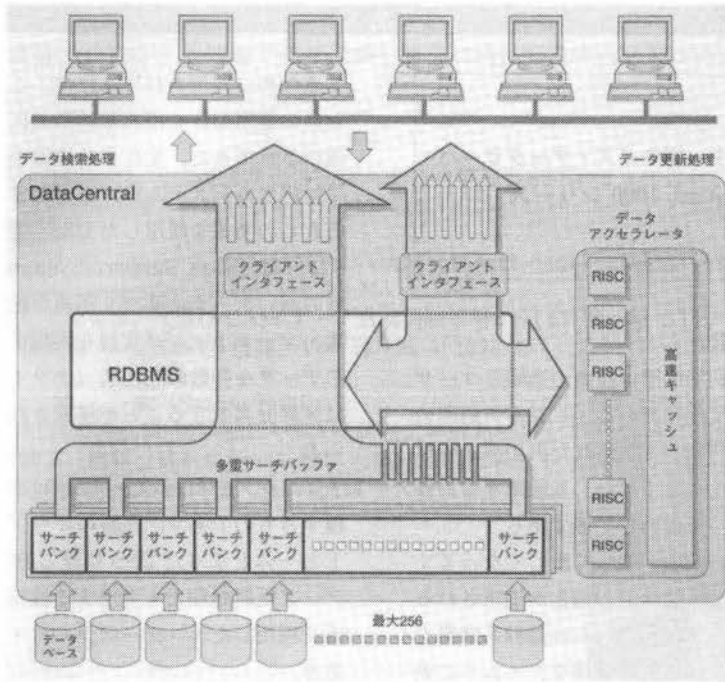


図1 全件データ検索とデータ更新の同時並列処理

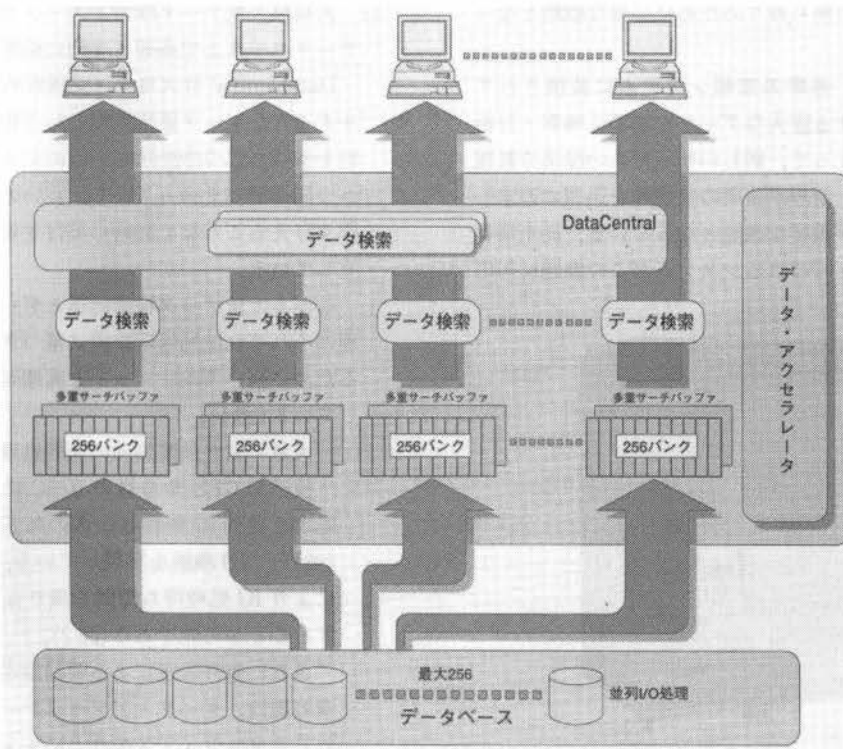


図2 データ検索並列処理

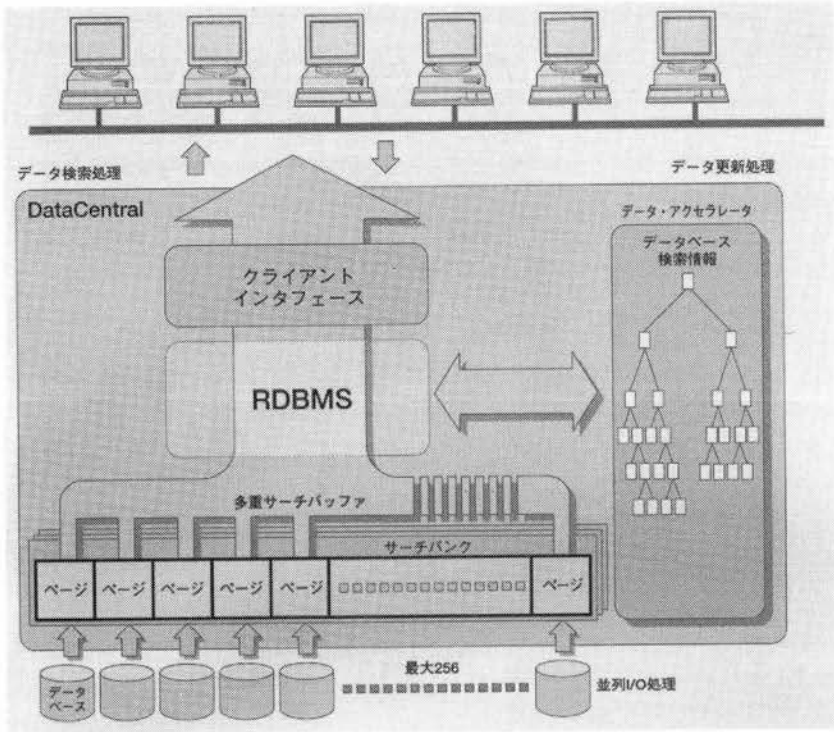


図3 範囲指定データ検索処理の高速化

② データ更新処理

複数のCPUによる並列処理とデータ・アクセラレータによる高速IO処理によって高速データ更新処理を実現している。また、多数のクライアントからの更新要求を同時並行処理できる。リアルタイムな更新時のIO処理はチャンネルやディスクへ直接アクセスすることなく、データ・アクセラレータ上でデータベース・アクセスとオーディットログの処理が完結するため、大量データ検索処理に影響を及ぼすことなく、複数のデータ更新処理を高速実行できる(図4)。

- 2) 多数の大量データ検索の並列処理や、大量のデータ更新の並列処理による高いシステムスループット能力を実現

複数のクライアントからのデータ全件検索要求を複数のCPUで同時並列処理し、CPU処理と非同期にIOの先読みをする。大容量のサーチ・バッファを介すること等により、複数クライアントの全件データ検索処理のトータル所要時間は順次処理される複数の大量

データ検索処理形態よりも大幅に短縮される(図5)。

- 3) 多様なオープン・クライアント/サーバ・インタフェースを提供

(ODBC, SQL * Star, SYBASE C/S, X/Open DTP)

データ検索処理のためには、ODBC (Open Data Base Connectivity) に準拠したインタフェース等を提供し、クライアントとしてのPCからのデータ検索要求、およびUNIXサーバ、メインフレームからのデータアクセス要求に応え、広く普及しているPC流通ソフトウェアを駆使してDataCentralを活用するクライアント/サーバ・システムの構築が可能である。

また、ORACLE, SYBASEのデータベースにアクセスするのと同じように、DataCentralのデータベースをアクセスするためのSQLインタフェースや、オープン化されたCASE/4GLであるMAPPERからDataCentralのデータベースをアクセスするためのインタフェース(MRI=MAPPER

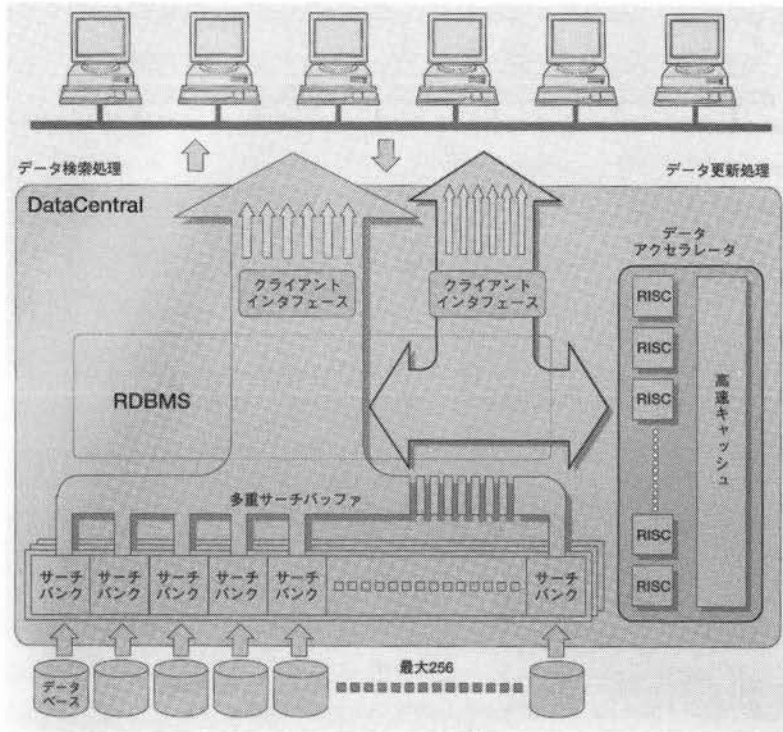


図4 データ更新処理の高速化

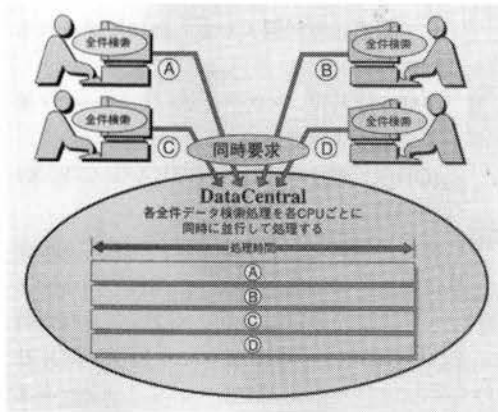


図5 複数の全件データ検索の同時並列処理

Relational Interface) などを提供し、分散データベース環境での DataCentral の利用を可能としている。

一方、リアルタイムなデータ更新処理のためのオープン・クライアント/サーバ・インタフェースとして X/Open DTP モデルに基づく TransIT Open/OLTP (計画中) を提供する。これによって、X/Open DTP のインタフェースを持つプラットフォーム上のアプリケ

ーションと DataCentral 上のアプリケーションとの間でメッセージ・レベルで更新データの交換が可能である(図6)。

4) オープンなサーバ・アプリケーション実行環境の提供

ユーザの多様なニーズに対応するクライアント/サーバ・コンピューティングを実現するために、さまざまな分散協調処理を行うサーバ・アプリケーションのための実行環境を提供する。PC や UNIX 上で開発されているプログラム(COBOL' 85, C' 89)を DataCentral 上に移植することが可能である(図7)。

5) 統合されたシステム運用管理とシステムの高信頼性/安全性の提供

DataCentral のシステム立ち上げや運用の自動化を実現。データベースの初期化や再編成、障害回復、セキュリティ管理、効率の良いデータベース管理機能、オンライン稼働状況監視等の機能を提供し、従来の大型メインフレームと同等の運用管理機能を実現。

また、遠隔障害監視機能、遠隔障害保守機能を標準装備している。

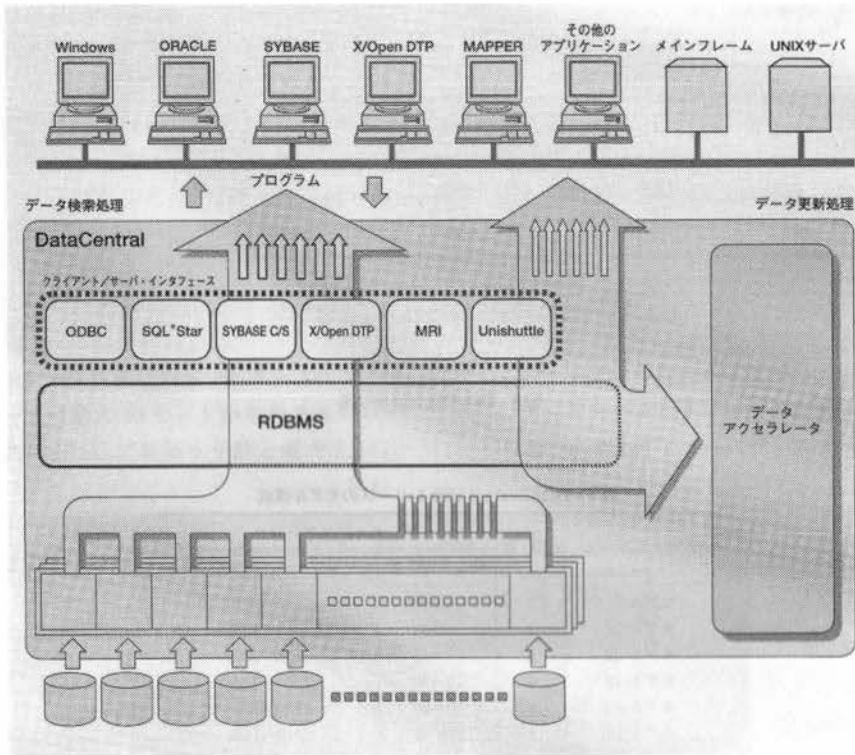


図6 クライアント/サーバ・インタフェース

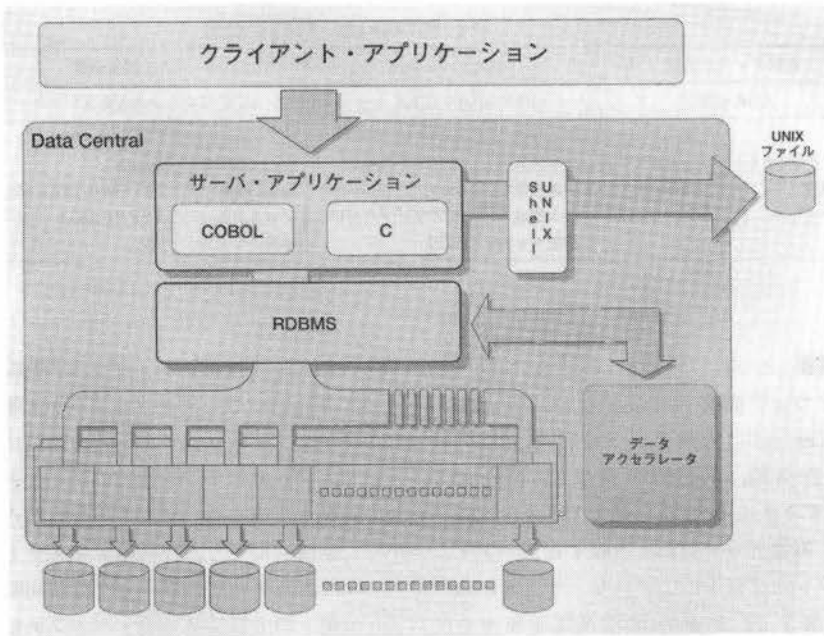


図7 アプリケーション実行環境

6) 柔軟な拡張が可能なハードウェア・アーキテクチャ

DataCentral は運用の中断を最小限に抑え

ながら、ビジネスの規模拡大に合わせて CPU やディスクなどを柔軟にハードウェアを拡張できる。

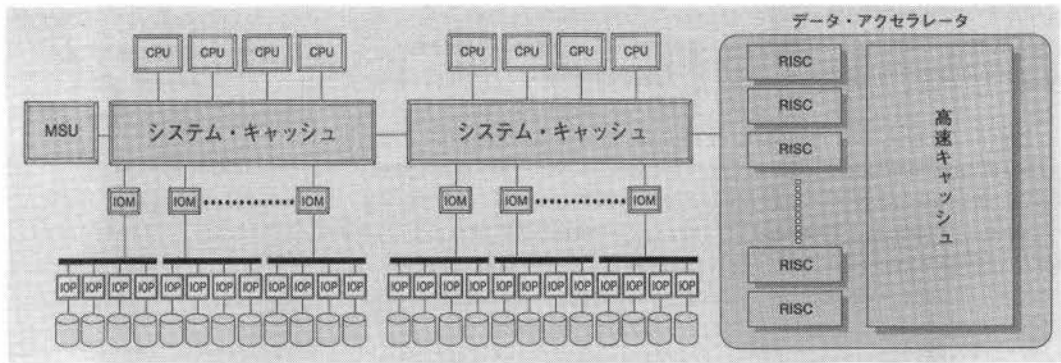


図8 DataCentral 構成図

表1 DataCentral 1000 シリーズのモデル構成

システムモデル	CPU 数	データ・アクセラレータ	
		最大 RISC 数	キャッシュメモリ容量(MB)
モデル 21	2	6~10	512~1280
モデル 22	2	6~12	512~1280
モデル 32	3	8~16	768~2304
モデル 42	4	10~20	1024~3328
モデル 63	6	10~22	1024~3328
モデル 84	8	18~40	2048~7424

表2 周辺機器仕様

磁気ディスク装置		磁気テープ装置		LAN 接続装置	
USR 4230		USR 5073 カートリッジ		HLC II ホスト LAN コントローラ	
容量	4.8~12 GB	移送速度	4 MB	サポート LAN	FDDI/イーサネット
平均アクセスタイム	11+5.6ミリ秒	テープ速度	79 インチ/秒	接続 LAN 数	最大 2
転送速度	10 MB/秒	記録密度	38000バイト/インチ	LAN 規格	ISO FDDI/IEEE 802.3
接続チャンネル	SCSI	最大構成	16 ドライブ/1 CU	プロトコル	TCP/IP DCA
		接続チャンネル	SCSI	接続チャンネル	BMC

3. 製品の概要

1) ハードウェア構成

DataCentral は大量データ全件検索用の CPU を 2~8 個、主記憶容量は 256 MB~2 GB、IO チャンネルは 32 から最大 128 まで拡張できる。高速データ更新に貢献するデータ・アクセラレータは RISC プロセッサを 6 から最大 40 個まで、非破壊/非消滅型キャッシュ・メモリ容量は最大 7.4 GB（ミラー構成）まで拡張可能である。6 モデルを提供する（図 8、表 1、表 2）。

2) ストライブド IO 機能

高速に大量データ検索を行うために、デー

タベースはストライブド IO 機能により展開されている。ストライブド IO 機能はデータベース・レコードを一定の単位に分割し、最大 256 系列までの複数のディスク上に振り分けて収納する。クライアントからのデータ検索要求に対し、複数のディスク上に振り分けられたデータ・ブロック群が同時並列に主記憶上の大容量サーチ・バッファに読み込まれる。サーチ・バッファはデータ検索スレッド要求ごとに最大 256 バンクまであり、複数の CPU 構成では複数のサーチ・バッファ（多重サーチ・バッファ）を使って検索処理を並列実行する。サーチ・バッファは対となる二つ

のバッファで構成され、一方のバッファ上で検索処理が行われている間に他方のバッファは連続する次のデータ・ブロックを読み込む。このためにCPUはディスクIOから解放されるとともに、ストライプされたデータ・ブロック群は検索処理とオーバーラップしてサーチ・バッファ内に読み込まれるために、IO処理待ち時間は限りなく短くなり、CPU能力が有効に活用できる(図9)。

3) データ・アクセラレータ

高速データ更新に貢献するデータ・アクセラレータは最大40セットからなる並列処理ベースのRISCプロセッサ群と最大7.4GB

(ミラー構成)のデータ非破壊/非消滅型の大容量キャッシュ・メモリを備え、システムレベルの大規模キャッシングを実現する。一度ディスクから読み込まれたデータはデータ・アクセラレータ上に保存され、通常約90%以上のヒット率でその後のデータ・アクセスを高速化する。データ更新処理においてはデータ・アクセラレータ上で更新処理が行われた時点で処理の終了をCPUに通知する。さらに、データ更新や障害回復、監査証跡としてのオーディット・ログ情報の処理は、それがデータ・アクセラレータ上に書き込まれた時点で処理が終了する。ディスクへの書き込み

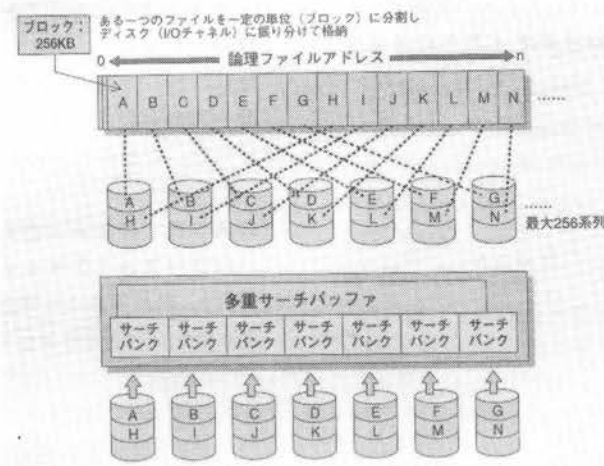


図9 ファイルの並列化

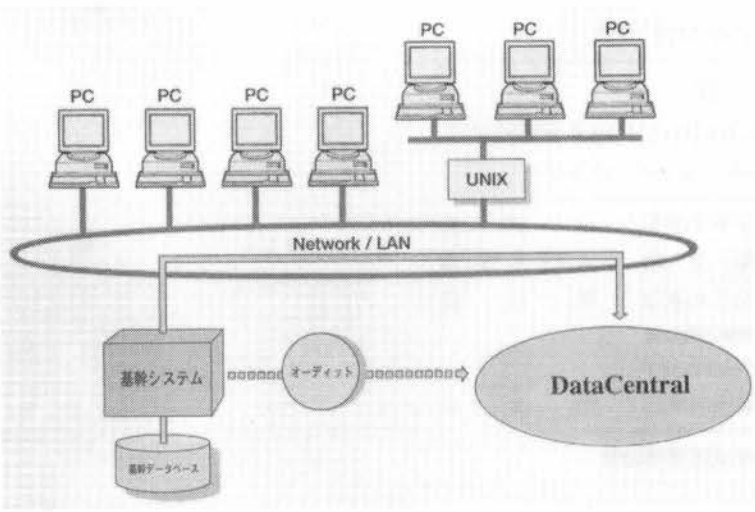


図10 DataCentralと基幹システムの連携

はデータ更新処理とは非同期に行われる。これによりデータ・アクセス、更新処理、オーディット処理の大部分はデータ・アクセラレータ上で完了することとなり、チャンネルやディスクへの直接アクセスは激減し高速処理が達成される。

4) 性能 (DataCentral 1000 シリーズの性能)

DataCentral 1000 シリーズの検索と更新処理の性能目標は次の通りである。

- ・データ検索処理……………約 50 万～200 万
レコード/分
- ・データ更新処理……………約 80～320 トラン
ザクション/秒

5) 基幹システムとの連携

DataCentral は既存システムの基幹データベースを DataCentral のディスクにストラ

イプド IO 機能により展開した RDBMS ファイルとして保持する。ファイルを最新状態に維持するために基幹データベースの更新情報をオーディット情報として LAN を通じて受取りこれをもとに DataCentral 自身が RDBMS を更新する (図 10)。

DataCentral は大量データ検索とデータ更新を同一データベース上で相互に影響を与えることなく同時並行に高速に処理すること、複数の大量データ検索処理を同時に並列処理すること、複数のオープンなクライアントからのアクセスとアプリケーション処理ができることなど、これまでに、なかった機能を持っている。企業が今必要としている新しい DSS アプリケーション実現のためにはこれらの機能は必須であり有効である。

CADCEUSの幾何処理モジュールは、C言語のプログラムから利用できる関数ライブラリである。このライブラリは、線と線の交点、面と面の交線、図形間距離、マトリクス演算等を行う。宮地恵美は幾何処理モジュールの中で、幾何処理ライブラリとしての特色を、幾何データの表現形式とインタフェースを中心に述べている。

CADCEUSの形状モデラの処理系は幾何処理と位相処理から成る。形状モデリングにおいて、面と面の交線計算などの幾何処理の結果生じる面と面の隣接関係の変化等を扱うのが位相処理モジュールである。位相処理モジュールの主な役割は、形状モデルを表現するデータ構造の位相的な整合性を維持・管理することである。片平正成は位相処理モジュールの中で、位相情報を持つ唯一の形状データである複合図形と、複合図形を創成・変更する位相処理について説明している。

CADデータ交換の必要性は高まる一方であるが、円滑な交換はなかなか実現されていない。CADCEUSのデータ交換サブシステムは、CADCEUSとIGESをはじめとする各種データ形式間のデータ交換の機能を提供する。その特徴は中間ファイル方式の採用による拡張性と保守性の高さにある。藤井省のデータ交換サブシステムは、データ交換サブシステムの概要を紹介するとともに、データ交換で発生する問題点とその解決策について考察している。



▶ 技報編集委員会

委員長 柳生孝昭

副委員長 小林 允

委員 青柳幸久, 佐々木健夫, 村岡俊彦
馬場正存, 長島 毅, 加藤正隆
高畑和夫, 萩田勝政, 原 潔
古村哲也, 岩佐宏一, 松倉 司
酒井喜嗣

▶ 編集制作担当

システム企画部 標準企画室

駒崎洋介, 丹野敬子

総合マーケティング部

熊谷 貴

● Editorial Board

T. Yagiu (Chairman)

M. Kobayashi (Vice Chairman)

Y. Aoyagi, T. Sasaki, T. Muraoka

M. Baba, T. Nagashima, M. Kato

K. Takahata, K. Hagita, K. Hara

T. Komura, K. Iwasa, T. Matsukura

Y. Sakai

● Editorial Staff

Y. Komazaki, K. Tanno

(Systems Operations Planning)

T. Kumagai

(Corporate Planning & Marketing)

ISSN 0914-9996

技 報

UNISYS TECHNOLOGY REVIEW

Vol. 14 No. 4 (No. 44)

発行日 平成7年2月28日
編集発行人 柳生孝昭
発行所 日本ユニシス株式会社
東京都江東区豊洲1-1-1 〒135
TEL(03)5546-4111 (大代表)
印刷所 三美印刷株式会社

禁無断複製転載

UNISYS

日本ユニシス株式会社

本社 東京都江東区豊洲 1-1-1 〒135 電話03-5546-4111(大代表)

ユニシスの、新DOS/V PCシリーズ。

Pentium (90MHz) 搭載のサーバ機から、クライアント機、ノート型までがフルラインアップで新登場
そろそろ新しいPCを、あるいはPC-LANを導入したい、PCによるC/Sシステムを構築したい…
そんなユーザの多様なニーズにお応えします

ノートPCからサーバまで、
フルラインアップで

新登場。

マルチメディア時代の、
高性能ノートPCです。

NBC4000

カラーモデル 本体価格448,000円より(税別)

- ディスプレイ：TFTカラー液晶(256色)、DSTNカラー液晶(256色)、モノクロ液晶(54階調)の3種類(全4モデル)
- CPU：Intel DX4(75MHz)またはSL Enhanced 486DX2(50MHz)
- メインメモリ：8MBまたは44MB
- HDD：250MB(モノクロモデル)、340MB(カラーモデル)ともに搭載可能
- FDD：外付け3.5"
- PCMCIAカード実装可能(Type I x2またはType II x1)
- サウンド機能標準装備(SoundBlaster互換)
- サイズ(W×D×H)：279×216×34
- ソフトウェア：MS-DOS2 V.MS-Windows3.1



パソコンもユニシス。



CWV4332/CWV4662

intel486SX(33MHz)搭載-CWV4332
intel486DX(66MHz)搭載-CWV4662
本体価格152,000円(税別)



ELI4663R

intel486DX2(66MHz)搭載
本体価格277,000円(税別)



ELI41003

intel DX4(100MHz)搭載
本体価格357,000円(税別)



MDP5605

Pentium(50MHz)搭載
本体価格435,000円(税別)



SVI5907

Pentium(90MHz)搭載
本体価格666,000円(税別)



SSE59010

Pentium(50MHz)
最大4個搭載
(近日発売)



SFE59010

(フェムトランジスタサーバ)
Pentium(50MHz)
最大4個搭載
(近日発売)



NEW Advantage シリーズ

●お問合せ先 ☎03-5546-4422 関西・中部地区の方は下記のお問合せ先もご利用いただけます。
(月曜～金曜、9:00～17:30) ☎06-343-5500 ☎52-204-6641

●intel inside, Pentium, Intel DX4, 486SX, 米国インテル社の商標および登録商標です。
●MS-DOS, MS-Windowsは、米国マイクロソフト社の商標です。
●その他の記載の社名、製品名は、各社の商標または登録商標です。