

情報処理技術の最新動向

小林 富士男・森 克己・清水 光・坪井 始・服部 進
川久保 和雄・新谷 敏朗・田中 始男

The Modern Trend in Computer Science and Engineering

Fujio KOBAYASHI, Katsumi MORI, Hikaru SHIMIZU, Hajime TSUBOI, Susumu HATTORI,
Kazuo KAWAKUBO, Toshio SHINTANI and Motoo TANAKA

ABSTRACT

Computers have now entered the age of multimedia. In order to be able to handle with ease the various types of data, such as audio, visual and text data, a large-capacity and high-speed access memory device is absolutely necessary.

In this paper, the modern trends of computer science and engineering are described in various fields. The fields are as follows : algorithm analysis and data structures, computer architecture, database and information retrieval, distributed processing and computer network, artificial intelligence and image processing, numerical analysis and numerical formula processing, data processing system.

Keywords : algorithm analysis, computer architecture, computer network, image processing, numerical analysis

1. まえがき

近年、半導体技術の著しい進歩により、マルチメディア情報が理解しやすいものになろうとしている。画像情報圧縮技術の発達、パソコンやワークステーションのマルチメディア技術の進歩などを背景として、情報システムのマルチメディア化が急速に進展している。情報活用を目的とした情報システムの高度化、分散化に伴いネットワークの役割はますます大きくなりつつある。なかでも、映像・音声・データなどを統合して扱うマルチメディア化、コンピュータのライトサイジングやオープン化の進展に伴うLANの普及、いつでも、どこでも、だれとでもという通信の理想を追求するパーソナル化などが、最近のネットワークの動向である。

計算機は科学技術を高速に行うことを指向したスーパーコンピュータ、総合情報処理システムの中核を担う汎用計算機、機能的には汎用であるが専用化して使用するワークステーション、さらにパーソナルコンピュータとに大きく分化しつつある。

通信技術と計算技術の融合を支えるソフトウェアの諸問題、すなわち通信ソフトウェア、標準化、分散処理など、また、情報システムの利用者層の拡大に対する利用者インタフェース、ますます大規模化、複雑化が進むソフトウェアの開発を扱うソフトウェア工学などが新たに加わってきた。知的所有権、コンピュータセキュリティの問題にも真正面から取り組まなければならない。さらに、わが国特有の日本語処理の問題も重要である。技術の進展と社会の要求につれて、このように増加する話題をすべて取り扱うことは困難である。本稿では、コンピュータサイエンスの分野を知るうえで鍵となる領域を対象とする。

2. アルゴリズムとデータ構造

現在、情報処理学会アルゴリズム研究会で取り扱われているテーマは以下の8分野である。

- (1) グラフ、ネットワーク等に関する離散アルゴリズム。
- (2) 計算幾何学と計算代数学。

- (3) 暗号、符号などの数論的アルゴリズム。
- (4) 確率アルゴリズムと近似アルゴリズム。
- (5) 分散、並列アルゴリズム。
- (6) データ構造。
- (7) 計算複雑度理論。
- (8) アルゴリズムの応用と実用。

この中で最近特に進展が著しい分野は(2)の計算幾何学である。計算幾何学は、図形の交差の判定・凸包の計算・領域探索など2、3次元の幾何学的図形に関する問題を扱う。コンピュータグラフィックス・VLSIの設計・地理情報処理などの応用分野がある。これらの応用ではデータ数が 10^4 程度以上のオーダの問題を扱う必要があり、時間計算量の小さいアルゴリズムの研究が進められている⁹⁾。

次に(3)の数論的アルゴリズムに関しては、素因数分解の困難性を利用した公開鍵暗号系や零知識相互証明などが研究されている。公開鍵暗号ではRSA暗号が最も実用的であると考えられており、最近では楕円曲線を用いたものも発表されている²⁾。符号理論においても、代数幾何符号と呼ばれる性能のよい誤り訂正符号に関する研究が行われている³⁾。また、符号理論の応用としてデータの圧縮があるが、種々の情報源に対して一つのアルゴリズムで効率よく圧縮することが可能なユニバーサル符号が最近注目され、実用化に期待が寄せられている⁴⁾。

また、厳密な意味ではアルゴリズムとはいえないが、NP完全であることが証明されているような最適化問題に対して、必ずしも最適ではないが多項式時間で最適解にある程度近い近似解が得られる計算法を近似アルゴリズム⁵⁾と称して、例えば「ナップザック問題」や「巡回セールスマン問題」に対する近似解を求めることなどが行われている。

同様に、アルゴリズムが備えているべき逐次性、決定性の条件を各々緩めた形である並列アルゴリズム、確率(あるいは発見的)アルゴリズム⁶⁾の研究も盛んに行われている。並列アルゴリズム⁷⁾においても、逐次的なアルゴリズムと同様に問題の困難さによって問題が分類されており、効率よく並列化することが可能な問題のクラスはNCと呼ばれている。「 $NC \neq P$ 」であると予想されており、効率よく並列化することができない本質的に逐次的な問題が存在すると考えられるがまだ証明はされていない。確率アルゴリズムでは、ニューラルネットワーク、遺伝アルゴリズムなどが最適化問題に対して研究されている。

歴史の古いグラフ、ネットワーク関係のアルゴリズムでは、例えば、ネットワーク・フローに関するものでE. Tardosの最小コストフロー問題の強多項式時間アルゴリズム、N. Karmarkarの線形計画法における「内点法」、

A. V. Goldbergによる最大フロー問題と最小コストフロー問題における「プリフロー・プッシュ法」などの成果が得られている⁸⁾。また、同様に歴史のある整列問題でも「シェルソート」の時間計算量に関する研究などが発表されている⁹⁾。

(7)の計算複雑度理論については、「 $P = NP$ 」かどうかということについては依然未解決であるが、大方の予想通り、否定的な状況証拠を示すような研究結果が出されている。例えば、「 $P = NP$ 」が成立すれば一方向関数が存在しないことが導かれ¹⁰⁾現代暗号の大前提がくずれることになる。また、PCP理論によればある種の最適化問題に対して、「効率のよい近似アルゴリズムが存在すれば、『 $P = NP$ 』が成立する」ことが示せる¹¹⁾。しかしそのような近似アルゴリズムは発見されていない。

アルゴリズムとデータ構造の研究では如何にして時間計算量の小さいアルゴリズムを見いだすかということが一つの大きな課題である。最近10年程度の間に得られた成果の例として上述の線形計画法における内点法を挙げる。1984年にBell研究所のKarmarkarが、従来線形計画法の解法として確立した解法であると考えられていた「単体法」と全く異なった「内点法」を発表した¹²⁾。単体法は許容領域を構成する多面体の頂点をたどりながら最適解に到達したが、内点法では許容領域の内部を通して最適解に到達する。アルゴリズムとしては、単体法が最悪の場合指数オーダの時間計算量が必要であったのに対して、内点法では最悪の場合でも多項式時間で良いという理論的に画期的なものであった。また実用的にも単体法で解くことが可能な限界である数万以上の制約を持つような大規模な問題に対しても有効ではないかという期待があり、研究が進められている。

(8)は平成7年度から追加された分野であり、今後の進展が期待される。

3. コンピュータアーキテクチャの動向

近年のVLSI(超大規模集積回路)技術の飛躍的な進歩に伴って、コンピュータアーキテクチャ(構成方式)の分野では高速化、高機能化をめざしてさまざまな技術が研究開発されてきた。現在のコンピュータの世代は第5世代といわれているが、本章では第5世代を特徴づける近年のコンピュータアーキテクチャの主要な技術動向について取り上げる。

3.1 RISC

従来のコンピュータでは高性能化、高機能化に伴い複雑化した多様な操作をできるだけハードウェアで実現させるために、命令体系を複雑なものにする方向で進んできた。このような方式のアーキテクチャはCISC(Complex Instruction Set Computers)とよばれている。CISCの

特徴は、可変長命令、メモリ・メモリ間演算、豊富なアドレッシングモード、およびマイクロプログラム制御による命令実行などである。CISCでは肥大化した命令セットに対応するため回路構成も複雑になり、素子数も飛躍的に増加し、設計開発に多大のコストと期間が必要となってきた。しかもこれらの回路の複雑さが、必ずしも高速化につながらないことがわかってきた。

これに対して近年普及しつつある方式がRISC (Reduced Instruction Set Computers) である¹³⁾。RISCは、命令体系をできるだけ単純化し、VLSIの設計を容易にするのと同時に、命令の解読（デコード）と実行を高速化するというものである。RISCの特徴は簡潔な命令体系、解読の容易な固定長命令、ロード／ストアに限定したメモリ参照方式、最小限のアドレッシングモード、および布線論理で制御される命令実行である。RISCは最適化コンパイラの利用を前提にソフトとハードのトレードオフを見直したものといえることができる。RISCの代表的なプロセッサには、SunのSuper SPARCなどがある。

RISCは1980年代初めに台頭し、当時RISC対CISCの論争がさかんに行なわれた。現在ワークステーションの分野ではRISCが優勢である。しかし、CISCの利点も捨てがたく、今後の方向としては、IntelのPentiumなどに見られるようなRISCとCISCの共存など、CISCの利点を生かした方向も模索されると考えられる。

3.2 ベクトルプロセッサ

ベクトルプロセッサは、ベクトルや行列など多数の種類のデータが規則的に配列されているものに対する同一の演算を、演算器にそれらのデータを連続的に供給して高速化をはかるものであり、演算パイプライン方式ともよばれている¹⁴⁾。

FORTRANのDO文のような通常の手続き型言語コードのループ部分を自動的に抽出して、ベクトル命令に変換するベクトル化コンパイラの普及により、容易にベクトルプロセッサを利用することが可能になった。

現在の科学技術計算用のスーパーコンピュータの大半は、このベクトルプロセッサを利用している。現時点でのベクトルプロセッサの最大演算性能は、単体で8 GFLOPS（1秒間に80億回の浮動小数点演算の実行）、マルチプロセッサ方式では20～32 GFLOPSに達している。

3.3 並列処理マシン

各種のシミュレーションや、設計支援、人工知能分野など、元来自然な形で高度の並列性を持った分野における処理の高速化の要求などを背景とし、従来の逐次型プログラムの枠内での高速化の限界を、空間的に配置された多数のプロセッサにより並列処理することで突破することをめざして、並列処理マシンが活発に研究開発されてきた¹⁵⁾。並列処理マシンの実現方式としては、大別し

てSIMD (Single Instruction Single Data Stream) 方式とMIMD (Multiple Instruction Multiple Data Stream) 方式がある。

SIMD方式は一つの制御装置から発せられた命令が多数のデータに同時に作用するものであり、一つの制御の流れのもとに、一斉に演算や通信がなされる。代表例にMPPがあり、16,384台の1ビット演算器が2次元格子状(128×128)に結合され、データ交換は東西南北の隣接した演算器となされる。SIMD方式は定型的な応用や専用目的に向いている。

一方、MIMD方式はそれぞれ制御機構を持つ複数のプロセッサが、互いに他のプロセッサと通信しながら、協調して非同期に動作する方式である。どのプロセッサ間でも自由に通信できる構造になっているため、競合が起こるなど、通信オーバーヘッドが大きい、非定型な応用や汎用目的では高速化が期待できる。商用化されているシステムとしては、NCUBE、CM-5などがある。

近年さらに、従来の並列処理マシンの枠組みを大きく越えた数千台あるいは数万台といった規模のプロセッサを備えた、いわゆる超並列マシンもすでに商用機として実現され、注目されている。

並列処理マシンの今後の課題としては、効率のよい並列処理アルゴリズムの開発、プロセッサ間の負荷分散、高速の同期／通信機構などがある。

3.4 スーパスカラ方式

1つの命令の実行過程を複数のステップ（ステージとよぶ）に分け、連続したいくつかの命令の異なる複数のステージを流れ作業的に同時に並列に実行して高速化をはかる方式を命令パイプライン方式とよび、従来から多くのアーキテクチャで採用されてきた。スーパスカラ方式は、この命令パイプラインを複数装備して、並列処理可能なデータを実行時に決める方式であり、IntelのPentiumなど、この方式を採用するコンピュータが実用化されている¹⁶⁾。

3.5 ハードウェアアルゴリズム

ハードウェアアルゴリズムは、コンピュータの演算器の演算方式を実現するハードウェア回路の構成方法であるが、これを工夫して演算を高速化する研究もさかんに行われている。例えばわが国で開発された2進数の各桁を2ビットで表現する冗長2進表現の手法は、各種の演算の高速化に効果を見せている。

3.6 データフローマシン

現在のほとんどのコンピュータが採用しているフォンノイマン型（逐次処理型）の動作原理から離れ、新しい動作原理を導入しようとする研究も活発に進められている。その代表例がデータフローマシンである¹⁴⁾。

データフローマシンでは、命令は通常のフォンノイマ

ソ型のプロセッサのように命令が並んでいる順序に実行されるのではなく、命令が扱うデータの依存関係によって決定される。つまり、それぞれの命令はその演算を実行するのに必要とするデータが揃った時点で自動的に実行される。従って、並列に実行が可能な演算は自動的にただちに並列実行されるので、処理速度の高速化が期待される。プログラムはデータの依存関係を示すデータフローグラフで表現され、プログラマが実行順序を指定する必要はない。ベクトル化が容易でないような科学技術計算分野や人工知能用言語Prologの処理系などの非定型的処理の高速処理が期待されている。

問題点としては、演算自体の並列実行は容易であるが、データが揃ったことを確認するユニットに処理が集中し、全体としては並列実行度が低下する場合があげられる。また、データフロー型に適した高水準言語の研究が今後期待されるところである。

3.7 今後の方向

今後、素子自体の高集積度化、高速化の限界に近づくにつれ、アーキテクチャによる高性能化が以前にもまして重要になる。並列処理などによる高速化がさらに進むことが予想されるが、ハードウェア構成のみならず、それを有効に生かすオペレーティングシステム(OS)や、最適化コンパイラの研究開発も必要である。また耐故障性などの、高速化以外の高機能化も重要な課題となろう。

4. データベースと情報検索

4.1 大きな転換点

高度情報化、マルチメディア化、ネットワーク化の流れに呼応してデータベースの考え方は、今、大きな転換点を迎えている。データベース(DB)はこれまで大量のデータの「安全な共用保管庫」と考えられてきたが、今、その役割は「多様なソフトウェアやハードウェアの統合基盤」あるいは「人間の知的活動の環境基盤」へと大きく変化しつつある¹⁷⁾。従来のDBは事務用途であり、扱うデータは品名、個数、金額等のスカラー量的な文字、数値であり、また、データに対する操作も簡単な四則演算的なものが主であった。すなわち、データ間には複雑な構造は存在せず、また、操作・加工も外付けのアプリケーションプログラム(AP)で処理されてきた。したがって、従来のDBの主要な課題は、①データがもつ構造を排除し原子(atom)化・平坦化すること、また、DBシステムを実現する個々の計算機システムの影響を排除する②ハードウェア、ソフトウェアからのデータの独立であった。これに対し次世代のDBは文書、音、画像などマルチメディアデータを対象とする。従来の事務データとの大きな違いは、これらのデータは複雑な構造をもつことにある。例えば、CADデータベースが対象とする図面

データでは、点、線、面のデータを個別に独立に管理しても無意味であり、点、線、面が相互にどのように関連し、どの面がどの部品を構成し、さらに全体となるかを有機的に管理することが本質的に必要となる。また、データに対する操作も、拡大・縮小、立体表示での視点移動などデータと一体になった複雑な処理が必要になる。すなわち、従来のDBが目指してきた、データ構造の排除、応用プログラムからの独立とは逆の要求に応えることが必要となってきたのである。

4.2 データモデルの歴史的推移と特徴

DBの歴史は次の3世代に分けて考えられている。

- (1) 第1世代：1963年に米国のGE社が発売したIDSが世界初のデータベース管理システムといわれる。そのデータモデルはCODASYLの網(ネットワーク)データモデル¹⁸⁾として広く普及した。続いて、1968年にIBM社から階層型データベース¹⁹⁾としてIMSが発売された。階層型モデルは大、中、小分類と順次細分化する構造で、人間が行う各種の分類手法に適合し理解しやすい。分類方法(構造)に合ったデータの検索は効率良く実行できるが、構造に合わない形での検索は効率が悪い。網モデルは2つのデータ種の組(親子集合)を単位として関連するデータ間をポインタで連結するもので、階層型モデルよりも柔軟な構造となっている。
- (2) 第2世代：1970年には関係(リレーショナル)データモデル(RDB)がIBMのコード(Codd)によって提案された。データは“関係”とよばれる表で組織化、管理、表示される¹⁹⁾。第1世代のDBがポインタやリストなどの計算機の記憶構造に直結していたのに対して、RDBでは数学的に形式化された高いデータの独立性が実現されている。また、第1～第4の正規化によりデータ間の相関(関数従属性)を徹底的に排除している。1980年代には商品化され事務用のDBとして高い評価を得ている。

なお、1970年代後半から、経済性、ソフトの生産性、安全性の観点から分散型DBシステムが現れてきた。これは複数のDBシステムを通信網で相互に接続し、利用者にはあたかも1つのDBシステムであるかのようなサービスを提供するものである。分散型DBシステムにはトップダウン型とボトムアップ型の2つの考え方があり。トップダウン型はデータを複数のDBシステムに最適になるように分散させるもので、一般には同一のRDBシステムから構成される。他方、ボトムアップ型は関係モデルや網モデルが混在する異種DBシステムをLAN等で接続し相互にデータ提供サービスを行うものであり、データモデルの差の吸収が課題となる²⁰⁾。

- (3) 第3世代(次世代)：1980年代半には、CAD、CASE

等の応用に対してRDBでは不十分であることが認識され、演繹データベース²¹⁾、意味データベース、オブジェクト指向データベース (OODB)²²⁾²³⁾など様々なデータモデルが提案されてきた。その中で最も実用化が進んでいるのがOODBである。世界初のOODBは1984年に発表されたオレゴン大学院のGemStoneであるといわれている。

第1、2世代のDBとOODBの最大の違いはオブジェクトの概念による「データとプログラム化された手続きの一体化(カプセル化)」にある。すなわち、実世界の対象物が、そのデータと振舞いとは一体でモデル化される。その結果として、固有の動作様式を持つ多数のオブジェクトが集まり全体として合目的に機能する系を的確に表現しようとするものである²⁴⁾。この意味でOODBシステムはDB機能とプログラミング言語が融合したソフトウェアシステムと位置付けられる。OODBの作りを記述するスキーマ構造は階層構造を基本としており、柔軟性の点では従来のRDBよりも劣る。そこで、DBの共用化の観点からは、スキーマやオブジェクトの多様化、仮想化を可能とするビュー (View) 機能の充実が必要となる²⁵⁾。なお、注意すべき点は、事務データにもOODBが適しているとは主張されていないことである。

4.3 マルチメディアデータベースと情報検索

従来の文字・数値データに加えて文書、図画、動画、音等のデータを統合して1つのDBとし、それに統一的なインタフェースを付加しデータの検索、生成、削除、更新を行えるDBシステムをマルチメディアデータベースシステム (MMDBS) という²⁴⁾²⁶⁾。MMDBSでは異なるメディア間の異質性の吸収が必要であるが、その方法として、文書も画像も1つのオブジェクトとして捉えることができるOODBが最も有力であると考えられている²⁷⁾。マルチメディア化には情報の本質に関わる困難な問題が含まれている。DBの構築に際して、DB管理者は何をオブジェクトにし、どのような性質を付与するかを具体的に設定しなければならない。従来の文字・数値データを扱う事務用のDBでは、DB管理者とDB利用者の間でのデータの意味付けに大きな差が生じる余地はなかったので、両者に共通する検索キーの設定が容易であった。したがって、利用者はDBシステムすなわちDB管理者が提供する検索キーを用いて目的のデータに効率よくアクセスすることができた。これに対して、MMDBSが対象とするデータは意味付けが特定できない情報である。例えば、1枚の人物画像に対しても、性別、顔つき、服装、身長、撮影場所、周囲の人物、…、など見る人によって無限に近い情報に焦点を当てることができる。すなわち、DB管理者とDB利用者の間で共通の検索キーを設定することが不可能となる。このことは、情報利用の高度化が

「情報は本来個人の主観によって異なるものである」という問題に遭遇してきたことを意味する。この問題を解決するためには、利用者の検索意図をDBシステムに伝えるための柔軟なインタフェース技術、検索意図に対応した内容検索、曖昧性を許容した類似度検索などさまざまな課題の克服が必要である²⁸⁾。最終的には、データは共通であるがその意味付けの世界は利用者毎に異なることを許すシステムの開発が待たれることになると思われる。

5. 分散処理とコンピュータネットワーク

計算機の高性能化や低価格化による高機能パーソナルコンピュータやワークステーションの普及、規格化された伝送路の普及、各種中継器機などのLAN (Local Area Network) ハードウェア技術の進歩と普及により、複数の計算機を接続して資源共有や処理の分散実行を行う分散処理システムが急激に浸透しつつある。これにより、大型計算機を中心とした情報処理システムはワークステーション、パーソナルコンピュータ等の複数台の計算機を連携させて協調処理を行うシステムに置き換えられつつある。また、この分散処理形態ではクライアントサーバモデルやピアツーピアモデルが用いられている。特に、ファイル管理を行うファイルサーバ、プリント処理を行うプリンタサーバ、ネットワーク情報管理を行うサーバなどは分散処理の形態として広く一般的に利用されている。さらに、最近の計算機の小型化、高性能化によりコンピュータ資源のパーソナル化が急激に進み、多人数で資源を共有する形態は色あせ、資源共有から資源占有へと進展し、データベース等の共有、処理負荷の分散、作業分担、協調作業等が分散処理の主な目的となっている。また、様々な種類の計算機及びネットワークが相互に接続されるため、メーカーや機種に依存しない相互接続性の高いネットワーキングシステムを構築する必要があり、このための通信インタフェースや通信規約の仕様が、ISO (International Organization for Standard) によって、7層からなるOSI (Open System Interconnection) 参照モデルが定められ、例えばUNIXでは図5.1のようにこの規約を実現している。さらに分散配置されたLANを広域接続してさらに大規模なネットワークシステムの構築も行われている。このようなネットワークでは、ネットワーク及びシステムの管理、特に異機種間の管理が重要な技術となりつつあり、このためのLAN管理の手段としてSNMP (Simple Network Management Protocol) が各種ワークステーション、ブリッジ、ルータに実装されて標準プロトコルの地位を築きつつある。さらに、このプロトコルで管理された複数のネットワークを連携した大規模なシステムには、ネットワークを管

理するためのアーキテクチャとして、オブジェクト指向の概念を用いた各種の方法が提案されている²⁹⁾。

LANに利用されるデータの伝送路としては、ツイストペアケーブル、同軸ケーブルで伝送速度が10Mbps (Mega Bits per Seconds) のいわゆるEthernetが一般的に利用され、IEEEによって標準化されている。さらに高速な通信路として光ファイバを利用したFDDI (Fiber Distributed Data Interface) によって100Mbpsの高速伝送が可能な標準規格も設定され、複数のLANを接続するための基幹LANとして用いられ、さらに、非標準ではGbpsのオーダーへと高速化されつつある。しかし、従来のシステムでは伝送速度は向上しているものの、アプリケーションの享受できるエンド・ツー・エンドのスループットが伝送速度の向上に見合う程度には高速化されていない。この点については通信制御処理の高速化によって解決する必要がある、OSI参照モデルに代表される通信プロトコル処理の高速化を図る方法、高速通信向けの新しいプロトコルを採用する方法等が提案されている³⁰⁾。通信ネットワークの分野では通信制御処理の高速化と同時に機器の接続性の向上に対する要求があるので、新しいプロトコルによる高速化については既存のプロトコルを採用した機器との接続性が重要な問題となっている。さらに、ネットワークで通信されるデータは、テレビ電話、テレビ会議システム、遠隔教育システム、マルチメディアメールシステムなどの分散マルチメディアアプリケーションの開発が行われるにつれて、音声・映像といった一定時間毎にデータが必要なリアルタイムデータの通信を保証し、リアルタイム性のないグラフィックス、テキスト、データ等のノンリアルデータを効率的に通信する必要が生じている。このようなデータを送信するためにトークンリング方式に基づいた方法³¹⁾等が提案されている。

最近、携帯・移動可能で高機能の機器が利用可能にな

り、これらの機器からネットワークを利用したいという要求がある。これらの機器を有線LANに直接接続すると携帯・移動という特徴が失われるので無線を利用するネットワークが注目されている。無線LANでは、室内で数Mbps～数十Mbpsという高周波無線通信を実現するために、信号の空間伝搬中に生じるマルチパスフェージング、干渉信号を抑制する方法としてスペクトル拡張通信技術や複数の受信アンテナから得られる相関の低い信号を利用して通信品質を改善する空間ダイバシティ技術が用いられている。また、通信中の電波伝搬上の障害などにより、有線LANで利用されるCSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect) 方式では媒体アクセスの際に問題が生じるので無線LANには適していない。このため、無線LANではデータフレームの衝突検出の代わりになんらかの衝突回避機能を備えたCSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式、集中局が小局にデータ伝送の有無を順次尋ねるポーリング方式、TDMA (Time Division Multiple Access) 予約方式が提案され、製品化されたものもあるが国内及び米国内において標準方式について検討中である³²⁾。さらに、従来の有線LANによる分散環境と無線ネットワークを接続融合した計算機環境である移動計算機環境に適したtransport層及びnetwork層のプロトコルとして移動ホストを考慮した分割サブネット方式、ソースルーティング方式、識別子アドレスマッピング方式、パケット転送方式が提案されている³³⁾。

協調作業等のための分散環境としては、ソフトウェア開発を分散環境で行うための試みや基盤ソフトウェアの開発がなされ、電子会議、電子メール、遠隔手続き呼出、分散ファイルシステム、分散エディタ、分散コード検査ツール等を利用した開発が行われている³³⁾。

負荷分散のための分散環境は、ある計算機で実行中の

応用層	システム管理、ファイル転送、ジョブ転送の管理	telnet	rwho	NFS
プレゼンテーション層	データを異なる端末装置向きに変換	ftp	ruptime	NIS
セッション層	プログラム間のデータ転送制御	SMTP	tftpなど	XDR
トランスポート層	伝送の順位付け、データ伝送速度の制御	rlogin		RPC
ネットワーク層	データ伝送路の指定、誤り制御	rsh		
データリンク層	データリンクの確率、伝送誤りの制御	rcpなど		
物理層	機械的、電気的な回路の接続と切断			
		TCP	UDP	
		IP		
		イーサネット、FDDI、専用回線、公衆電話		

図 5.1 OSI 参照モデル

プロセスを他の計算機に移送して実行を継続するプロセス移送を利用して分散システム全体の負荷を均衡させる方法等で実現されている。また、プロセス移送は、故障した計算機のプロセスを他の計算機に移送することで、分散システムの対故障性の改善技術としても利用されている。負荷の動的な分散と均等化は、各プロセッサ資源の有効利用の観点から非常に重要な問題の一つである。一般的にはCPUの稼働率を問題として、CPUを遊休させず、稼働率を高く維持することを目的としている。このための方式として、特定のプロセッサが問題を互いに独立な仕事に分割する作業を行い、仕事を要求してきた各プロセッサに対して割り付けるマルチレベル動的負荷分散方式、要求駆動方式を用いながら全てのプロセッサが仕事の分割および供給の対象となるスタック分割的負荷分散方式、要求駆動型でない負荷分散の方法として各プロセッサが隣接するプロセッサ群の稼働率に基づいて、近傍の平均的な稼働率と自プロセッサの稼働率に応じて仕事の分配を行う動的負荷浸透方式等が用いられている³⁴⁾。また、分散処理を“計算”として捉えれば、分散処理システムでは計算を行うアルゴリズムが必要であり、これは従来の逐次実行アルゴリズムとは異なり、他の計算機またはプロセスと情報を交換しながら問題を解くため、アルゴリズムを評価するには、局所的な計算に要する時間に加え、メッセージ配送時間やメッセージ数も考慮しなければならない。このような観点から分散アルゴリズムを評価するための方法が提案され、さらに評価ツールの開発も行われている。

6. 人工知能と画像処理

6.1 人工知能の研究領域

人工知能とは人間の脳の働きを計算機に持たせようとするものである。人間の知的機能は知能の現れであるが、その範囲はきわめて広く、学習、推論、理解、創造、計画、認識、意志決定、発明・発見に及んでいる³⁵⁾。これらの知的機能を計算機にさせようとするのが人工知能研究の主たる目的である。

現在行われている研究は互いに密接に関係しているが、大きく3つの方向に分けることができる。1つは人間の知能そのものとはどういうものかを明らかにしようとするもの³⁶⁾、2つめは人間の知的機能を論理的に明らかにしようとするものである。これに対し3つめはごく実用的観点から人間の持つ知識を積極的に利用してさまざまな問題解決に使用しようとするものである。1つめは脳のハードウェアを計算機で実現するのが目的であり、2つめは脳のソフトウェアを実現しようとするものであるといえる。ここではとくに第1の課題に重点をおいて、現在の画像処理、すなわち人工視覚の研究の現状を解説する。

6.2 脳のハードウェアとニューロ計算機

1つめの分野の研究はかなり本質的な問題であるが、現在のところ脳の構造は少ししか分かっていないので、生理学的に得られた知識をそのまま使って脳の代替品を作ることはほとんど不可能である。現在の計算機はすべてプログラム内蔵型のものであって、最初に与えられた命令に従ってステップごとの演算と判断を行う。これにたいして脳は無数のニューロンと呼ばれる神経細胞が高度に結合して並列に働くネットワーク構造をしていることが知られている。最近では知覚（視覚、聴覚、触覚）の入出力系と制御系および単純な学習の機能を対象として、脳の神経系をまねたモデルの研究が行われている。とくに5感の中でも最も関心が高いのが視覚であるが、最近生理学と情報科学の接近が盛んになり、視覚情報の処理に関する積極的なモデル化が進むようになった。

人工視覚のモデルの最初は1960年代の図形認識のためのパーセプトロン³⁵⁾である。これはやがて機能の限界が明らかになるにつれて、忘れられたが、1980年代にニューロ計算機³⁶⁾、あるいはもっと原理的な発想でコネクショニストモデルと呼ばれる並列計算機概念として復活した。パーセプトロンは視覚系のニューロンを感覚層（網膜）、連合層（大脳中枢）、反応層（出力）の3つに分け、感覚層に入った信号を無数の素子で、連合層に、さらに反応層に接続した構造を持っている。この接続の強さの分布が入力と出力（認識結果）を決定する。人間と同じように多くの学習を行うことで、認識率を上げることができる。現在のニューロ計算機の考え方も同じ延長上にあるが、バックプロパゲーションと呼ばれる方法に代表される接続の制御の方法が進んだこと、ハードウェアとして実現性が高くなったこと、情報理論、制御理論、計算理論からの数学的解析が進んだことで新たな局面を開いた。その用途は画像パターンの認識だけでなく、広範囲の最適制御の手段として期待されている。

ニューロ計算機はある種の組み合わせ最適化問題を解けることが示されてから、視覚系との構造的類似性が議論されるようになった。このタイプのニューロ計算機にはHopfield型³⁷⁾と呼ばれるものとBoltzmann型³⁸⁾と呼ばれるものがある。Hopfield型は多重1次形式のエネルギー式を最小化するが、その方法は最急勾配法であって、局所解へ落ち込むことが知られている。これに対してBoltzmann型（Boltzmann machineと呼ぶ）は確率的にエネルギー式を最小化する最適解を探索するものである。アルゴリズムの観点からはマルコフ連鎖をシミュレーションするものであるといえ、この方法はシミュレーテッドアニーリング（SA）と呼ばれる。金属を高い温度で溶かし、徐々に冷やすと分子が自分で相互の位置を調節し、長い時間のあとでは位置エネルギー最小の基底状態

に達する性質がある。SAはこの状態遷移を計算機でシミュレーションすることから始まっていて、現在広い分野での組み合わせ最適化問題に使われている。BoltzmannマシンはこのSAをハードウェアとして実現したものであり、無限大の状態遷移の結果、確率1でエネルギー最小の大域解に収束することが保証される。

6.3 人工視覚の発展

計算機による画像処理は1960年代後半から行われており、すでに長い歴史を持っている。多くの画像処理の問題はおおむね1次元信号処理の拡張であって⁴⁰⁾、従来の方向はすでにデッドゾーンになっている。現在パターン認識は後述する人工視覚との関連、すなわち人間のパターン認識に学ぶ方向で発展している⁴¹⁾。

1980年代から人工視覚が画像処理の重要な部分を占めるようになった。その第1人者はDavid Marrであり、その歴史的な著書vision⁴²⁾で視覚システムの数理モデル化への道を開いた。現在の人工視覚の研究は、Marrの敷いた大筋の枠組に沿い、実験的神経科学、心理物理学と数理モデルに基づく計算論的な方法が組合わさって進んでいる。

人工視覚の主たる目的はMarrが述べているように「網膜に投影された2次元の画像から3次元の世界を再現し、記述すること」であると見なせる。彼は視覚の過程を初期視覚、中期視覚さらに後期視覚に分けた。初期視覚の目的は網膜に投影された画像の強度変化をとらえ、その原因を分析することである。Marrは網膜が画像の強度変化を検出する微分フィルタを持っていることを示し、これがガウス関数のラプラシアンで近似できることを発見した(LoGフィルタと呼んでいる)⁴³⁾。LoGフィルタは高周波雑音に強い良質のエッジ抽出フィルタとして現在広く使われるようになっている。

中期視覚は網膜画像を中心とする観測者の座標系で、3次元の対象の表面の形状を認識することであるとする。このとき2次元の画像から3次元の空間を再現するには多くの認識過程が独立のプロセスとして働いていると考えられている。考えられるプロセスには、両眼視差(ステレオ)、陰影からの再構成、オブティカルフローからの再構成などがある。これまで各々のプロセスを実現するための研究が進められてきた。とくにステレオではMarr-Hildreth-Grimson (MHG) アルゴリズム⁴⁴⁾がよく知られている。これはスケールを変えたLoGフィルタを左右画像に施し、そのゼロ交差から得られたエッジを粗い画像から細かい画像へと段階的に対応づけるものであった。しかしつぎの2つの理由で完全なものではなかった。

(1)局所的な類似性しか取っておらず、全域的最適性に欠ける。

(2)LoGフィルタは信号の変化に敏感で安定性に欠ける。このことが以下に述べる新しい画像理論へと発展する契機となった。

6.4 新しい画像理論

6.4.1 正則化法とニューロ計算機

3次元空間を2次元画像に投影する方法は無限にあり、何らかの拘束がなければ逆に2次元画像から3次元を一意的に再現することはできない(こういう問題を不良設定問題と呼ぶ)。人間は対象の形状認識を行うのに、脳の中に対象のモデルを持っていて、最も確からしい3次元空間を採用していると考えられている。モデルの1つとして、これらの機能を統一的に扱う方法がPoggioらによって提案された⁴⁵⁾。これはエネルギー最小法(正則化法)と呼ばれている。対象表面の3次元形状は観測条件を満たしながら何らかのエネルギーないし評価式を最大または最小にするように再構成されたとする考え方である。

エネルギーを最小化する考えに従うと多くの問題が組み合わせ最適化問題になる。画像の組み合わせ最適化問題は変数の数が極端に多いので、これを解くにSAが提案されている。興味深いことに第2節で述べたBoltzmannマシンはこれを解決する可能性があり、脳のモデルであるニューロ計算機と正則化法との結びつきが議論されている。

6.4.2 画像の確率モデルとシミュレーテッドアニーリング

正則化法のもう1つの流れは画像を確率モデルで扱うものである。人間は画像の雑音を気にせずもとの状態を認識できる。Geman & Geman⁴⁷⁾は雑音で劣化した画像を再現するのに、与えられた画像のサンプルから最大事後確率推定量としてもとの画像を推定した。彼らは画像の濃度値がマルコフ場からのサンプルであると考え、また同時に画素と画素の間にエッジの確率場を考えて、この両者が最も有り得る状態を推定した。確率モデルでの最適化問題を解くのにSAが使えることを示し、確率1での収束条件(十分条件)を証明している。この方向は組み合わせ最適化とともに、人工視覚の考えに大きな影響を与えている。

6.4.3 Wavelet変換とエッジからの画像の再現

LoGフィルタはWavelet変換と呼ばれる完備な直行関数系に属するものであることが指摘された⁴⁸⁾。Wavelet変換のゼロ交差の列からもとの画像が完全に再構成される条件が示され、さらにその安定性が議論されるようになった。簡単にいえば、粗いエッジから細かいエッジまでの1連のエッジの系列から元の画像が、近似的でなく、正確に再現されることが保証され、もしエッジ情報のみを脳の中枢に送っているにしても、情報の欠落はないことになる。

7. 数値的および数式的計算

数値シミュレーションは、コンピュータの性能の向上とともに、物理現象解明の手法の一つとして重要な位置を占めるようになってきた。米国電気電子学会 (IEEE) においても1994年にIEEE Computational Science & Engineering (計算科学と計算工学) という雑誌が発刊され、科学・技術の様々な分野の計算機による解析が扱われている⁴⁹⁾。電磁界のシミュレーションについて概観すれば、コンピュータの性能向上に伴って、より計算量の多い複雑な手法が開発されている。すなわち、二次元解析から三次元解析へ、静解析から渦電流解析や電磁波解析へとシミュレーション手法は進展している。このように、シミュレーションに代表される数値的計算は大規模計算への要求が増している。

大規模な数値計算のための高速化技術を図7.1に示す。アレイプロセッサは、同一のプロセッサ数百以上を同時

に同一演算を実行させるもので、制御が容易なことから最初に登場した高速計算専用のハードウェアである。次に登場したベクトル計算機は、繰返しループをパイプライン処理によって高速化するもので、スーパーコンピュータはこの方式を採用している。その計算速度の限界は100GFLOPS (Giga Floating-point Operations Per Second、1 GFLOPSは1秒間に10億回の浮動小数点演算を行う) と言われ、これは電流 (電子) の伝搬速度による限界である。これ以上の高速化には複数のプロセッサによる並列または分散処理が必要となる。並列計算機は専用ハードウェアにより実現されるが、台数効果が期待でき、多くの試作または実用システムが発表されている。並列処理では、繰返しループの前後依存性に注意して並列性を抽出し、プログラミングを行う必要がある⁵⁰⁾。また、並列計算機の幾何学的な配置や接続法などのハードウェアの形態によってもプログラミング法は異なる。

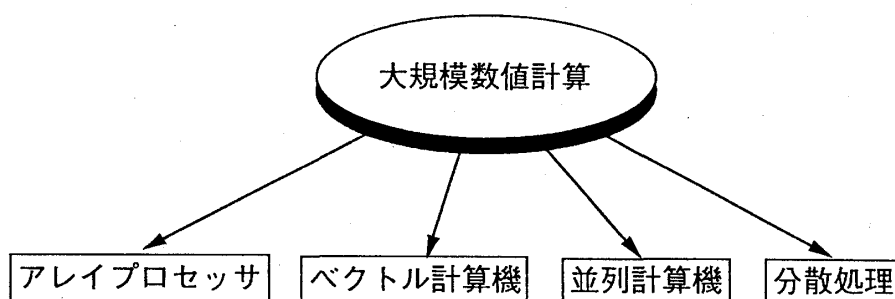


図7.1 数値計算の高速化技術

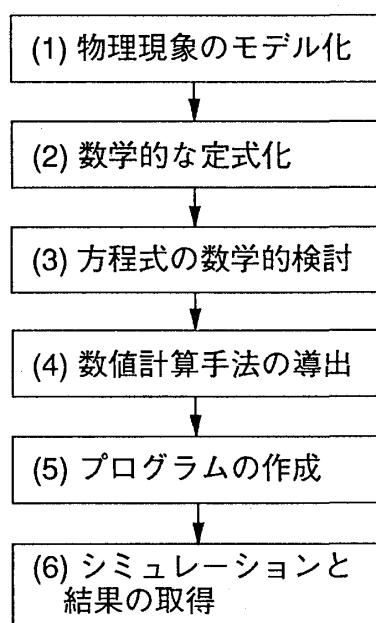


図7.2 物理現象のシミュレーション手順

今後のコンピュータは、パーソナルコンピュータから汎用機やスーパーコンピュータまで並列化が進み、オペレーティングシステムによる並列処理のサポートが充実してくると考えられる⁵¹⁾。並列処理に対して分散処理は、特別なハードウェアなしにネットワークなどで接続された緩い結合で計算処理を分散するものである。独立性の高い（依存関係の少ない）処理は分散処理に向き、分散処理は機種が異なるコンピュータを用いても可能である。したがって、分散処理は、身近なLANに接続されたコンピュータを用いて実現でき、ソフトウェアによる柔軟な対応が可能である。複数のプロセッサをもつ並列計算機を複数台LANに接続したシステムを用いて、並列かつ分散処理により大規模な数値計算を高速に行うというスタイルが現在一般的になりつつある。

図7.2に物理現象のシミュレーション手順を示す⁵²⁾。まず、(1)対象とする物理現象を単純化または抽象化することによってモデル化を行う。(2)数学的な定式化を行い、方程式を作成する。(3)方程式の数学的な検討を行い、(4)数値計算手法を導出する。さらに、(5)プログラムを作成し、(6)シミュレーションを行ってシミュレーション結果を得る。この中で、(3)において数式処理を導入することができ、(4)以降が数値的な処理である。このようなシミュレーションでは、微分・積分処理を高精度に行うためにできるだけ解析的に行う必要があり、これらの解析的な式を求めるために数式処理がしばしば利用される。

シミュレーションの分野では、計算時間の大半を占める大型行列の演算、とくに連立方程式の解法が問題となることが多い。実用問題のシミュレーションの場合、数千円から数十万円の連立一次方程式を解く必要がある。直接法であるガウスの消去法では計算時間が元数の三乗に比例するために数千円が限界であり、それ以上は反復法が実用的である。有限要素法で得られるスパースな対称行列の係数をもつ連立方程式は、ICCG法 (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Method) が一般的に用いられている。この方法は反復回数が元数のオーダーに収まるので大型行列の解法として適している。また、並列処理や分散処理にも適した方法である。一方、ガウスの消去法は、ベクトル計算機に適している⁵³⁾。

また、新しい課題として逆問題及び最適化問題がある⁵⁴⁾。計算モデルが与えられてそれを解析して物理量の分布を求める問題は順問題と呼ばれ、最終的な物理量の分布が与えられてこの分布が得られるモデルの形状や媒質定数の分布を求める問題は逆問題または最適化問題と呼ばれている。逆問題や最適化問題では、モデルの形状や媒質定数の分布を直接求める方法が見出されていないため、数値計画法やニューラルネットワークなどを用い

た種々の反復法によって解かれている⁵⁵⁾。

数式処理は、前述のように数式の検討によって、数値微分を解析的微分に、数値積分を解析的な積分に置き換える場合に、複雑な数式の変形、置換などに利用可能である。これにより、数値処理による誤差発生を最小限にすることができる。数式処理システムは、人工知能向き言語として知られるLISPを基礎にしたものが多く発表されているが、入手の容易なシステムとしてはREDUCE⁵⁶⁾とMathematica⁵⁷⁾がある。REDUCEは、ソースコードが公開され、多くのコンピュータシステムで稼働している。Mathematicaは、Wolfram Research社の商用システムで、パーソナルコンピュータとワークステーションを中心に稼働している。何れのシステムも、微分、積分、因数分解、多項式の展開、行列演算など多くの数式処理を行うことができ、多倍長精度の数値計算も使用できる。また、数式処理結果を直接数値計算で利用するためにFORTRANやC言語のソースコードを出力する機能をもっている。さらに、Mathematicaでは、計算結果のグラフ化や三次元表示などのグラフィックス表示機能が充実している。

8. 情報処理システム

ここでは、特に最近重要性を増してきたリアルタイム処理システムを中心に、オンライン処理システムの技術動向について紹介する。情報処理システムは処理形態により図8.1のように分類される。オンライン処理システムのホストコンピュータと通信ネットワークを接続する通信制御装置の概要やハード構成、役割について比較すると表8.1のようになる⁵⁸⁾。

リアルタイム処理システム（以下、単にリアルタイムシステムと称する）の主要な評価値は処理速度と信頼度である⁵⁹⁾。処理性能を決める要因として、素子のスイッチング速度、配線距離、演算方式、タスク起動方式、処理アルゴリズム、プログラム言語、などが挙げられる。また、システムの信頼性に関係するものとして、部品の故障率、部品点数、システム構成、プログラム品質、メンテナンス機能、などが挙げられる。

リアルタイム計算機アーキテクチャの主な要求事項は実行時間予測性と耐故障性である⁶⁰⁾。メモリアクセスの実行時間予測性を高める方法として、メインメモリのアクセス時間の短縮、必要な容量の実装、などが考えられる。現在、リアルタイム処理用に設計された並列計算機アーキテクチャとして、HARTS、MAFT、CODA、などがある。

分散リアルタイムシステムのOSアーキテクチャの課題として、OS構成法、リアルタイムスケジューリング、リアルタイム同期、リアルタイム通信、が挙げられる⁶¹⁾。

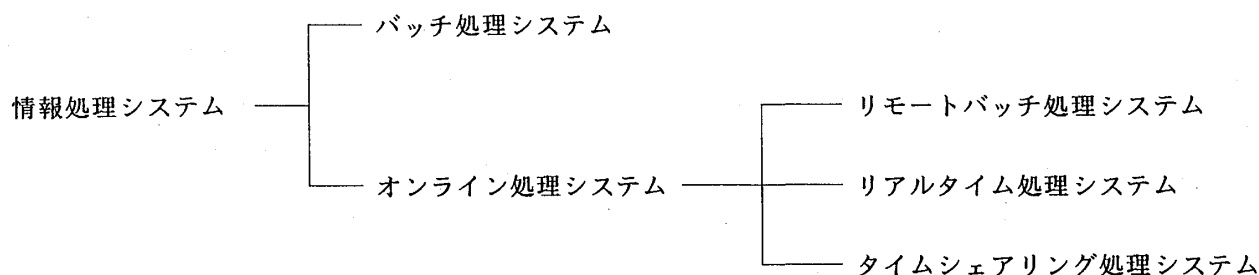


図 8.1 情報処理システムの分類

表 8.1 代表的な通信制御装置

名称	概要	ハード構成要素	役割
CCU	結線論理による制御装置	回線インタフェース、直列並列変換レジスタ、バッファ、制御回路	少数の低中速端末に対する物理層の機能を実行する。
CCP	プロセッサを内蔵したプログラム可能な通信制御装置	プロセッサ、回線インタフェース、ホスト入出力チャネル、メモリ	物理層とデータリンク層とネットワーク層の一部をサポートする。
FEP	ホストコンピュータと独立して運用可能な通信処理プロセッサ	プロセッサ、回線インタフェース、ホスト入出力チャネル、メモリ、内蔵ディスク	通信に関するほとんど全ての機能をサポートして、ノンストップオンラインを可能とする。

OSアーキテクチャとして拡張性や柔軟性に富むマイクロカーネルアーキテクチャが有効である。リアルタイムスケジューリングについて、周期的タスクモデルに対するレート・モニタリング方式や非周期的タスクモデルに対する非周期的タスク・サーバ方式が開発されている。リアルタイム同期に関してプライオリティ継続プロトコル⁶²⁾、PCP⁶²⁾、SRP、RCSプロトコル、が提案されている。また、リアルタイムプロトコルとしてVMTP、XTP、STII、RMTP/RTIP、CBSRP、などが開発されている。

リアルタイムシステムは、あるデッドライン内に一定の処理を終了することに対する要求度により、ハードリアルタイムシステムとソフトリアルタイムシステムに分類される。ハードリアルタイムシステムの代表的な事例として、原子力プラント監視制御システムや航空機制御システムなどの構成や機能について文献⁶³⁾に紹介されている。

最後に、デッドラインが数分程度とリアルタイムシステムほど厳しくはないが、道路交通流をオンラインで制御する新交通管制システム⁶⁴⁾について紹介する。このシステムの信号制御に関するサブシステムは、車両感知器から交通情報をリアルタイムで入力し、スーパーバイザで信号制御パラメータ（サイクル長、スプリット、オフセット）を計算し、その結果を信号機にオンラインで転送して現示を動的に制御するリモートバッチ処理システム

となっている。

9. むすび

インターネットは、猛烈な勢いで世界中に普及しており、電子メールは今や企業革新の担い手として必要な手段になりつつある。世界規模での情報化インフラストラクチャ構築に向けての機運が高まっている。高度情報化技術は、情報の価値を高めるとともに、有効に活用されなければならない。そのためには、ユーザに親しまれるヒューマンインタフェースの情報が重要である。人間と同程度の知能を持つコンピュータを作り上げるには、まだまだ時間をかけ奥深い基礎研究を行う必要があることは言うまでもない。日本語ワープロ、文書処理、日本語印刷、機械翻訳、テキスト検索、音声認識、音声合成、文字認識などは、かなり実用化している。辞書技術と形態素解析技術の進歩により、高度な漢字変換が可能となった。さらに、図表や絵を挿入する文書を作成する文書処理システムも普及した。21世紀には、異なる言語を話す人同士がオンラインで対話のできる通訳電話も出現するであろう。

本稿には、このようなコンピュータ応用などの記事がなく、また、頁数の関係でそれぞれの分野の記事も十分とはいえないが、読者諸賢が参考文献に当たって理解を深められることを願う。皆様のお役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) 徳山豪：組み合わせ幾何学—計算幾何学の新しい手法、情報処理、Vol.30, No.6, (1989), pp.706-716
- 2) 黒澤馨、藤岡淳、宮地充子：数論アルゴリズムとその応用—暗号理論への応用、情報処理、Vol.34, No.2, (1993), pp.195-206
- 3) 松本勉、今井秀樹：数論アルゴリズムとその応用—代数幾何符号の復号アルゴリズム、情報処理、Vol.34, No.2, (1993), pp.189-194
- 4) 山本博資：ユニバーサルデータ圧縮アルゴリズム：原理と手法、情報処理、Vol.35, No.7, (1994), pp.600-608
- 5) 谷口健一：確率・近似・非決定性アルゴリズム、数理科学、No.328, (1990), pp.18-23
- 6) 茨木俊秀：組合わせ最適化法をめぐる最近の話題—モダンヒューリスティックの新展開、日本OR学会第30回シンポジウム(1990)
- 7) 宮野悟：並列アルゴリズム、数理科学、No.328, (1990), pp.56-61
- 8) 岩野和生：最大流アルゴリズムの最近の発展とその背景—I、II、情報処理、Vol.30, No.12, (1989), pp.1494-1501, Vol.31, No.1(1990), pp.82-88
- 9) 平田富夫：整列及び記号列処理アルゴリズム、1995年電子情報通信学会総合大会講演論文集(情報・システム1)、pp.407-408
- 10) 渡辺治：一方向関数のお話し、情報処理、Vol.32, No.6, (1991), pp.704-713
- 11) 太田和夫、岡本龍明：クラスNPの新しい特徴づけ、情報処理、Vol.35, No.1(1994), pp.55-68
- 12) N.Karmarkar: A New Polynomialtime Algorithm for Linear Programming, Combinatorica, Vol.4, No.4(1984), pp.373-395
- 13) 金田：“RISC コンピュータ”、電子情報通信学会誌、Vol.73, No.10, pp.1087-1094, (1990)
- 14) 久野：“新しいアーキテクチャとコンパイラ技術”、情報処理、Vol.31, No.6, pp.727-735, (1990)
- 15) 馬場：“超並列マシンへの道”、情報処理、Vol.32, No.4, pp.348-364, (1991)
- 16) 富田：“コンピュータアーキテクチャI”、丸善、(1994)
- 17) 上林弥彦：メディア・応用・環境統合のための高機能データベース、情報処理学会研究報告、94-DB S-100, pp.43-50, (1994)
- 18) 小碇暉雄：データベース入門、啓学出版
- 19) 増永良文：リレーショナルデータベース入門、サイエンス社
- 20) 滝沢誠：異種分散型データベースシステム、情報処理、Vol.29, No.1, pp.23-29, (1988)
- 21) 小林功武：古典データベースから演繹データベースへ、情報処理、Vol.31, No.2, pp.189-197, (1990)
- 22) 牧之内顕文：オブジェクト指向データベース管理システムのアーキテクチャ、情報処理、Vol.32, No.5, pp.514-522, (1991)
- 23) 酒井博敬：オブジェクト指向データベース設計、情報処理、Vol.32, No.5, pp.568-576, (1991)
- 24) 増永良文：次世代データベースシステムとしてのオブジェクト指向データベースシステム、情報処理、Vol.32, No.5, pp.490-499, (1991)
- 25) 田中克己：オブジェクト指向データベースの基礎概念、情報処理、Vol.32, No.5, pp.500-513, (1991)
- 26) 上林弥彦：マルチメディアデータベースの技術開発課題、情報処理、Vol.28, No.6, pp.784-791, (1987)
- 27) 牧之内顕文：次世代データベースシステム、電子情報通信学会誌、Vol.78, No.1, pp.65-75, (1995)
- 28) 坂内正夫：画像検索技術、電子情報通信学会誌、Vol.71, No.9, pp.911-914, (1988)
- 29) ISO/IEC: Information Processing system OSI system management overview (1990).
- 30) 水谷他：マルチプロセッサ構成を用いた高速LAN用通信制御装置の性能評価、情報処理学会論文誌、Vol.34, No.5, pp.1144-1953, (1993).
- 31) 米田、松下：分散モードチェンジ方式を用いた統合サービストークンリングLAN、情報処理学会論文誌、Vol.34, No.6, pp.1417-1425, (1993)
- 32) 岡田他：無線LAN、情報処理学会誌、Vol.35, No.12, pp.1069-1121, (1994)
- 33) 垂水：グループウェアのソフト開発への応用、情報処理学会誌、Vol.33, No.1, pp.22-31, (1992)
- 34) 佐藤他：疎結合型マルチプロセッサ上の拡散型動的負荷分散方式、情報処理学会論文誌、Vol.35, No.4, pp.51-59, (1994)
- 35) 上坂吉則、尾関和彦：パターン認識と学習のアルゴリズム、文一総合出版、(1990)
- 36) 志村正道：人工知能、森北出版、pp.1-8, (1994)
- 37) Hopfield, J.J. and Tank, D.W.: “Neural” Computaiton of Decisions in Optimization Problems, Biological Cybernetics, Vol.52, pp.141-152, (1985)
- 38) Aarts, E. and J.Korst: Simulated Annealing and Boltzmann Machines, Wiley, pp.(1990)
- 39) 安西祐一郎：認知科学と人工知能、共立出版、(1987)
- 40) 有本卓：信号・画像のディジタル処理、産業図書、(1975)
- 41) 舟久保登：パターン認識、共立出版、pp.148-158,

- (1991)
- 42) Marr, D. : Vision-A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information, W.H.Freeman, (1982)
 - 43) Poggio, T., Torre, V. & Koch, C. : Computational Vision Regularization Theory, Nature, Vol.317, pp.314-319, (1985)
 - 44) Marr, D and E.Hildreth : Theory of Edge Detection, Proc.Roy.Soc. Lon., Vol.207, pp.187-217, (1980)
 - 45) Ullman, S and W. Richards : Image Understanding 1984, Ablex Publishing Corp., (1984)
 - 46) Grimson, W.E.L. : A Computational Theory of Visual Surface Interpolation, Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Vol.B.298, pp.395-427, (1982)
 - 47) Geman, S and D.Geman : Stochastic Relaxation, Gibbs Distribution, and the Bayesian Restoration of Images, IEEE Transaction on PAMI, Vol.6, pp.721-741, (1984)
 - 48) Mallot, S : Zero-Crossings of A Wavelet Transform, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.37, No.4, pp.1019-1033, (1991)
 - 49) J.L.Volakis & L.C.Kempel : Electromagnetics : Computational Methods and Considerations, IEEE Computational Science & Engineering, Vol.2, No.1, pp.42-57, (1995)
 - 50) 小特集、並列アルゴリズムの理論と動向、情報処理、Vol.33, No.9, pp.1029-1066, (1992)
 - 51) 特集 並列処理のためのシステムソフトウェア、情報処理、Vol.34, No.9, pp.1134-1186, (1993)
 - 52) 三井 : 数式処理と数値処理との界面、情報処理、Vol.27, No.4, pp.422-430, (1986)
 - 53) 村田、小田、唐木 : スーパーコンピュータ、丸善、(1986)
 - 54) 特集、逆計算 : 計算の理論における逆関数、情報処理、Vol.35, No.4, pp.259-340, (1994)
 - 55) 坪井 : 最適設計へのアプローチ (電界問題)、平成7年度電気学会全国大会シンポジウム、S.18-2, (1995)
 - 56) A.C.ハーン : REDUCE ユーザマニュアル、マグローヒル、(1988)
 - 57) S.Wolfram : Mathematica (second edition), Addison-Wesley, (1991)
 - 58) 板倉 稔監修 : 情報システム構成論、pp.43-45、丸善株式会社、(1993)
 - 59) 井原廣一 : リアルタイムシステムとは、情報処理、Vol.35, No.1, pp.12-17, (1994)
 - 60) 西田健次、戸田賢二 : 実時間処理のためのハードウェアアーキテクチャ、情報処理、Vol.35, No.1, pp.26-33, (1994)
 - 61) 徳田英幸 : 分散リアルタイムシステムのためのOSアーキテクチャ、情報処理、Vol.35, No.1, pp.18-25, (1994)
 - 62) R.Rajkumar : Synchronization in Real-Time Systems, A Priority Inheritance Approach, Kluwer Academic Publishers, (1991)
 - 63) 竹垣盛一 : ハードリアルタイムシステムの応用例、情報処理、Vol.35, No.1, pp.34-40, (1994)
 - 64) 井上良一、山崎勝則、新見博英 : 交通管理センター用新型交通状況表示装置の導入について、第14回交通工学研究発表会論文集、pp.13-16, (1994)