

01-R 013

新情報処理技術に関する総合的調査研究
—3次元情報処理WG報告書—

平成 2 年 3 月

JIPDEC

財団法人 日本情報処理開発協会



この報告書は、日本自転車振興会から競輪収益の一部である
機械工業振興資金の補助を受けて平成元年度に実施した「新情
報処理技術に関する総合的調査研究」の成果をとりまとめたも
のであります。



序

過去30余年にわたる情報処理技術の進歩は著しく、その成果を支えに社会の情報化も急速に進展し、コンピュータは今やわれわれの社会活動にとって不可欠のものとなった。しかしながら、その利用範囲の拡大や多様化にともない、情報処理機能の一層の高度化が求められ、特に最近では、固定化した逐次処理型の情報処理機能から、人間にとって親和性に富む、より柔軟性の高い知的な情報処理機能への変革が、強く期待されるようになった。

このため、従来のコンピュータが不得手とする、人間の脳が行っているような、高度かつ多彩な情報処理の実現に向けて、必要とされる機能、計算原理および実装技術、さらには、革新的な情報処理技術と社会の係わり等を含めた総合的な調査研究を、平成元年度から開始した。

本年度は、通商産業省における新情報処理技術調査研究委員会の下部機構として、当協会に基礎技術、新機能、社会応用の3分科会および超並列・超分散処理、学習、光技術・新デバイス、3次元情報処理、認識・理解、自律・協調の6ワーキンググループを設置して調査研究を実施するとともに、大学・研究所への研究委託、海外調査等により、21世紀を目指す革新的な情報処理技術がいかにあるべきかを、ニーズ、シーズの両面から追求し、新しいナショナルプロジェクトとしての可能性を検討した。

最後に、本調査研究に多大なご協力を頂いた各分科会およびワーキンググループの委員各位に厚く御礼申し上げる次第である。

平成2年3月

「3次元情報処理WG」委員名簿

(順不同)

	氏 名	役 職
主査	島田 潤一	工業技術院電子技術総合研究所 光技術部長
幹事	石原 聡	工業技術院電子技術総合研究所 光技術部光情報研究室主任研究官
幹事	中神 隆清	(株)富士通研究所 通信・宇宙研究部門主管研究員
委員	浅田 修	沖電気工業(株) ヒューマンインタフェース研究所 端末機器研究部研究主任
	石川 正俊	東京大学工学部計数工学科助教授
	岩井 榮一	東京都神経科学総合研究所 臨床神経学研究部長
	大山 永昭	東京工業大学工学部 像情報工学研究施設助教授
	金谷 健一	群馬大学工学部情報工学科教授
	河合 滋	日本電気(株)C & C 情報研究所 パターン認識研究部主任
	高橋 秀実	松下電器産業(株) 技術統括室 調査部 主事
	林 佑三	日本電信電話(株) NTT情報通信処理研究所主幹研究員
	森 晃徳	工業技術院電子技術総合研究所 知能情報部画像研究室主任研究官

協力者 浅川 和雄 (株)富士通研究所 情報処理研究部門
システム研究部第一研究室長

稲本 康 (株)富士通研究所 通信・宇宙研究部門
宇宙メカトロニクス研究部主任研究員

羽倉 弘之 日本ポラロイド(株) 経営企画室長付

目 次

1. まえがき	1
2. 調査の目的および調査項目	2
2.1 目的	2
2.2 調査項目	2
3. 調査検討経過	3
4. 3次元情報処理技術の体系	5
5. 3次元情報の処理	9
5.1 3次元情報の計測	9
5.1.1 立体の計測	9
5.1.2 3次元情報のセンシング手法	14
5.2 3次元情報の処理・認識	23
5.2.1 生体の情報認識	23
5.2.2 立体・空間の認識	29
5.2.3 情報のデータ構造と処理	30
5.2.4 3次元画像処理の技術課題と応用例	37
5.2.5 機械設計支援用 CADシステム	44
5.3 3次元情報の伝送	47
5.3.1 立体テレビ信号の伝送	47
5.3.2 3次元情報の高能率伝送、知的符号化	50
5.3.3 3次元情報の光伝送	50
5.3.4 超並列伝送	51
5.4 3次元情報の表示・蓄積	53
5.4.1 3次元情報表示技術	53
5.4.2 ホログラフィックな3次元表示技術に関する研究例	68
6. 情報の3次元的处理	70
6.1 処理方式	70
6.1.1 人間の情報処理	70
6.1.2 光情報処理	74
6.2 ハードウェア	81
6.2.1 3次元コンピュータ	82
6.2.2 3次元情報処理デバイス	88
7. 新しい情報処理	94
7.1 多次元情報処理	94
7.2 知的コンピュータへの一考察	95
7.3 ニューロコンピュータ	98
7.4 頭脳型(常識装備型)コンピュータ	109
7.5 3次元的处理からイメージされること	112
8. 3次元情報処理と群情報処理	114
9. あとがき	119

1. ま え が き

電子計算機を道具とした情報処理技術は1940年代に始まった。電子計算機に使われる論理処理用デバイスは真空管からトランジスタへと進んできた。トランジスタも単体のものから集積化されたものへと進んできた。集積化されたものも集積度の低いものから高いものへと進んできた。論理素子のこのような変遷に応じて電子計算機は第1から第4まで世代分けされて特徴付けられてきた。

このようなハードウェアの進展に付随して機能も同じ世代分けで特徴付けられることをとらえ、この路線上で第5世代のコンピュータと呼ばれるものが開発されるようになった。一方、これと路線を別にしたスーパーコンピュータというものも現れた。さらに、新しいアーキテクチャの構築を目指し、並列処理コンピュータという概念が顕在化してきた。

このような背景のもとで、3次元情報処理という言葉提起したい。光コンピュータの一つのイメージが2次元空間並列処理にのっとったものなので、その先のものとしての意味を表現したものでもあり、また高精細テレビの次に来るものとしての立体テレビからの連想でもある。

同時に作動させる複数個のCPUを空間的にどう並べるか、すなわち1次元的に並べるか2次元的に並べるかということは必ずしも処理法にとって本質的なことではないかも知れない。しかし新しい発想を求めるよすがとして、このような言葉を扱ってみるのもよしとするところである。すなわち、“始めに言葉有りき”である。出発点をこの言葉にとるとしても、3次元にとどまらない発想が湧くことを期待して行うのが本調査である。

本調査は2年計画で行うものの初年度分である。そこで本年度は来年度に予定している本格的調査の対象とする課題を洗い出すために、関連するであろう事項の調査とブレインストーミングを行うこととした。

2. 調査の目的および調査項目

2.1 目的

本テーマの調査研究の背景にある、

- ・高精細TVの次を考える時がきた
- ・2次元並列の次を考える時がきた

の認識のもとに、3次元空間の情報を扱うための新しい情報処理機能の探索を目指す。例えば立体的な情報を1次元の数字や記号の列に分解せずにそのままの形で表現し、取り扱うことを可能とするような、3次元情報処理に関わる様々な技術項目、研究課題について、情報工学、光学等の成果を踏まえつつ調査検討することを目的としている。

2.2 調査項目

調査項目を次のように大別して、調査検討した。

- (1) 3次元空間の情報を扱う技術
- (2) 1次元あるいは2次元情報を3次元的に扱う技術

具体的項目として以下の内容を含めた。

- ・3次元情報の計測・変換（3次元情報の圧縮、1次元あるいは2次元情報の3次元情報化；例えば、3次元センサ、3次元計測、3次元情報圧縮など）
- ・3次元情報の処理・認識（時系列信号に変換しての処理、3次元空間での処理；例えば、3次元情報処理アルゴリズム、3次元イメージング、3次元イメージ処理、3次元情報記憶方式、空間認識など）
- ・3次元情報の伝送（時系列信号に変換して伝送、3次元配置のままで伝送；例えば、光並列伝送、イメージファイバ、ホログラム伝送など）
- ・3次元情報の表示・蓄積（2次元表示、3次元表示；例えば、立体画像、立体テレビ、ホログラフィなど）

3. 調査検討経過

- (1) 第1回WG（平成元年9月6日）
 - ・WGの基本方針説明および調査の進め方に関する意見交換
- (2) 第1回アンケート調査（平成元年9月7日）
 - ・調査対象候補の抽出のため、3次元情報処理に関するキーワードについてWG委員を対象に第1回アンケート調査
- (3) 第2回WG（平成元年9月20日）
 - ・講演および討論
「3次元画像処理の技術課題と応用例」：大山永昭委員（東工大）
 - ・第1回アンケート調査の結果を基に、キーワードの分類に関して討論
- (4) 第3回WG（平成元年10月11日）
 - ・講演および討論
「センサ情報の並列処理技術」：石川正俊委員（東大）
 - ・第1回アンケート調査の結果について討論と各委員の補足説明
- (5) 第4回WG（平成元年11月1日）
 - ・講演および討論
「21世紀の情報処理技術／コンピュータ・ビジョンの例／人間の情報処理」
：森晃徳委員（電総研）
 - ・前回に続き、第1回アンケート調査の結果について、各委員より補足説明と討論
- (6) 第2回アンケート調査（平成元年11月4日）
 - ・3次元情報処理技術の体系化等についてアンケート調査を実施
- (7) 第3回アンケート調査（平成元年11月11日）
 - ・合宿討論のたたき台のため、3次元情報処理のシナリオ（構想、イメージ）につきアンケート調査を実施
- (8) 第5／6／7回WG・合宿討論（平成元年11月24～25日）
 - ・講演「3次元情報表示技術の現状」：羽倉弘之氏（日本ポラロイド）
 - ・これまでのWGと3回のアンケート調査を基にした総合的討論
- (9) 第4回アンケート調査（平成元年12月25日）
 - ・調査報告についてアンケート調査

(10) 第8回WG（平成2年1月8日）

- ・講演「ニューロコンピューティングについて」： 浅川和雄氏（富士通研）
- ・調査報告の内容と構成について討論（次回に継続）

(11) 第9回WG（平成2年1月22日）

- ・米国調査団参加報告： 石川正俊委員（東大）
- ・調査報告の内容と構成について討論

(12) 第10回WG（平成2年2月19日）

- ・調査報告原案の審議

4. 3次元情報処理技術の体系

3章に示したような経緯によってアンケート調査およびWGにおける技術講演と討論を行い、その結果、3次元情報処理技術のフレームワークを明確化し、対象となる技術項目を分類・整理した。技術項目は

A. 「3次元情報」の処理

B. 情報の「3次元処理」

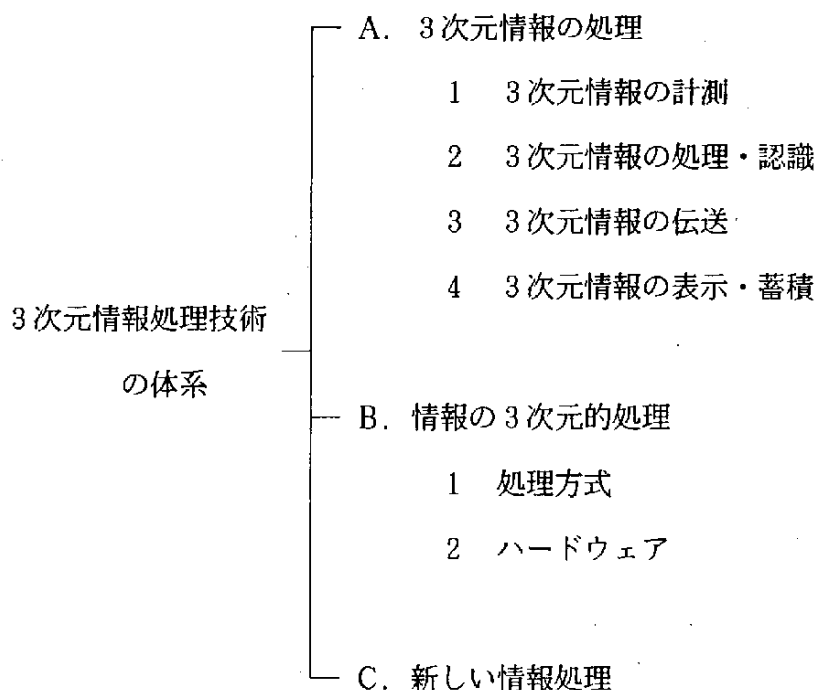
に分けて整理することが適当であるとしたが、さらに、調査検討の過程で、

C. その他 「次元を物理的にとらえず自由度として扱う新しい処理方式」

があり得ることが明らかになり、この分野は今後重要になるとの意見がWGの中で多く出された。

これらの議論に基づいて作成した、3次元情報処理技術の体系を、図表4-1に示す。

図表4-1 3次元情報処理技術の体系



以下では、この体系の各項について簡単に説明を加え、関係する技術項目を例示する。さらに、本報告書の5～7章で取り上げる関連項目名も、（ ）で囲んだ番号と共に併記する。

なお、5～7章の各（ ）で示されるこれらの関連項目が、必ずしもこの3次元情報処

理体系の全体をカバーしているわけではなく、また、すべての体系の中から相対的に重要な項目を選択した結果でもないことをお断りしておきたい。

A. 3次元情報の処理

ここでいう3次元情報とは、例えば立体像のようなものを表す。

A.1 3次元情報の計測

外界の3次元情報を情報処理系に入力する操作一般を対象とする。

C T／立体視／投光法／センシング／センサフュージョン／インテリジェントセンサなど関連技術項目は多い。

(1) 立体の計測

(2) 3次元情報のセンシング手法

A.2 3次元情報の処理・認識

広く、3次元情報の処理一般を対象とする。

生体の持つ各種の情報機能はもとよりのこと、空間認識／形状認識／モデルベース計測などの情報の3次元的理解・認識処理アルゴリズム、記述モデル／データ構造／座標変換などの3次元モデリング、輪郭・面検出／拡大・縮小・回転処理／陰影付加／ホログラフィックフィルタリング／レイトレーシングなどの立体像の3次元処理、特徴抽出／相関処理／予測符号化などの3次元情報の圧縮処理アルゴリズム、などが含まれる。

(1) 生体の情報認識

(2) 立体・空間の認識

(3) 情報のデータ構造と処理

(4) 3次元画像処理の技術課題と応用例

(5) 機械設計支援用C A Dシステム

A.3 3次元情報の伝送

テラビット光伝送／フィールド交番伝送などの時系列伝送技術が、その対象となる。

(1) 立体テレビ信号の伝送

(2) 3次元情報の高能率伝送・知的符号化

(3) 3次元情報の光伝送

(4) 超並列伝送

A.4 3次元情報の表示・蓄積

立体テレビを代表とする立体映画／全周投影映像／コンピュータグラフィックス／実時間ホログラフィ／ヘッドマウントディスプレイなど3次元動画像表示や立体写真／ホログラム／レンチキュラレンズなどの3次元情報の蓄積技術、3次元情報記憶／イメージの多重記憶などの3次元情報記録がその対象である。従来は、3次元技術というと、この分野を指すことが多かった。

(1) 3次元情報表示技術

(2) ホログラフィックな3次元表示技術に関する研究例

B. 情報の3次元的処理

「情報を3次元的に処理する」ということが有り得るのか、また有ったとしてもそこに新しい情報処理技術として何らかの意味があるのか、について種々の観点から調査を行い、議論を進めたが、確定的な結論には達していない。

B.1 処理方式

次項が、情報を3次元的なハードウェアで処理しようというのに対して、3次元的「方式」で情報処理を行おうという新しい試みである。必ずしも、明確に定義できていない分野である。

超並列情報処理、ニューロコンピューティング／ニューラルネット、セグメンテーション／スライシングなどの面的連続情報処理、光連想メモリなどが、関連技術項目として提起された。

(1) 人間の情報処理

(2) 光情報処理

B.2 ハードウェア

情報処理ハードウェアはそれが実空間に存在しているため本質的に3次元であるが、情報処理機能を向上させるためには、その3次元的特性を有効に生かす必要がある。

積層型連続処理プロセッサ／超並列プロセッサ／NCUBE などの3次元コンピュータ、3次元デバイス（3次元IC、3次元OEIC）／面的光デバイス／空間光変調素子／マイクロオプティックス／3次元ホログラム／3次元実装などの3次元情報処理デバイス技術、ホログラム／光インターコネクションなどの超並列伝送技術が注目されている。

- (1) 3次元コンピュータ
- (2) 3次元情報処理デバイス

C. 新しい情報処理

次元を物理的にとらえず自由度として扱う新しい情報処理の開拓が重要と思われる。

ハイパープロセッサ／多次元コネクションマシンなどの多次元情報処理、知的創造型コンピュータ／想像コンピュータ／判断プロセッサなどの知的コンピュータなどが、その一例である。

- (1) 多次元情報処理
- (2) 知的コンピュータ
- (3) ニューロコンピュータ
- (4) 頭脳（常識装備型）コンピュータ
- (5) 3次元的処理からイメージされること

今後は、従来から研究がなされているA. の分野よりも、まだ未開拓の技術が多く、将来の発展が期待できるB. 及びC. の分野に重点を置いて調査検討を行う必要がある。

5. 3次元情報の処理

ここでいう3次元情報とは、例えば立体像のようなものを表す。われわれが住み、生活している空間がまさに3次元であるので、3次元情報を取り扱いたいというニーズは多い。

5.1 3次元情報の計測

本節では、外界の3次元情報を情報処理系に入力する操作一般を対象とする「3次元情報の計測」について述べる。

CT／立体視／投光法／センシング／センサフュージョン／インテリジェントセンサなど関連技術項目は多い。

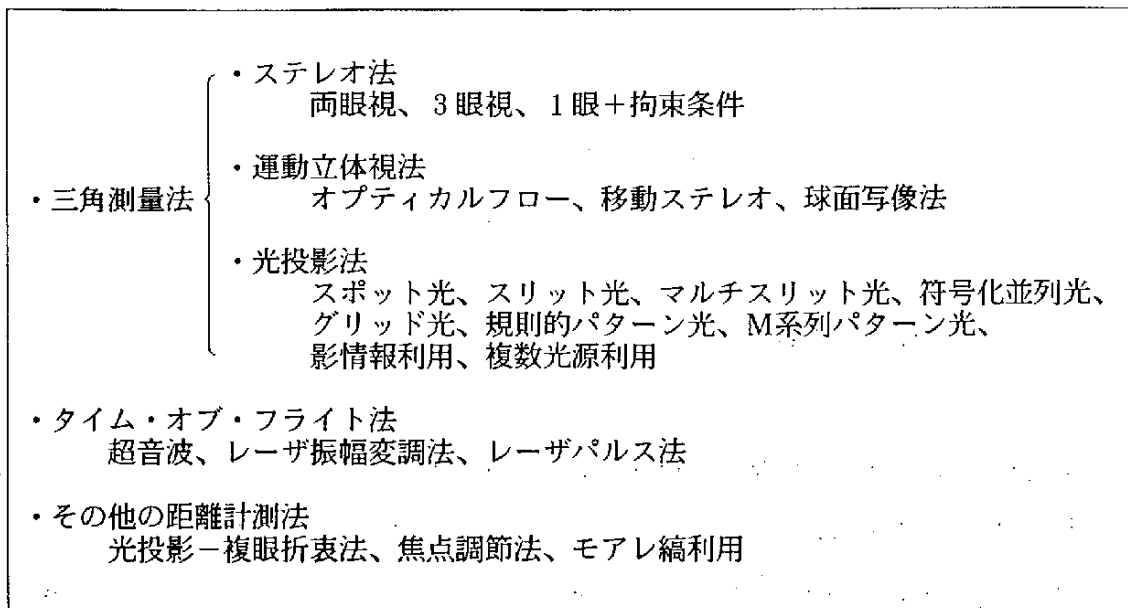
5.1.1 立体の計測

(1) 現状技術のサーベイ

これまで、多くの3次元計測手法は、ロボット用視覚研究の一環として研究されてきた。ロボット用視覚センサは、まず外界の環境を2次元画像などの形で入力し、その情報から環境の3次元構造を計測し、線や面の相互位置関係を調べて元の物体の形が何であるかを求め、最終的にはその物体が何であることを認識して、ロボットが環境の中で移動や作業を行うことを可能にすることが目的である。この中で、環境の3次元構造の計測は、その後の認識処理を行う上で重要な要素技術である。

3次元計測には、線方位計測、面方位計測、距離計測などがあるが、取り分け重要な技術が距離計測である。その理由は、距離情報が得られれば、線方位や面方位を求めたり、物体の凹凸の認識や平面・曲面の認識等が可能になるのに対し、逆に、例えば単眼画像から3次元形状認識は可能でも、ロボットが動作する上で必要な対象までの距離を得ることは難しいからである。

現状の距離計測技術を原理の違いで分類すると図表5.1-1 のようになる。大きく分けると、計測対象と観測系との間にできる三角形の計測を基にした三角測量法、超音波や光の発信・受信間の時間差を基にしたタイム・オブ・フライト法、およびその他の方法に分類できる。三角測量法は、さらにステレオ法、運動立体視法、光投影法に分類できる。



図表5.1-1 距離計測法の分類

(a) ステレオ法

ステレオ法の基本は両眼視[1]である。これは、生物の両眼と同様の左右2台のカメラに写る左画像と右画像の視差、すなわち、対象物に向かう視線方向の差を利用して、3次元空間の対象物の位置を左右の視線が交わる位置として求める方法である。ここで問題になるのが、左画像上の1点に対応する右画像上の1点をどのように求めるかという対応点探索問題である。人間の場合には、生来の経験により反射的に対応点の探索を行っている。しかし、これを計算機に行わせようとするとは結構難しい。対応点探索は、対応をとる範囲の大きさによって領域間対応、エッジ間対応、特徴点対応などに分けられる。かつては、計算を容易にするため、領域よりはエッジ、エッジよりは点というように、適宜次元を下げて必要な部分だけの対応を求めるのが一般的であった。しかし、対応点探索の限界が次第に明らかになってきたため、最近では、点よりエッジ、エッジより領域というように、できるだけ大局的な情報を利用して、より確かな対応点探索を行おうとする傾向にある。

対応点探索を両眼視よりも確実に行うため、カメラを3台使う方法が3眼視[2]である。また、例えば対象物は直方体であるというような、ある拘束条件を使うと、1枚の画像から3次元情報を得ることができ[3]、これもステレオ法のバリエーションと考えられる。

(b) 運動立体視法

運動立体視法は、1個のカメラを移動させて画像を取り込み、複数枚の画像を利用して距離計測を行う方法である。移動ロボット等の移動に伴う大きな視差を利用できるため、2眼ないし3眼の間隔が固定されているステレオ法に比べて、精度の高い距離計測を行える利点がある[4]。運動立体視の一つに、2次元画面上の物体の軌跡、すなわちオプティカルフローから物体の3次元的形状と運動を復元する方法[5]がある。また、多数枚の画像を利用できるメリットを活かして、画像間の対応点探索を不要にした移動ステレオ[6]や、2～3眼よりも計測の精度と信頼性を大幅に改善した球面写像法[7]がある。

(c) 光投影法

光投影法は、基本的にステレオ法の両眼視における一方のカメラを光投影器に置き換えたものである。ステレオ法との大きな違いは、特殊な場合を除いて対応点探索という厄介な問題が存在しない点であり、それだけ確実な方法と言える。ただし、色情報を扱い難い、鏡面反射する対象物への適用が難しい、などの短所がある。これまで、計測を高速化するために、スポット光からスリット光へ、さらにマルチスリット光から符号化並列光などへと改良が進められてきた。今後、実時間計測を目指す有望な方法の中に、メモリ機能を持つ受光素子を2次元的に配列した非走査型カメラを使用する方法[8]や、並列光の識別を波長を利用して行う方法[9]がある。

(d) タイム・オブ・フライト法

タイム・オブ・フライト法は、超音波やレーザ光を対象物に照射し、反射して戻って来るまでの時間差や位相差から距離計測を行う方法である。超音波は装置が簡便な反面、指向性を鋭くすることが難しいため、高い方位分解能を得にくい。一方、レーザを用いる方法は、処理時間、方位分解能、装置寸法等にまだ改善の余地はあるものの、半導体レーザの大出力化や回路素子の高速化・小型化を背景として、強力な3次元計測技術となりうる方法である。レーザ振幅変調法[10]は、照射波と反射波の位相差から距離を求める方法であり、レーザパルス法[11]は、時間差から求める方法である。

(e) その他の方法

その他の距離計測法として、光投影法と複眼を組み合わせた方法、オートフォーカスカメラ等に使用されている焦点調節法、格子状パターンを対象物に投影し、格子を

透かして観測したときに見られるモアレ縞を利用する方法などがある。

3次元計測法には、以上述べた距離計測法のほか、照明の方向と面の明るさから面方位を計測する照度差ステレオ法、照度差ステレオと両眼視を組み合わせて面方位と距離を計測する方法[12]、複数方向から見た物体の輪郭情報からすべての視線方向について空間的共通領域を求め、物体の3次元表面形状を計測する錐体相貫法[13]などがある。

(2) 今後の課題

応用分野によって課題は異なるが、一般的には次のような項目が課題としてあげられる。

(a) ダイナミックレンジ

将来、大きな需要が予想される宇宙ロボットでは、極めて高いコントラストの画像を入力する必要がある。地上の応用でも、例えば溶接検査では光のダイナミックレンジが120 dBに及ぶという報告がある。従って、そのように大きなダイナミックレンジにも対応できる画像入力デバイスおよび画像処理技術を開発する必要がある。

(b) 計測精度／計測範囲

一般に、計測範囲が限られていれば、それなりに高い計測精度が得られる。例えば、現状技術ではほぼ最高性能と思われる12ビットの距離分解能があれば、40cmの計測範囲で0.1mmの精度が得られる。しかし、もし80cmの範囲を計測したいときは、センサを移動する必要がある、センサの走査機構を設けると、装置が大きく複雑になり、精度は劣下する。一方、広い範囲を計測したい場合でも、計測範囲の全域にわたって高い計測精度が要求されることは少ない。従って、そこそこの精度で広い範囲を計測でき、かつ、狭い範囲については非常に高い精度で計測できるような3次元計測技術が望まれる。

(c) 処理速度

現状技術では、対象を限定すれば、実時間（実際的にはNTSCビデオ信号のフレーム周波数である30Hz）で計測できる技術がある。将来的には、動きの速い対象物や環境を計測するために、視野の全画素の距離計測をフレーム周波数で実行可能な3次元計測技術が望まれる。さらに、1フレーム時間内の動きによるブレを避けるため、走査なしで計測できることが望ましい。その点で、最近の高速電子シャッター機能付きテレビカメラは、動く対象物の画像入力に適している。

(d) 装置寸法

移動ロボットに搭載する場合は当然として、工場やオフィスなどに固定して使用する場合でも、3次元計測装置のサイズが小さければ小さいほど使いやすい。将来的に広く使用されることを想定すれば、指先程度のセンサとポータブルパソコン程度の処理装置で、上に述べた機能・性能を持つことが望まれる。

以上のような課題を克服する上で、非常にコンパクトで高性能な3次元視覚センサである生物の眼と、その情報処理を受け持つ脳および神経系の仕組みが解決のヒントを与えてくれる可能性がある。

【参考文献】

以下の文献は、それぞれの手法の例であり、必ずしも代表的な文献という訳ではない。

- [1] 白井：コンピュータビジョン、人工知能シリーズ4、昭晃堂、(1980)
- [2] N. Ayache, F. Lustman: "Fast and reliable passive stereovision using three cameras", Proc. International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence, SEIKEN SIMPOSIUM Tokyo, pp. 186-191, (1987)
- [3] T. M. Strat, M. A. Fischler: "One-eyed stereo: A general approach to modeling 3-D scene geometry", IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol. PAMI-8, no. 6, pp. 730-741, (1986)
- [4] 築山：「無人走行車のためのモーションステレオ」、情報処理学会コンピュータビジョン研資、41-4, (1986)
- [5] 金谷、吉田：「ノイズに強いオプティカルフローからの3次元復元」、情報処理学会コンピュータビジョン研資、48-4, (1987)
- [6] 山本：「連続ステレオ画像からの3次元情報の抽出」、電子通信学会論文誌D、vol. J69-D, no. 11, pp. 1631-1638, (1986)
- [7] T. Morita, Y. Yasukawa, Y. Inamoto, T. Uchiyama, S. Kawakami: "Measurement in three dimensions by motion stereo and spherical mapping", Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 422-428, (1989)
- [8] 田中、荒木、佐藤、久野：「高速3次元物体計測装置の試作」、電子情報通信学会研究報告、PRU87-41, (1987)

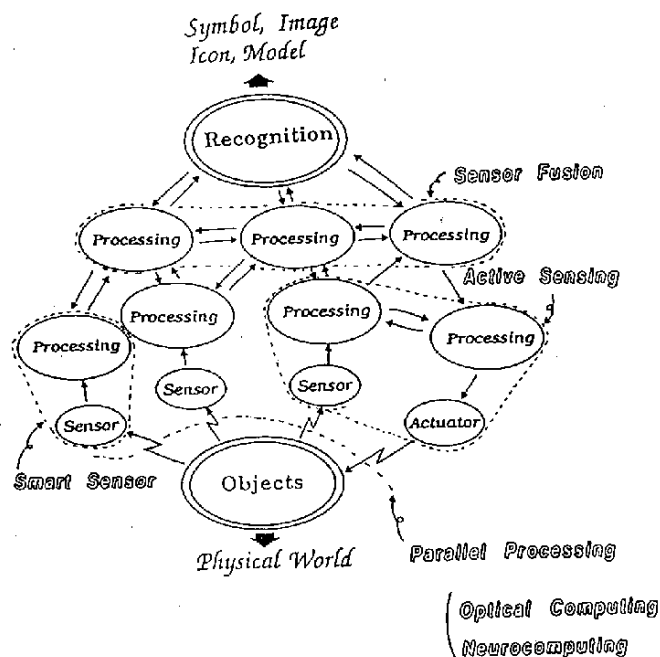
- [9] 岩川、田島、本山：“Rainbow Range Finderによる距離計測実験”、情報処理学会コンピュータビジョン研資、59-1, (1989)
- [10] D.Nitzan, A.E.Brain, R.O.Duda: “The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis”, Proc.IEEE, vol.65, pp.206-220, (1977)
- [11] R.A.Jarvis: “A perspective on range finding techniques for computer vision”, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.PAMI-5, no.2, pp.122-139, (1983)
- [12] 池内：“二枚の法線分布図からの領域対応法による距離分布図の作成”、電子通信学会論文誌D、vol.J68-D, no.10, pp.1761-1768, (1985)
- [13] 宇佐美、仁尾：“3次元ディジタル画像入力方法の基礎検討”、情報処理学会コンピュータビジョン研資、37-2, (1985)

5.1.2 3次元情報のセンシング手法

認識の対象としてあるいは行動する空間としての3次元空間内には、様々な情報が様々な形で存在している。この中から必要な情報を有用な形で取り出すためには、センサの出力から必要とする情報を抽出・選択・変換する過程が必要となる。一般に3次元空間内の情報は、一度2次元以下の構造を持つセンサの出力空間に写像される場合が多いので、もとの3次元情報を取り出すには、適当な条件設定のもとでその逆演算を行うことが必要である。この処理過程は、情報の抽出と選択というセンサ本来の機能と本質的に等価なものであり、その意味でセンサの機能の一部として考えなければならない[1]。このような観点から、特に視覚の研究などでは、立体視などを例に視覚を視覚系固有の処理を含む一つの情報処理モジュールとみなし、これを初期視覚(early vision)と呼んでいる[2]。このような演算機構を内包するセンシング構造の実現にはセンサアーキテクチャの議論が必要であり、そのような議論こそ今後のセンサ技術の方向を決定づけるに違いない。

(1) センシングシステムの基本構造

センサが固有の処理を内包することは、センサを用いるシステム全体が必然的に並列分散構造、しかも機能的に局在した階層的構造を持つことを示唆している。このような考え方に基づくセンシングシステムの構造と課題を図表5.1-2に示す[3]。



図表5.1-2 センサ情報の並列処理方式[3]

この図に示されるような並列分散処理構造において、それぞれのセンサが取る処理アーキテクチャは画一的なものではなく、検出デバイスや処理の目的などの違いに応じて、多様な処理形態をとることになる。一般に視覚情報のように均質性の高いパターン情報を扱う場合には、SIMD(Single Instruction stream and Multiple Data stream)型の並列処理が効果的であり、逆に異種センサの情報の処理には、MIMD (Multiple Instruction stream and Multiple Data stream)型の処理が有効である。また、センサは本来、物理的な現象を利用したものであるから、その物理現象を処理に利用することも可能である。

(2) センサの知能化

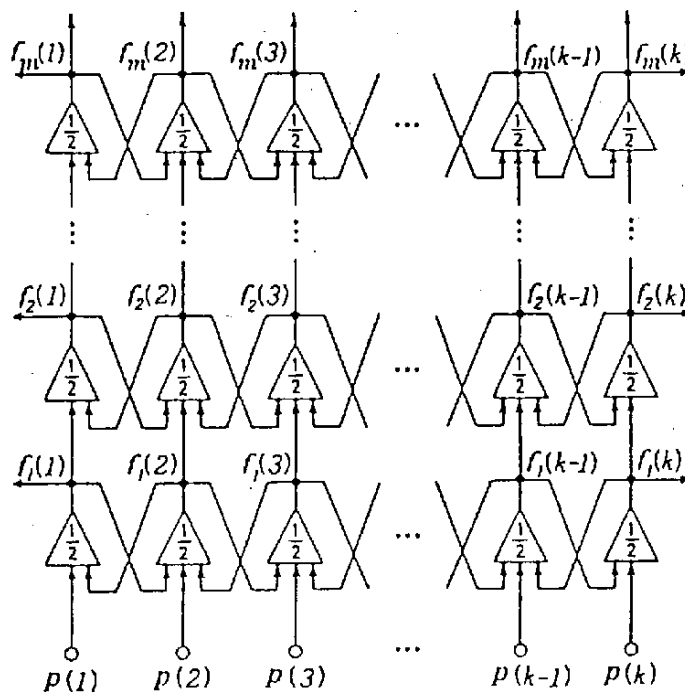
センサに固有の処理機能を検出機能と一体化することをセンサの知能化と呼び[4]、検出機能と一体化する処理回路の構造が焦点となる。この処理回路の設計に際しては、従来からのプロセッシングアーキテクチャの設計思想とは違って、集積化の要請、専用性の高さ、高速性などといった特異な設計条件が存在する。特に、演算処理の構造よりもI/Oの機能を優先させたセンサオリエンティドな演算アーキテクチャが必要である。

一方、センサの知能化はシステムの負荷分散のためにも有効である。この面での課題として、知能化されたセンサと処理アルゴリズムとを関係づけ、システム全体として効

率的な負荷分散やリアルタイム性の要求にこたえられるような記述ソフトウェアの開発が挙げられる。

(3) センサ情報の並列処理

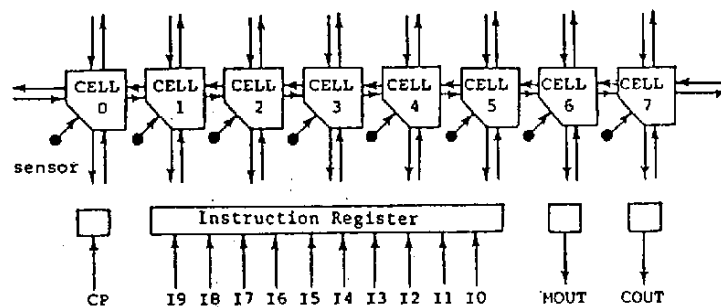
アレイ状あるいはマトリクス状のセンサからの信号の処理については、比較的整理された処理方式が幾つか提案されている。パターンのフーリエ特徴の抽出に対しては、すでに多層の並列処理方式であるバタフライ回路(FFT)が存在するが、モーメント特徴に関しても、多層の並列処理回路により検出する方法が提案されている[5]。この方法は、位置検出デバイスの構造を偏微分方程式で記述し、さらに分布定数系から差分方程式で記述される離散系に変換することにより導かれたものである。例として、アレイ状センサに対する処理回路を図表5.1-3に示す。この図に示すような均質な多層並列処理回路により、アレイ状のセンサ情報 $p(i)$ ($i=1, 2, \dots, k$)の n 次モーメントが、 $m=\text{INT}(n/2)+1$ 層($\text{INT}(a)$ は a を超えない最大整数)の処理回路の境界値、 $f_j(1)$ と $f_j(k)$ ($j=1, 2, \dots, m$)とから簡単な演算により検出することができる。また学習を導入することにより、全体回路の座標軸が均一でなくても思った通りの出力が得られるようになることも示されている[6]。



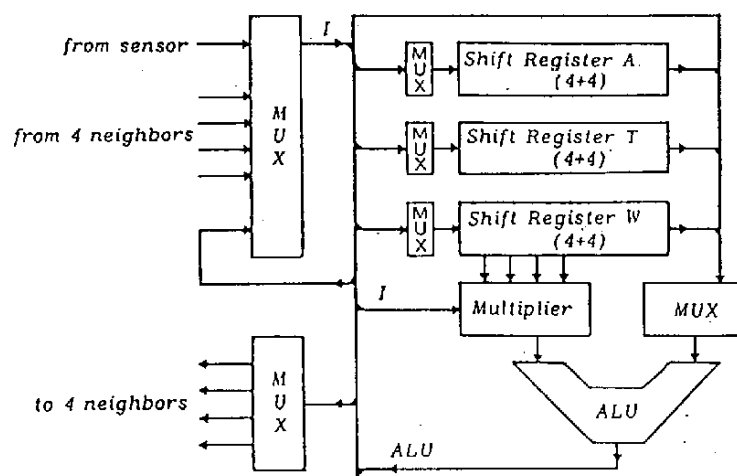
図表5.1-3 n 次モーメントを検出する並列処理回路(1次元)[5]

このような回路は、特徴量抽出のための専用回路であり、処理の汎用性に乏しい。処理の汎用性を実現するためには、何らかの形でプロセッサを導入することが効果的とな

る。このようなプロセッサの例として、局所的なパターンに対する並列処理を実現したLSIが開発され、触覚センサの処理に応用されている[7]。図表5.1-4 にそのLSI の構造を示す。開発されたLSI は、ビットシリアル演算を採用したコンパクトなプロセッシングエレメント(300ゲート)を8個内蔵しており(図表5.1-4(a))、全体で3000ゲート規模に収まっている。コンパクトなプロセッシングエレメントという点ではコネクションマシンと類似の設計思想を持つものであるが、センサということで設計条件は極端に厳しくなっている。図表5.1-4 (b) に示すように、各プロセッシングエレメントにはセンサ情報を直接入力するラインがあり、3つのレジスタ(8bits)と4bit乗算器を内蔵したALUにより、種々のパターン処理が実行できるようになっている。



(a)



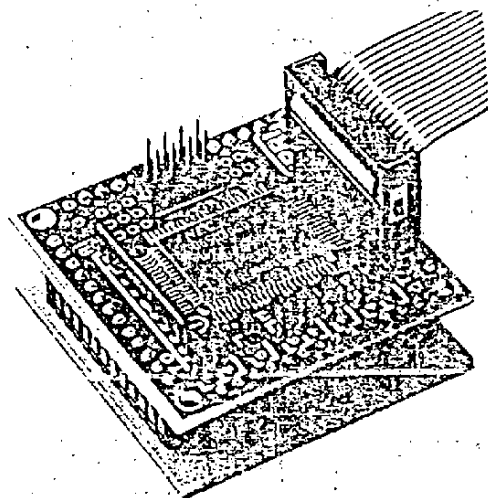
(b)

図表5.1-4 並列処理用 LSIの構造[7]

このLSIを用いて触覚センサを構成した例を図表5.1-5 に示す。このセンサは、 8×8 のマトリクス状の検出点を持ち、各検出点を行方向に走査することによって、1行に

対して1つのプロセッシングエレメントで処理するようになっている。このLSIを用いて1bitパターンに対する論理演算によるエッジの抽出の処理を行った例では、 $8.3\mu\text{s}$ で検出、処理、出力が実現されており、その高速性が示されている。

さらに、このような設計思想に基づき、大規模完全並列処理を実現することもこれらの延長線上にある[1]。つまり、数千から数万のプロセッシングエレメントを内蔵した1チップセンサの実現である。後述するニューロコンピューティングの利用も同様の考え方が背景にある。このような完全並列処理方式は、従来とは比較にならないほど高速の処理が可能であり、走査に伴う時間のずれの問題もない。汎用化については、ハードウェア上で対応するよりも、シリコンコンパイラなどを利用して実現をはかる方が現実的である。



図表5.1-5 並列処理型触覚センサ [7]

(4) アクティブセンシング

センサ情報の処理形態は、求心性のものばかりではない。遠心性の情報、すなわちセンサをアクティブに動かす動作をセンシングの一部として利用する方法がある。この方法をアクティブセンシングと呼び、センサの局所性や不確実性を回避する手段として用いることができる。

このような議論は、従来から生体の触覚系などでは多くの議論がなされている[8]。生体の触覚系では、受容器から得られる情報のみでは検出不可能な情報が存在し、運動系を積極的に利用した感覚系が構成されているとされ、haptics と呼ばれる独特の学問

分野も形成されている[8]。これに類似した考え方は、具体的に種々のモデルとして数多くの提案がなされている。触覚系ではTaylerによる材質感覚のモデル[9]、視触覚系を対象としたものでは Arbibによるpreshapingやschemaのモデル[10]、さらに感覚系運動系全体を論じた Albusの階層的フィードバックモデル[11]などがある。

実際にシステムとして組まれた例としては、固定した対象物の外形を局所的なセンサで認識するセンサシステム[12]がある。このシステムは、ちょうど指先で対象物の外形を認識する動作（触運動と呼ばれる）を模倣したものであり、並列処理により対象の局所的なエッジの位置を抽出し、その位置制御を行ってエッジのトレースを実現している。この際、遠心性の情報をうまく利用するために内部モデルという考え方が導入され、遠心性の情報を内部モデルの入力（遠心性コピーと呼ぶ）とすることにより、自己の動作の予測を行い、その予測に基づいて動作した結果をセンサ情報により修正するという方法により、アクティブな認識動作を実現している。この方法により、未知の対象物に対する能動的動作が実現でき、結果として対象物の全体像を自律的に認識することを可能にしている。

(5) センサフュージョン

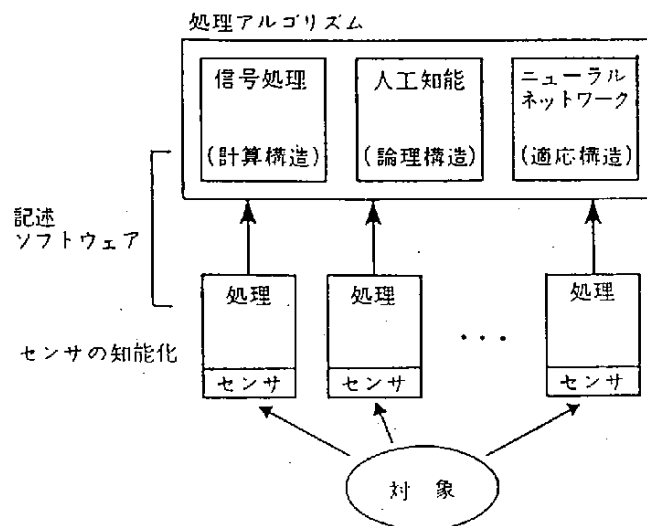
センサの智能化が進み、システムが扱うセンサの数と種類が増加するにつれて、異種センサからの情報についても、その処理構造を整備しておくことが必要になる。このような異種センサからの情報を融合して一つのまとまった情報を抽出する技術をセンサフュージョンと呼び、今後の重要な研究課題とされている[13]。

センサフュージョンの分類を図表5.1-6に示す。複合や統合のレベルは従来の技術の延長線上で考えられるが融合や連合は新たな処理構造の導入が必要となる。従って、課題は複合や統合のレベルからいかにして融合や連合のレベルに押し上げるかにある。

具体的には、記述論を主体とするソフトウェアの問題、センサの智能化を主体とするハードウェアの問題に基盤を置き、それらの道具立ての上にアルゴリズムの問題として、信号処理、人工知能、ニューラルネットワークなどのアプローチが考えられる。この様子を図表5.1-7に示す。

図表5.1-6 センサフュージョンの分類 [13]

分類	意 味	各センサ情報(A, B) と処理の関係	処 理 の 目 的
複合	複合個が合 わさること	$A, B \rightarrow A+B$: 相互の関係は言及しない。 または独立。相補的、加法的処理。	単一機能性や局所性の回避、 測定レンジの拡大など。
統合	支配が形成 されること	$A, B \rightarrow f(A, B)$: 処理演算 f に対する関 係として規定される。乗法的処理。	精度や信頼性の向上、処理時 間の短縮、故障診断など。
融合	緊密に一体 となること	$A, B \rightarrow C$: 相互の関係からまとまった 知覚表象を得る。協調・競合的処理。	両眼融合 (立体視)、視触角融 合 (物体認識、空間認知) な ど。
連合	関連が形成 されること	$A, B \rightarrow (A \rightarrow B, B \rightarrow A)$: 相互の関係が抽 出される。連想的処理。	予測、学習・記憶、モデル形 成、異常の検出など。



図表5.1-7 センサフュージョンの課題 [13]

(6) ニューロコンピューティング

ニューロコンピューティングの基本思想は、高度の並列構造を持つ [入力→処理→出力] 装置である。しかも、ニューロンモデルという演算の汎用性に乏しいコンパクトなプロセッシングエレメントを要素とする大規模完全並列処理であり、その処理に汎用性・柔軟性を付与するための構造として、“学習”が導入されている。このような処理構造は、その基本的な考え方において並列処理型のセンサの知能化と酷似している。従って、ニューロコンピューティングは、センサの知能化に有効な手法を提供することが可能である。

具体的にセンサとして試作を行っている代表例にMeadらの視覚センサならびに聴覚センサがある[14]。これらはアナログのVLSI技術を用いて生体の感覚機能を実現しようとする試みであり、聴覚では音像の定位を対象とし、視覚では近傍間演算によるフィルタ機能の実現を目指している。どちらも感覚系全体からみれば一次処理的な意味合いの強いものであるが、検出機能と一体化することにより並列性の高いセンシング機構を実現することが可能となり、VLSI技術の利用を容易にしている。また、従来の並列処理にありがちな入出力のボトルネックは、このVLSIの内部には存在しない。しかし、次段との接続、すなわちLSI間相互接続の方法には多くの課題が存在する。

このようなニューロコンピューティングと高い親和性を持つもう一つのハードウェア技術として、光演算がある[15]。光演算は、従来から光コンピュータの実現を目指して研究が行われており、原理的に高い並列性を持つ演算方式である。また、視覚的入力情報とのマッチングもよく、視覚入力を直接光演算することでセンサの知能化を達成しようとする期待も大きい。しかし、従来の研究では、この並列性を生かすアルゴリズムがなく、特にプログラムの概念が導入しづらいという欠点があった。そこで、ニューロコンピューティングが要請する大規模並列性を光演算の原理的並列性で確保するとともに、プログラムにとって代わる機構として学習機構を導入することにより、光演算において処理の柔軟性を実現しようとする考え方が光ニューロコンピューティングである。

このような考え方にに基づき、すでに様々な光演算システムが提案されている。しかし、光演算での実現に本質的な役割を演じる学習機能に対しては、その機能を光演算で実現している例は少ない。その中で、最近、光アソシアトロンと呼ばれる学習可能な光連想記憶システムが開発された[16]。このシステムは、空間光変調管をキーデバイス（光学的パターンの演算と記憶）として、学習機能（直交学習）を実現した自己想起型光連想記憶システムであり、具体的な学習実験も示されている。このシステムにおいて、実際に学習によって得られた記憶行列は、パターン間の干渉を除去しながら認識機能を自己組織されたものであると同時に、システムに存在する各種の不均一性をも補償されたものとなっている。つまり、センシング機能と演算機能が一体のものとして光演算で実現されている。

【参考文献】

- [1] 石川：センサ情報処理のための並列処理アーキテクチャ、コンピュータアーキテクチャシンポジウム論文集、Vol. 88, No. 3, pp. 199-208, 情報処理学会（1988）

- [2] D.Marr: Vision, Freeman (1982)
- [3] 石川: センサ情報の並列処理技術、光技術コンタクト、Vol.27, No.1, pp.9-14 (1989)
- [4] 山崎: センシング技術 [II] - センサの知能化 -, 計測と制御, Vol.24, No.12, pp.1135-1142 (1985)
- [5] 石川, 吉澤: 多層型並列処理回路を用いたn次モーメントの検出方法、計測自動制御学会論文集、Vol.25, No.8, pp.904-906 (1989)
- [6] 宇津木、石川: 格子型ネットワーク回路による線形連想写像の学習、電子情報通信学会論文誌D-II、Vol. J72-D-II, No.12, pp.2103-2110 (1989)
- [7] 石川: 並列処理を用いた局所パターン処理用LSIとその触覚センサへの応用、計測自動制御学会論文集、Vol.24, No.3, pp.228-235 (1988)
- [8] 石川: 触覚のセンシング技術、精密工学会誌、Vol.55, No.9, pp.1583-1587 (1989)
- [9] M.M.Tayler, S.J.Lederman, and R.H.Gibson: Tactual Perception of Texture, in Handbook of Perception III, Academic Press (1974)
- [10] M.A.Arbib: Visuomotor Coordination: Neural Models and Perceptual Robotics, in Visuomotor Coordination, Plenum Pub. (1989)
- [11] J.S.Albus: Brains, Behavior, and Robotics, McGraw-Hill (1981)
- [12] 石川: 並列処理を用いた能動的センサシステム、計測自動制御学会論文集、Vol.24, No.8, pp.860-866 (1988)
- [13] 石川: センサフュージョンシステム - 感覚情報の統合メカニズム -, 日本ロボット学会誌、Vol.6, No.3, pp.251-255 (1988)
- [14] C.Mead: Analog VLSI and Neural Systems, Addison Wesley (1989)
- [15] 石川: 光コンピュータと並列学習情報処理, 計測と制御, Vol.27, No.12, pp.1115-1122 (1988)
- [16] M.Ishikawa, N.Mukohzaka, H.Toyoda, and Y.Suzuki: OPTICAL ASSOCIATRON - A Simple Model for Optical Associative Memory -, Appl. Opt., Vol.28, No.2, pp.291-301 (1989)

5.2 3次元情報の処理・認識

本節では、広く、3次元情報の処理一般を対象とする「3次元情報の処理・認識」について述べる。

生体の持つ各種の情報機能はもとよりのこと、空間認識／形状認識／モデルベース計測などの情報の3次元的理解・認識処理アルゴリズム、記述モデル／データ構造／座標変換などの3次元モデリング、輪郭・面検出／拡大・縮小・回転処理／陰影付加／ホログラフィックフィルタリング／レイトレーシングなどの立体像の3次元処理、特徴抽出／相関処理／予測符号化などの3次元情報の圧縮処理アルゴリズム、などが含まれる。

5.2.1 生体の情報認識

(1) はじめに

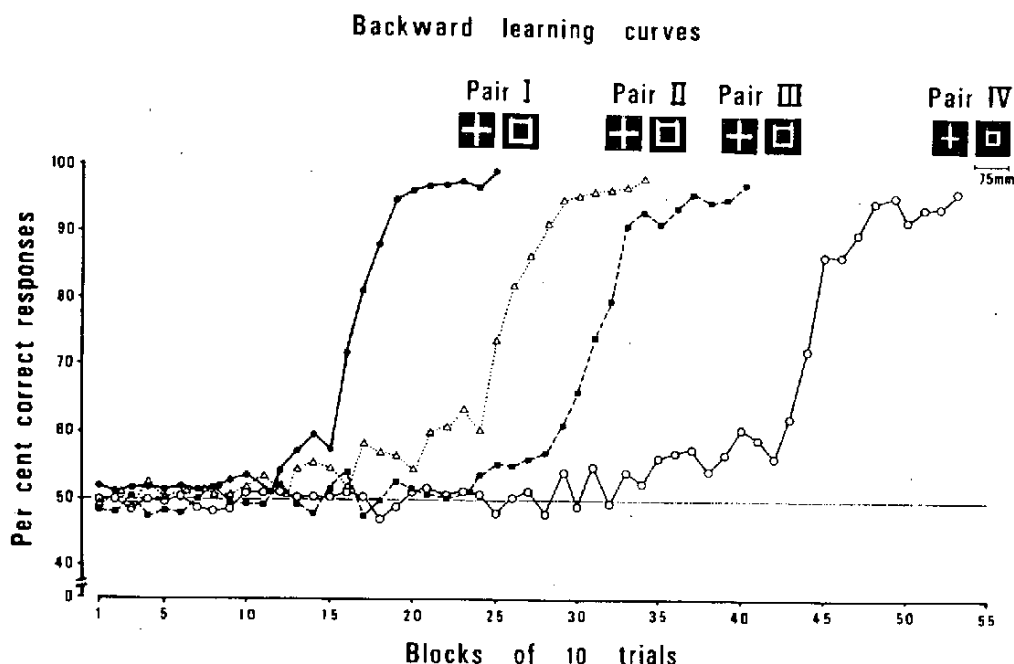
高次思考過程に関与する連合皮質の諸領野は互いに異なった役割を果たしている。しかし、それは全く独立した、又は絶対的存在を意味するものではない。相対的なものにしかならない。脳の営みを理解するには、分業（いわゆる機能局在）と協調（全体論的機構）の2つの対立的立場から理解する必要がある。このような、諸領野が互いに分業的役割を果たすと共に、協調、共同するという処理機構により一つの合目的行動はより効率的に発現される。さらには、対象の物理的情報の処理機構のみならず、意味体としての対象、さらには行動誘発価という情動や意志過程とのつながりで理解する必要もある。このことはニューロコンピュータ開発の目的にもあてはまるであろう。

本項では、岩井が研究している視覚性図形（2次元対象）と物体（3次元対象）の認識（知覚と認知）の神経機構について2、3の知見を概述するととどめる。なお、詳細については岩井の和総説（【参考文献】参照）、及び欧原著論文（文献掲載省略）を参照されたい。

(2) 正常サルにおける図形認識

図表5.2-1 は 220余頭のサルによる、同型であるが、寸法が若干異なった4種の図形弁別学習課題の初学習の逆行性学習曲線である。これらの学習曲線は、偶発的正反応率を示す第1学習過程期と、急速に正反応率の改善を示し、学習習得の規準位に達する第2学習過程期の2過程期から成り立っている。また、各課題に対する学習試行数の差異は第1学習過程期の差異による。これに対し、第2学習過程期の試行数は各課題間で全

く差異がない。その他の研究所見から、第1学習過程期の長短は、注意の焦点化部位である反応部位から分離されている手掛けへの選択的注意過程（注意の転換過程）の難易度を、第2学習過程期は図形認識（知覚と認知）の難易度を反映しているといえる。



図表5.2-1 正常サルにおける図形弁別学習

(3) 図形認識に対する下部側頭葉皮質（第2、3側頭回）剔除効果

図表5.2-2 は下部側頭葉皮質剔除サルの再学習の逆行性学習曲線である。下部側頭葉皮質剔除サルは、術後再学習において、極めて徐々に正反応率の改善を示す。この所見は、下部側頭葉皮質剔除後に発現する図形認識障害は、第2学習過程期の極端な延長として示

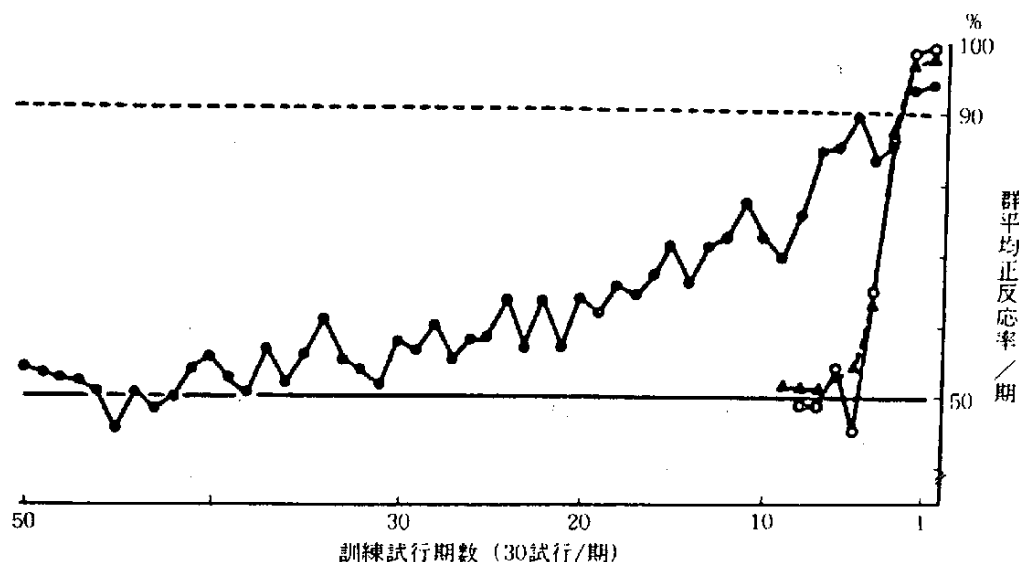


図5.2-2 図形弁別学習課題に対する下部側頭葉皮質剔除効果

されるもので、下部側頭葉皮質切除サルの視機能障害は選択的注意過程の障害というよりは、基本的には、対象の認識（形態視知覚・認知）障害によることを示す。

(4) 下部側頭葉皮質TE野とTE0 野切除効果

下部側頭葉皮質はTE野とTE0 野から構成されている。図表5.2-3 は同時的多数対（24対、計48物体）物体弁別学習課題、1対の図形弁別学習課題、24対（計48物体）の継次的単式（1対）物体弁別学習課題に対するTE野とTE0 野の切除効果を比較検討した結果である。術前過剰訓練を受けたサル（OT群）も、受けてないサル（NOT群）も、同時的多数対物体弁別課題においてはTE野の切除によって障害を示した。しかも、OT-TE群の障害の程度はNOT-TE群の障害の程度と差異はない。TE0野切除群は、OT-TE0群もNOT-TE0群も、軽度の障害を示したにすぎなかった。また、継次的単式物体弁別課題については、TE野切除群は軽度の障害を示したが、TE0 野切除群はほとんど障害を示さなかった。

図形弁別課題に対するTE野切除とTE0 野切除効果は上記所見と逆であった。即ち、TE0 野切除によって、顕著に障害された。TE野切除によっては軽度障害された。

この実験所見は、①TE野とTE0 野は視覚性学習成立において、互いに異なった役割を果たしている、②TE野は物体認識過程に、TE0 野は図形認識過程により密接に関与していることを示唆している。

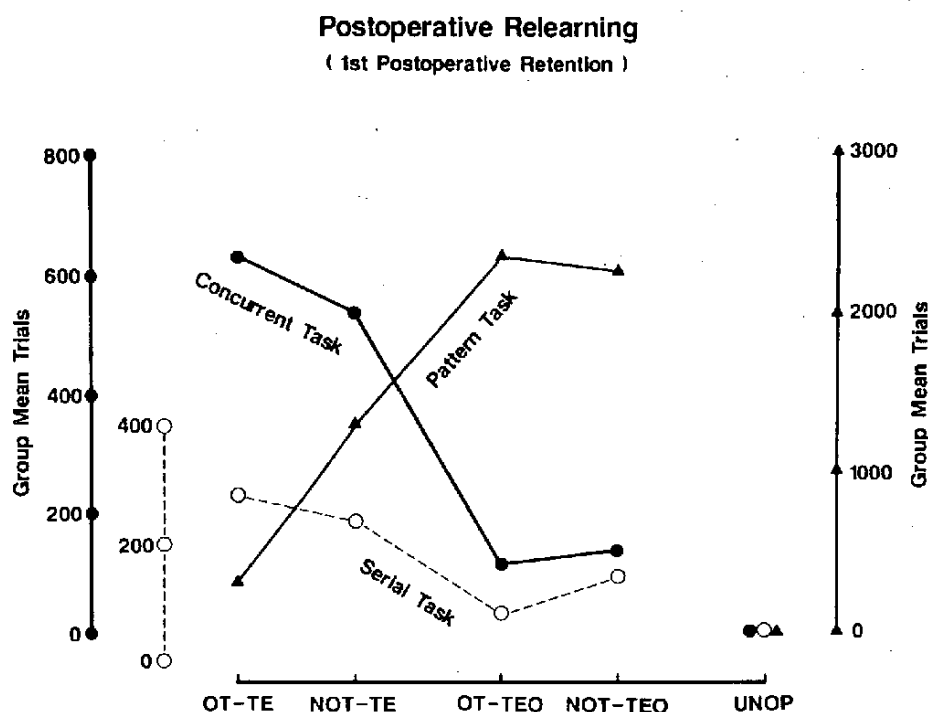


図5.2-3 下部側頭葉皮質TE野とTE0野切除効果

(5) 1次元情報（線分）の合成としての2次元図形の認識

下部側頭葉TE0野ニューロンの中には、4図形（+、△、○、□）のうち、1図形にのみ応答性を示し、他の3図形には応答性を示さないニューロンが少数（約10%）存在する（1図形特異的応答性ニューロン）。しかも、これらのニューロンは、図形の大きさを变化させても、明るさを変えても、さらには図形に彩色（赤、緑などの図形）を施しても応答様式に変化はみられない。図形の構成要素、例えば+図形では—（横棒）や|（縦棒）には応答を示さない。すなわち、この種のニューロンは図形の物理的属性に直接関与しないもので、図形認識（ゲシュタルト知覚）に関与するニューロンであると考えられる。

また、TE0野では、図形の各線分又は曲線の構成成分から図形を合成する過程に関与すると考えられるニューロンも見出されている（図表5.2-4）。このニューロンは、+図形に対しては、刺激提示後の初期段階（約150~200msec）における一過性の高頻度発射と、それに続く比較的長持続性（刺激提示後約500msec）の中程度の発射という応答パターンを示した（上段、左欄）。□と△図形及びこれらの類似テスト刺激に対しては初期段階における一過性の応答のみを示した（下段、3図；△図形に対するPSTHは省略）。しかも、+図形の構成成分である縦棒（|）と横棒（—）にも、一過性の初期応答性を示した（中段、右図）。また、+図形の同種異型図形テスト刺激（拡大、縮小、回転、部分図形）に対する応答性は標準（訓練）図形に対する応答性とほとんど同じであった（上段、右2図と中段の中央図）。また、縦、横棒を含まず、曲線成分から構成されている○図形には全く無応答であることに注意してほしい（中央段、左図）。従って、これらの応答性は□と△図形を構成している縦又は横棒に対する応答を反映したものと考えられる。+図形に対する長持続性応答が単純にバー押し（運動反応）過程や報酬獲得過程を直接反映しているものでないことは、+図形と同じ陽性条件刺激である△図形に対する発射パターンとの差異から知りうる。従って、このニューロンは、縦、横棒、など方向定位線分の情報を受け、それらを合成し、+図形という形態を知覚する過程に密接に関与しているニューロンと考えられる。

なお、現在のところ3次元物体の運動方向選択性ニューロンには見出されているが、3次元物体認識ニューロンの存在については現在のところ報告されていない。今後の重要検討課題であろう。

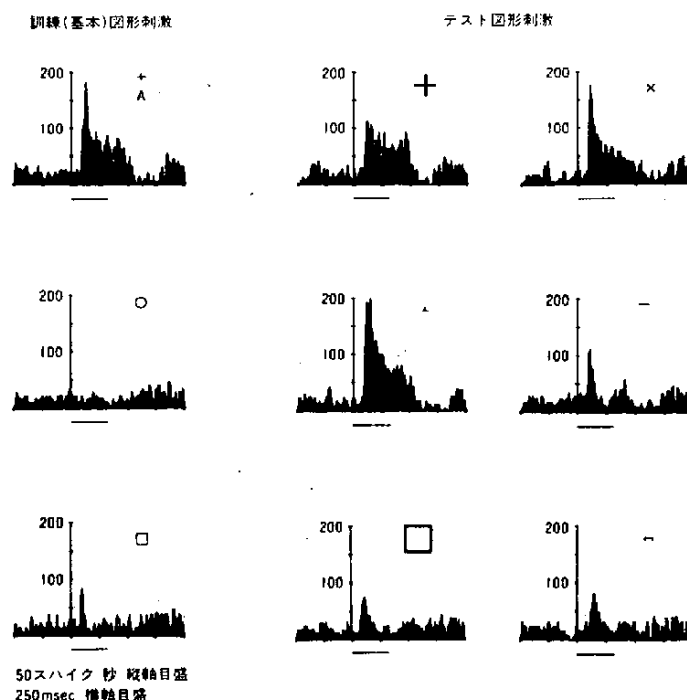


図5.2-4 下部側頭葉後方1/3領野 (TE0野) から記録された図形の形態知覚関与ニューロンの1例。1次元情報(直線線分)を合成し、2次元図形を認識していると考えられるTE0ニューロン。

(6) おわりに

現在の情報処理装置に2つあると言える。一つは、創造の神の作りたもうた生物の脳である。他は我々の脳が作り上げたコンピュータである。これら2つの装置は現時点では似て非なるものである。特に、動作原理、装置のハードウェアの点では著しく異なっており、多くは互いに独立して研究が進展している。しかし、両者は将来にわたっても互いに独立したものではないであろうし、あってはならない。脳のメカニズムを導入することによって、現在のコンピュータの限界を越えたいわゆる「ニューロコンピュータ」を実現しうるであろう。これが、まさに、本プロジェクトの目的である。反面、脳研究に携わっている者にとっても、シミュレーションのためのコンピュータの性能の向上によって、合成的手法を用いた神経回路モデルの研究知見は重要、不可欠なものとなってくるであろう。それは、高次思考過程を営んでいるヒトや動物の脳の生理学的研究に当たっては、種に制約があるからである。

情報処理機構を理解するに当たって、脳生理学的研究者にとっても、合成的手法による神経回路モデル研究者にとっても、それぞれの立場から、必要な幾つかの基本的過程があろう。両者が協調して研究するには、何らかの点で共通した観点とか立場がなければ

ばならないであろう。ここでは、異なる立場の両者が共通していると考えられる3過程を挙げる。これらの3過程は両者が互いに異なった術語で表現されているものである。

第1は何をなすべきかという目標過程である。生理学では、目標志向(goal-directed)といわれているものである。また、膨大な、多岐多様の情報のうちから、何を目標として、合目的行動を発現、達成するためには何に注目すればよいかという過程のメカニズムの理解である。これはいわゆる選択的注意(selective attention)過程のメカニズムとも表現されている。同時に、回路網モデルの分野ではコンピュータでは「何(what)」を計算することが必要か、すればよいか」目的を明確にすることが重要であろう。これは、言うほどに容易なことではない。膨大な資料に埋もれているどの情報を適確に利用すれば、解答が得られるかは非常に苦慮しているところである。

第2は目標志向行動発現のためのアルゴリズムの理解であるし、計算のためのアルゴリズムの理解である。逐次的直列的处理系と並列的分散処理系の存在とそれらの理解は、特に注目されている。生理学では、並列分散系の存在は推定されているが、機能との関係で十二分に解明されている訳ではない。

第3は、そのアルゴリズム実行のための脳での神経回路網の理解であるし、コンピュータでのハードウェアの理解である。特に重要なのは機能ユニットの立場からの理解であろう。脳では基本素子である1個のニューロン、1つの領野内の多数のニューロンによる回路網、複数の領野間にまたがる回路網として理解するなど機能ユニットの設定については問題が多い。コンピュータでも基本演算素子のトランジスタ、素子の集合体であるIC、LSI、更にはそれらを組み込んだパッケージ、部分装置などのユニットが考えられる。それぞれの機能ユニットについて、その構造と機能するところについて明確に理解することが重要であろう。そして、これらの対応づけの解明が重要であろう。

このように、脳生理学者とコンピュータ(コンピューティング)研究者の研究には、互いに共通した所がある。しかし、上述したように、現実問題として、両者間には多大なギャップがあることも事実である。この間隔は両分野の研究者が互いに、他の分野の研究手法、所見、志向する所を十二分に理解しあっていないことによるものである。このプロジェクトの目的は、生理学者とコンピュータ研究が一堂に会し、研究を推進することにある。

【参考文献】

- [1] 岩井榮一： 脳： 学習・記憶のメカニズム. pp. 1 - 269, 朝倉書店、
(1984;第4刷, 1989)
- [2] 岩井榮一： 第2章-I. 側頭葉連合野の解剖. 新生理学大系：
第12巻 高次機能の生理学（星 猛・伊藤正男）， pp. 54-73、医学書院、(1988)
- [3] 岩井榮一： 第2章-II. 下部側頭葉・後部連合皮質の機能 --
その神経行動学的研究. 新生理学大系： 第12巻 高次脳機能の生理学（星 猛
・伊藤正男）， pp. 73 - 98, 医学書院, (1988)
- [4] 岩井榮一： 第2章-V. 側頭葉・後頭葉連合皮質の構造と機能についての概説
と今日的话题. 新生理学大系： 第12巻 高次脳機能の生理学（星 猛・伊藤正男），
pp. 133 - 148, 医学書院, (1988)
- [5] 岩井榮一： 第1章-X. 視覚連合皮質野と高次機能. 新生理学大系：
第9巻 感覚の生理学（星 猛・伊藤正男）， pp. 180 - 214, 医学書院, (1989)

5.2.2 立体・空間の認識

立体図形（3次元対象物）の認識の研究は、ロボットの眼を中心に研究が展開されてきた。現在では、研究領域の裾野が、「静的外界のみならず動的外界を取り扱う」、「外界のみならず自己の状態をも取り扱う」というように広がってきている。また、21世紀の新しい情報処理技術を考えるには、拡大された枠の中で議論したほうがよいと考えられる。そこで、研究分野のおおまかな分類例を以下に示す。



(b)(d)の中には、歩行・投球・鳥の羽ばたき・天変地異など時間的・空間的パターン（出来事）が含まれている。従来のロボットの眼の研究のほとんどは (a)であり、その中

でも積木や工学部品といった限られた狭い空間中の人工対象物を取り扱うのが大半であった。すなわち、自然な対象物・多種類の対象物・広域の空間を取り扱うことがあまりなかった。

狭い空間中の立体図形の認識における一つの大きな課題は、オクルージョン問題の解決である。この問題の解決のため、最近になって、観察者（カメラ）が動き回るという能動的情報処理が注目されるようになったが、それでも数カ所の離散的場所からの外界の解析が中心である。

我々の住んでいる世界は、時間的・空間的な変化に富んだ世界である。我々動物は時々刻々と変化する状況をいち早くとらえ、その後に起こることを予測し、素早く行動しないと生きていけない。すなわち、広域空間内での位置づけ・自己の動的状態・外界の動的状態の抽出は、極めて重要な機能である。従って、今後は、観察者の移動に伴う連続的処理・外界の変化の認識など時空間的情報処理技術の研究に世界に先駆けて大々的に取り組むべきであると考えられる。

【参考文献】

- [1] 白井：コンピュータビジョン、昭晃堂(1980)
- [2] Ballard, D.H. et al.: Computer Vision, Prentice Hall, Press(1980)

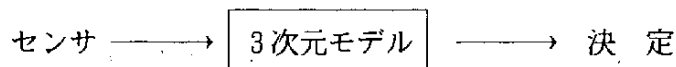
5.2.3 情報のデータ構造と処理

(1) 3次元情報の役割

近年、3次元情報を介在する処理の必要性が急速に高まっている。例えば、ロボットの自律制御のためには、ロボットの作業空間に関する知識が必要となるので、まず何らかの“センサ”（画像解析[9]、ステレオ、距離センサ等）によってデータを取り込み、それを基にして“環境モデル”[1]を構築し、ロボットはそのモデルに基づいて動作を決定する。また、医療においては、CTスキャンなどによって、体内の3次元的状态のデータを取り込み、それを基にした“3次元モデル”を構成し、それに基づいて診断を下す。CADにおいても、まず“3次元形状モデル”を構成する。そのためのデータは既存の物体に対する計測（例えばモアレ縞）によって取り込むこともあるし、数学的表現（例えば他項式曲面の組み合わせ）で直接に入力することもある。そのようにして構成されたモデルをグラフィックディスプレイ装置に表示することによって、設計者は何ら

かの決定を下す。その他、いろいろの工学の分野で、計測装置によってデータを取り込み、“3次元モデル”を構成して、それに基づいて現象説明・装置設計を行うことが多い。

このような3次元情報が介在する処理に共通しているのは、まず（データが人間によって直接に入力されることを含めて）“センサ”がデータを取り込み、それを基にして“3次元モデル”が構築され、それに基づいて決定が下されることである（図表5.2-5）。



図表5.2-5 3次元モデルの役割

(2) 3次元モデルの変換

このような処理においては、構成される“3次元モデル”（＝3次元情報の表現法）は用いるセンサと密接に関連している。例えば、距離センサであれば、構成されるモデルは、観測点から相対的に各方向ごとの物体面（センサから放たれるレーザ・超音波などのビームの反射面）までの距離を割りつける写像として表現される（その測定の“確度”等のより多くの情報を割りつけることも可能である）。一方、CTスキャンでは、空間の各点にその点での物体の密度を割りつける写像としても表現される。また、“フォトメトリックステレオ”のような光反射特性を利用したセンサを用いれば、各方向に、その方向にある物体面の法線方向を割りつける写像が得られる。

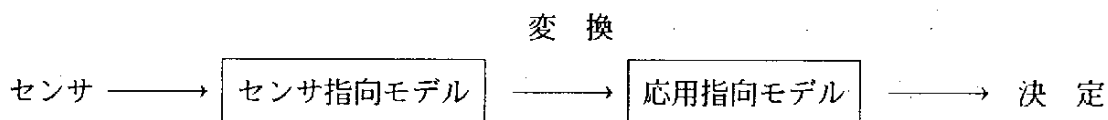
このように、センサの種類ごとに、そのセンサにとって最も容易で最も自然なモデルの構成法が存在する。そのような3次元モデルを「センサ指向モデル」と呼ぼう。

しかし、これは必ずしも目的とする処理に都合のよいものではない。例えば、距離センサがロボットの作業を目的としているなら、空間の各点に物体面があるかないかの1ビットを割りつける写像として表現されているほうが都合がよい。従って、観測点の絶対位置を知って、絶対的なモデルに変換しなければならない。CTスキャンによる診断でも、必要なのは各点の組織の密度ではなく、何らかの組織（例えば胃壁、血管、骨格など）の形状であることも多い。その場合には密度データを密度ごとにセグメンテーションして曲面モデルに変換する等の処理が必要である。また、光反射特性を利用したセンサを用いる場合でも、欲しいのは物体面の形状であれば、法線方向データに曲面当てはめを行うなどして、曲面モデルに変換する必要がある。CADにおいても、目的によって

“ワイヤフレームモデル”（局所の変更が容易）、“サーフェスモデル”（表示が容易）、“ソリッドモデル”（空間占有関係が分かりやすい）のように別々の3次元モデルを使い分けるのが便利である。

すなわち、それぞれの応用において必要となる3次元モデルは応用ごとに異なる。そのようなモデルを「応用指向モデル」と呼ぼう。これは一般にはセンサ指向モデルと異なっているから、“計算”によって応用指向モデルに変換する処理が必要となる（図表5.2-6）。

この変換は困難な計算であることが多い。それは、測定の誤差やデータの欠落によって、センサ指向モデルが一般に不正確かつ不完全であるためである。これをそのまま用いると、計算が不可能になったり、結果に矛盾が生じたりする（例えば、異なる物体部分が空間の同一点を占めたり、一点であるべきところが2点に分離したりするかもしれない）[5], [8]。そのため、さまざまな仮説や知識に基づく拘束条件を付加して不合理な解を排除したり、何らかの基準による最適化（レギュラリゼーション）を行うなどの、いろいろの計算技法が必要となる[3], [4], [6], [7], [10]。



図表5.2-6 3次元モデルの変換

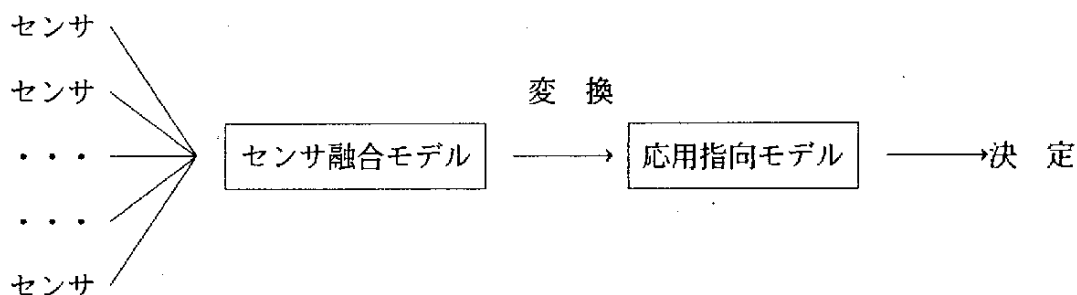
(3) センサ融合

個々のセンサの不正確さと不完全さを補完するために複数のセンサを用いるというのは自然な考え方である。このとき、それぞれのセンサごとに別々の3次元モデルを作るのではなく、複数のセンサからのデータを融合した“共通の3次元モデル”が得られることが望ましい（図表5.2-7）。これは「センサ融合（フュージョン）」とも呼ばれている[2]。しかし、これを実現するのは必ずしも容易ではない。

距離データを計測する距離センサとステレオのように、同じ種類のデータから得られる場合は、同じ3次元モデルが利用できるから問題はない。各点に濃度を割りつけるセンサと各点に温度を割りつけるセンサのように、モデルの構造が同一でデータの意味が互いに独立な場合は、単にそれぞれのモデルの“和”をとればよい。また、一方のセンサで得られるデータが他方のセンサで得られるデータを含む場合は、構成されるモデル

間に“包含関係”があるから、より一般的なほうに統一できる。しかし、それぞれのセンサごとに構成される3次元モデルが構造も異なっていて包含関係もないなら、直接的な融合は困難である。

従来の研究はどちらかというとセンサ側からみたセンサ間の相互関係に重点を置いている。すなわち、複数のセンサの役割をどのように割り振るか、それぞれのセンサが（専用ハードウェアにより）どのようにして融合に都合のよい形のデータを生成するか、それによってどういう3次元モデル（データ構造）を構成するか、逆にそのようなモデルを得るためにはどのようなセンサを組み合わせればよいか、などが中心的課題である[1], [2]。



図表5.2-7 センサ融合

(4) 汎用モデル統合

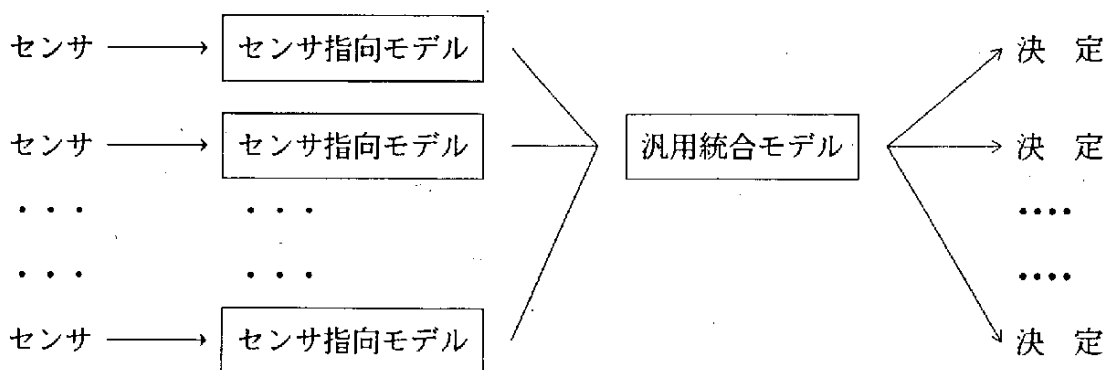
複数のセンサ利用に対するもう一つの考え方は、センサ融合とは対照的に、それぞれのセンサが他のセンサの存在を意識せず、独立にセンサ指向モデルを作り、その後にそれらのモデルを“計算”（ソフトウェア）によって統合し、より一般的なモデルに集約するというものである。従来はこれもセンサ融合に含めて議論されることが多いようであるが[1]、区別して考えるべきであろう。そこで、これをセンサ融合と区別して「モデル統合（インテグレーション）」と呼ぼう。

このとき問題となるのは、どのような一般的モデルに統合すべきかということである。代表的な考え方は、とにかくあらゆる情報をあらゆる形で保持しようとするものである。これは、そのような一般的なモデルがあれば、どういう応用目的にも利用できる“汎用データベース”の役割を果たすという期待によるものである。個々の応用に当たっては、それぞれで必要とする部分だけを参照すればよい（図表5.2-8）。例えば、移動ロボットであれば、空間占有情報のみ参照すればよく、色とか表面テクスチャとか物体のカテゴリ

りとかは不要である。そして、異なる応用に対しても、改めて計測し直す必要はない（ロボットが移動しながら物体の分類・識別を行うのであれば、モデルを単により詳しく参照すればよい）。

しかし、このように汎用性を追求すれば、モデルはますます複雑になり、どのようなデータ構造にするかを決めるのが難しくなる。ある応用では全体の様子がおおざっぱに（低精度で）分ければよいであろう。別の応用では特定の部分の局所的様子を詳しく（高精度で）知る必要があるかも知れない。このような要求にも対処できるように、おおざっぱな記述から詳細な記述までを“階層構造”に編成することも考えられる[1]（画像処理では「多重分解能記述」とか「スケール空間記述」などと呼ばれる）。

一方、個々のセンサ指向モデルの不正確さと不完全さをどのように統合するかも大きな問題である。先にも指摘したように、矛盾が生じないように整合性を保つには、何らかの仮説や知識（例えば、物体面では平面であるとか、滑らかであるとか、物体形状は多面体であるとか、球、円柱、円錐、直方体などのプリミティブからできているなど）に基づいて、不足のデータを補完・生成したり、測定データを修正したり、不合理なデータを排除したりする必要がある[9]。しかし、どのような仮説や知識が採用できるかは応用目的による。例えば、ある物体面を平面とみなしてよいのか、滑らかな曲面とみなすべきか、あるいは細かい凹凸が重要なのかは、そのモデルから何を決定するかということに依存するので、一概には決められない。



図表5.2-8 汎用モデル統合

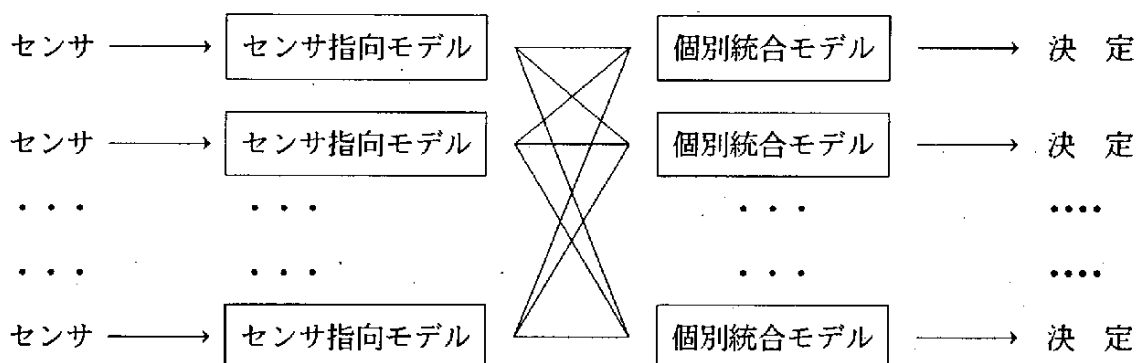
(5) 個別モデル統合

先に述べたように、測定データそのものでなく「3次元モデル」が必要なのは、それに基づいて何らかの決定を下すためである。また、センサに都合のよいモデル（「セン

サ指向モデル」)は必ずしも決定を下すのに都合のよいモデル(「応用指向モデル」)とは限らず、従って、「計算」による変換が必要であることを指摘した。そこでは単一のセンサを想定していたが、これをそのまま複数のセンサの場合に拡張すれば、個々のセンサに基づいたモデルを個別に作り、それらを(汎用モデルに統合するのではなく)特定の応用ごとに、その応用に最も都合のよいモデルに“そのつど”統合することが考えられる。すなわち、応用の要求があるまではモデル統合は行わず、それぞれのセンサ指向モデルのままで保持しておく(図表5.2-9)。これを「個別モデル統合」と呼ぼう。

こうすれば、それぞれの応用に最も適した3次元的モデルは明確であり、そのためにどのセンサ指向モデルのどの情報を取り入れればよいかが容易に決定できる。さらに、整合性を保つにはどのような仮説、知識、近似を採用してよいかの判断も容易である。もちろん、異なる応用に対して、必要となる計測が(既に一度なされているなら)改めて繰り返されることもない。

この方式の問題点の1つは計算の効率である。データが出揃った時点で統合されるのではなく、必要が生じた時点で統合を行うので、リアルタイム処理などには向かないかもしれない。また、類似の要求が同時に発生したときには、類似の統合モデルが同時に別々に構築されてしまう。また、想定する応用ごとに(参照の仕方ではなく)統合の仕方をあらかじめ指定していなければならない。従って、それまでに想定していなかった新しい要求が生じると、改めて統合の仕方を指定しなければならない。これは、汎用モデルの新しい参照の仕方を指定することに比べると、はるかに手間がかかることである。



図表5.2-9 個別モデル統合

(6) 今後の課題

以上、3次元情報を表現する「3次元モデル」の必要性和役割、「センサ」との関連からみたデータ構造と処理、及び「応用」との関連からみたデータ構造と処理の関係を整理し、「センサ融合」と「モデル統合」の2つの考え方を区別した。後者はさらに「汎用モデル統合」と「個別モデル統合」とに分けて論じた。それぞれ一長一短があり、それぞれ異なる難しさを抱えている。

基本的な問題は、まず3次元情報をどのような“データ構造”で表現するかである。これには、先に指摘したように、センサとの関連と応用との関連の両方が絡んでくる。その結果、単一のモデルでは対応できず、モデルの“計算”による変換処理が次の問題である。とくに、モデルの不正確さと不完全さをどう克服するか、整合性を保ち、矛盾を防ぐにはどうすればよいか、そのためにはどのような仮説、近似、最適化を施せばよいか、計算の効率を上げるにはどうすればよいか、などが課題である。

このような方向の研究は、単に実用上の成果が得られるだけでなく、理論的發展も期待される。新しい計算手法やその数理的裏付けが開発され、他の分野にも波及することを考えれば、学問的にも大変意義のあることである。

【参考文献】

- [1] 浅田稔：「センサ統合と環境モデルの構築」、情報処理学会技術報告 90-CV-64 (1990)
- [2] 石川正俊：「センサフュージョンシステム、一感覚情報の統合のメカニズム」、日本ロボット学会誌、Vol. 6, No. 3, 251-255 (1988)
- [3] K. Kanatani : “Reconstruction of consistent shape from inconsisitent data : Optimization of 2 1/2D sketches, “International Journal of Computer Vision, Vol. 3, No. 4, 261-292 (1989)
- [4] 前原一夫・川島孝夫・金谷健一：「直交性仮説による多面体の3次元形状復元」、電子情報通信学会論文誌D-II, Vol. J72-D-II, No. 6, 887-895 (1989)
- [5] 大沢晃：「計算誤差による暴走の心配のない図形演算アルゴリズム：スペースモデルによる実現」、情報処理学会論文誌、Vol. 31, No. 1, 42-55.4 (1990)
- [6] 杉原厚吉：「線画の代数的構造を利用した単眼画像からの立体復元法」、電子通信学会論文誌 D, Vol. J66-D, No. 5, 541-548 (1983)

- [7] K. Sugihara : Machine Interpretation of Line Drawings, MIT Press, Cambridge, MA, (1986)
- [8] 杉原厚吉・伊理正夫 : 「計算誤差による暴走の心配のないソリッドモデルの提案」、情報処理学会論文誌、Vol. 29, No. 9, 962-974 (1987)
- [9] 杉原厚吉・金谷健一 : 「数理的手法による 3 次元情報抽出」、人工知能学会誌、Vol. 4, No. 1, 13-20 (1989)
- [10] 田中俊江・川島孝夫・金谷健一 : 「平行性仮説による多面体の 3 次元形状復元」、電子情報通信学会論文誌D-II, Vol. J72-D-II, No. 4, 517-525 (1989)

5.2.4 3次元画像処理の技術課題と応用例

(1) はじめに

近年の著しい計算機の発達、従来、極めて困難であった 3 次元物体に関する各種の処理を可能とした。本項では、3 次元画像処理における大量の情報処理と計算機能力アップの関係、および現実にニーズのある応用例とその可能性について述べる。

3 次元画像処理の実用化に関連する技術は、3 次元をキーワードとすると、図表 5.2-10 に示されるように 6 項目に大別される。これらの技術項目の内、必要性の時間的要因から、①～④は第 1 ステップ、⑤⑥は第 2 ステップとすることができる。新情報処理と言う観点からは、⑤認識・学習および⑥知識処理だけでなく、②高速並列処理もその研究・開発課題となり、その重要性はきわめて大きい。次節では医療応用の例として、冠状動脈の 3 次元再構成を取りあげ、拘束条件導入による画像再構成問題の正則化と、その解法として有効であるシミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing) を概説する。

図表5.2-10 3次元画像処理の技術項目

技 術 項 目	状 況
① データ収集	目的依存（システムの用途に適した収集法の確立）
② 処理	高速並列処理、問題の正則化（速度アップが必要）
③ 蓄積(データベース)	大容量記録媒体の活用（光ディスクでかなり解決）
④ 表示	今後の課題（4次元表示方法の開発が必要）
⑤ 認識・学習	ニューラルネット方式 (有効な手段。ただし②の処理には工夫が必要)
⑥ 知識処理	エキスパート（①～⑤の問題が解決されて実現可能）

(2) シミュレーテッドアニーリングとは？

シミュレーテッドアニーリングはモンテカルロ法の一様であり、最適化問題に対する一つの解法としてKirkpatrickらにより1983年に提案された[1]。彼らは、この手法をVLSI内の配置問題や巡回セールスマン問題に適応し、その可能性を示したが、アルゴリズム自体は組合せ問題に限らず広く一般的に応用できる能力を有しているため、画像処理の分野でも幾つかの報告がなされている。その代表的なものとしては、W. E. Smith による符号化開口像法を用いた画像再構成問題への応用[2]、M. Nieto-Vesperinasらによる位相回復問題への応用[3]、さらにS. T. Barnard によるステレオ画像におけるマッチング処理への応用[4] 等がある。

① 基本原理

シミュレーテッドアニーリングは、統計熱力学の類推を用いたモンテカルロ法的なアルゴリズムであり、与えられた問題に設定されたコスト関数の大域的な最小点を見つけるために用いられる。

(a) 多数の粒子からなる物理系との対比

与えられた最適化問題における変数 $\{x_i\}$ と最適化を評価する関数（通常コスト関数と呼ぶ）を、それぞれある物理系における粒子及び系のエネルギーに例える。今、このコスト関数 E が、 n 個の変数により与えられるとすると、

$$E = E(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

と書くことができる。画像再構成問題などにおいては、 (x_i) は各ピクセル値になり、この E の値を最小にするような $\{x_i\}$ の組を見つけ出すことで最適化問題を解く。実際の物理系においては、系の温度が T である時多数の粒子はそれぞれ自由エネルギーが最も低い状態で熱平衡となるが、その時、系が基底状態より ΔE だけ高いエネルギー状態になる確率は、ボルツマン分布

$$P(\Delta E) = \exp(-\Delta E/kT) \quad (2)$$

になることが知られている。このことは言い換えると、各粒子の状態が熱的に揺らいでいることになり、これが局所的な最小点にトラップされずに大局的な最小点への到達を可能にしている。従って、複雑な形をしたコスト関数を用いる最適化問題においては、系の温度を十分に注意深く制御し、準熱平衡状態の連続として冷却を行なう焼き鈍し(Annealing)が必要になる。系の温度を制御するannealing scheduleは、大局的な最小点へ到達するためにきわめて重要であるが、その可能性とスケジューリングの方法については、D.Mitra ら[6] やH.Szu ら[7] により議論されている。

(b) アルゴリズムの説明

はじめに求める解 $\{x_i\}$ に、一様な値や解に対する先験的な情報から得られた値等の適当な初期推定を与える。そして、各パラメータに対し順番に微小な変化を加える。例えば、今 i 番目のパラメータをある微小量 Δx (この量はグレインと呼ばれ、その符号はランダムに選ばれる)だけ変化させるとし、その時のコスト関数の変化量 ΔE を計算する。もしも $\Delta E < 0$ であれば、この微小変化はより最適解に近いものとして受け入れる。逆に $\Delta E > 0$ の時は、系のエネルギーを増加させてしまうのであるが、これをローカルミニマムから抜け出すために必要なゆらぎと考えて、ボルツマンの確率に従って受け入れることにする。このような微小変化をすべてのパラメータに対し繰り返し行うことで、計算機内に疑似的な熱平衡状態を作り上げる。次に系の温度を少し下げると、エネルギーを上昇させるようなグレインを受け入れる確率も下がるために、系は非平衡状態となって新たな熱平衡状態へと変化して行く。以上のことを、系のエネルギーが十分小さくなるまで実行することで、与えられた問題の最適解を得る。

(3) 拘束条件付き画像再構成問題への応用[8]

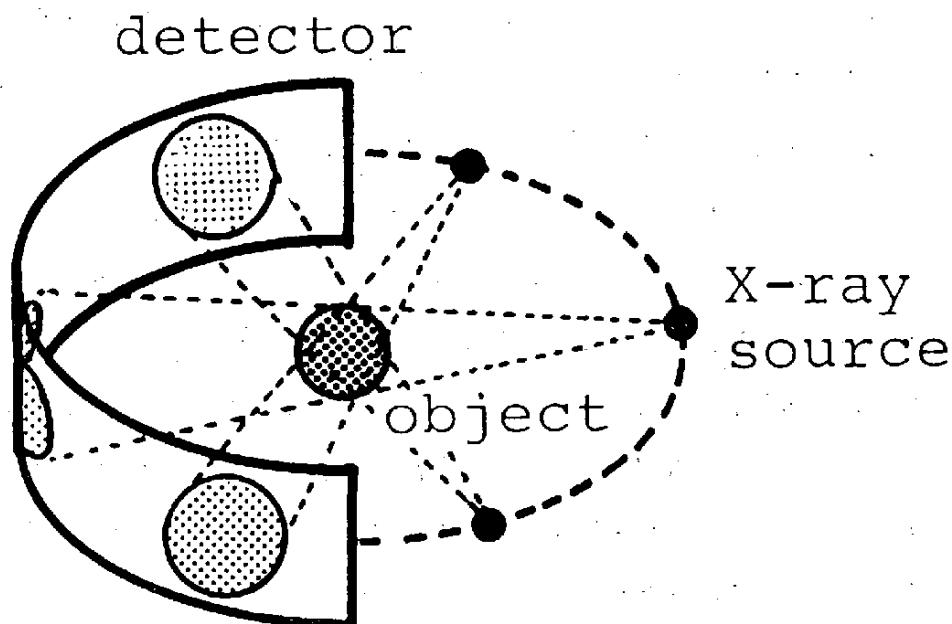
ここでは、シミュレーテッドアニーリングが最も有効に働く例として、拘束条件付き画像再構成問題の一つである血管画像の再構成への応用について述べる。

① 再構成システムと拘束条件

ここで想定している再構成システムでは、静脈造影による心臓血管などの動きの激しい物体の3次元イメージングを目的としている。通常のX線CTなどでは、多方向の投影データが必要となるが、この場合には図表5.2-11に示されるように、複数のX線管球による同時曝射が必要になるため、得られる投影方向数はきわめて少ないものになる。従って、この再構成問題は強度のill-conditionであり、良好な再構成画像を得るには強力な拘束条件の導入が不可欠である。

再構成の対象が血管であるということから、次のような拘束条件の導入が考えられる。

- (a) 再構成画像の取り得る値が、血管部分と背景部分に対応して、ほぼ2つの領域に分かれる。
- (b) 血管は空間的に連続しており、孤立点は存在しない。拘束条件の(a)は、造影剤の投与前後の画像間のサブトラクションを用いることで、その導入を可能にする。



図表5.2-11 撮像システムの概念図

② 再構成手法と拘束条件を導入したコスト関数

まずはじめに、上記拘束条件を含まない基本的なコスト関数について述べる。物体

を1次元に並べなおしたものを、ディテクタにより得られた強度を、入射X線強度で規格化して負の対数を取ることににより得られる投影データを g とすると、この再構成問題は一種の線形逆問題となるため、

$$g = Hf + n \quad (3)$$

の問題を得る。ここで H は投影の条件を与えるマトリクス、 n はノイズである。求める物体の推定値 f は、一般的に用いられるコスト関数

$$E_s = \| g - Hf \|^2 \quad (4)$$

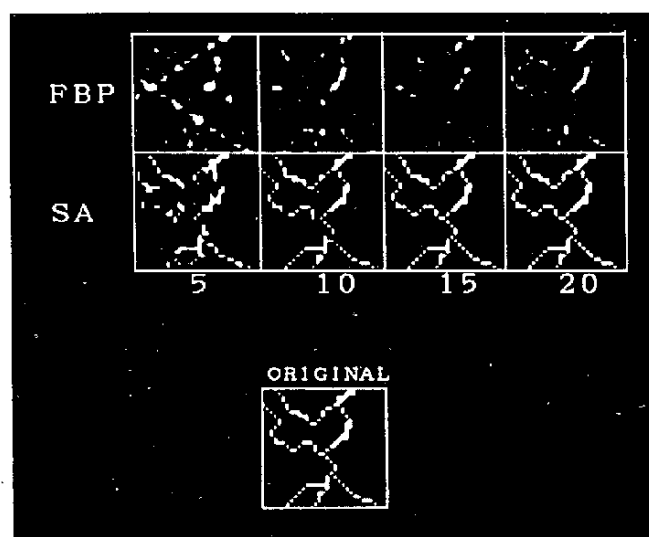
を最小とするように決められる。ところが、前節で述べたような ill-condition の問題では、 $E_s = 0$ とするような f は無限に存在してしまうため、正しく物体を再構成することはできない。そこで、前記の拘束条件を定式化し、コスト関数に加える。実際に用いたコスト関数は、

$$E = E_s + W_h E_h + W_c E_c \quad (5)$$

であり、 E_h 、 E_c はそれぞれ前記の拘束条件(a)、(b)を定式化したもの、 W_h 、 W_c はその重み係数である。 E_h は各ピクセルが取り得る値の領域の境界にポテンシャルの壁を作るものであり、 E_c は微小変化を加えるある一点の近傍に、血管部のレベルを有するピクセルがある時には負の値を、そうでなければ正の値を与えるものである。

③ シミュレーション結果

上記の有効性を確認するために、計算機シミュレーションを行った。想定した投影は、平行ルビームであり、物体は図表5.2-12の右下に示される2次元の血管像であり32×32の画素を有している。コスト関数は(5)式を用い、シミュレーテッドアニーリングにより得られた再構成像を図表5.2-12の下段に示す。ここで付記されている数字は、投影方向数を示している。図表5.2-12の上段は、解析的な逆変換手法である Filtered Back Projection(FBP) により得られた再構成像である。両者の比較から拘束条件付きの本手法の有効性が十分に確認される。



図表5.2-12 filtered back projection(FBP)法とsimulated annealing(SA) による再構成像の比較。付記されている数字は、それぞれの
場合の投影方向数を示している。SAの15、20方向は、オリジナル画像
と同一である。

(4) シミュレーテッドアニーリングのまとめと今後の課題

シミュレーテッドアニーリング法の利点としては、

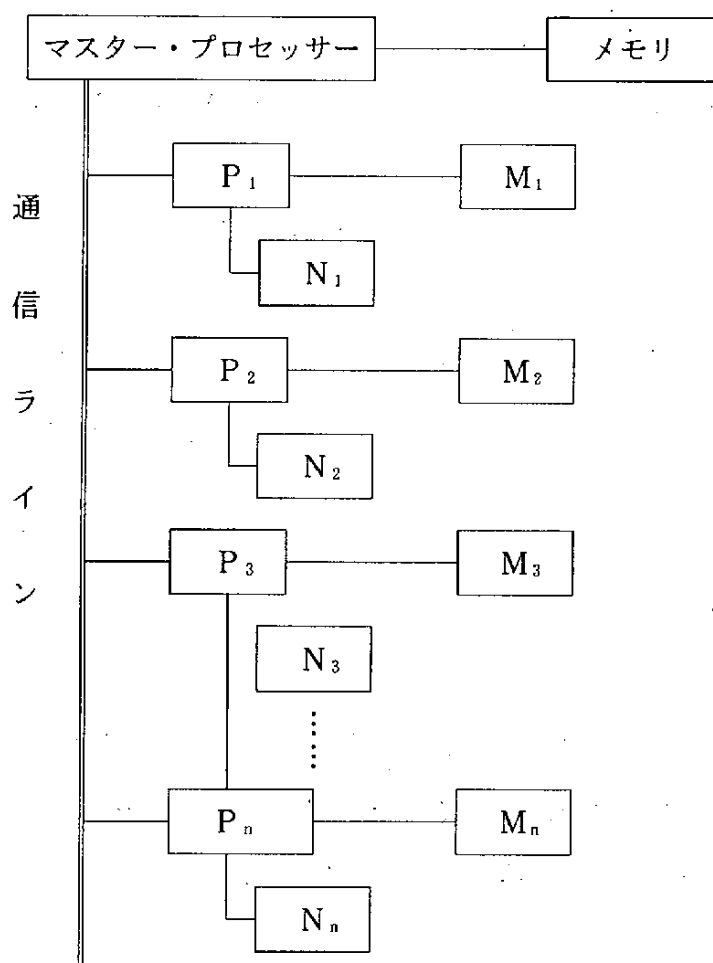
- ① コスト関数の局所最小点にトラップされず、大局的な最小点まで到達することができる。
- ② コスト関数の形をかなり自由に設定できるため、拘束条件の導入を容易にする。
- ③ 並列処理の可能性を有している。

等があげられる。

これらの利点に着目して行われた心臓血管再生の応用例は、多くの新しい知見を与えている。すなわち、一般的な問題に対しても、先見情報を考慮した拘束条件の導入は、ill-condition の問題を正則化するだけでなく、知識を信頼性の高いデータとして取り扱うことで、センサーフュージョンと同じように、ノイズ等の外乱に対しても安定な処理を実現する。しかし、このような条件の導入は、コスト関数にローカルミニマムを発生させるため、最終的な解が、目的とする大局的最小点に到達できるアルゴリズムが不可欠となり、その一つとして、シミュレーテッドアニーリングは有望であると結論できる。

本手法が現在持つ最大の欠点は、解を得るのに長時間を要することである。これは、上記③に示される並列処理を実行していないためで、計算時間短縮のためには、並列処

理が可能なハードウェアとそのソフトウェアを開発する必要がある。特に、図表5.2-13に示されるように、本手法を実行するためのハードウェアは、従来のシリアルコンピュータとニューラルコンピュータの両方を用いることが望まれるため、創造力と想像力を持つ知的コンピュータへと発展する可能性を有している。



図表5.2-13 シミュレーテッドアニーリング実行のためのハードウェア

各記号は、P：プロセッサ、M：メモリ、N：ニューラルプロセッサを示している。このシステムでは、 n 個の並列プロセッサが1つのマスタープロセッサにより管理される。各々の子プロセッサは、演算の高速化のためにニューラル方式のプロセッサを用いている。

【参考文献】

- [1] S.Kirkpatrick, C.D.Gelatt, Jr., and M.P.Vecchi :
"Optimization by Simulated Annealing" Science 220, 671-680 (1983)
- [2] W.E.Smith, H.H.Barrett, and R.G.Paxman : "Reconstruction of objects from
coded images by simulated annealing" Opt. Lett., Vol.8, 199-201 (1983)

- [3] M.Nietro-Vesperinas and R.Navarro : "Performance of simulated annealing algorithm for phase retrieval" J.O.S.A. (A), Vol.5, 30-38 (1988)
- [4] S.T.Barnard : "Stochastic approach to stereo vision" Readings in COMPUTER VISION, Morgan Kauffmann Publishers, Inc., (1987)
- [5] 深尾毅 : " アニーリング法 — 一つの最適化手法 " 電子情報通信学会誌 Vol.70, No.12, 1247-1250(1987)
- [6] D.Mitra, F.Romeo, and A.S.Vincentelli : "Convergence and finite-time behavior of simulated annealing" Adv. Appl. Prob. Vol.18, 747-771 (1986)
- [7] H.Szu and R.Hartley: "Fast Simulated Annealing" Phys. Lett. A Vol.122, 157-162 (1987)
- [8] H.Haneishi, T.Masuda, N.Ohyama and T.Honda : "Three Dimensional Blood vessel reconstruction by simulated annealing" Optics Letters, Vol.14, No.20, 1095-1097 (1989)

5.2.5 機械設計支援用CADシステム

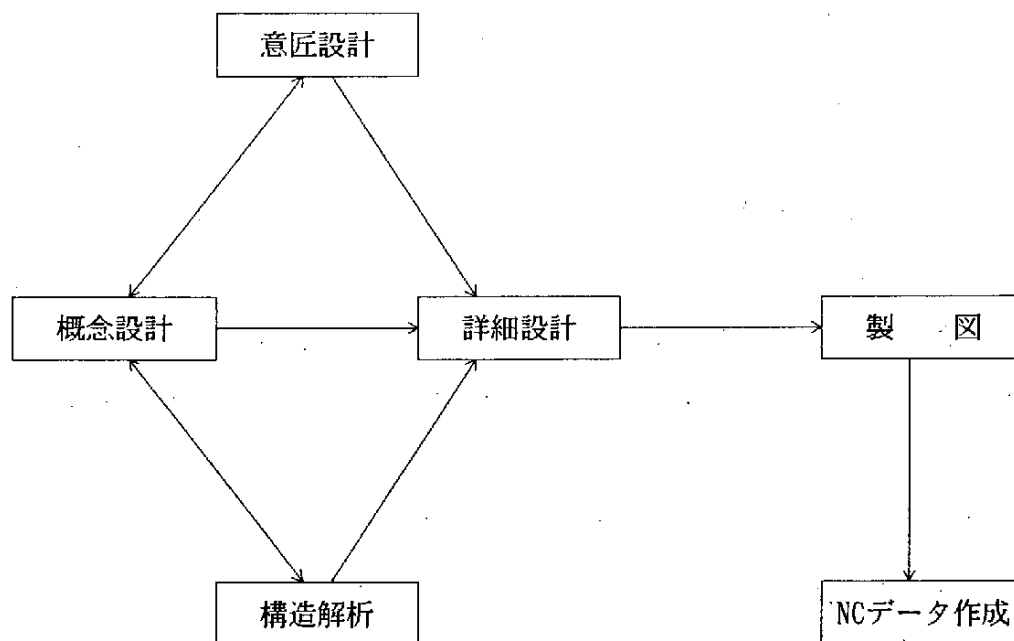
(1) はじめに

設計の種々の場面で、コンピュータの利用が進んでいる。機械や建築の設計においては、その対象が3次元構造を持つため、その設計支援には3次元情報の取り扱いが必須である。本項では、一例として、機械設計を取り上げ、3次元情報の処理の現状と課題を概観する。

(2) 機械設計の主要工程

機械設計は、要求仕様を満足する機械を具体化するため、設計修正—設計評価を繰り返して、最適設計へ近づける過程であり、図5.2-14に示すように、概念設計・意匠評価・構造解析の相互作業を経て、詳細設計・製図・NCデータ作成により設計を完了する。

これらの設計作業の支援をコンピュータで行うには、製品モデルをコンピュータの中に作る必要があり、このモデルを用いて形状表示・動作シミュレーション等を行う。



図表5.2-14 設計の流れ

(3) 3次元モデル化

3次元物体をコンピュータの中に構築するには、その特徴を何らかの形でデータ表現することが必要で、次の3種類の表現法が考えられている。

① ワイヤフレームモデル：

形状の頂点の座標とそれらの点を接続した稜線の情報を定義したもので、3次元物体の概略形状や、部品等の相互接続関係を知るには十分である。

② サーフェスモデル：

形状を面の集合で定義したもので、3次元物体の表示には十分である。しかし、表面形状情報のみのため、形状を切断した場合には再定義が必要であり、容積・重心等の物理量の計算もできない。

③ ソリッドモデル：

実物に最も近いモデルで、サーフェスモデルに体積の情報を加えたモデルである。物体形状の演算、容積・重心の計算、断面の形状表示等が可能である。

機械設計では、内部構造をも考慮する必要があり、ソリッドモデルが最も適しているが、データ量が他に比べて多く、計算量も多いため、処理に応じてモデルを選択する必要がある。設計の各フェーズで別々のデータを利用することは、設計バグにつながるため、設計データベースは一つにしておくべきであり、モデル間の相互変換ツールにより

対処している。

(4) 意匠評価

意匠設計においては、設計者のイメージをリアルに表示し、視点を変えた表示や修正後の表示を高速に行えるツールが必要であり、これには、CG（コンピュータグラフィックス）が利用される。表示装置の多くは2次元ディスプレイであるため、透視投影や色調・陰影の付加により立体感をつけて表示している。設計者は、形状・サイズ・カラー等を修正した結果をディスプレイを通して評価しながら、設計作業を進める。

(5) 構造解析

構造解析は、機械を試作・製造する前に、その機能・性能等を評価するために行う。機械の機能・性能を左右する諸パラメータには、重量、体積、重心、慣性モーメント、強度、固有振動数、振動、騒音、乗り心地、空力特性、熱特性等、広範にあり、物理学や力学法則に基づいた数理解析により求められる。このように力学現象を計算機の力を借りて解明する手法は計算力学といわれ、従来、差分法（FDM:Finite Difference Method）や有限要素法（FEM:Finite Element Method）が用いられている。

差分法や有限要素法は、領域全体を多数の差分格子又は有限要素に分割し、差分格子点又は要素節点での変数値に関する連立1次代数方程式で近似して解を求めるもので、工学のあらゆる分野で利用されている。これらの方式では、領域全体を分割して近似解を求めるため、データ量・計算量が多く、それらが3次元問題の解析では制約となる場合も多い。最近、データ量・計算量の削減可能な第3の方式として境界要素法（BEM:Boundary Element Method）が提案され、その有用性が確かめられ始めている。

境界要素法は、支配微分方程式を等価な境界積分方程式に変換したのち、有限要素法と同じく離散化を行って数値解を求める手法である。線形問題では、境界表面のみを要素分割するだけでよく、次元数を1次元落して取り扱えるため、データ量・計算量を大幅に減少できる。

数値解析によって出力されるデータ量は膨大であり、数値情報から結果を判断するのは困難である。しかも、従来のように、実物で試験したときに観察されるのと同様な形で計算結果を観察したいという要望も強い。そのため、結果の可視化は、必須となり、ここでもCGが活躍している。

(6) 今後の課題

これまでみてきたように、機械のモデルの構築、立体表示、構造チェックをすべて計

算機上で行うことが可能になっている。しかし、3次元モデル入力の手数削減、多大な計算量に伴うターンアラウンドタイムの短縮、金属疲労のような非線形現象への計算力学の限界の克服等、解決すべき問題も多い。

また、CADの普及に伴い、設計データの企業間流通も新たな課題となっており、標準化への取り組みを急ぐ必要がある。

【参考文献】

- [1] 中前栄八郎：3次元コンピュータグラフィックス技法、情報処理、pp.1082-1089 (1988.10)
- [2] 伊藤公俊：CADシステムにおける統合データベースと属性モデル、応用機械工学、pp.62-67 (1989.9)
- [3] 平野徹：機械のCAEにおけるコンピュータグラフィックス、情報処理、pp.1190-1195 (1988.10)
- [4] 矢川元基、吉村忍：計算力学とCAE、機械設計別冊、pp.57-60 (1989.8)
- [5] 田中正隆：CAEにおける境界要素法、機械設計別冊、pp.61-66 (1989.8)

5.3 3次元情報の伝送

本節では、テラビット光伝送／フィールド交番伝送などの時系列伝送技術を対象とする「3次元情報の伝送」について述べる。

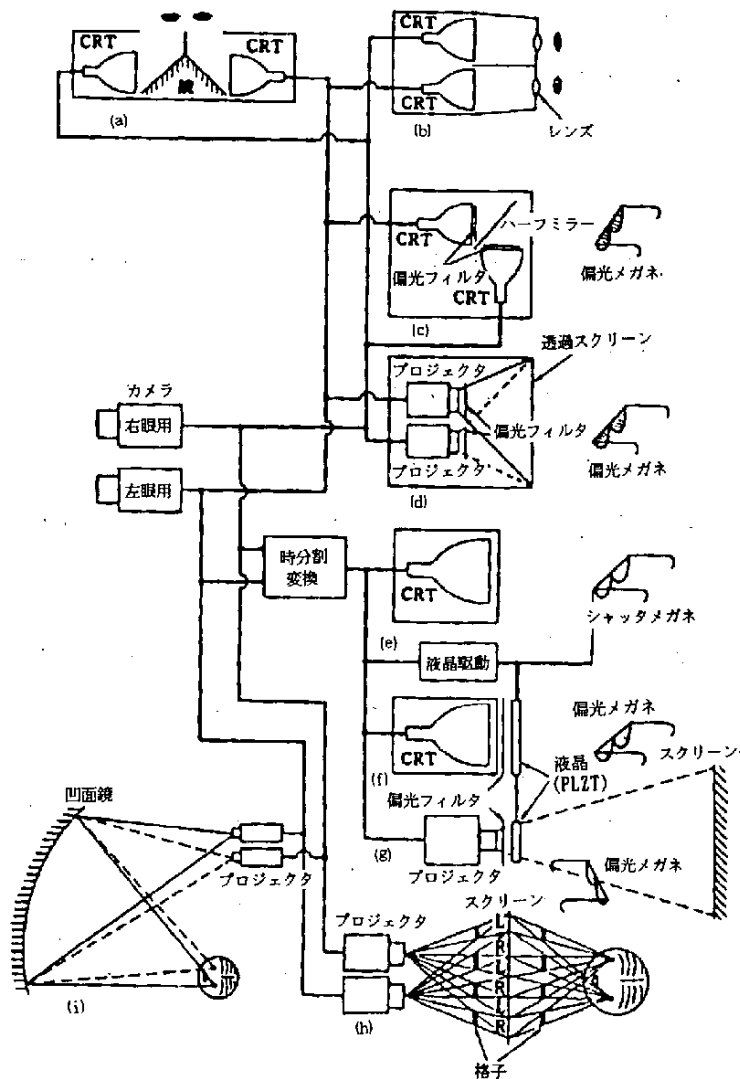
5.3.1 立体テレビ信号の伝送

立体テレビは、テレビの初期からの長い研究の歴史を持っているが、産業用あるいはアトラクション用などの一部を除き未だ広く実用になっているとはいえない。映像の撮影と表示に問題が残っているのが主因であるが、信号の伝送にも課題がある。

立体テレビは立体像の実現方法により、①2眼式立体映像方式、②多眼式立体映像（水平パララックス）方式、③完全3次元映像（空間映像）方式の3種類がある。

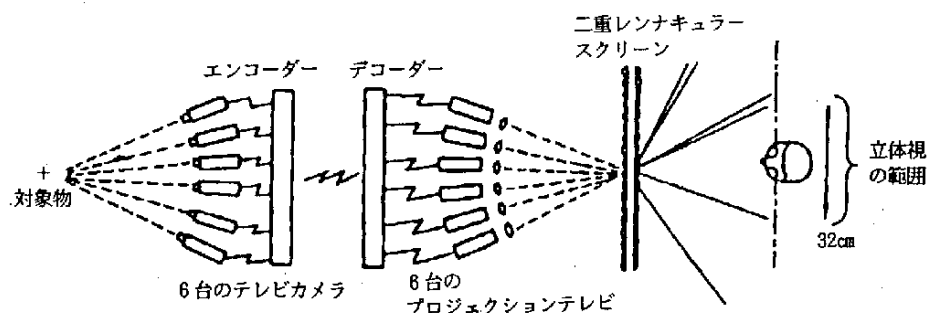
2眼式立体映像の方式は、図表5.3-1に示すように左右の両眼に対応する2つのカメラで撮った映像を偏光あるいは異なる色の眼鏡を用いて分離して見る方式と、シャッター付き眼鏡で左右交互に時間順次で見る方式などがある[1]。この方式の信号伝送は、2チャ

ンネルの映像を並列にあるいは時分割で送ればよいので既存の技術が適用でき、伝送技術上の問題はほとんど無い。



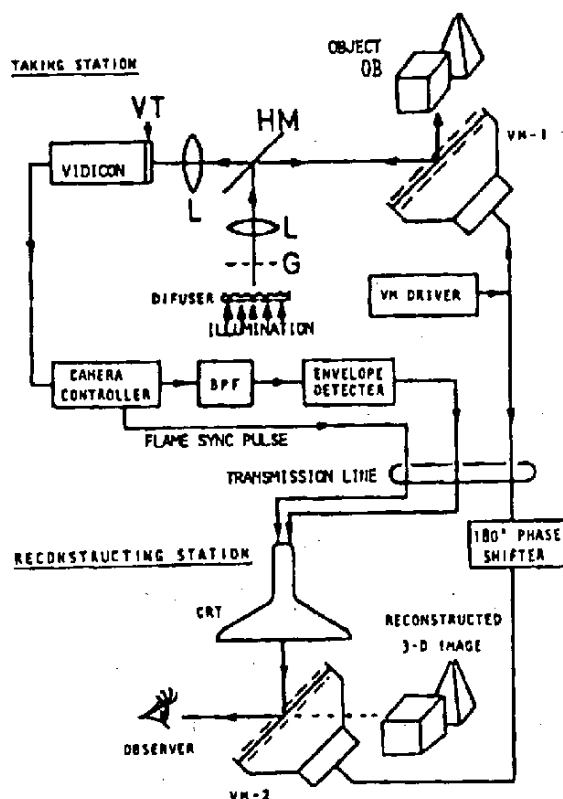
図表5.3-1 2眼式立体映像による立体テレビの各種方式[1]

多眼式立体映像の方式の構成例を図5.3-2 に示す[2]。多数の視点からの映像をレンティキュラーレンズを通して表示することで、立体視のできる範囲が広くできる。伝送すべき映像信号量が増えるが、伝送系の周波数帯域を上げたり、伝送路を複数設けることで既存の技術で対応できる。但し、現行テレビ方式との両立性が必要な場合には帯域圧縮など新しい信号処理技術の開発が必要となる。



図表5.3-2 多眼式立体映像による立体テレビの伝送[2]

完全3次元映像には、表示面を振動させて奥行き方向を表示する図表5.3-3のようなバリフォーカルミラー方式[3]と、ホログラフィの原理を用いた方式が提案されている。前者は種々試作されて実用例もある。後者の場合には、異なる視点から自由に立体映像を見ることができ理想的であるが、実時間での撮影や表示はもとより伝送すべき信号量が2眼式にくらべ数百倍～数千倍[4]とけた違いに多く、極めて実現が難しい。今後に残された大きな研究課題といえる。



図表5.3-3 バリフォーカルミラー方式の立体テレビの伝送[3]

5.3.2 3次元情報の高能率伝送、知的符号化

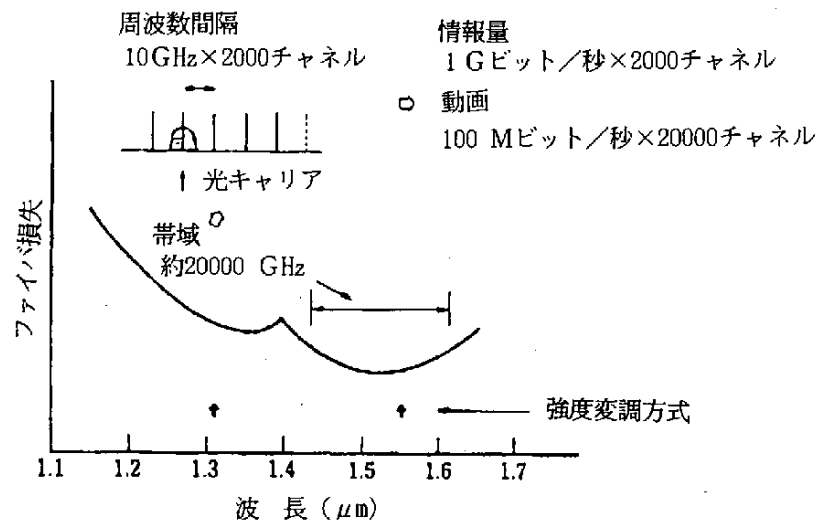
3次元情報の伝送では、情報量が多いので伝送周波数帯域の圧縮などの高能率伝送技術が必要である。2眼式立体映像方式の立体テレビでは、通常のテレビ信号の帯域圧縮と同様に動き補償フレーム間予測と直交変換符号化とを組合せ、さらに左右の画像間の相関性を利用した視差補償を採り入れた符号化法が考案され、10～20%の帯域圧縮ができるようになった。また多眼式立体映像の場合には、2眼式の技術を拡張する方法のほかに、より高品質の画像を得るための新しい符号化アルゴリズムも提案されている[5]。

一方、高能率伝送の究極としてAI技術と通信技術を融合した知的符号化、あるいはモデルベース伝送がある[6]。これは送信側で先験的知識をもとに対象を認識してその特徴や概念のみを送信し、受信側では送信側と共通の知識ベースをもとに情報を復元するものである。現在のところでは顔の画像を対象にして基礎的な研究が行われている段階で、3次元モデルを送受信側で共有し、モデルの特徴、動き等を符号化して送る方式などが検討されている。この実現には認識、理解、分析、合成など人間の情報処理機構の研究成果を取り入れる必要があり、新情報処理技術の分野で研究すべき課題が多い。

5.3.3 3次元情報の光伝送

離れた場所への3次元情報の伝送には符号化して送る必要があり、信号処理技術の開発がキーポイントになる。3次元情報の処理アルゴリズムとハードウェアへの光技術の適用も今後の研究課題である。

符号化後の伝送は他の情報伝送と変わりはない。しかし3次元情報の伝送には大容量伝送の可能な光ファイバ伝送が適している。近年、速度10Gb/s、無中継伝送距離100 kmを超える超高速光伝送技術が開発され、また最近では光の波動性を利用したコヒーレント光技術の進展で、伝送容量をさらに飛躍的に増加できるようになってきた。図表5.3-4のように、光ファイバの損失が最低になる1.5 μm 帯には約2万GHzの伝送可能な周波数領域がある。ここに光キャリア（搬送波）を10GHz間隔で配置すると2,000チャンネルの波長多重が可能になる。これは、一本の光ファイバで100Mb/sの動画像を2万チャンネル同時に送れることになる[7]。従来、ホログラムによる立体テレビの伝送にはけた違いの容量が必要なことからほとんど不可能とされていたが、伝送技術の面では新しい状況が生まれつつある。まだ高速な符号変換や実時間表示技術などに多くの困難が残されているが、将来が期待される分野である。



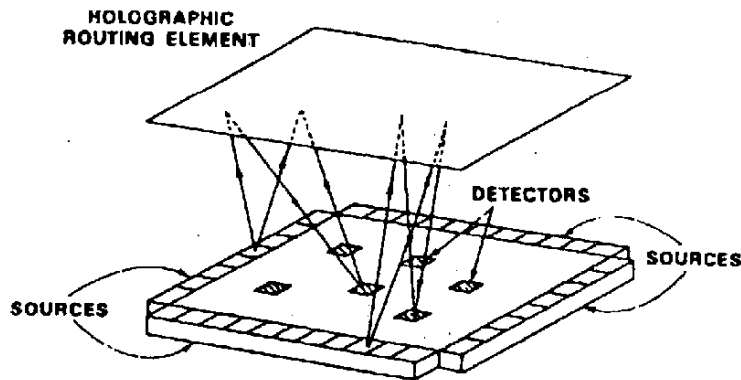
図表5.3-4 コヒーレント光伝送による光領域での周波数多重化[7]

一方、多数の細径ファイバを配列して束ねたイメージファイバは、数百m程度までのイメージ伝送路として、人間の眼の届かない人体内部の検査、エンジンや原子力機器の点検など、医療用、産業用に広く実用になっている[8]。立体視用にも応用でき、簡便な3次元映像の伝送技術といえるが、技術としては完成域にあるといえよう。

5.3.4 超並列伝送

光学系を用いて相互に干渉のない稠密な並行結合が構成できるので、この原理を利用して極めて多数の情報を同時に伝送できる超並列伝送が実現されと考えられている。

この一つの例が前述のホログラム伝送で[4]、立体テレビ等への応用が期待されているが将来の課題である。他の応用として、コンピュータの回路要素やLSI、プリント基板にある端子の間を空間あるいは光導波路を用いて並列に光で結線する光インターコネクションのアイデアが提案されている[9]。この例を図表5.3-5に示す。また、イメージファイバが数千～数万画素の細径ファイバよりなっていることを利用した超並列伝送の可能性もある。将来のコンピュータの高度化、複雑化とともに多数のプロセッサ要素間的高速な信号伝達がますます重要になるので、本技術の開発は大きな課題といえる(6.2節参照)。



図表5.3-5 コンピュータチップ内の光インターコネクション[9]

【参考文献】

- [1] 平田、鈴木：「3次元ディスプレイ —種々の方式とテレビジョンへの応用—」
テレビジョン学会誌、Vol.41, No.7, pp.610-618, (1987)
- [2] 木谷：「立体テレビジョン」、テレビジョン学会誌、Vol.36, No.12, pp.1051-1059 (1982)
- [3] J. Hamasaki et al. : "Real-time transmission of a 3-D image using volume scanning and spatial modulation," Appl. Opt., Vol.16, No.6, pp.1675-1685 (1977)
- [4] 大越：「三次元画像工学」 p.220, 産業図書 (1972)
- [5] 安田他：「3次元画像通信」、テレビジョン学会誌、Vol.43, No.8, pp.786-789 (1989)
- [6] 南：「画像符号化を展望する」、電子情報通信学会誌、Vol.71, No.7, pp.658-662, (1988)
- [7] 光技術動向調査報告書V、p.22, 光産業技術振興協会 (1989)
- [8] "特集・ファイバースコープの最近の動向"、オプトロニクス、Vol.4, No.2, pp.37-75 (1985)
- [9] J.W.Goodman et al. : "Optical Interconnections for VLSI Systems," Proc. IEEE, Vol.72, No.7, pp.850-866 (1984)

5. 4 3次元情報の表示・蓄積

本節では、「3次元情報の表示・蓄積」について述べる。

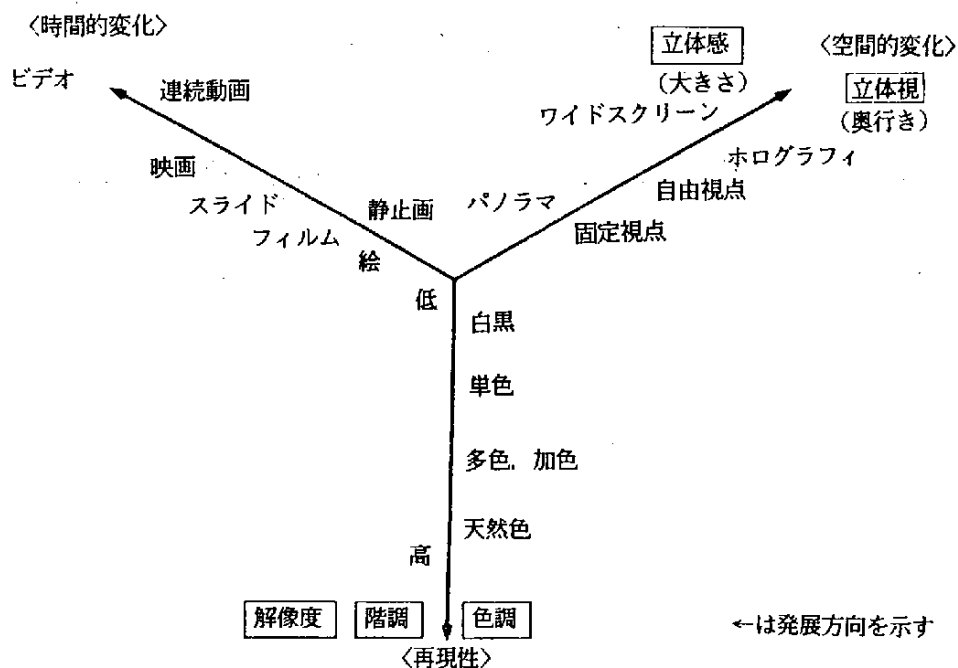
立体TVを代表とする立体映画／全周投影映像／コンピュータグラフィックス／実時間ホログラフィ／ヘッドマウントディスプレイなど3次元動画像表示や立体写真／ホログラム／レンチキュラレンズなどの3次元情報の蓄積技術、3次元情報記憶／イメージの多重記憶などの3次元情報記録がその対象である。

従来は、3次元技術というと、この分野を指すことが多かった。

5. 4. 1 3次元情報表示技術

(1) 3次元映像技術の歴史と分類

映像再現については、図表5.4-1にあるように歴史的に次の3つの方向へ展開されてきた。



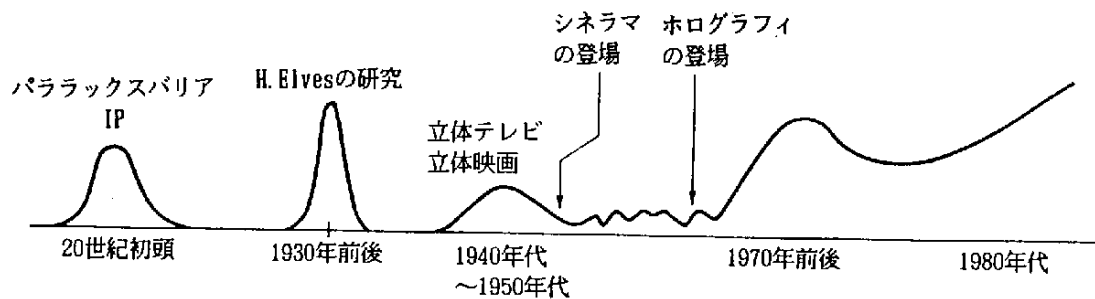
図表5.4-1 立体映像の発展方向

- ・白黒からカラーへ
- ・静止画から動画へ
- ・より広角化と立体化へ

3次元映像についての関心は、歴史的に古くからあったものと考えられ、またそれは押し寄せる波のように、急に来てはまた引いていくように、幾つかのブーム時期を迎えてきた。

図5.4-2 では20世紀初頭以後の3次元映像のブームの時期を図示したもので、ほぼ10年間隔でブームが発生していることが分かる。

日本においても、最近再び立体映像に関する動きが活発になってきており、ブームが到来した感じがする。



図表5.4-2 3次元映像のブームの流れ

図表5.4-3 では静止画および動画における各種3次元映像技術を分類してある。

図表5.4-3 3次元映像技術の分類

分 類	使用光	方 式
2 眼式 3 次元 映像	非コヒーレント光	・裸眼 ・鏡（1枚ないしは2枚使用） ・プリズム ・レンズ ・パララックスステレオグラム ・2眼式レンティキュラ ・2色眼鏡式 ・偏光板眼鏡式
多 眼 連 続 式 3 次元 映像	非コヒーレント光	・レンティキュラ ・投写式 ・IP（Integral Photography） ・固体中の発光現象方式 ・煙などへの投影方式
	コヒーレント光	・ホログラフィ
	混合光	・ホログラフィックステレオグラム ・白色光再生ホログラフィ
切断面再生		・バリフォーカルミラー方式
その他		・ワイドスクリーン方式

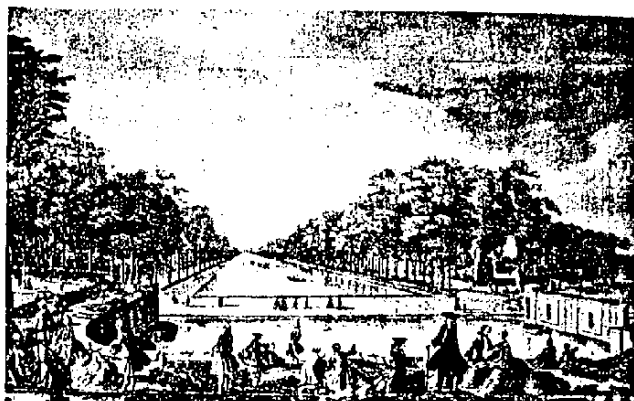
(2) 静止画における3次元映像技術

① 平画面における立体表現方法

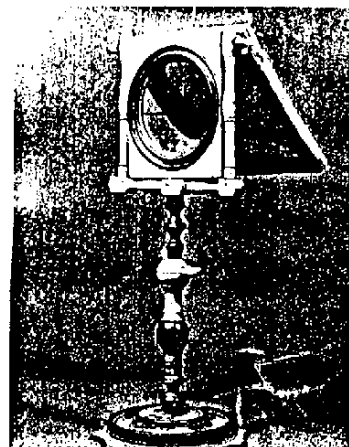
長い廊下や家並みが続く街の光景を表現しようとするときなど、一点を定め、そこに両側から伸ばした延長線が交わるように描く。このような画法を“線遠近法”又は“線透視図法”と呼んでいる。

この線遠近法は、立体感をだす錯視的效果があるため、ヨーロッパではルネッサンス時代に、この手法が盛んに使われていた（図表5.4-4）。

わが国でも16～17世紀の南蛮美術のなかに、この手法が取り入れられている。そのなかでも、とくに線遠近法が強調された“眼鏡絵”などと呼ばれている（図表5.4-5）。



図表5.4-4 眼鏡絵



図表5.4-5 覗き眼鏡

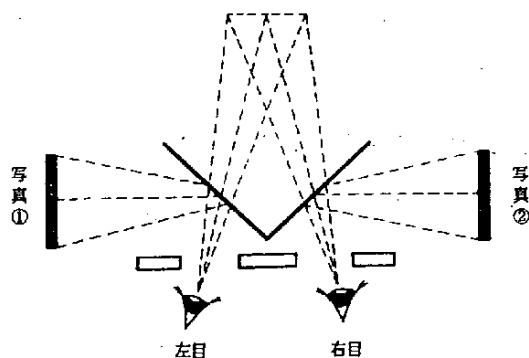
② メガネを使う方式

(a) ステレオ写真方式

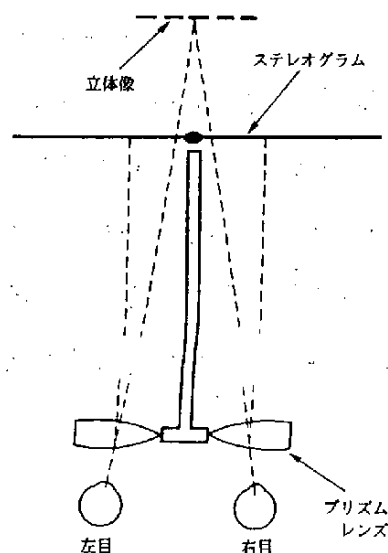
ステレオ写真方式（ステレオスコープ方式）には、鏡を使う“反射型”のもの（図表5.4-6）とプリズムやレンズを使う“屈折型”のもの（図表5.4-7）とがある。反射型ものは、歴史的には古くから使われているが、今日でも使われている方式は後者の屈折型の立体鏡である。

初期の段階での立体画像は、手書きの絵であったが、ステレオスコープが発明されてからまもなく、写真法が1839年にダゲール（L. J. M. Daguerre, 1789 ~ 1851）によって発明され、それ以来、立体写真はカメラで容易に作成できるようになった。

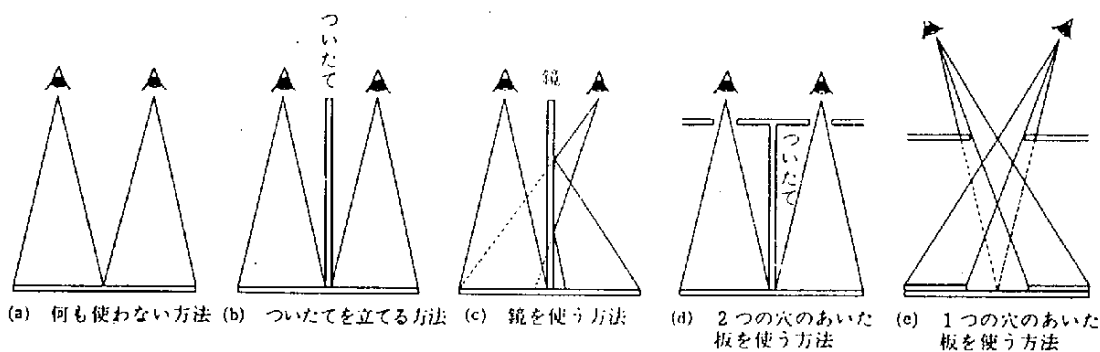
立体視する方法には、図表5.4-8 のように各方法がある。これは裸眼でも見ることが出来る。



図表5.4-6 ホイートストンの反射型立体鏡



図表5.4-7 プリュースター方式の立体鏡



図表5.4-8 立体視する各方法

(b) アナグリフ方式

一般に、補色の関係となっている2色（たとえば赤と青あるいは緑）のフィルタを使って、白い紙の上に、その2色で描画されたものを見る方式のことをアナグリフ（赤青メガネ）方式と呼んでいる。赤で作成された部分は赤いフィルタを通過し、背景の白と見分けがつかなくなり、青で作成された部分は、通過せず、背景の白と見分けられ、画像として観測されることになる。同様に、青いフィルタを用いた場合は、赤で作成された画像だけが観測されることになる。そこで、左右の目に入る絵や写真を少しずらして、両眼視差がとれるようにすると、立体視ができる。この種の方法は古くから行われており、立体写真集や漫画などで利用されている。かつては、立体映画やテレビで、この方式が主流であった。

アナグリフ印刷は、2つの写真や絵を、同一の紙の上に重ねて印刷して、立体視するもので、刷色は互いに補色関係にある色（赤と青や緑）で行う。アナグリフ印刷の特徴は、同一の紙面に重ねて印刷するため、2つの像が比較的融像しやすく、だれでも容易に立体視できる点である。また、印刷スペースが限られている場合や、大きなスクリーンに2つの像を投影する場合などに有効である。

原理的には、赤で印刷されたものは赤いフィルタを通しては紙の白地と区別できず、観測できないことになっているが、現実には印刷上の赤とフィルタの赤とでは、スペクトルが異なるため、赤フィルタを通して赤い印刷の絵や写真が見えてしまう。ストロークが起こりやすい方式である。もちろん、品質のよいものは、このようなことはない。

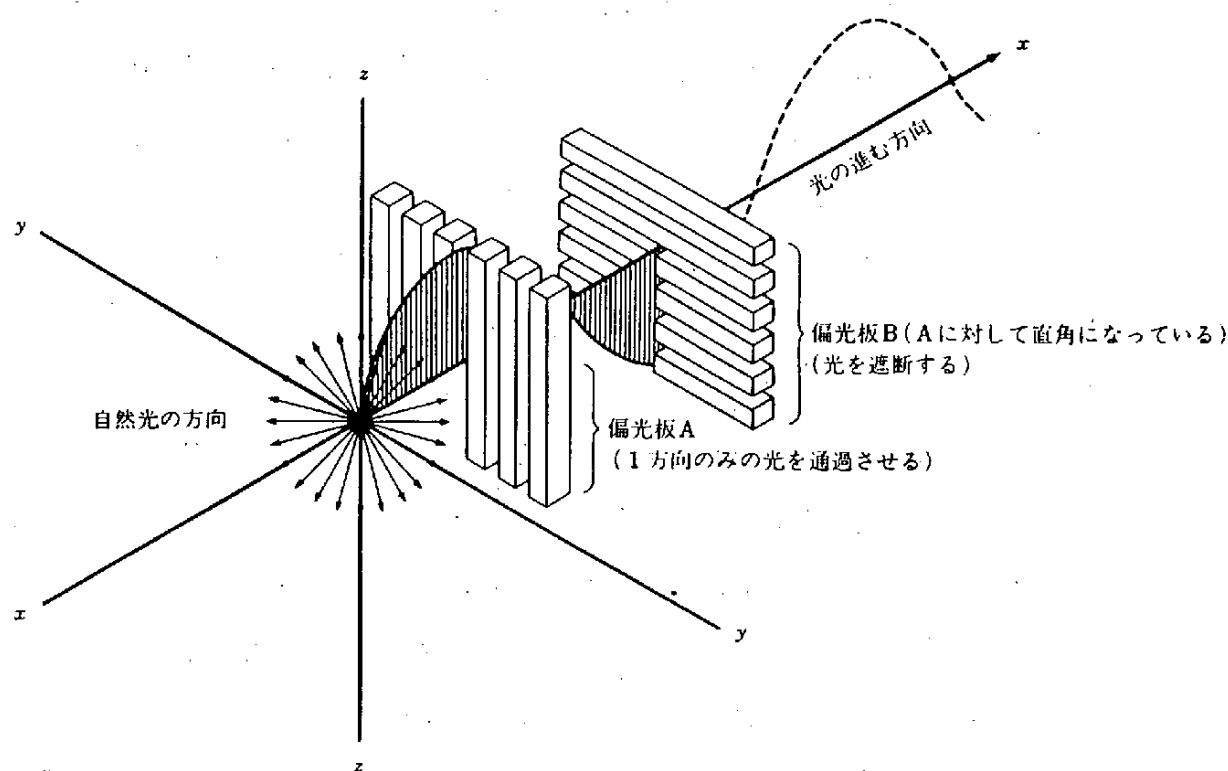
アナグリフ方式の場合、カラー画像は立体視できないという問題がある。淡い色

のフィルタを使って、カラーで見る試みもされているが、不完全である。

(c) 偏光板方式

偏光板方式は、アナグリフ方式に比べて、比較的歴史の新しい方式である。アナグリフ方式の場合は、スクリーンとフィルタの色調整が厳密に行われていないと、両眼にストロークが生じやすいという欠点があるが、偏光フィルタを使う場合は、左右の偏光軸が90度になるようなものであれば、ストロークもなく、またフルカラーで鮮明な映像を見ることができる。

今日では、“3D映画”といえば偏光板方式が主流になっているが、印刷物としてはアナグリフのように容易ではないため、普及していない。太陽光や電灯光のような、あらゆる方向に振動している普通光のなかから、一方向の振動をもつ光だけを通過させるフィルタのことを“偏光板（フィルタ）”という。



図表5.4-9 偏光の原理

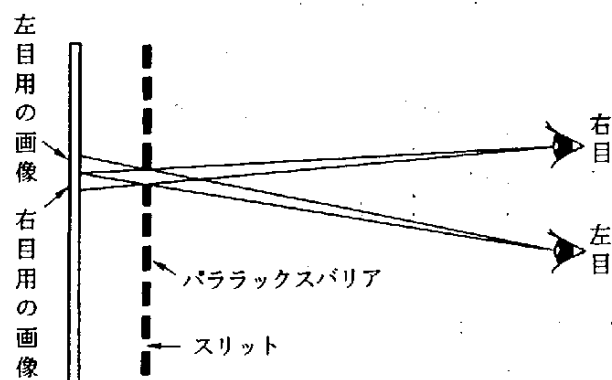
③ メガネを使わない方式

(a) パララックス方式

パララックス方式は、図表5.4-10に示すように、非常に細かいスリットを通して、印刷物を見る方式である。このスリットは縦縞で構成され、この板を“パララック

スバリア (parallax barrier) ”と呼んでいる。

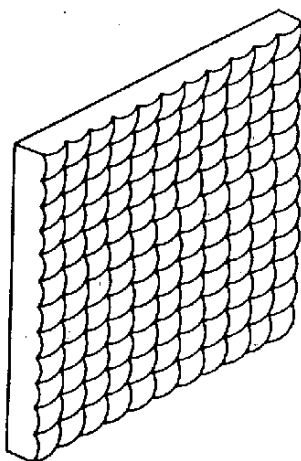
対象物は、図表5.4-10に示すように、縦縞で、左右に一連の絵又は写真が配置されるように作成されている。この際、左右の画像に両眼視差をもたせたものを印刷しておく、立体視が行える。



図表5.4-10 パララックス

(b) インテグラルフोटグラフィ方式

インテグラルフोटグラフィ方式は、“IP”と略して呼ばれており、図表5.4-11に示すような“フライズアイレンズ”と呼ばれる昆虫の複眼レンズを用いて、立体視するものである。

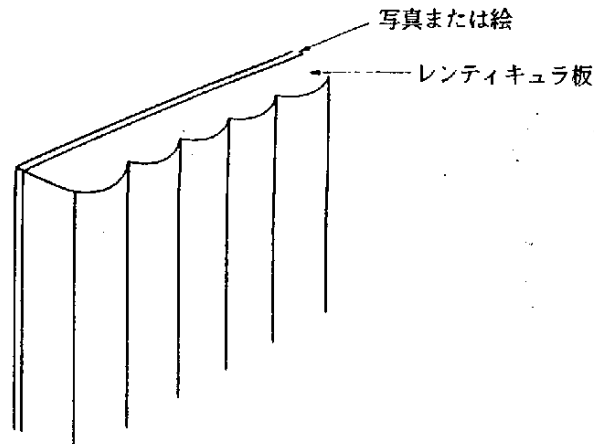


図表5.4-11 インテグラルフोटグラフィ方式

(昆虫の複眼のような極めて小さいレンズの集合体)

(c) レンティキュラ方式

IP方式は、左右のみならず、上下及び斜め方向からも視差を得ることができるが、一般にステレオ画像では、目が横に並んでいるため、左右方向の視差だけで十分で、上下方向の視差は必ずしも必要ではない。この上下方向の視差を取り除いたのが、“レンティキュラ方式”である。立体写真や動く絵に使われている細長いレンズは、図表5.4-12に示すような形状をしており、“レンティキュラレンズ”と呼んでいる。



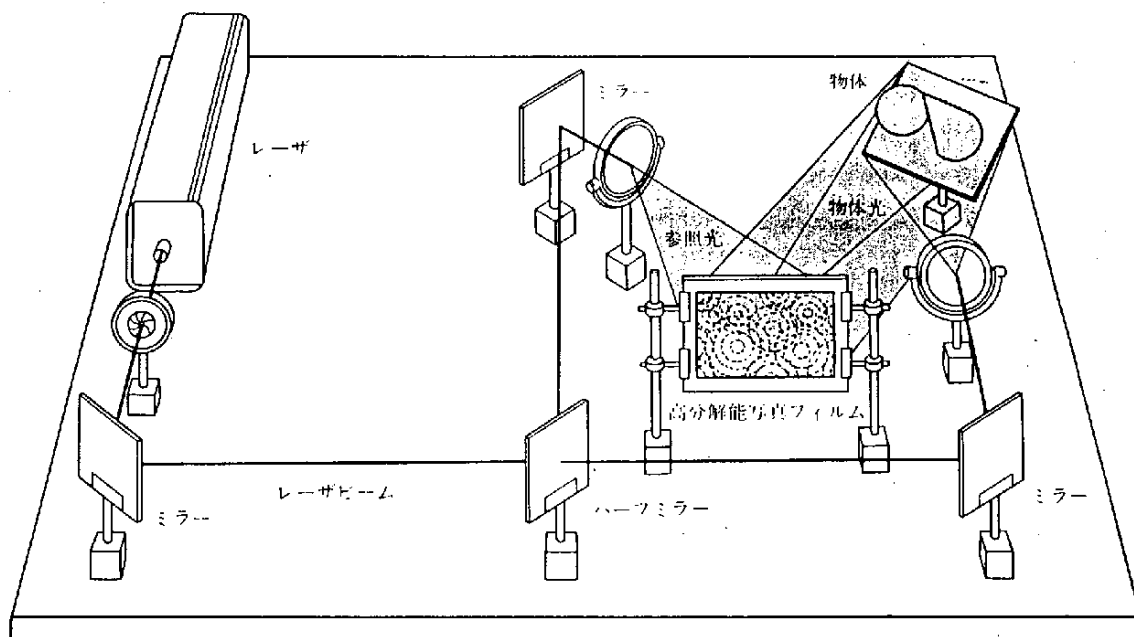
図表5.4-12 レンティキュラレンズ

(d) ホログラフィ（ホログラム方式）

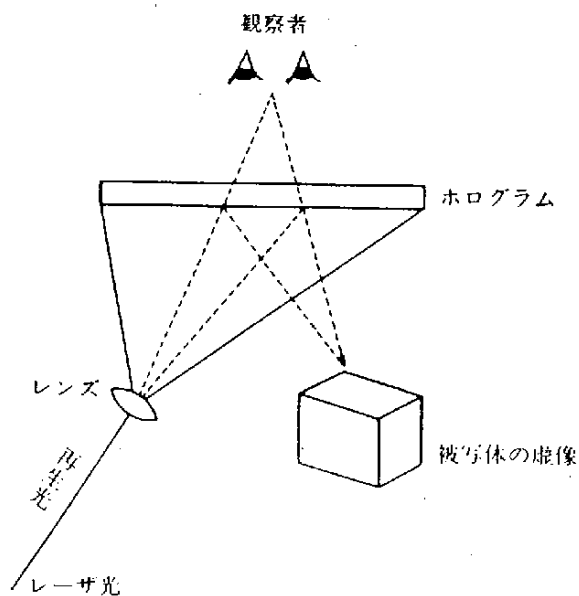
ホログラム方式は約50年前に原理が発見され、レーザ光の利用により実現されたものである。最近では、半導体レーザを利用した装置も検討されている。

図表5.4-13に、ホログラムの撮影装置の構成例を示す。同図のように、レーザ光をミラーで照射し、ハーフミラーを利用して、光を2方向に分離し、片方の光は、物体上を照射して、高分解能写真フィルム上に投影される。他の光は参照光となり、フィルム上に干渉縞を発生させ、立体像の情報を記録する。

このようにして記録されたホログラムは、コヒーレント光あるいは白色光で再生できる（図表5.4-14）。再生像は、最初の被写体と同一の立体像として、浮かび上がってくる。特に、レインボーホログラムは見る角度によって、虹色に色が変わる。



図表5.4-13 ホログラム撮影装置



図表5.4-14 レーザ光を用いたホログラムの再生方法

また従来の銀塩の代わりにポリマーを使用したホログラムも開発されている。また、フルカラーのホログラムもできるようになった。

これらの手作りのホログラムに対して、型おこしで大量生産できるエンボスホログラムも開発・普及されてきている。話題となったものとしては、アメリカの雑誌「National Geographic」の表紙を飾ったものがあり、これは高品質（鮮明で奥行き感がある）で蛍光灯の光でも立体視でき、また非常に薄いという特長を備えてい

た。この他最近ではパンフレットやカード、また絵本の一部などに取入られてデザイン効果を上げている。

またエンボスホログラムは、クレジットカードなどセキュリティが求められるものに利用され、偽造防止の役割を果たしている。さらに最近ではホログラム自身に情報を持たせるという応用例も見られる（ホテルのルームキーなど）。

現在研究中の応用例としては、飛行機のコックピットを操縦士が顔面を前に向けたまま見ることのできる装置（ヘッドアップディスプレイ）への利用が考えられている。なお、ホログラムのその他の技術としては、電磁波立体映像方式や音波立体映像方式などが研究・開発されている。

図表5.4-15 ホログラムの分類

方 法	分 類	種 類
記録方法	参照光の照射法によるもの	①単光束（ガボール型）ホログラム ②2 光束（ルース型）ホログラム
	干渉縞の次元によるもの	①2 次元（平面）ホログラム ②3 次元（ポリューム）ホログラム
	干渉縞の記録方法によるもの	①振幅ホログラム ②位相ホログラム ③グレースドホログラム
	波面の形状によるもの	①フレネルホログラム ②フラウンホーフェ型ホログラム ③フーリエ変換ホログラム ④イメージホログラム
	被写体の種類によるもの	①動く物体 （パルスレーザホログラム） ②大きい物 （ホログラフィックステレオグラム ）
再生方法	使用する光が異なるもの	①レーザ再生ホログラム ・フレネルホログラム ・イメージホログラム
		②白色光再生ホログラム ・イメージホログラム ・レインボーホログラム ・リップマンホログラム
光以外のホログラム		X線ホログラム 電子線ホログラム 電波ホログラム 音波ホログラム
コンピュータによるホログラム		コンピュータホログラム キノフォーム

(3) 動画における3次元映像技術

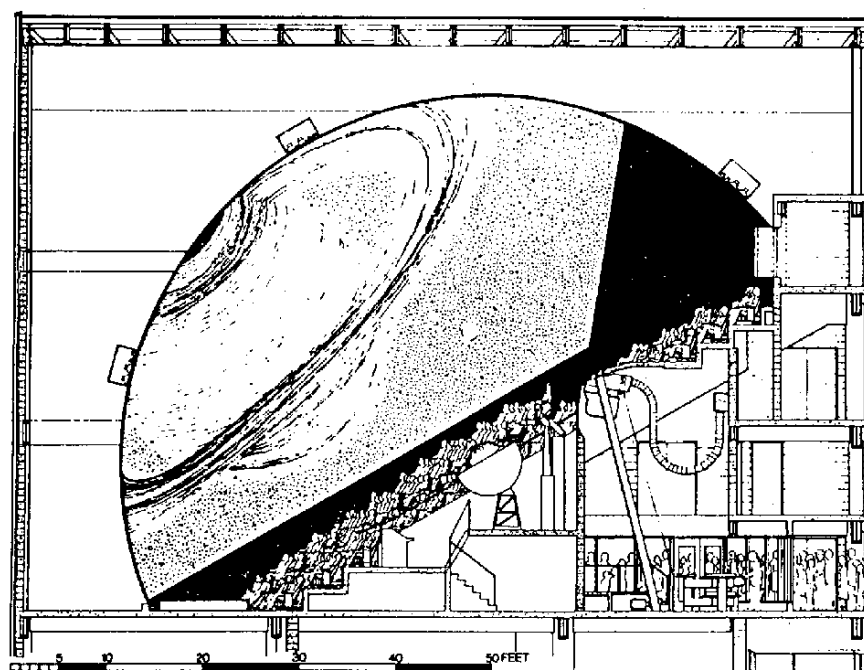
① 立体映画

本格的な立体映画の始まりは、1930年代の“アナグリフ方式”からとされている（図表5.4-16）。最近では、偏向メガネをかける立体映画の時代になったが、メガネをかけるというわずらわしさは避けられず、立体映画の技術的な未完成さは否めない。ホログラフィなどのメガネの不要な立体映画が強く望まれている。

図表5.4-16 立体映画の歴史

年 代	方 式
1930年代	アナグリフ方式立体映画時代
1950年代 および 1970～1980年代	偏光方式立体映画時代

最近では、図表5.4-17のような大型全天周型（ドーム型）の立体映像が人気を博している。



図表5.4-17 オムニマックス方式の劇場（カタログより）

② 立体テレビ

テレビを立体で見たいという欲求は、映画を立体で見ようという気持ちと同じで、一つの自然な発展といえる。基本的には、映画と同様な考え方で、立体テレビが実現されている。

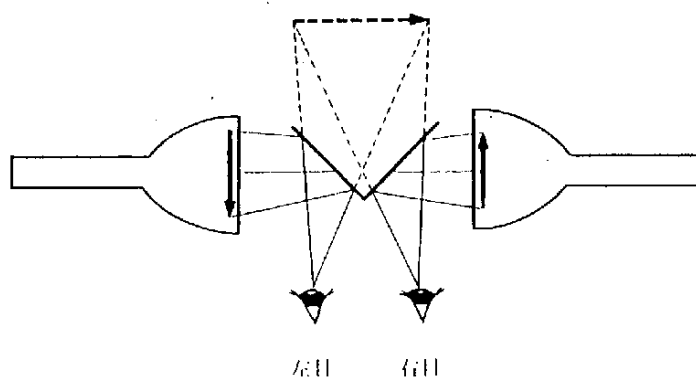
しかし、テレビの場合、映画と異なり、映像が電気信号であるため、信号を電氣的に処理することができ、映画では不可能な様々な技法も生まれてきている。

図表5.4-18に立体テレビの主な種類を示す。また図表5.4-19～図表5.4-25は、メガネを使用する方式とメガネを使用しない方式に分けて示す。

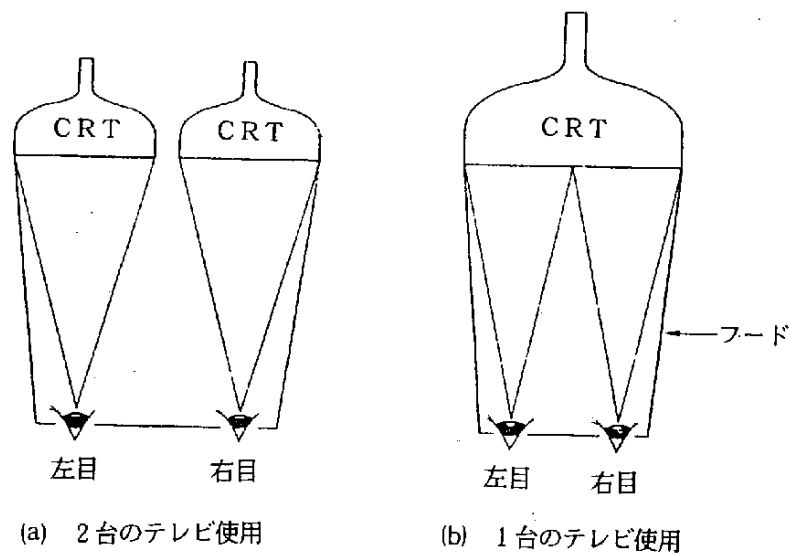
図表5.4-18 立体テレビの方式分類

メガネ	立体視の方式	像の変化	方式名	備考
使用する	両眼視差	視点を 変えても 不変	立体鏡方式 アナグリフ(2色)方式 偏光方式 時分割方式 濃度差方式	大型プロジェクション方式で進んでいる PLZTや液晶を利用したシャッタ 方式など NDフィルタ(フルグリット方式)
			パララックスバリア方式 レンチキュラ方式	ラスタ方式
使用しない	空間像	視点を 変えると 変化	バリフォーカルミラー方式	平面多重像
			固体内発光方式	実像

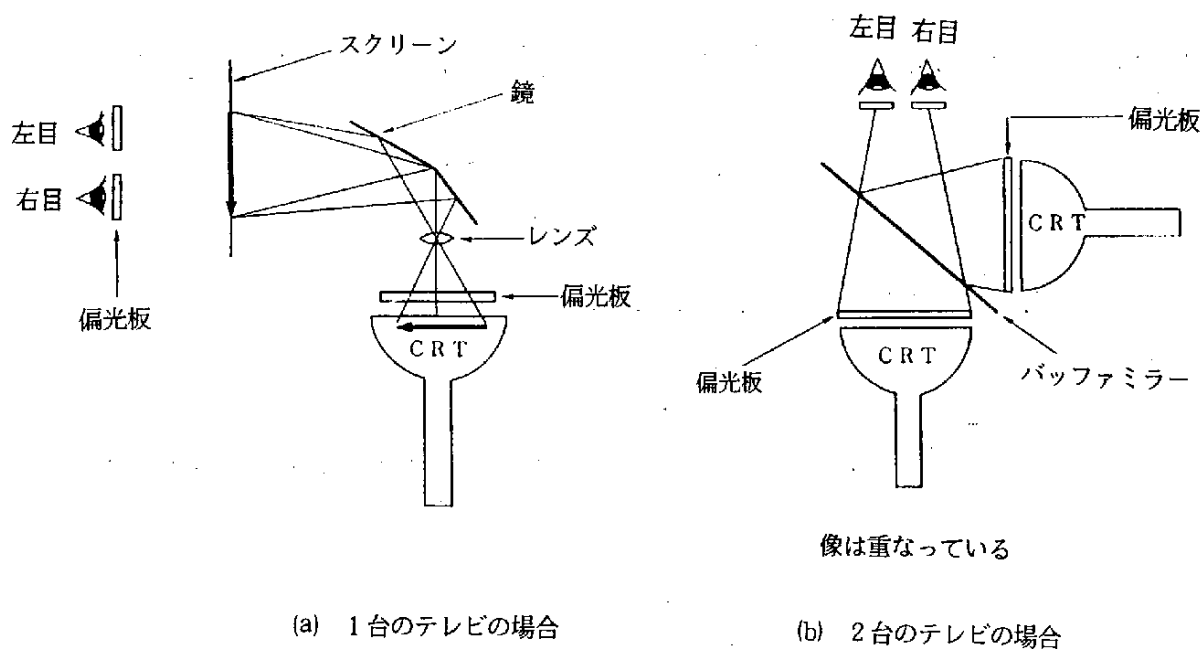
(a) メガネを使用する方式



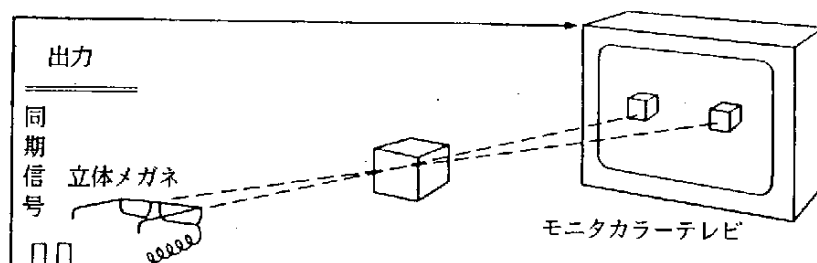
図表5.4-19 立体鏡方式による立体テレビ



図表5.4-20 個人用のステレオビューアを用いた立体テレビ

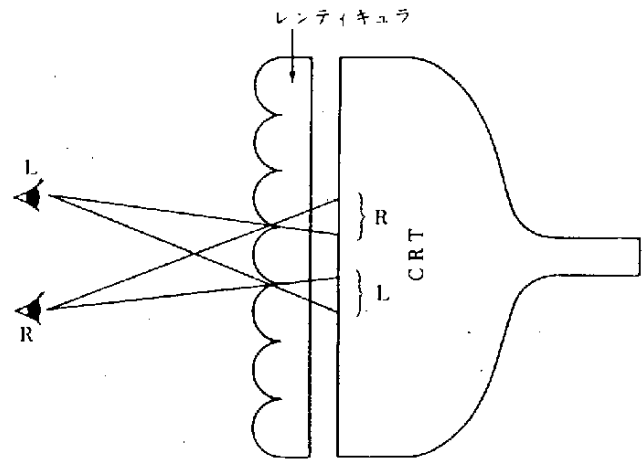
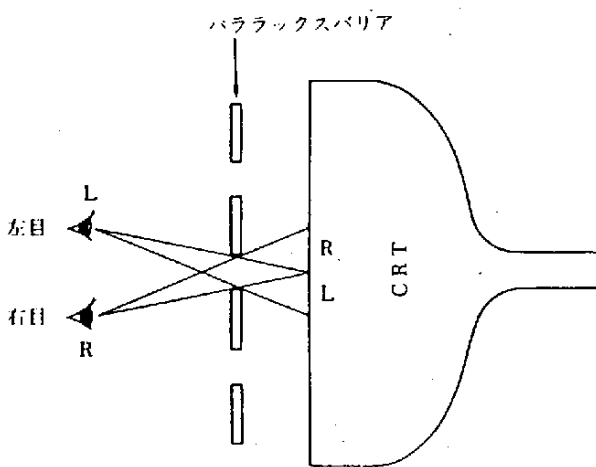


図表5.4-21 偏光方式による立体テレビ

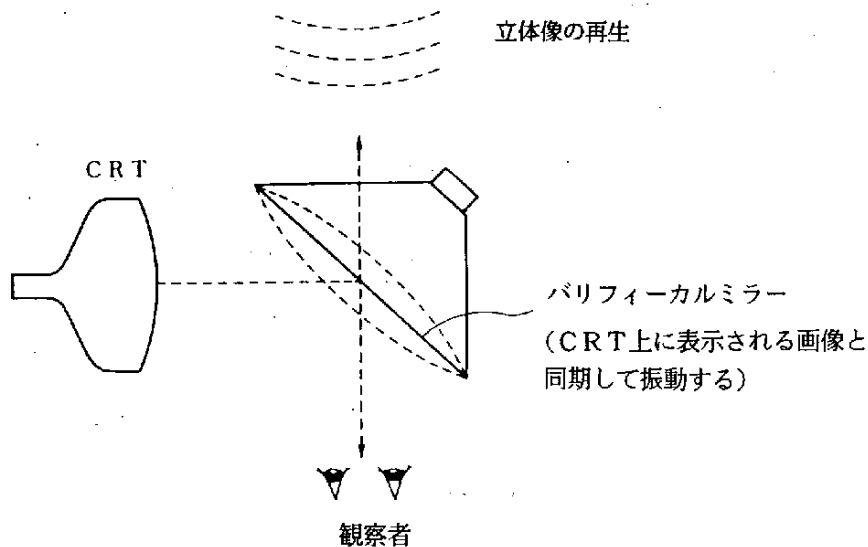


図表5.4-22 電子シャッター方式の立体テレビ

(b) メガネを使用しない方式



図表5.4-23 パララックスバリア方式テレビ 図表5.4-24 レンティキュラ方式テレビ

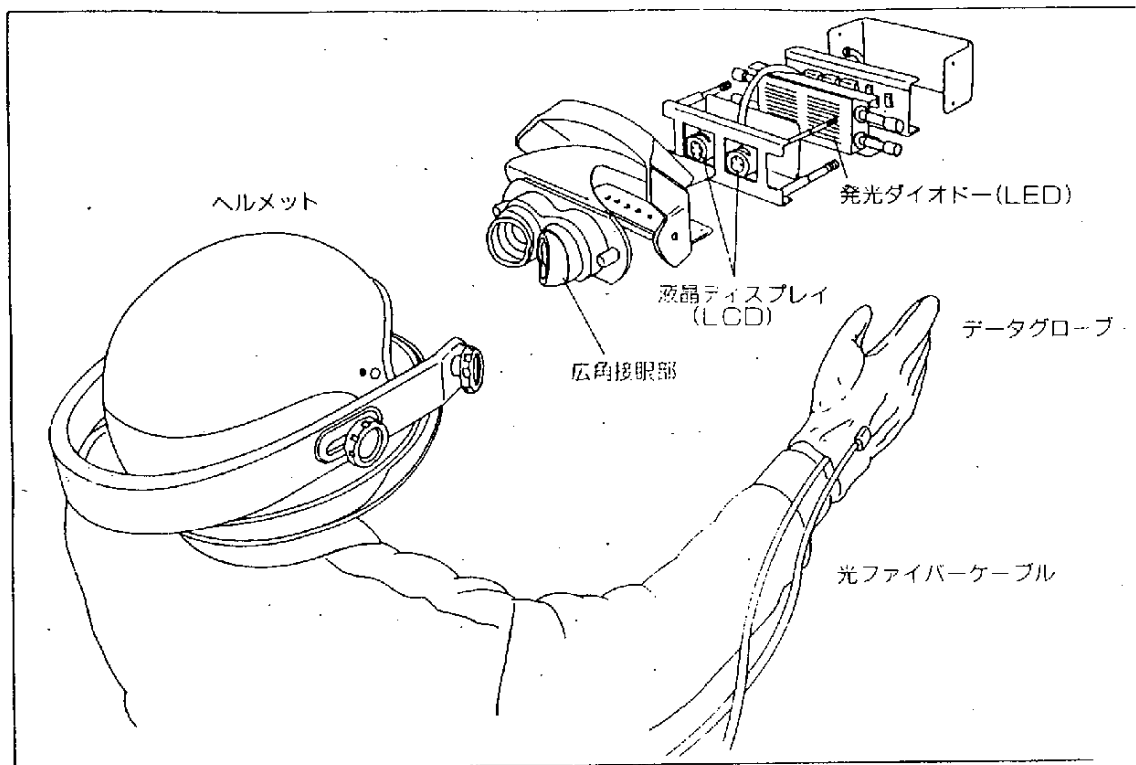


図表5.4-25 バリフォーカルミラー方式の構成

(c) 新しい方式の例

最近NASAで開発された技術として、3次元映像と観察者の位置・姿勢センサとを併用することにより、実空間と同種の体験が得られる仮想環境誘導型システムがあり、話題を呼んだ。これはゴーグル型（あるいはヘルメット型）のシステムで、その内側に、両眼に対してそれぞれ液晶ディスプレイが光学系と組合され、左右で立体視できるようになっている。しかも同時に、確認された位置や姿勢に応じた映像を創り出し、リアルな感じを与えることのできるシステムである。ただし、観察者

の素早い動きに対しては、まだ完全に追従できないのが現状である。



図表5.4-26 仮想視覚環境表示装置

NASAで開発したヘルメットタイプの表示装置とデータグローブと組んで、仮想視覚環境を作り出すシステム

(4) 3次元映像の応用

3次元映像の応用例としては、凹面鏡を利用して虚像と実像を組合せて特殊な効果を上げたものや、TV電話のレンティキュラ方式に液晶ディスプレイを組合せて精度を向上させた例などがあげられる。

その他、各分野における応用例を以下に列举する。

- ・ アメリカのディズニーランド内のエプコットセンターにおける、コンピュータ室案内マスコットのショー
- ・ 商業デザイン …… ショーウィンドウのディスプレイ、商品のパッケージ、ポスター、カタログやパンフレット等
- ・ 事務文具用品 …… デスクアクセサリ、小物入れ、シール、ワッペン等

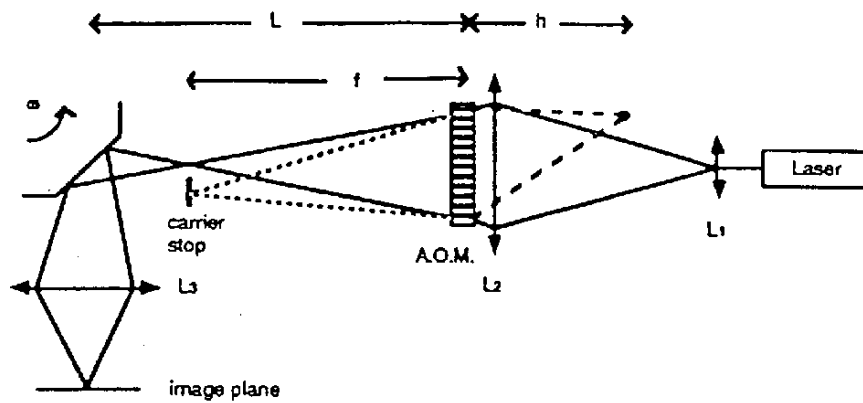
- ・ 家具設計 CAD との組合せ、室内レイアウトの鳥瞰図化等
- ・ 建築設計 CAD との組合せ、配管・配線レイアウトの3次元表示等
- ・ 文化財の記録 2眼ステレオペアによる撮影
- ・ 写真測量・ 航空機、気球、人工衛星などからの撮影による立体写真測量
地図作成
- ・ コンピュータ・グラフィックス プレゼンテーション効果を上げるための影付き表示等
- ・ バイテクノロジー 分子構造分析用システム等
- ・ 訓練 フライトシミュレータ等
- ・ 航空管制 レーダの映像を立体視化するシステム等
- ・ 医学 ベクトグラフを利用した立体盲（立体視ができない症状）検
査、ステレオ写真やレンティキュラを利用した立体X線映像、
立体顕微鏡や立体内視鏡等

このように様々な新しい分野で立体映像が利用されるようになり、今後研究・開発が進むことにより、さらに多くの分野での利用が期待できる。

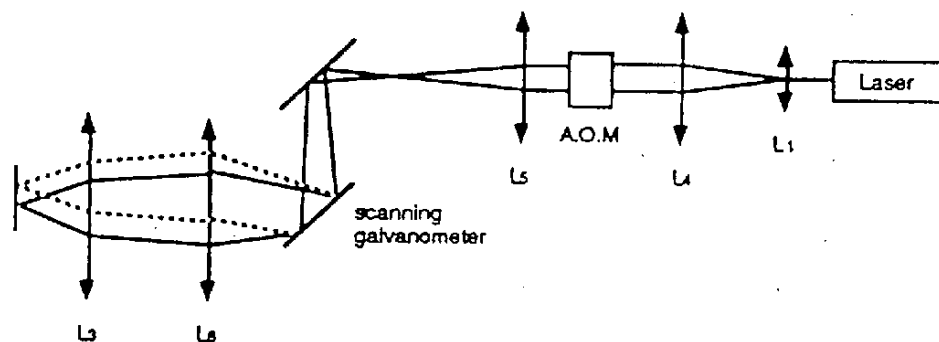
5.4.2 ホログラフィックな3次元表示技術に関する研究例

ホログラフィによる3次元ハードコピーとしては、“Holographic 3-D printer”[1]が提案されている。これは、従来のドットプリンタのように点状の小さなホログラムを塗りつぶすように露光するものであり、全く歪のない立体像をコンピュータのデータから自動的に合成することができるものである。

ホログラフィによるリアルタイムの表示に関しては、“Electronic display system for computational holography”[2]が研究されている。光学系は図表5.4-27～28に示すものである。スーパーコンピュータで計算した1次元のCGH (computer generated hologram) の信号により、音響光学変調器 (acousto-optical modulator:AOM) をドライブする。AOM に表示されたCGHは音速で流れてゆくため、これを補償するためポリゴンミラーにより、変調された光を水平方向に音波の進行方向と逆向きに動かす。垂直方向には、ガルバノメータによりスキャンを行い、水平方向の視差を持つホログラムをリアルタイムで表示することができる。現在のところ30×30×30mmの物体を、垂直方向の解像度64本、40Hzのフレームレートで表示することが可能となっている。CGHの計算時間は1画面5秒以下である。



図表5.4-27 光学系の、水平方向の走査を行う部分。ガルバノメータミラー他の垂直方向の系は省略されている（参考文献[2]）。



図表5.4-28 垂直方向の走査光学系。ポリゴンミラーは省略されている（参考文献[2]）。

【参考文献】

- [1] M. Yamaguchi, N. Ohya, and T. Honda: Proc. SPIE Vol. 1212, to be published.
- [2] P. S. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa, and J. Underkoffler: Proc. SPIE Vol. 1212, to be published.

6. 情報の3次元的处理

6.1 処理方式

次節が、情報を3次元的なハードウェアで処理しようというのに対して、3次元的「方式」で情報処理を行おうという新しい試みである。必ずしも、明確に定義できていない分野である。

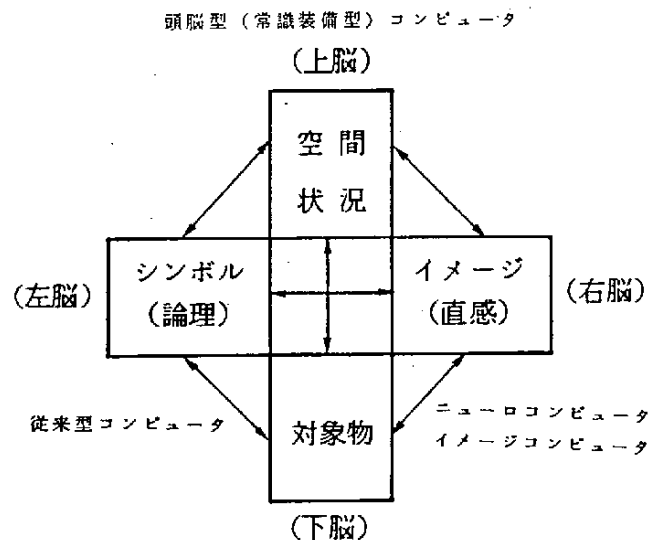
超並列情報処理、ニューロコンピューティング／ニューラルネット、セグメンテーション／スライシングなどの面的連続情報処理、光連想メモリなどが、関連技術項目として提起された。

6.1.1 人間の情報処理

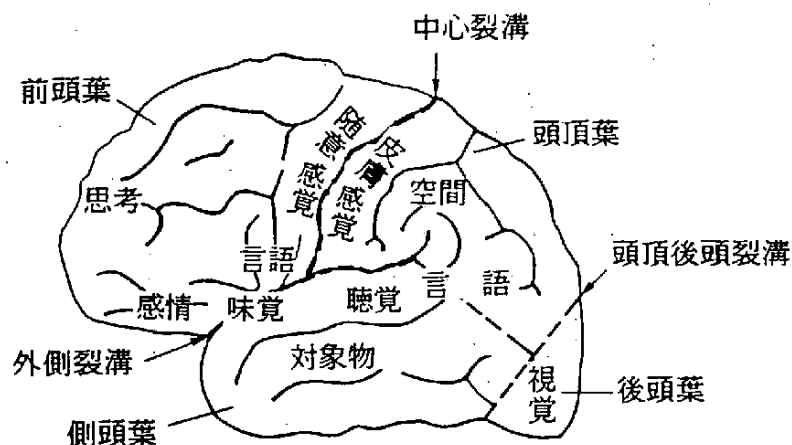
人間の脳における情報処理の最も著しい特徴は、膨大な数の異なった処理が互いに有機的に結びつきあって、同時に並行して行われ、なおかつ、ある秩序に従って統一的に働いているということである。残念ながらその全貌は完全には解明されていない。ここでは、脳における四元的情報処理の側面を紹介する。

(a) 超並列・分散型情報処理

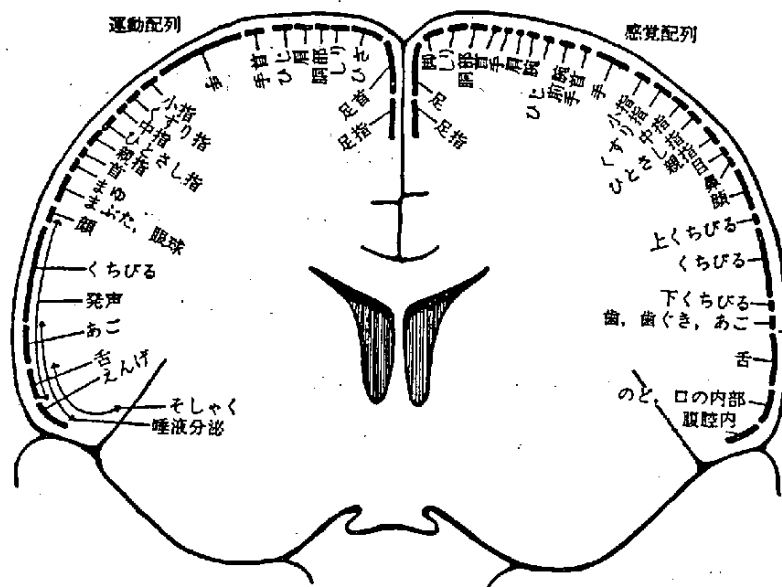
脳の機能を大局的にみると図表6.1-1のように上脳（空間）・下脳（対象物）・左脳（論理）・右脳（直感）といった4つの機能に分かれる。これをもう少し詳しく示したのが図表6.1-2である。皮膚感覚のところをさらに詳しく示したのが図表6.1-3である。



図表6.1-1 上下左右脳の機能模式図



図表6.1-2 新皮質の構成（左脳）

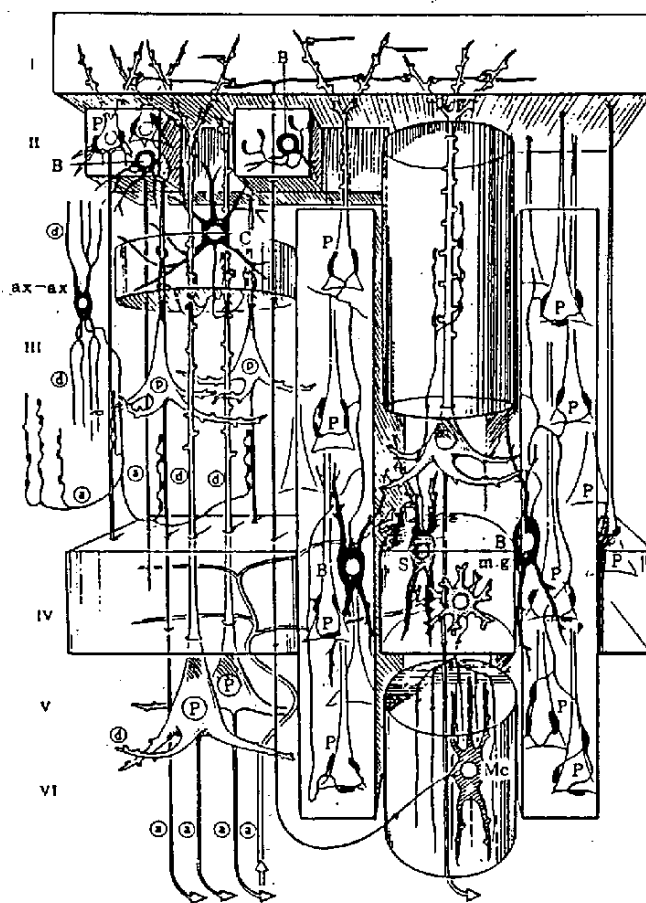


図表6.1-3 感覚運動領域野のところで大腦を切断して、運動配列と感覚配列を示したもの。各反応に対応して描かれた太線の長さは反応が生じた皮質領野の相対的大きさの平均値に基づいた推定値を示している。

このように、各感覚情報は、それぞれ多数に分散し、並列に処理されていく。図表6.1-3 は、感覚情報のほんの脳の入口の部分を示しただけのものであり、その後の情報の流れは、さらに分散・統合を複雑に重ねた四元情報処理となる。

大腦における感覚情報の入口の部分の回路網の一例を図表6.1-4 に示す。ここからだけでも、3次元神経回路網が単純な一様構造ではないことが分かる。ニューロンの種類

も50種以上あり、結合部における情報伝播・処理も種々あるといわれている。



I～VIは層の番号を示している

図表6.1-4 新皮質における各種ニューロンと結合様式

(Szentagothai 1978 より)

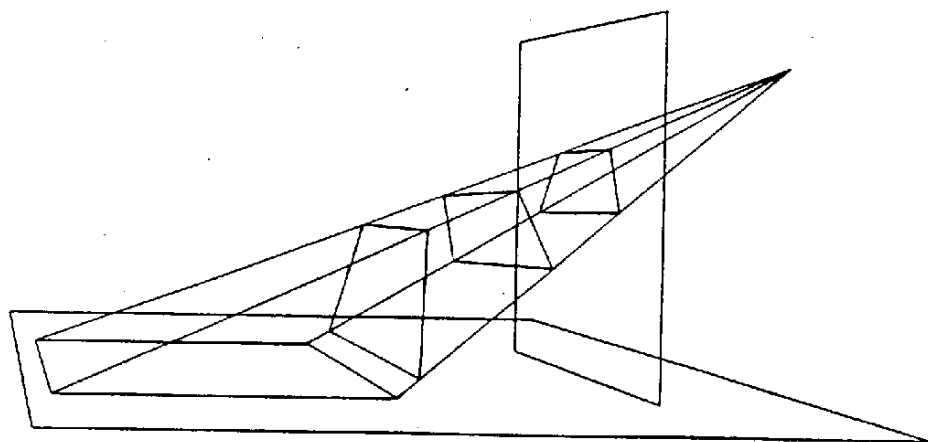
(b) 情報処理系の統合原理・最小原理

情報の並列的分散表現を多重表現・多次元表現・多種類表現の3つに分けて考える。

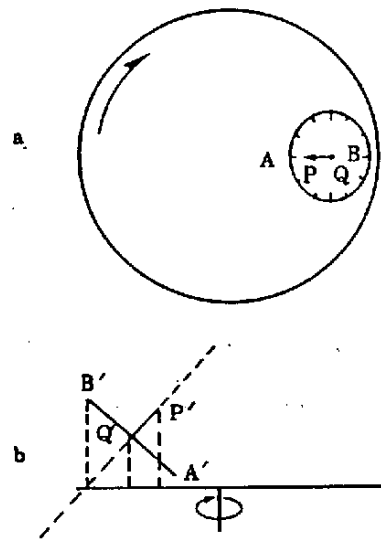
(色、大きさ、位置、動きなど異なった属性・機能が並列的に表現されている場合を多種類表現と呼び、色彩を赤・緑・青の成分で表す例のように1つの属性・機能を複数の成分で表現する場合を多次元表現と呼び、1つの属性・機能を複数通りに表現する場合を多重表現と呼ぶ。) そうすると、多重表現の統合は「重ね合せの原理」、多次元表現の統合は「排他原理」、多種類表現の統合は、一方が他方の基準になるなどの「制御的統合の原理」にそれぞれ従うということが、主に知覚レベルの多数の知見から導き出されている。最近では、認知レベルの研究でも同様の知見が得られつつある。これらのもとになっているのは、最小原理であることも分かってきた。

(c) 不完全問題・制約条件

人間における処理のほとんどは不完全問題(ill-defined problem)である。例えば、図表6.1-5 の場合網膜に写る像は、台形であってもその発生源は、平面上の四角形であるとは限らない。無限の可能性がある。しかし、我々人間は、何らかの無意識的仮定(制約条件 constrain)を使い、例えば長方形とただ一つのものを知覚する。図表6.1-6 a の図形を回転させると図表6.1-6 b のように知覚される。時計の針のようなものは立ち上がってみるのである。このとき作用しているのが変形最小や軌道最小などの最小原理である。



図表6.1-5 同じ立体視角内にある等価な布置



図表6.1-6 自分で立ちあがる針 (Metzger 1953)

- (a) 呈示図形
 (b) 知覚される構造 (分かりやすくするため側面図で示してある。))

【参考文献】

- [1] 甘利、森 (監修) : 入門ニューラルネットワークス, トリケップス (1988)
- [2] 森 (他) : 感覚・知覚系の脳内表現に関する調査報告, 電総研調査報告第215号 (1986)
- [3] 品川 : 右脳コンピュータ, ダイアモンド社 (1986)
- [4] スペア : 視覚の情報処理, サイエンス社 (1986)

6.1.2 光情報処理

(1) はじめに

光ディスクメモリ、光ファイバ通信やレーザ加工などに代表される光技術の発展と、情報化社会の進展にともなう質的、量的両面での情報処理能力の一層の向上への期待を背景として、光を用いた情報処理技術が注目を集めている。1990年4月にわが国で最初の光コンピューティング国際会議が開催されるのも、その流れの一つである。

ここでは説明の便宜上、光情報処理技術を次のように大きく4つに分け、この順序でそれぞれについて述べる。

- ・光インターコネクション
- ・アナログ光情報処理技術

- ・ディジタル光情報処理技術
- ・光ニューロコンピュータ技術

次の(2)でも触れる光の特性により、3次元的情報処理の可能性への期待も大きい、具体的なハードウェアについては、6.2項で述べる。

(2) 光の特長

個々の技術の紹介の前に、情報技術への応用において、「なぜ光なのか」、すなわち「どのような光の特長が注目されているのか」、を簡単にまとめておこう。

- (a) まず、よく知られているように、その周波数（可視光で10Hz以上）が従来の電気的情報処理系で行われているそれ（<10Hz）に比べてけた違いに大きいこと。ただし、このような帯域を直接利用する技術はまだ開発されていない。
- (b) 次に、外部からの電磁なノイズにも強いこと。また、ガラスのような透明物質内や空間を伝搬する光は、電導体を伝わる電気（電子）の場合と異なって、電気容量などの制限を受けないこと。これらの点は、情報を別の場所に伝えようとする場合に特に有用である。
- (c) さらに、光は3次元空間内を伝搬できること。また、光と光の直接的な相互作用が著しく小さいこと。このため、いわゆる「並列処理」に適していると言われ、注目されている。後者の「光と光の相互干渉性」は、一般的には、光で直接論理演算を実行しようとする場合にはむしろ欠点になるとも考えられるが、光と物質の相互作用を介することによって高速、低消費パワーの論理演算素子の実現の可能性も追求されている。

なお、以下に述べる個々の技術が、必ずしもここにあげたすべての特長を利用している訳ではないことを注意しておこう。

(3) 光インターコネクション

従来のコンピュータ技術において、大きくはコンピュータ間から、小さくはLSIチップ内のエレメント間に至るまで、情報のやりとりは電気的に行われている。情報処理容量の増大にともなって、これらの情報伝送の伝送容量の向上へのニーズも高まってきたが、これにつれて、配線量の増大にともなう配線間のクロストークなど、幾つかの問題点が生じてきた。これらを解決する手段として光が有効と考えられている。そのような技術が光インターコネクションである。これには、必ずしも光ファイバや光導波路などを介することなく、3次元空間内を伝搬する手法も含まれるため、光接続と呼ばれるこ

ともある。

ここでは、コンピュータを次のように階層分けし、その各々のレベルごとに検討してみよう。

(a) 機器間

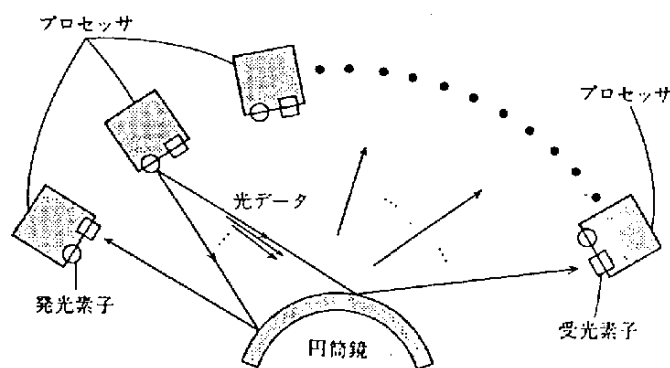
コンピュータや各種情報機器の間の光配線である。伝送情報容量の増大、電磁ノイズ対策などを狙いとした、このレベルへの光技術の導入は、既に光LAN（ローカルエリアネットワーク）として実用化されているので、多くの説明を要しないであろう。身近な話では、オーディオ機器間接続にも光ケーブルが使われ始めている。概念的には以下の各レベルでの光配線につながるものといえる。

(b) 機器内／プロセッサ間

コンピュータの内部を覗いてみると、多数のケーブルの束がプロセッサなどのモジュールの間を行き来している。これらの電気配線の間のクロストークや、外部（へ）のノイズが無視できなくなり、光ファイバが徐々に導入され始めている。

さらに、多数のプロセッサを同時に稼働させてコンピュータの性能を向上させようという試みもある。多数のプロセッサ（やメモリ）を放送型の（すなわち任意のプロセッサからの情報を他のすべてのプロセッサに同時に伝える）「バス」によって1つに結合したマルチプロセッサシステムはその一例であるが、一つ一つのプロセッサ間を光ビームや光ファイバでそれぞれ直接結合する方法では、プロセッサ数が増大すると膨大な配線が必要になる。そこで、3次元空間を自由に伝搬する光の利用が注目されている。図表6.1-7 にそのような光バスの基本的な構成を示す。ある一つのプロセッサの発光素子（レーザなど）からの光にのったデータは、円筒形のミラーで反射し、すべてのプロセッサの受光素子に到達することができる。

また、光技術の大容量空間スイッチへの応用も注目されているが、これは光通信技術でも利用できる。



図表6.1-7 光バスの基本的構成

(c) チップ間

最近のLSI 論理素子の速度は、素子自体のスウィッチング時間よりも、むしろ素子間を情報が伝わっていくのに有する遅延時間で制限されるようになってきている。従って素子の高速化を図るためには、チップ内の素子の大きさや素子間の距離を小さくする、すなわち集積密度を上げる必要が出てくる。各チップへの入出力を電氣的な結線によって行っていると、相互クロストークなどの問題もあって、その入出力の線数には限界が生じる。また、配線自体が電気容量を持つのでチャージアップにも時間がかかる。そこでチップ内部から光によって、直接情報を入出力できれば都合良い。これは発光素子／受光素子をチップ内におくことによって、実現できよう。クロック分配の応用は有望な領域である。

最近、結線のためにホログラムを用い、外部の3次元空間を利用しようという提案もある。チップを多層化し、その間を光でつなげば、全体は3次元的なデバイスになる。

(d) チップ内

チップ内の結線についても、クロストークなどに関してはチップ間と似た事情にある。また、チップ内の演算部に対して配線部の面積が無視できなくなってきている。そこで演算は電気(E)で、配線は光(O)でと、それぞれの特長を生かしての分担型デバイスが考えられている。多数のEO、OE変換をいかに効率的に行うかがそのキーポイントであろう。いずれにせよ、ここまでくると、後にとり上げるオールオプティ

カルデバイスまではあと一步である。

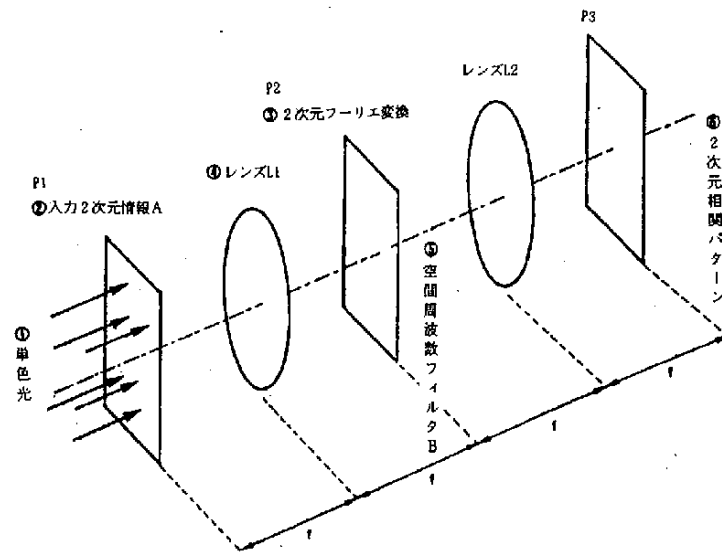
(4) アナログ光情報処理技術

これもコンピュータの不得意な機能を光によって補おうという技術である。一口で言えば、レンズを用いた光アナログコンピュータということになるが、むしろ光専用プロセッサなどという方が具体的に内容を示すことになるかも知れない。「レンズ1枚によって(2次元)フーリエ変換が一瞬のうちにできる」という、光と3次元空間の持つ物理的性質を直接利用する。このような光アナログ方式は、数ある光情報処理技術の中でも古い歴史を持ち、そのエレガントさゆえに多くの人を魅了してきた。図表6.1-8においてP1面に2次元(振幅透過率)情報を置き、これを単色光で照射するだけで、3次元空間内の光の伝わり方によって、元の2次元情報の2次元フーリエ変換の結果がP2面で光振幅分布として得られる。フーリエ変換とは周波数空間への変換であるから、P2面はそのままスペクトルアナライザの出力面といえるし、P2面に、必要とする透過率を持った2次元情報Bを置くことによって空間周波数フィルタリングが可能となる。さらに、図表6.1-8の右側のような第2のレンズL2を置けば、再度フーリエ変換が行われるので、P3面にAとBの2次元相関パターンが得られる。一般に自己相関パターンは鋭いピークを示すので、AとBが同一であるかどうか、すなわちパターン同定の手段としても使用できる。さらにL1とL2を、ある方向にのみフーリエ変換を行う特殊なレンズにすることによって、P1面に配置したベクトル情報とP2面に配置したマトリクス情報のベクトル・マトリクス積(ベクトル)をP3面で得ることも可能となる。

この方式は、出力がアナログ的であって、ダイナミックレンジに限界があるが、最大の特長は何と云っても、3次元空間をうまく利用したハードウェアの単純さと高速性である。最近米国を中心に、レーダ信号などの周波数解析器、相関器あるいは2次元的な画像情報の相関器の実用化の研究が進められている。

この方式の実用上の最大の問題は、図表6.1-8のP1(やP2)面へどうやって2次元情報を導入するかという点にある。従って、電氣的あるいは光学的な入力によってその2次元的な振幅透過率(あるいは反射率)を変えることのできる空間光変調器(SLM)の開発が重要な課題となる。現在市販されているものは数種しか無い。代表的なLCLV(液晶ライトバルブ、ヒューズ社製)は応答速度が10msのオーダーである。わが国でも浜松ホトニクスや住友電工などでSLMについての先駆的な開発が進められているが、このようなデバイスは日本の得意な分野と思われ、新たな参入が待たれる。3次元的な空間変調器

についても提案はあるが、実現は容易でないものと思われる。



図表6.1-8 光アナログ方式によるフーリエ変換

(5) デジタル光情報処理技術

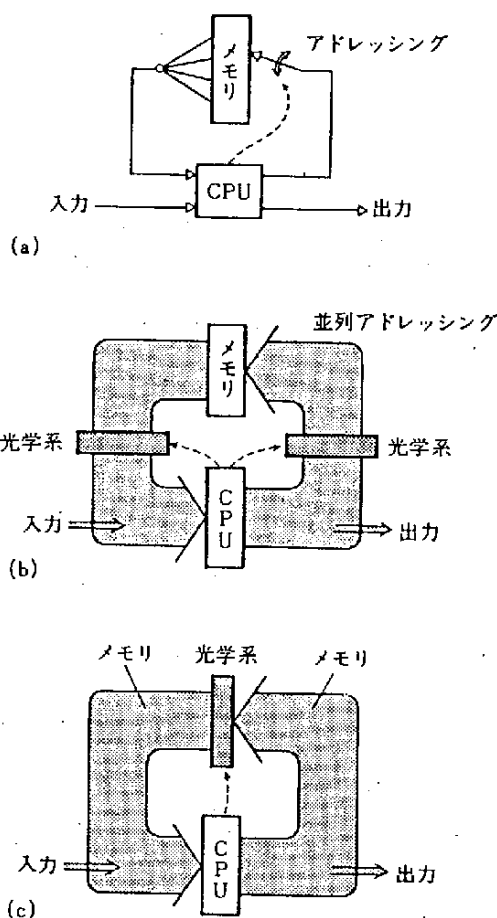
「光」自体が、演算のような情報処理の中核的機能を担おうという技術である。すなわち、いわゆる「光コンピュータ」を指す。

スーパーコンピュータにせよ、パソコンやファミコンにせよ、現在のコンピュータは、その中で電気的なパルスが動き回って、必要とする処理を実行している。使われているハードウェアは、シリコンで作られた論理素子やメモリと、配線用の銅線である。情報の担体を光に置き換え、光パルスに対する光論理素子や光メモリ、そして配線用の光ファイバ（あるいは光ビーム）を使うという光コンピュータを想定することは比較的やさしい。コンピュータの構成方式（アーキテクチャ）は現状のものをそのまま借用すればよいからである。事実、従来の光情報処理の研究の多くの努力は、いわゆる光双安定素子などそのような光論理素子の開発に向けられてきている。このような方向のポイントは、デバイスの速度、消費エネルギーといった基本的性能はもとより、大きさ、信頼性といった実用的ファクタ、そして究極的にはコストパフォーマンスが従来の、例えばシリコンデバイスのそれを上回ることができるかどうかにある。今後の発展を含めたシリコンデバイス技術の現状を念頭に置くと、これはそれほど容易ではないと思われる。

以上のように構成デバイスを光デバイスに置き換えることによって速度や消費エネルギーなどの性能アップを図ろうとするアプローチだけでなく、既に述べた光の並列処理

性を導入することによってコンピュータ全体のシステム的な性能を飛躍的に向上させようとする試みがある。このためには、コンピュータのアーキテクチャ自体を再考する必要がある、これはいわゆるフォンノイマンボトルネック問題（図表6.1-9 (a)参照）の解決にもつながる。米国のベル研究所や南カリフォルニア大などを中心に研究が進められている。例えば、光の並列処理性を活かしメモリ全体を一度にアクセスする方式（図表6.1-9 (b)）や、プロセッサとメモリを一体化して考える方式（図表6.1-9 (c)）などが研究されている。前者では、並列メモリを2次元的に配置する場合3次元空間を利用したアクセス方式が有効になるものと考えられるし、また後者では、3次元空間をそのまま情報のメモリとして使っている。

この種の並列デジタル光情報処理方式技術については、わが国でもロジックアレイの考え方を拡張した大阪大学の演算方式の提案などある。しかし、全般的には問題の大きさに対して研究開発人口も十分ではない。今後のこの分野の一層の進展のためには、独創的なアイデアの提示や、デバイス技術を踏まえたその具体的な構成方式の研究などが必要である。



図表6.1-9 並列デジタル光情報処理方式

(6) 光ニューロコンピュータ技術

ニューロコンピュータについては、7.3で詳述されるので、ここでは省略するが、一般に、そのようなコンピュータでは多数の基本要素が並列的に動作し、情報は分散的に記憶、処理されるというものが多い。そこで、光の並列処理性などを利用して、モデルのシミュレーションを光学的に行うという試みがある。さらに進んで、そのような光を使ったハードウェアを作ることができれば、まさに「光脳」とでも言うべき、既に述べた新しいタイプのコンピュータの実現につながる。

野心的な、未知の分野といってもよいが、最近では幾つかの実験が行われ、専用のチップなども試作されている。

また、ホログラムを使った「連想システム」に関する基礎的な実験の報告もある。これはホログラム中にあらかじめ蓄えられたパターン（例えば、顔写真）の一部分をインプットすることによって、その全体をアウトプットするというものである。

(7) おわりに

以上、光情報処理技術について、最新の動向もまじえ、広い範囲にわたって紹介してきた。ここでは便宜上これを4通りに分類したが、今後、ここにはあげられていない新しい技術も次々と現れてくるものと思われる。紙面の都合で概論に留まらざるを得なかったが、興味をお持ちの方は専門誌あるいは文献などを参照願いたい。

いずれにしても、3次元空間内伝搬という性質を有する光は、今後、新しい情報処理の発展に様々な形で寄与していくものと思われる。

6.2 ハードウェア

情報処理ハードウェアは、それが実空間に存在しているため本質的に3次元形態を有するが、情報処理機能を向上させるためには、その3次元特性を有効に生かす必要がある。

積層型連続処理プロセッサ／超並列プロセッサ／NCUBEなどの3次元コンピュータ、3次元デバイス（3次元IC、3次元OEIC）／面的光デバイス／空間光変調素子／マイクロオプティックス／3次元ホログラム／3次元実装などの3次元情報処理デバイス技術、ホログラム／光インタコネクションなどの超並列伝送技術が注目されている。

6.2.1 3次元コンピュータ

(1) はじめに

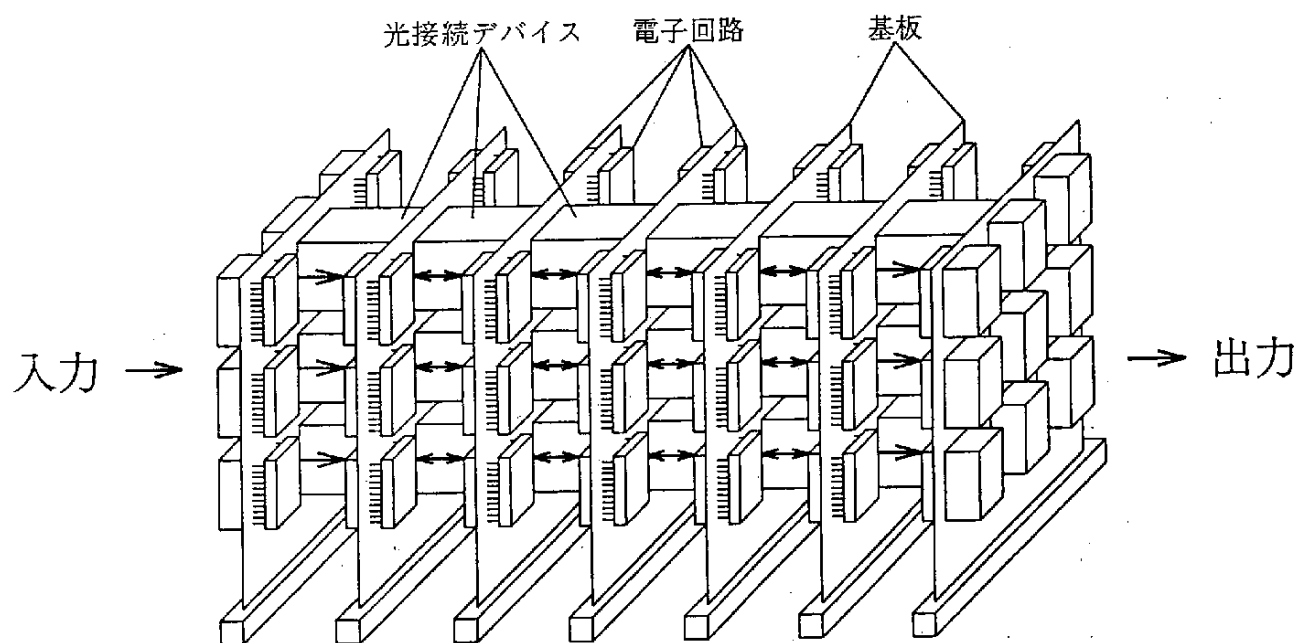
情報を3次元的に処理するコンピュータのイメージとして、①演算素子あるいは演算に関する物質が、3次元連続的に配列されていて、文字通り3次元的に情報を処理するもの、②LSIと同じようなサブミクロンの精度で、3次元方向に素子が配列されていて、ミクロ的には連続的ではないが、3次元的に情報を処理するもの、③2次元の素子が多層に配列されていて、3次元離散的に情報を処理するもの、が考えられる。体積ホログラムを用いた情報処理は、①に含まれるものの一つであるが、まだシステムを構成するようなレベルにはなく、他に、①に含まれるようなものの例も見当たらない。また、②に含まれるようなシステムのアーキテクチャや製作プロセスは、困難を極め、まだ現実的ではない。そこで、③に含まれるようなシステムに限定して、議論を進める。

図表6.2-1は、LSIの実装されたボードやWSIを、3次元方向に離散的に配置し、これらの間を密に配線したもので、③に含まれるシステムの一例である。このようなシステムの中の高密度に実装されたデバイスを電氣的に配線するには、莫大な配線量、信号伝播の遅延、配線路の帯域制限などが問題になる。極端な場合には、装置の中のほとんどの部分が、配線のためのケーブルで専有されたり、システムの速度が、プロセッサやメモリなどの処理速度ではなく、これらの間の通信に要する時間に支配されてしまうといったボトルネックが生じる。

光は、配線路を必要としない性質（高並列）、互いに干渉されずに伝播する性質（無誘導）、搬送周波数が高く、帯域が配線数に依存しない性質（高帯域）、浮遊容量などの影響を受けずに光速で伝播する性質（高速）などを有する。これらの特徴を生かした光配線が実現できれば、電気配線の問題を解決することができる。高機能化された種々のシステム内部の配線は、階層化されており、チップ内、チップ間、ボード間、モジュール間、装置間、システム間に大別することができる。従来、光の配線方法として、光ファイバを用いたネットワークが広く知られており、装置間、システム間といったレベルの光配線は、すでに光LANとして実用化されている。しかし、ボード間、チップ間といったレベルの光配線は、配線量が膨大であるために、まだ、実用化されていない。

多数のプロセッサを結線した超並列処理コンピュータを想定した場合、従来は、主にボード間の配線の問題から、ビット長の長いプロセッサを配列させることはできなかった。例えば、 $N \times N$ 個のプロセッサが実装されているボードを組合せて、全体で、大き

な2次元のメッシュ状にプロセッサを接続したと仮定すると、ボード間の配線数は、1ビットプロセッサの場合に $[3 \times 4N]$ 本であるが、32ビットプロセッサの場合には、パラレルに接続すると、少なくとも $[34 \times 4N]$ 本になる。さらに、これらのプロセッサが、3次元的に接続されている場合、その数は、 $[34 \times (2N^2 + 4N)]$ 本に達する。例えば、 $N = 32$ の場合には、それぞれ、390本、4,400本、74,000本になり、32ビットマルチプロセッサのボード間パラレル配線のような膨大な配線は、もはや電気や光ファイバなどの配線路を用いた方法では、不可能である。一方、光は、配線路のない自由空間を交錯して伝播できるので、この特長を生かした光配線法が実現できれば、配線数を飛躍的に高めることができる[1]。この項では、3次元コンピュータを構成する上で、重要な技術になると考えられる、空間光配線法の現状と課題について述べる。



図表6.2-1 3次元光コンピュータの実現イメージ

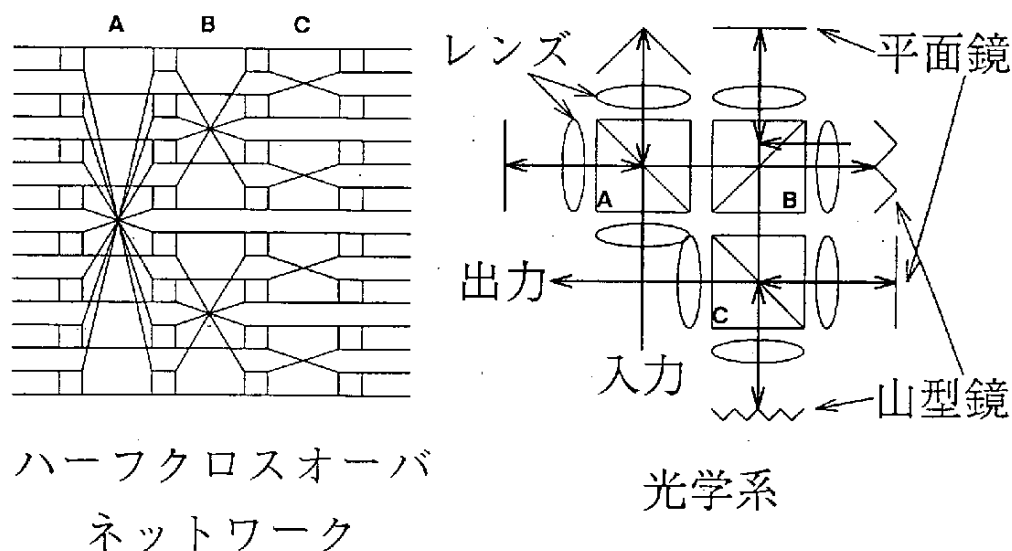
(2) ホログラムを用いた光配線

ホログラムは、入射光に対して、任意の光配線パターンを作ることができるので、光配線の手段として、もっとも古くから研究されている。すでに、電子デバイスのチップ間を配線した報告[2]やパーフェクトシャッフル配線を実現した報告[3]がある。これらの方法の問題点は、光利用率が低いことと素子を小さくできないことにある。ホログラムでは、位相を完全に変調できれば、100%の回折効率が得られるが、そのようなホログラムを記録する材料が乏しいために、実際には、振幅変調型や正弦波状の表面レリーフ

型にする場合が多い。この場合の回折効率は、たかだか30%程度であり、残りの光は、不要な回折光としてノイズになる。また、ホログラムの再生パタンの解像限界は、ホログラムの大きさに反比例するので、ホログラムを小さくすると、解像度が悪くなる。

(3) 鏡を用いた光配線

微小な鏡を多数配列し、結線したい方向に光を反射させれば、空間的な光配線が可能である。このような原理に基づき、プリズムを用いて、クロスオーバーと呼ばれるセルフルーティングなネットワークを構成した報告がある[4]。その光学系とネットワークの構成を図表6.2-2に示す。入射光は、ビームスプリッタによって、ネットワーク内の直進と偏向の配線にわけられ、直進の成分は、平面鏡によって反射され、偏向の成分は、プリズムの機能を持った山型の鏡によって、反射される。それぞれの光を再び合波すると、ネットワークの一段分の配線が得られる。合波した光を、ピッチの異なる山型の鏡によって複数回反射させれば、ネットワーク全体の配線が実現される。他に、フレネルミラーを用いて、パーフェクトシャッフルを実現した報告がある[5]。

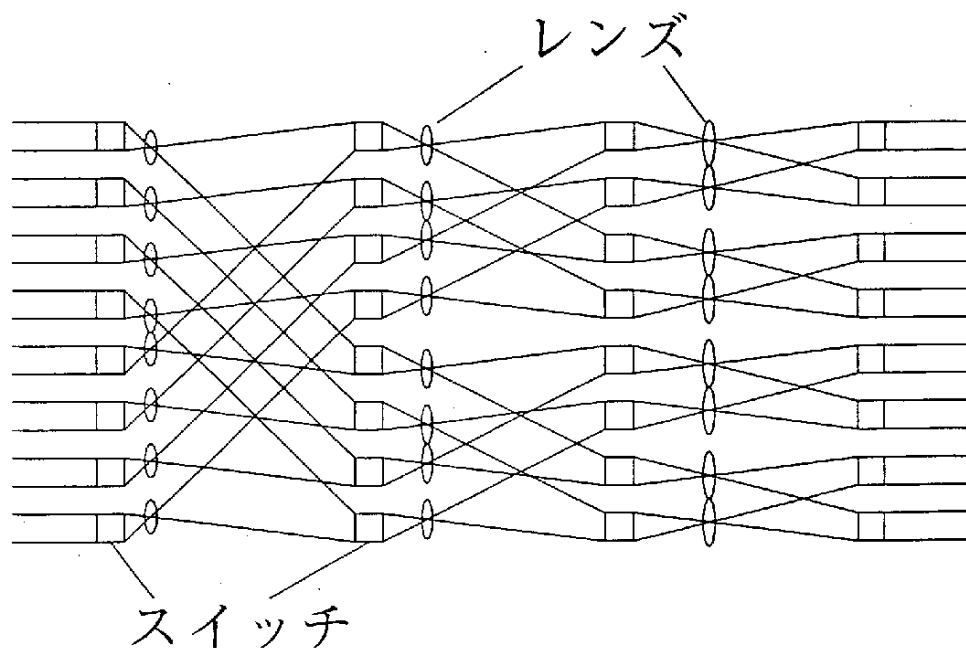


図表6.2-2 鏡を用いたクロスオーバーネットワーク

(4) レンズを用いた光配線

レンズによって、入力面の発光素子の像を、出力面の受光素子の上に結像させて、基本的な結線ができれば、高光利用率で単純構成の光配線が実現できる。入出力面の素子に対するレンズの位置を工夫することによって、シャッフル配線[6]やバタフライ配線

[7]を実現した報告がある。図表6.2-3 は、バタフライ配線を組合せたバンヤンネットワークの光学系を示したものである。配列の異なったレンズを複数段組合せることによって、ネットワーク全体の配線が実現される。各段のレンズは、それぞれ同一面上に配置されているので、マイクロレンズのように、アレイ状に一体化されているレンズを用いて、配線することができる。

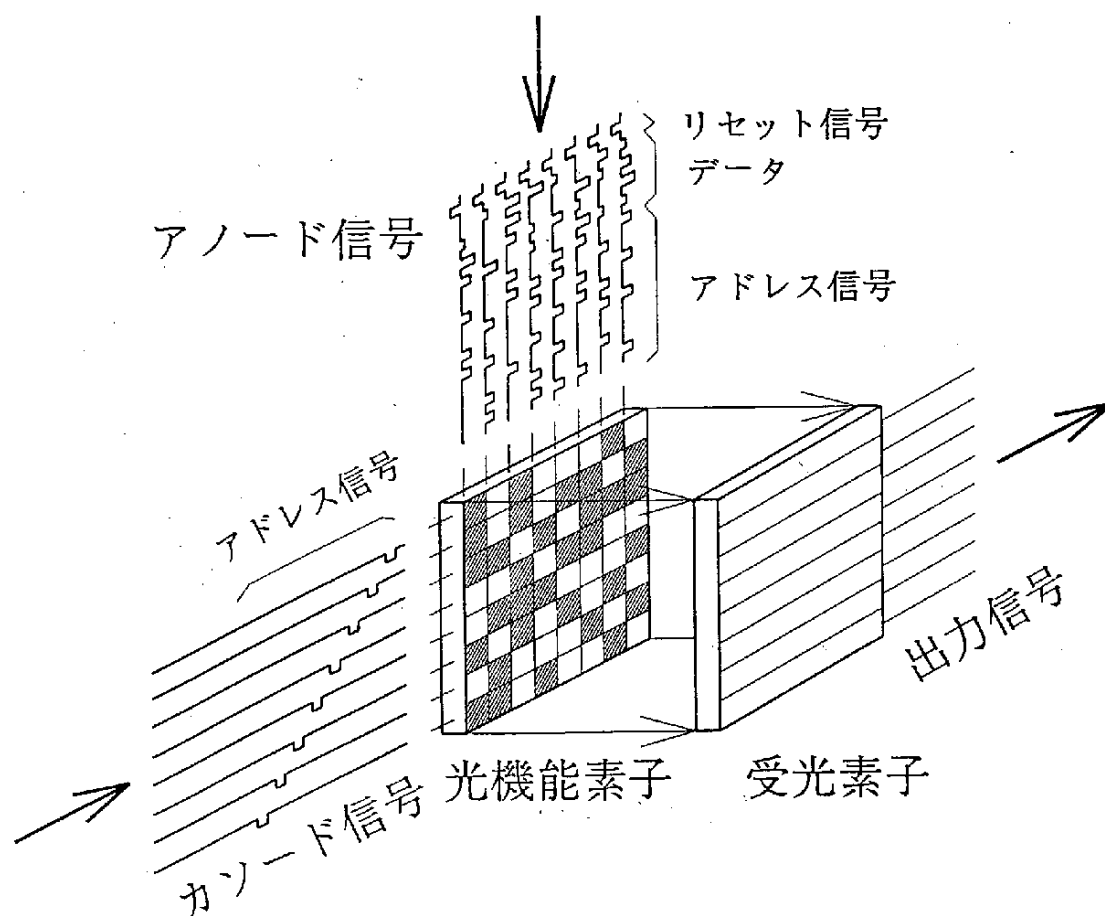


図表6.2-3 レンズを用いたバンヤンネットワーク

(5) 再配置可能な光配線

今までに述べた光配線法は、いずれも固定の配線であり、それらを用いて、再配置可能な接続を行うためには、多段のネットワークを構成して、間にスイッチを設けなければならない。再配置可能な接続を行うには、光の方向を自由に制御できるようなデバイスを用いることが理想的であるが、現状では、実用に耐えるようなものはない。この問題を解決するために、まず、1次元の入出力素子アレイ間の光路をマスクの透過率で制御する空間光クロスバ接続法が提案され[8]、[9]、ブロードキャストな接続ができるようになった。さらに、この接続法において、メモリ機能を持った発光素子をマトリクス

駆動することによって、再配置可能な光配線が、実現できるようになった[10]。図表 6.2-4 は、再配置可能な光クロスバ接続法の原理を示したものである。入力側の素子は、マトリクス状に配線されており、始めに、アノードとカソードのアドレス信号の組合せによって、発光させる素子を決める。その後、素子にデータを流すと、あたかも短冊状に素子が接続されたような構成で、しかも、アドレスされた素子のみが発光する。このような光クロスバ接続法では、 N^2 の素子を用いて、 N の配線しか実現できないことが問題である。



図表6.2-4 再配置可能な光クロスバ接続法

(6) 空間光配線法の問題点

空間光配線法は、配線路を必要としないために、膨大な配線を実現する可能性がある。しかし、これを実現するためには、①素子の位置ずれ、②消費パワー、③素子を集積したチップ間の配線、④素子の駆動方法などの問題を解決しなければならない。以下に、これらの問題点について議論する。

空間的な光配線法では、各素子の空間的な位置は絶対的なものであり、常に安定な配線経路を確保できる環境が必要である。図表6.2-1のような構成では、光素子が実装されているボードやWSIの振動や熱による変形などによって、それらの素子が、空間的に定められた位置からずれる可能性がある。この問題の一つの解決方法として、2つの面型の光素子をチップ状に貼り合わせた報告がある[11]。しかし、このように、複数の素子を一体化してしまうことは、一種の配線路を形成することになり、空間を伝播するという光の特長を犠牲にする可能性がある。この問題は、空間光接続法を実現するための一つの重要な課題である。

次に、構成上、配線数を確保できたとしても、光素子の効率が悪いために、多数の能動素子を集積できない問題がある。例えば、現在、安定に発振できる半導体レーザの閾値電流は、もっとも低いものでも数mA程度であり、このような素子を集積化した場合には、数百程度の配線が限界である。従って、素子の閾値電流は、将来、少なくとも $100\mu\text{A}$ 程度以下に抑えられなければならない。

最後に、もっとも重要な課題として、光素子のチップ間の配線と駆動方法の問題がある。各光素子を同時に駆動する場合には、光素子が集積されているチップの外に、少なくとも、素子と同数のピンが出ていなければならない。さらに、光素子を駆動するためのドライバとの間の配線のことも考えると、光素子間の配線数が、光素子とそれ以外の素子との配線の数によって、決まってしまう。この問題の一つの解決方法として、前述の光機能素子を用いた空間光クロスバ接続法がある。この方法によれば、光路の切り換えに N クロックを必要とするが、 N^2 の配線を $2N$ に減らすことができる。この問題のもっとも理想的な解決方法は、電子デバイスをGaAsで作るか、Si上にGaAsの光デバイスを形成するか、あるいは、Siを発光させ、電子デバイス、光素子、ドライバを一緒に集積化することである。信号を送ったり受けたりするデバイスのそばに、光素子やそのドライバがあれば、無駄な配線を省くことができる。

(7) まとめ

以上、この項では、3次元コンピュータのハードウェアの中で、特に重要な要素になるであろうと考えられる配線の問題について、現状と課題について述べた。今後、面型の光素子とその実装技術の進歩が期待される。

【参考文献】

- [1] J.W. Goodman et al.: "Optical interconnection for VLSI systems",
Proc. IEEE, Vol. 72, No. 7, pp. 850-866 (1984)
- [2] R.K. Kostuk et al.: "Optical imaging applied to microelectronic chip-to-
chip interconnections", Appl. Opt., Vol. 24, No. 17, pp. 2851-2858 (1985)
- [3] A.W. Lohmann et al.: "Optical perfect shuffle", Appl. Opt., Vol. 25, No. 25,
No. 10, pp. 1530-1531 (1986)
- [4] J. Jahns and M. J. Murdocca: "Crossover networks and their optical
implementation", Appl. Opt., Vol. 27, No. 15, pp. 3155-3160 (1988)
- [5] Y. Sheng: "Light effective 2-D optical perfect shuffle using Fresnel
mirrors", Appl. Opt., Vol. 28, No. 15, pp. 3290-3292 (1989)
- [6] A.A. Sawchuk and I. Glaser: "Geometries for optical implementations of the
perfect shuffle", SPIE, Vol. 963, pp. 270-282 (1989)
- [7] 河合他: "レンズアレイを用いた面光接続法", 第36回応用物理学関係連合講演会
講演予稿集 3a-ZA-3, p. 795 (1989)
- [8] D. Psaltis and N. Farhat: "Optical information processing based on an
associative-memory model of neural nets with thresholding and feedback",
Opt. Lett., Vol. 10, No. 2, pp. 98-100 (1985)
- [9] R.A. Athale et al.: "Optical implementation of associative memory with
controlled nonlinearity in the correlation domain", Opt. Lett.,
Vol. 11, No. 7, pp. 482-484 (1986)
- [10] 河合他: "セルフアドレス可能な空間光クロスバ接続", 電子通信情報処理学会技
術報告 Vol. CPSY89, No. 61, pp. 13-20 (1989)
- [11] J. Ohta et al.: "GaAs/AlGaAs optical interconnection device for neural
networks", Opt. Lett., Vol. 14, No. 16, pp. 844-846 (1989)

6. 2. 2 3次元情報処理デバイス

超並列分散処理システムや大規模ニューラルネットワークシステムの実現には、これらの処理に適したアーキテクチャ、ソフトウェア、ハードウェアが必要である。

超並列分散処理や大規模ニューラルネットワークを考えた場合、プロセッサ間あるいは

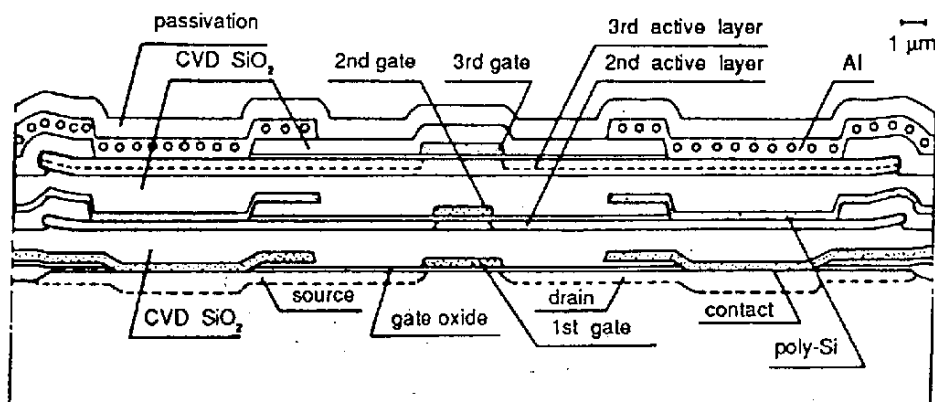
ニューロン間の配線数は膨大なものとなる。また、効率のよい情報のやりとりを行わなければ、並列度を上げて処理速度の向上につながらないことになる。従って、これらのシステムに用いられる処理デバイスとしては、3次元的な構造を持つものと予想される。ここでは、VLSI技術の一つの方向である3次元ICならびに次世代の情報処理として注目されている光情報処理デバイスについて述べることにする。

(1) 3次元IC[1]

3次元ICの主な特徴は、以下のようにまとめられる。

- (i) 高密度の実装が可能である
- (ii) 高速処理が可能である
- (iii) 並列処理が可能である

具体例を図表6.2-5に示す。3層の構造であり、各層ごとに固有の配線を持ち、各層は独立に動作可能であるとともに、層間はバイアホールによって電氣的に接続されて、層間での信号のやりとりが行える。



図表6.2-5 3層の3次元ICの構成例[1]

(2) 光情報処理デバイス

3次元構造をもった処理デバイスとして光を利用したものが、将来活用されることが予想される。

(a) 光結線デバイス[2]

超並列分散処理システムには、3次元的な光結線が重要な要素技術となると期待さ

れる。結線に使用するデバイスによって以下の3通りに分類される。

(i) 光ファイバ結線

マルチプロセッサシステムにおいてプロセッサ間の光バス接続が実証されている[3]。

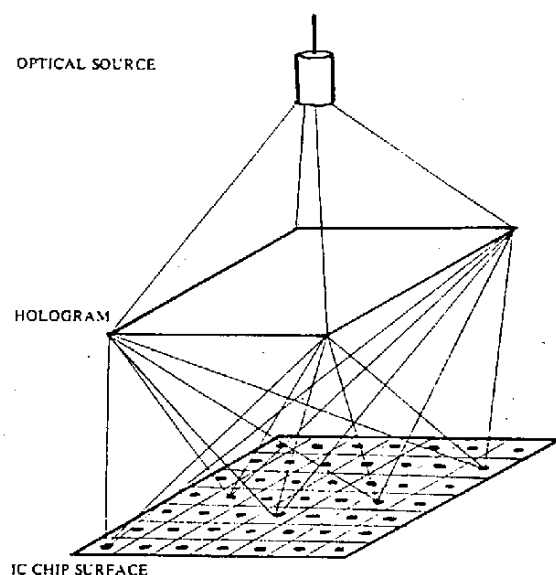
(ii) 導波路結線

光導波路を用いてボード内のチップ間の結線を行い、さらにボード間をファイバ結線する3次元的な構成が考えられる。

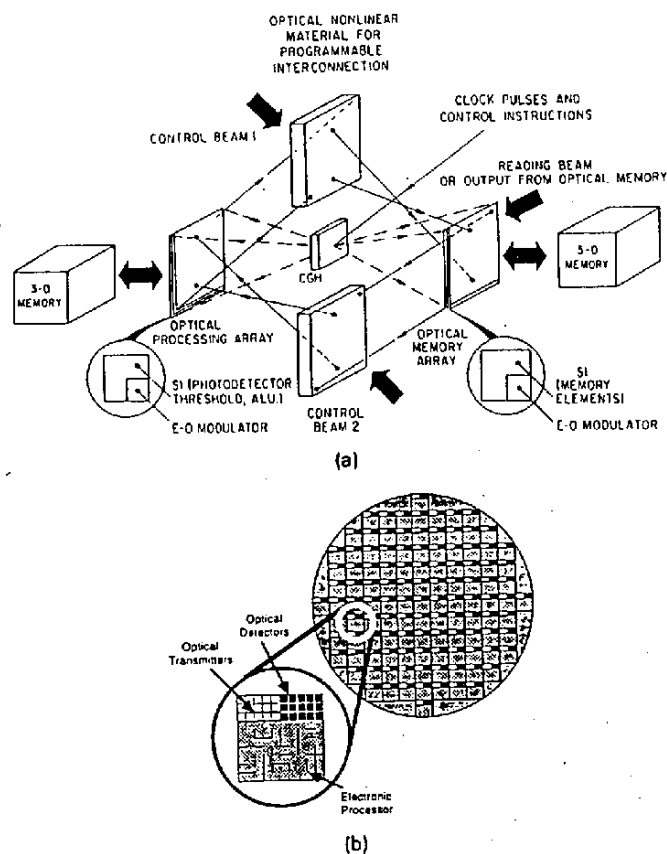
(iii) 自由空間結線

図表6.2-6に示すような、計算機ホログラムを用いて自由空間におけるクロック信号の分配が実験的に行われている[3]。また、図表6.2-7に示すように、VLSIベースのアレイプロセッサを3次元的に並列光接続するPOEM(Programmable Optoelectronic Multiprocessor)システムが提案されている[5]。

光結線は、今後、着実に発展が予測される重要な技術である。



図表6.2-6 計算機ホログラムを用いたクロック信号のチップへの分配の構成図[4]

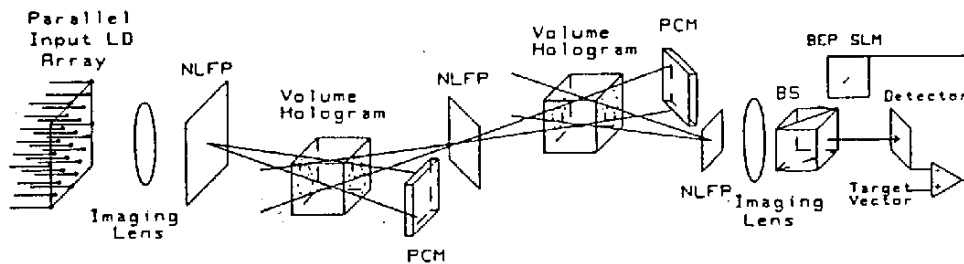


図表6.2-7[5] (a) POEMのシステム構成
(b) POEMにおけるOEICの構成図

(b) 光ニューロデバイス

脳の神経回路網は3次元的な構造をもつ立体回路網である。前述の光結線において結線の強さを制御できれば、シナプス結合が実現できる。このようなデバイスとして、各種の空間光変調器や図表6.2-8に示すような光屈折結晶を用いた体積ホログラム[6]が研究されている。

将来の大規模ニューラルネットの実現にはキーとなる技術であり、システム、デバイス両面からの今後の研究が必要である。

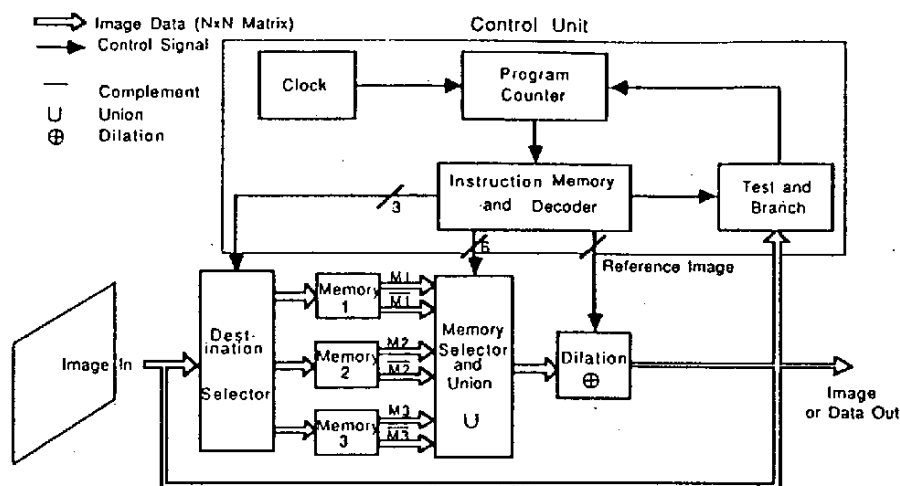


図表6.2-8 体積ホログラムによる光結線を用いた3層のニューラルネットの構成の提案システム [6]

LD : 半導体レーザ、NLFP : 非線形ファブリーペロー、
PCM : 位相共役鏡、BEP SLM : 誤差逆伝播のための空間
光変調器

(c) 3次元光処理用デバイス

さらに演算部も光で行う3次元的な構成をもつ並列デジタル光演算が研究されている。様々な構成が提案されているが、具体例として図表6.2-9に示すような2値画像の並列処理を目的としたDOCIP(Digital Optical Cellular Image Processor)があげられる[7]。本システムでは符号置換といわれる新しい演算原理を実現できる。



図表6.2-9 DOCIPのシステム構成 [7]

これらの並列デジタル光演算の実現には、構成デバイスとしてLDアレイなどの面発光デバイス、光論理素子アレイ、OBICなどの研究が必要である。

次世代の情報処理である超並列分散処理や大規模ニューラルネットの実現には、3

次元的なハードウェアは不可欠である。しかしながら、現状では、実際に実験されているものはまだまだ基礎段階である。並列処理のアーキテクチャ側からの研究と同時にデバイス側の進歩が必要である。

【参考文献】

- [1] R. Shankar and E. B. Fernandez : "VLSI and Computer Architecture"
(VLSI Electronics Microstructure Science vol.20, Academic Press).
- [2] 武田光夫 : " 光インターコネクション" 応用物理, vol. 56, 361(1987)
- [3] O. Stucky, R. L. Shoemaker, R. Manner, and P. H. Bartels : "Optical
Interconnection for Multiprocessor Computer Bus System ", Opt. Eng. vol.28,
1185 (1989)
- [4] B. D. Clymer and J. W. Goodman : "Optical Clock Distribution to Silicon
Chips", Opt. Eng. vol. 25, 1109(1986)
- [5] F. Kiamilev, S. C. Esener, R. paturi, Y-Fainman, P. Mercier, C. C. Guèst, and
S. H. Lee : "Programmable Optoelectronic Multiprocessors and Their
Comparison with Symbolic Substitution for Digital Optical Computing ", Opt.
Eng. vol.28, 396(1989)
- [6] K. Wagner and D. Psaltis : "Multilayer Optical Learning Networks ", Appl.
Opt. vol.26, 5061 (1987)
- [7] K. S. Huang, B. K. Jenkins, and A. A. Sawchuk : "Image Algebra
Representation of Parallel Optical Binary Arithmetic", Appl. Opt. vol.28,
1263 (1989)

7. 新しい情報処理

「次元」を物理的にとらえず、自由度として扱う新しい情報処理の開拓が重要である。

ハイパープロセッサ／多次元コネクションマシンなどの多次元情報処理、知的創造型コンピュータ／想像コンピュータ／判断プロセッサなどの知的コンピュータなどが、その一例として提示された。

以下では、WG委員の個人的なコメントを中心にこれらに関して述べる。

7.1 多次元情報処理

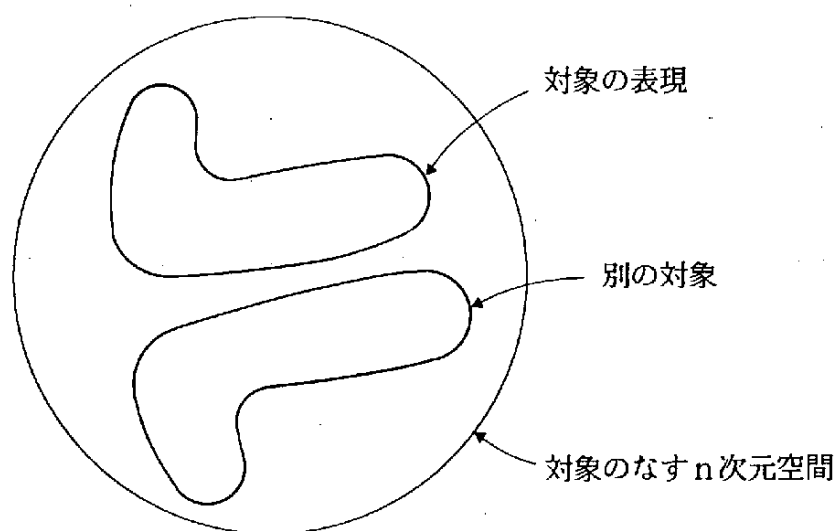
我々人間が生活する空間は、まぎれもなく3次元空間である。従って、情報処理というものが最終的に人間の生活に活かされるものであるとするならば、少なくとも人間へのインタフェースの部分は3次元空間あるいはその部分空間でなくてはならない。すなわち、行われる情報処理の内部構造がどうであれ、処理の対象も処理装置の構造も3次元空間という窓、つまりニュートンの物理学が通じる世界から通して見るほかない。

しかし、このことがそのまま情報処理の構造までも3次元でなければならないということにはつながらない。対象としての3次元情報を考えてみても、対象の存在する座標空間は3次元であるが、そこに存在する情報の構造は3次元ではなく、より広く n 次元としてとらえなければならないことがわかる。例えば、ある物体の存在を考えてみよう。形状の情報は3次元であるとしても、各点の密度や物質の情報、表面の色の情報あるいは分光反射率分布の情報、ひいてはその物体の機能や存在の経緯までが情報となる。これらはすべてこの物体の存在や特徴を表現するものであり、これらすべての情報で張られる空間上でこの物体を表現する一つの分布が規定されることになる。つまり、物体は n 次元空間内の集合を規定し、その特徴はトポロジ問題として扱うことができる。この様子を図表7.1-1に示す。

さて、今までは対象の情報として静的で確定的な情報を扱ってきたが、そこに不確定的な情報や動的な変化を導入することを考えてみよう。例えば、ある情報（密度でも色でも位置でもよい）が何らかの確率分布を持つものとすれば、それもまた考えている確率分布の総体の中で一つの構造を持つものと考えればよい。動的な変化も同様の扱いができる。これらの構造の上で処理を考えれば、対象の構造的な特徴が見えてくる。測定はこの空間か

らの射影として記述される訳である。又は、処理の目的の空間への射影を考えればその構造も見えてくる（図表7.1-1）。これが情報の柔らかい表現であり、多次元情報処理の主体である。

しかしながら、これらの考え方は多分に理想論であり、一般的な枠組みを与えるにはもっと整理された形にしなければならない。この点に関してはセンサフュージョンなどで議論されている。つまり、種々の出力空間を持つセンサ情報からもとの対象の構造を導き出す問題となるわけである。この際、処理を記述するためには、何らかのモデルを用いる訳であるが、実は、このモデルはバックにある n 次元構造に対して人間の深い洞察により、モデルの空間への射影として導き出されていると考えられる訳である。従ってゆるいモデル化を記述する一般的方法さえ存在すれば、その中の不変的構造の抽出が多次元情報処理の中心である。



図表7.1-1 多次元情報処理

7.2 知的コンピュータへの一考察

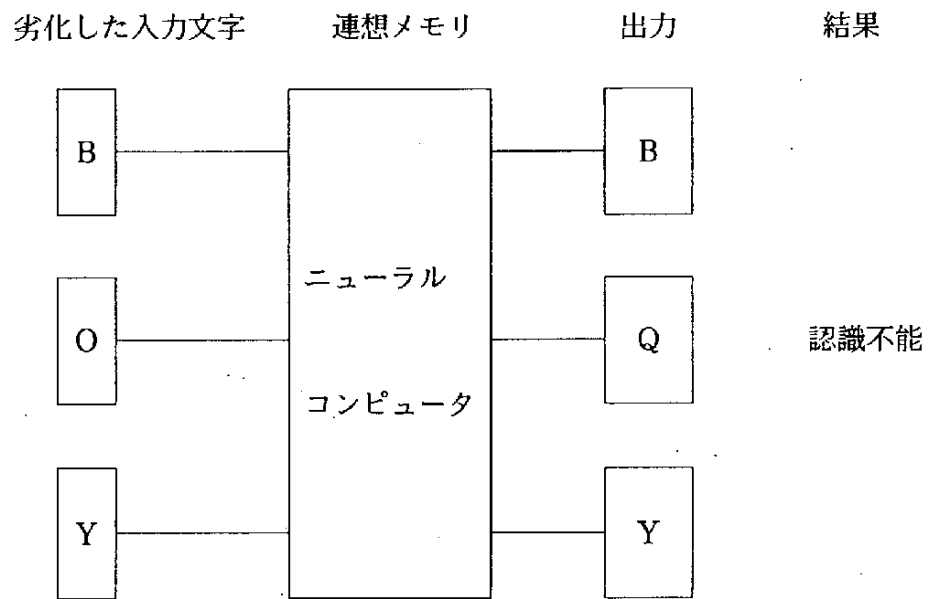
従来のフォンノイマンタイプの計算機が左脳型であるのに対し、ニューラル方式は右脳型と言われているが、今後の新しい情報処理の一つとして、両者を効果的に用いることが考えられる。これは、人間の思考過程において、論理的及び直感的な発想を用いていることから、人間の脳を模した計算機を開発するためには、重要な項目となる。ここでは、左脳と右脳を統合する事により実現される機能を用いた、新しい情報処理手法の可能性を考

察する。

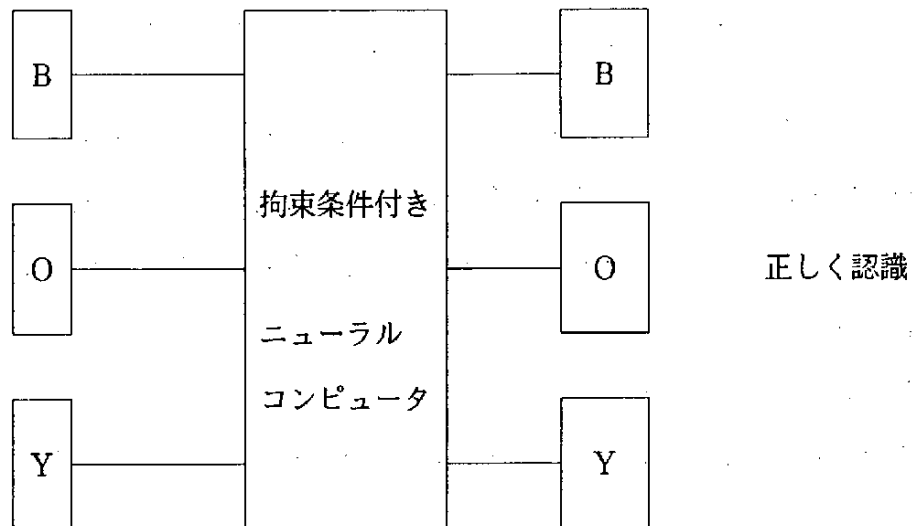
人間の脳が持つ偉大な機能として、各種の情報を統合して、与えられた状況を予測する想像力、及び過去において取得した経験と、新しい発想を組合せる創造力がある。これら2つの機能は、その思考過程において、前述した左脳と右脳の両者を用いていると思われ、本説での知的コンピュータが持つ最も重要なものである。例えば、図表7.2-1に示されるような、かすれてしまった単語等を読むことを考えてみよう。1文字ずつ相互の関連を考慮せずに認識する手法では、劣化した文字を読める可能性は、その劣化の程度そのものに依存してしまう。より具体的に述べれば、認識手法として、ホップフィールドタイプのニューラルネットによる連想メモリー方式を用いると、劣化した文字像に最も近いものを、学習により取得された文字群から連想する。しかし人間の認識過程では、例えば意味が通じない候補を排除して、最も理にかなったものを想像する。このプロセスは、まさしく右脳と左脳の両方を相補的に用いていると言える。現実には、ニューラルネット型コンピュータを、従来のシリアル型コンピュータで、制御・統括することにより実現されると予想される。

このように想像力を持つ知的コンピュータを開発するためには、右脳及び左脳に対応するハードウェアの開発と、それらを有機的につなぐシステムのデザインを研究する必要がある。さらに、そのようなシステムに創造力を持たせるための研究を推進するべきである。

(a) 従来の連想メモリを用いた文字認識



(b) 想像力コンピュータによる文字認識



図表7.2-1 想像力コンピュータが持つ機能の概念的説明

従来のホップフィールド型ニューラルネットでは、連想メモリ機能により、劣化した入力像“O”を“Q”と出力してしまう場合でも、想像力コンピュータでは、B Q Yは認識不能から“Q”に対し連想禁止を行うことで、“O”を正しく出力することが出来る。

7.3 ニューロコンピュータ

(1) 人工ニューラルネットの分類

現在研究されている人工ニューラルネットへのアプローチを分類すると図表7.3-1 のようになる。

図表7.3-1 人工ニューラルネットの分類

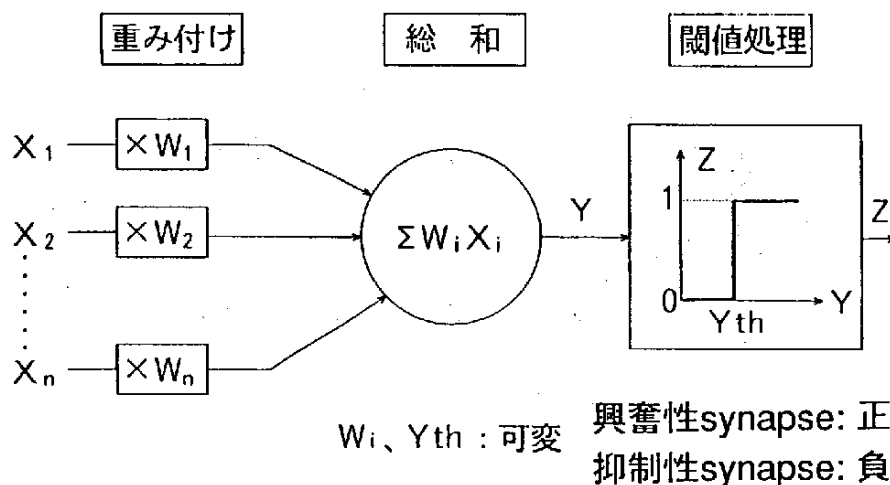
	フィードフォワード型		フィードバック型	
	静的デジタル	静的アナログ	動的デジタル	動的アナログ
決定論的	論理関数の形成 (Perceptron)	連続関数の形成 (BP法)	離散型力学系の形成 (オートマトン)	連続型力学系の形成 (Hopfield ネット)
確率論的	——	——	有限マルコフ連鎖の形成 (Boltzmannマシン, Gibbsマシン)	連続関数の形成 (Gaussマシン)

従来は決定論的なアプローチが主体であったが、最近では多数のニューロンを使用して自己組織的な動きをさせる確率論的なモデルの研究も進んでいる。

本節では、この内フィードフォワード型の静的アナログ型の決定論的モデルを中心に解説する。

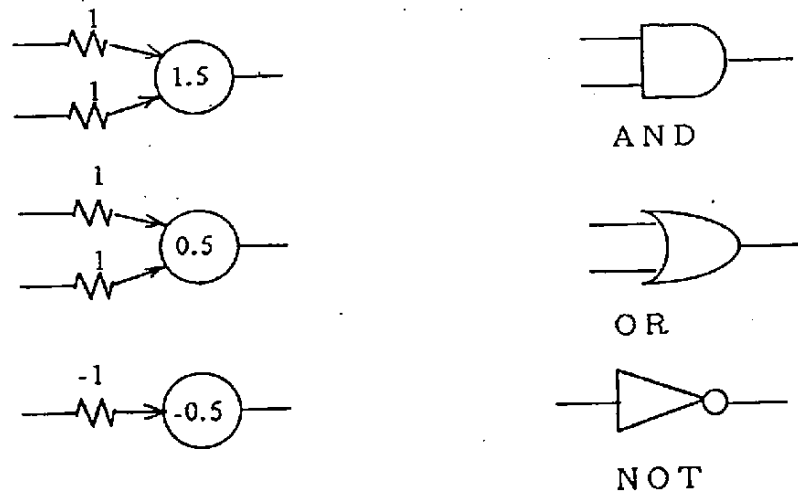
(2) デジタル型のニューロンモデルとアナログ型ニューロンモデル

静的デジタル型のニューロンモデルの仕組みを図表7.3-2 に示す。



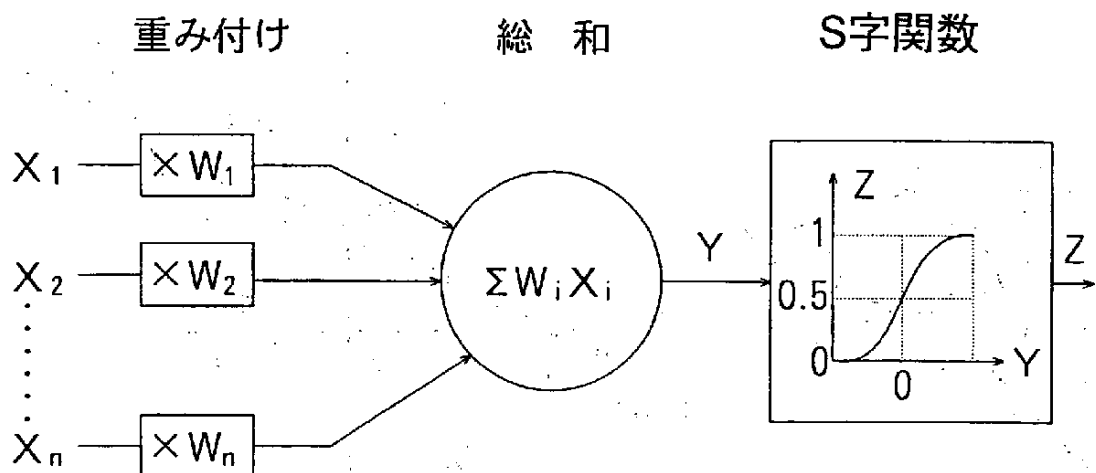
図表7.3-2 デジタル型のニューロンモデル

これは McCullochとPitts により1943年に提唱されたものであり、パーセプトロンはこのモデルを応用したものである。このモデルを利用すれば、AND、OR、NOT などの論理関数の表現も可能である（図表7.3-3 を参照）。ただし、このような論理関数はあえてニューロンモデルで実現する必要はなく、従来のスイッチング回路の方が効率的である。



図表7.3-3 デジタル型のニューロンモデルによる論理回路

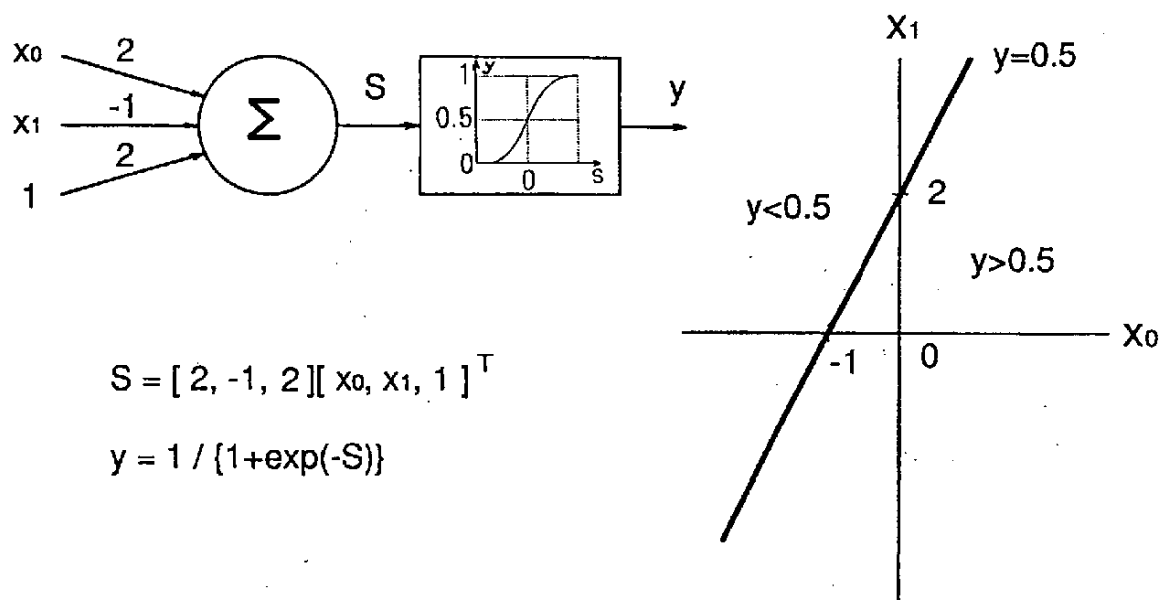
一方、静的アナログ型のニューロンモデルの仕組みは図表7.3-4 のように表される。



図表7.3-4 アナログ型のニューロンモデル

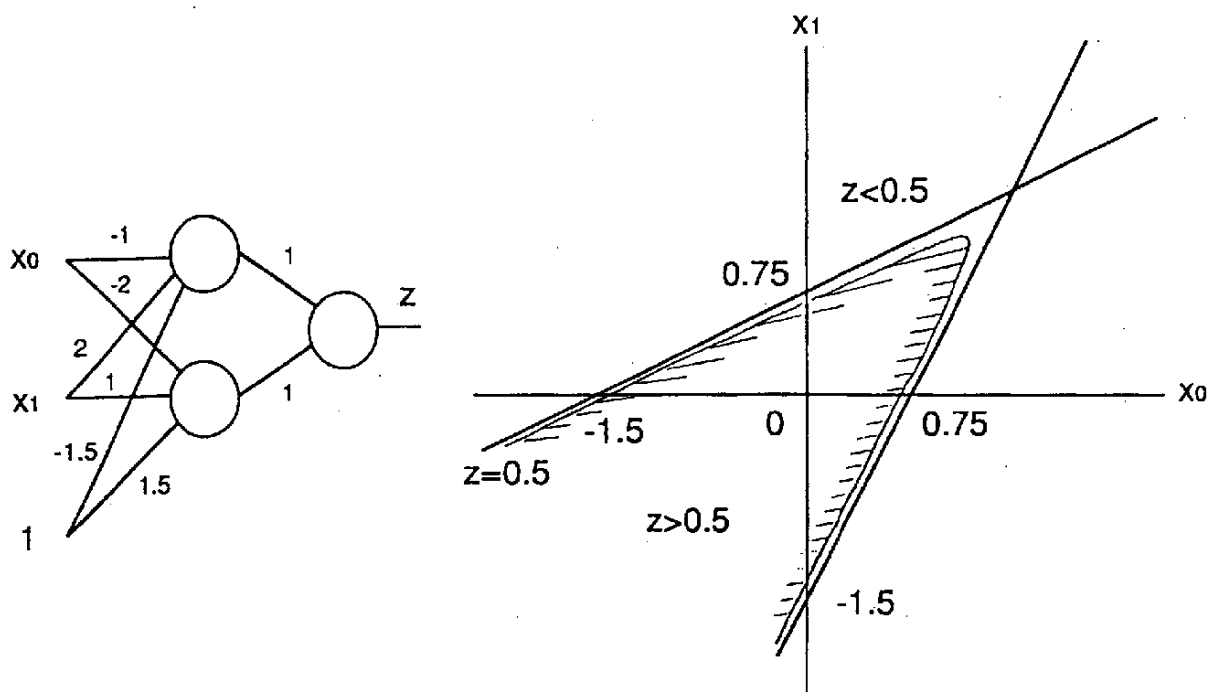
デジタル型との差異は、閾値処理の代わりにS字関数（Sigmoid function）と呼ばれる連続関数を取入れている点である。これにより出力と重みの関係を微分方程式で表すことが可能になっている。S字関数は、連続的なものであればどのような関数を使用してもよいが、一般的には図表7.3-5 に示すような比較的単純な式で表される関数が用

いられる。



図表7.3-5 アナログ型ニューロンモデルの計算

図表7.3-5 では1つのニューロンが線形分離機能を持っていることを表している。そしてニューロンを階層化することにより非線形の識別が可能になる（図表7.3-6 を参照）。



図表7.3-6 階層化による非線形識別

図表7.3-6 ではニューロンを2階層に階層化することにより、出力 z が 0.5 より大きい範囲を規定することができる。

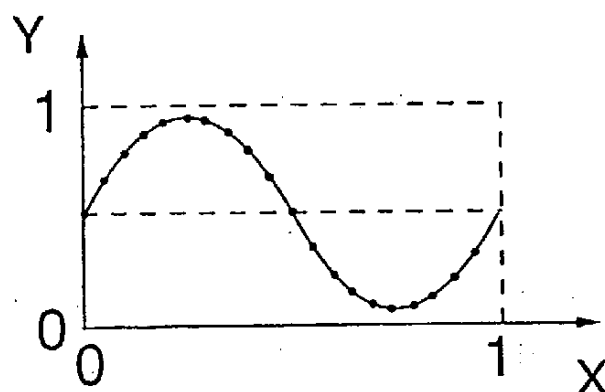
(3) ニューロンモデルにおける学習法

学習における重要な問題点として、いかにしてローカルミニマムを避けてグローバルミニマムに到達するかという点があげられる。この点に着目して現在利用されている各学習法を比較してみる。

現在、一般的に利用されている学習法としては、最急降下法とバックプロパゲーション法がよく知られている。バックプロパゲーション法は最急降下法の変型とも言えるが、1回前の重みの変更量を記憶しておき、これをフィードバックさせる仕組みを取り入れて自己調整を可能にしている。

しかし、バックプロパゲーション法では、重みの初期値を乱数で与えるため、初期値によってはローカルミニマムに落ち込んでしまい、なかなか抜け出すことができなかったり、フラットな部分に乗ってしまい、学習がなかなか進まないといった場合がある。この問題を逃げるために、新たに考案された仮想インピーダンス法と呼ばれる学習法は、2回前の重みの変更量まで記憶させる方法である。仮想インピーダンス法では、重みを振動させることによって強制的にローカルミニマムやフラットな部分から抜け出させることにより、グローバルミニマムに早く到達させる。

この3種類の学習法を、同一のシミュレーションに応用してその結果を比較する。シミュレーションは図表7.3-7に示すようなサインカーブの1周期上の20個の点のX座標を入力して、10個の中間層を持つネットワークで学習を行い、Yの値を出力させるものである。

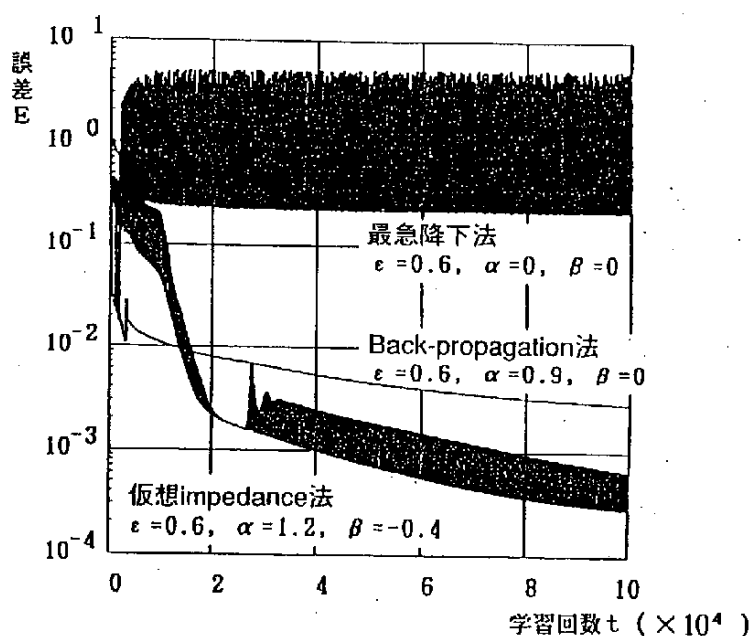


$$Y = \frac{2}{5} \sin(2\pi X) + \frac{1}{2}$$

教示 pattern

図表7.3-7 各学習法の比較のためのシミュレーション

このシミュレーションの結果を表したものが図表7.3-8である。



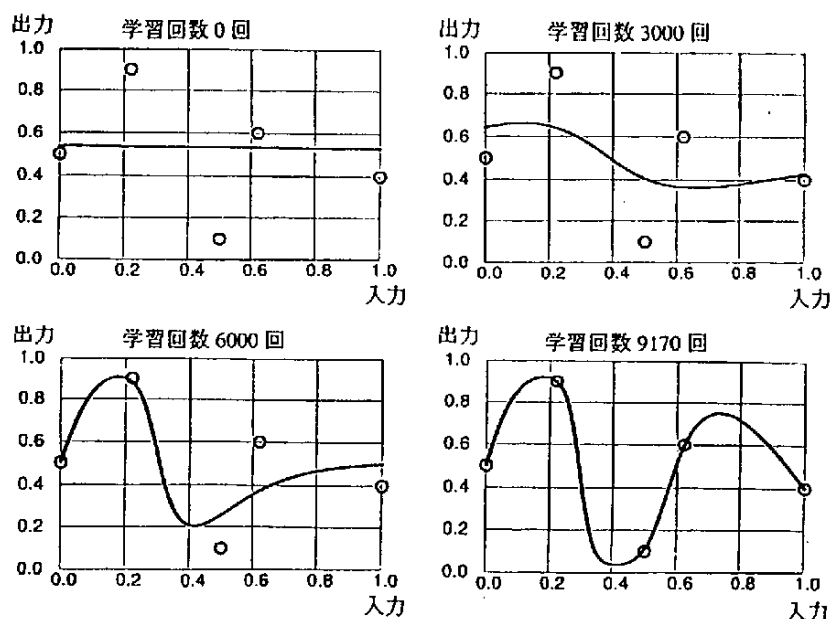
図表7.3-8 同一シミュレーションによる各学習法の比較結果

図表7.3-8の中で ϵ は学習常数、 α は1回前の学習結果に対する記憶、 β は2回前の学習結果に対する記憶を表している。学習常数を小さくすれば振動は収まるが、その分学習回数を飛躍的に増大させなければならないため現実的ではない。

図表7.3-8の結果では、最急降下法は学習回数を増やしても誤差の振動は収まらないが、バックプロパゲーション法では、フィードバックを行うことにより振動が抑制されている。ただし、バックプロパゲーション法では、抑制が効き過ぎてローカルミニマムに止まってしまう場合もあり得る。これに対し、仮想インピーダンス法では2回前の学習結果まで考慮して、2次の運動方程式で表される機械インピーダンス制御と等価な制御を行い、系を適当に振動させたりダンピングをかけたりすることにより、ローカルミニマムに陥らずにグローバルミニマムに達することができる。図表7.3-8の結果によれば、学習回数が少ない場合にはバックプロパゲーション法の方が優れているが、学習回数が増やすにつれて仮想インピーダンス法の方が若干の振動はあるものの効果が大いことが分かる。

(4) 階層ネットワークの関数生成機能

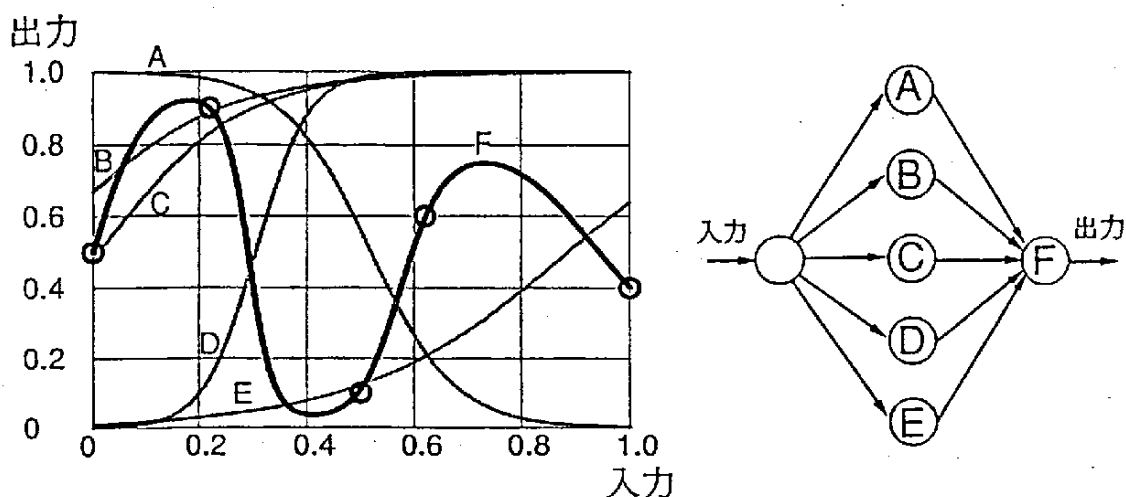
ニューラルネットワークを階層化し、学習回数を増大させることにより、高次の非線形関数をネットワーク内に取込むことが可能である。図表7.3-9にその例を示す。



図表7.3-9 非線形関数の学習による獲得

この例では、X軸を入力、Y軸を出力としてあらかじめ任意の5点の値を与えておき、学習を重ねることによってこれら5点を通る高次の関数を実現されることが分かる。

このような学習を行ったときに、ニューラルネットワーク内でどのようなマッピングの構造を作り出したのか (internal representation : 内部表象) を表したものが図表7.3-10である。



図表7.3-10 3層ネットワークの関数生成機能

図表7.3-10では学習が終了したときにニューラルネットワークの5つの中間層 (A～E) が、各々どのような関数を取得したのかを表している。これらは全てS字関数ではあるが、各々傾きや場所が異なっている。そしてこの5つの関数を調整して組合せるこ

とによりFの関数を実現されている。ネットワーク内には閾値を調整する機能を持っており、これによりS字関数の中心の位置を調節することができる。また入力に対する重みは、S字関数の傾きを調節することができる。これらの調節機能は、学習回数を増大させることにより精度が高まり、中間層のユニットを増やすことによりどんな複雑な関数も近似的に実現可能である。

なお、図表7.3-10のBとCの関数はほぼ同じであるので、Fの関数を獲得するためには、中間層は4ユニットですむことが分かる。

このように、ニューラルネットでは、ある問題を解かせてやり、その後で中間層ユニットを解析することにより、最少の中間層ニューロン数を一意的に決めることができる。ただ、上記の例のように関数の近似の場合は、中間層が何をやっているのか理解しやすい。しかし、ニューラルネットを何らかの意味の変換に適用しようとする場合は、関数だけでは表現できないため、その解析方法が今後の課題である。

以上は1次元の例であるが、当然、2次元以上にも適用できる。2次元の例では、3層ネットワークの学習によって特定の図形にのみ反応するようなパターン識別を行わせることができる。

(5) 学習認識機械としての階層ネットワーク

学習認識機械として階層ネットワークの特徴を考えると、次の2点があげられる。

① 情報圧縮性

- ・与えられた認識関数を任意の精度で実現できる

② 般化性

- ・標本からの母集団の推測が可能（任意関数の統計的推定）
- ・帰納的推論が可能（パターンクラスの規則性）

ただし、般化性については、現在のところまだ具体的な成果が上がっていない。以下、情報圧縮性を生かした例としてロボットの運動制御への応用を示す。

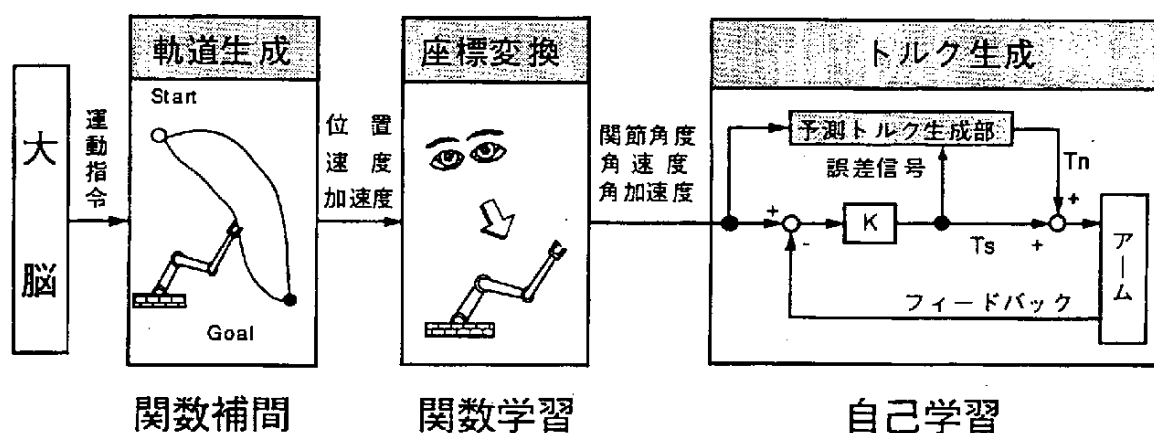
(6) 運動制御へのニューラルネットの応用

生物の運動の特徴として、①動作の自由度が大きい（システムが冗長自由度系である）、②プログラムより実技による学習が主体（適応制御が主体）という点があげられる。

一方、ロボット制御における問題としては、①軌道生成が無数に考えられること、②関節数を増やすことにより冗長性が増すこと、③トルク生成を非線形で処理しなければならないことなどがあげられる。したがって、ロボット制御を効果的に行うためには二

ニューラルネットを応用して、生物の運動学習系を模倣することが有効と考えられる。

ロボット・アームなどの運動制御へニューラルネットを応用する場合、その処理手順を図表7.3-11に示す。



図表7.3-11 運動制御へのニューラルネットの応用

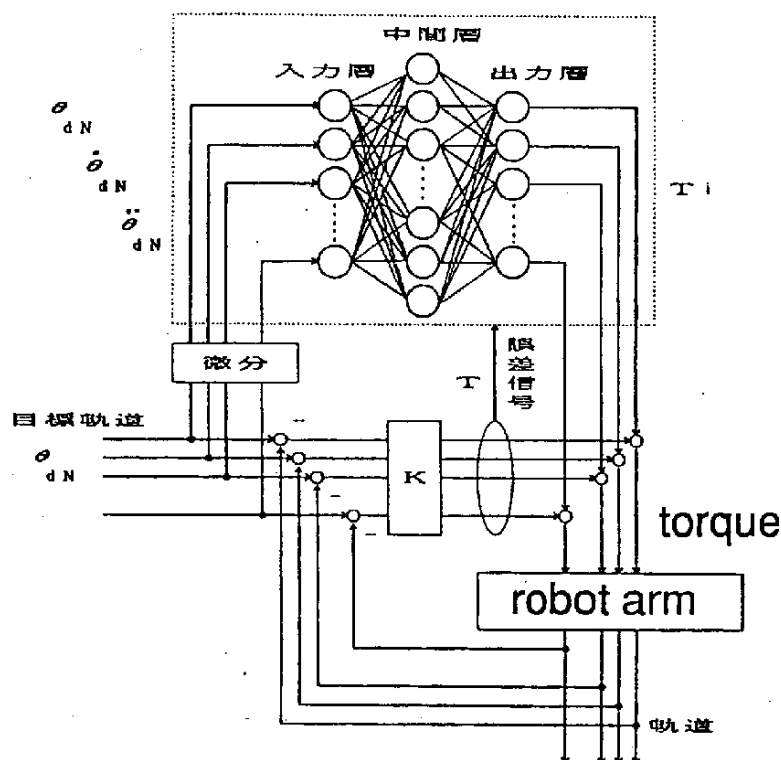
この内、軌道生成については、ロボットの最初の姿勢と最後の姿勢をニューラルネットに与えることにより、中間の姿勢を作り出す例がある。ステップごとの姿勢を与えなくてもそれなりの中間の姿勢を作り出してくれるものであり、ニューラルネットの応用として有効である。

また、座標変換へのニューラルネットの応用例としては、ロックウェル・インタナショナルによるロボットアームのインバースキネマティクスの獲得例が知られている。これは、2関節のロボットアームの動きを2台のビデオカメラで撮影したものを入力し、ニューラルネットに学習させることによって各関節の角速度を出力させるものである。学習を重ねることにより、ネットワーク内にインバースヤコビアンを解いたものと等価な関数が獲得される。

一般のパソコンではインバースヤコビアンをリアルタイムに解くことはできないが、ニューラルネットを応用すればリアルタイムの処理が可能になる。

3番目に、トルク生成の例としては、ATRの川人氏らによるロボットアームのインバースダイナミクスの獲得例もよく知られている。これは3層から成るネットワークを応用してバックプロパゲーションを行うことによりダイナミクスを学習させている（図表7.3-12を参照）。

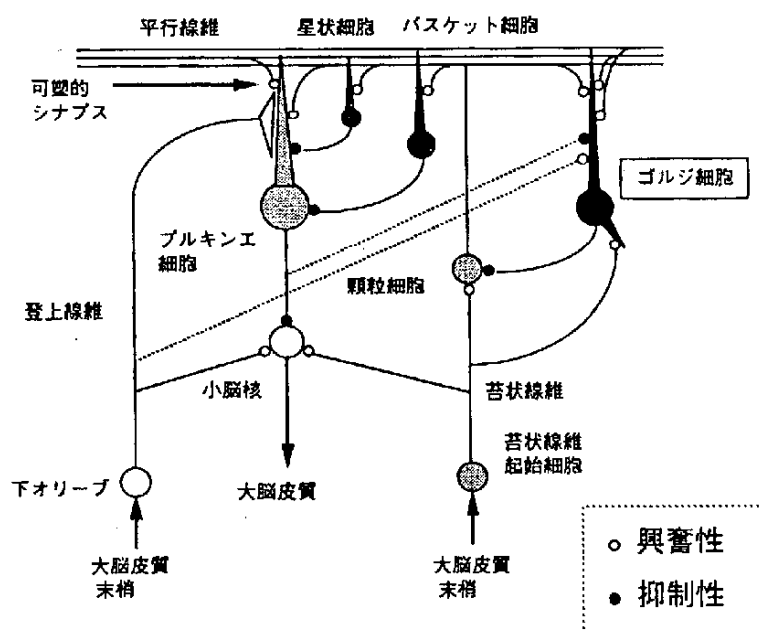
一般的に、このようなフィードバックループが働いている系では、系に時間遅れが存在するために高精度で高速な制御はできないのであるが、ニューラルネットがフィードフォワードで制御しているために、非常に滑らかで高精度な制御が可能になっている。



図表7.3-12 ロボットアームのインバースダイナミクスの獲得例

(7) 小脳神経回路のニューラルネットへの応用

東大医学部の伊藤氏らによる小脳神経回路の構造を図表7.3-13に示す。

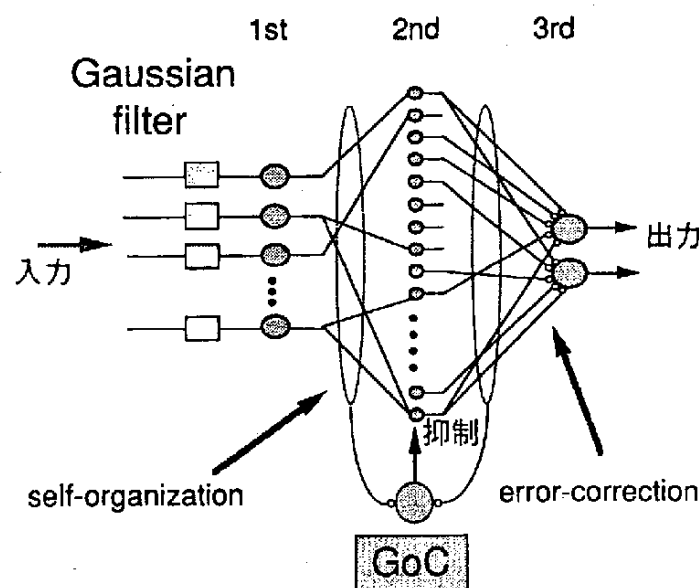


図表7.3-13 小脳神経回路の構造

図表7.3-13において、プルキンエ細胞は出力細胞、顆粒細胞は中間ユニット、苔状線維起始細胞は入力細胞にあたり、解剖学的にも3層構造になっていることが判明している。そして各々にゴルジ細胞、バスケット細胞、星状細胞が付随してネットワークを制御している。このような構造はパーセプトロンと同様と言える。

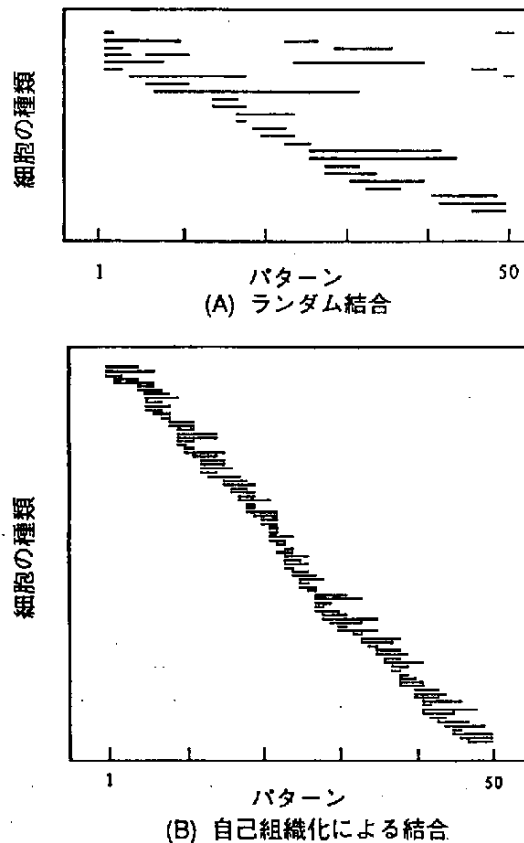
大脳皮質からの信号は、苔状線維起始細胞へ入力されるのとは別に、下オリーブへも入力され、これはプルキンエ細胞への教師信号としての役目を果たしている。つまり小脳は、大脳皮質からの教師信号に対して正しい出力ができるようにネットワークが学習を行っているのとらえることができる。

このような小脳神経回路をニューラルネットに忠実に応用したものが図表7.3-14に示す3層神経回路モデルである。このモデルはパーセプトロンのモデルにゴルジ細胞の働きを加えた点に特徴があり、精度の高い学習が可能になっている。ゴルジ細胞 (GoC) は中間層を制御するだけでなく、入力層から中間層へself-organization をさせる学習を行わせ、中間層から出力層へはerror-correctionをさせる役目を果たしている。これにより中間層が効率のよい働きをするようになり、学習回数の減少、般化能力の増大に効果的になっている。このself-organization 効果の例を図表7.3-15に示す。



□ 糸状体構造は考慮されていない

図表7.3-14 3層神経回路モデル



図表7.3-15 中間層細胞の応答

これは50個のパターンに対して反応した中間層細胞の種類を図示したものである。(A)はゴルジ細胞がないため入力層と中間層がランダム結合となった場合の結果であり、応答する中間細胞が均等ではない。これに対し (B)はゴルジ細胞の働きにより入力層と中間層が自己組織化による結合となった場合の結果であり、中間細胞が効率的に働いていることが分かる。(A)の場合、100個の細胞の内何らかの応答があった細胞が25個しかないのに対し、(B)の場合には96個の細胞がほぼ均等に応答を返している。このため、各細胞に負荷が分散されることから、モデルの精度が高く、かつ、1個のパターンに対して常に複数の細胞が応答することから、耐故障性にも優れている。

(8) 自己学習のためのシステム

ニューラルネットが賢くなるための次のステップとして、自己組織的な学習が目標となる。これは教師信号を目的評価関数という形でシステム内部に持たせ、外から見ると自己組織的に学習を行っているように振舞わせることで実現できる。例えば目標物追跡行動のシミュレーションなどに応用されるが、ある入力に対しランダムに動いた結果の中から目的に合ったものだけを取り出して記憶させ学習をやり直すことで、目標物を追跡することが可能になる。ただし、現在は比較的単純な動きにしか追従できない状態であ

り、自由度を上げてでも対応できるようにすることが今後の課題である。

(9) ニューロコンピュータの今後のアプローチ

ニューロコンピュータの開発には、①汎用機を応用するもの、②専用機を応用するもの、③ニューロチップを応用するもの、の3つの方向が考えられる。①のうち現在商品化されているのは①にニューロのソフトを搭載したものであるが、①が逐次処理を行っているうちは速度上問題があり、いずれは高並列マシンやハイパーキューブ型のマシンに移行すると考えられる。

一方②は、ニューロに適したハードウェアを開発して高速化を計るというアプローチである。現在市販されているものとしては、マイクロプロセッサやデジタルシグナルプロセッサでボードを作るという方法であるが、①と同様の問題があり、高並列化の方向へ進むと考えられる。高並列マシンとしては、現在、富士通のスーパーニューロやソニーのGCNなどが発表されているが、さらにプロセッサ数が1万以上の超並列マシンの開発が望まれる。ただし、超並列マシンを実現させるためには、現在のプロセッサではなく、③のアプローチから生み出された技術を応用することが必要と考えられる。

7.4 頭脳型（常識装備型）コンピュータ

(1) 背景

世界最初の電子計算機（コンピュータ）が、1943年に提案され、1946年に完成して以来、コンピュータの発達は、すさまじいものであった。最初は、弾道計算など単なる数値計算を高速に実行するものにすぎなかった。しかし、プログラム（ソフトウェア）内蔵方式がvon Neumanらによって発明されてからは、ソフトウェアの置き換えのみで、一つのコンピュータが、銀行業務、在庫管理、新幹線の運行管理などをこなすという万能性を発揮するようになった。今では、なくてはならない情報処理機器であり、人工頭脳ともてはやされてきたのも当然のことといえよう。

しかしながら、ロボットの分野、コンピュータビジョンの分野、音声認識の分野、自動翻訳の分野など多くの分野で、コンピュータを今少し人間の機能に近づけようとするとなちまち大きな壁に突き当たってしまうのも事実である。これは、どうしてであろうか。よく知られているように、人間の脳は、左右2つの部分から成り立っている。概略的には、左脳は計算や言語・記号処理のような意識的、論理的情報処理を司り、右脳は、

イメージを用いた無意識的判断のような直感的情報処理を司るといわれている。現在、すばらしい威力を発揮しているコンピュータは、左脳のような意識にのぼりうる論理的情報処理機能を人工的に実現し、その方面を大きく発展させたものである。それに対して、右脳的情報処理機能は、無意識的ゆえ取扱いが難しく、研究の精力があまり注がれてこられなかった。その結果、未発達に終わっているのが現状である。融通のきく親しみのある高度の脳機能を実現しようとする、右脳的情報処理技術、上脳的情報処理技術（図表6.1-1 参照）など、上・下・左・右・四者をうまく有機的に統合した情報処理技術がどうしても必要となる。これが、前述の疑問に対する答えである。すなわち、現在の情報処理技術のブレークスルーには、現在のコンピュータ技術を中心とした情報処理体系と相補的な右脳、上脳などの原理に学んだ新しい情報処理体系の確立が極めて重要であるといえよう。

そのような情報処理体系の中心になると思われるのが常識／常識形成機能である。以下では、それについて少し述べる。

(2) 頭脳型（常識装備型）コンピュータの条件

人間にとって常識は、空気のような存在であるので、平凡な夢のないもののように思えるかも知れない。しかし、森（電総研）によればそれはサルから人間への進化の如く、コンピュータが人間の仲間入りをする条件のように思われている。

常識を支えているものは、「世界像」という知識体系であり、「世界像」は、膨大な量の経験・体験などの記憶に支えられている。世界像の構成要素は、

- ① 自分の住んでいる世界の空間像（上脳型情報）と
- ② そこで起こる自然現象・事象やその中に納まっている種々の対象物のイメージを含む知識体系（下脳型情報処理）

である。

物理学、化学などの個別学問は、各々に特有な自然現象の知識体系であるが、常識の中にすべてを含める必要はない。我々人間の場合を考えてみれば分かるように、各個人の頭のなかにある知識は限られており、知識の総体は個人の頭のなかに分散して蓄えられている。頭の中に入りきれないものは、書物などの形で蓄えられており、それらを称して外部知識・記憶と呼んでいる。このような外部記憶をアクセスする機能は常識の中に含まれている。外部記憶をアクセスするためには、他人等とのコミュニケーションが必要であり、言語機能を省くことはできない。また、人間の仲間入りをするような常識

を備えるためには、喜怒哀楽のような感情の理解も欠かすことはできない。感情はある種の価値基準であるので、複数の価値を扱う機能が要求される。

このような考察から分かるように「常識」を扱うためには上下左右脳型の4つの情報処理機能の基本的なもののみならずそれらの統合機能も不可欠となる。

常識という難問を解く鍵が、本書で取り扱われる「並列・分散型情報処理」であるニューラルネットであると思われる。

最後に、常識機能実現に当たって解かねばならない課題を列挙しておく。

- ① 自分の住んでいる世界の空間像の形成と
自己の位置付け（現在地、移動状態、姿勢など）
- ② 一定時間内に生じる出来事の認知
- ③ 体験・知識の組織化・体系化

これらの課題を実現するための要素技術は何か。以下には、その幾つかの例を掲げる。

- ① 連続的情報処理技術
- ② 広域空間の獲得・表現技術
- ③ 予知技術
- ④ 多重記憶技術（100万個以上）
- ⑤ 新・旧の判定技術
- ⑥ 情報探索技術（内部&外部）
- ⑦ カテゴリー化技術
- ⑧ 各種量子化技術
- ⑨ 制約条件の獲得技術
- ⑩ 部分と全体の統合技術
- ⑪ 変化発見技術
- ⑫ 記号の意味のイメージ化技術
- ⑬ 操作空間(working storage)の構成・利用技術
- ⑭ 各種連想技術
- ⑮ 無意識的推論・直感技術
- ⑯ 多重スケール空間の統合技術
- ⑰ 能動的情報処理[1]
- ⑱ イメージの図・地的超入子表現技術

⑱ 並列的多重分散処理系群の統合技術

⑳ 4次元パターン(events)認識・組織化(知識体系化)技術

【参考文献】

[1] 甘利、森(監修)：入門ニューラルネットワークス、トリケップス(1988)

[2] 森(他)：感覚・知覚系の脳内表現に関する調査報告、電総研調査報告第215号
(1986)

7.5 3次元的处理からイメージされること

3次元的处理とは、3次元空間の情報を1次元あるいは2次元の情報に分解することなく、そのままの形で取り扱おうとする考え方である。しかしながら、3次元的处理と言ってもその内容は必ずしも明確ではない。ここでは、環境理解など3次元空間を理解する問題を対象として、3次元的处理の実際的意味を考えてみたい。そのために、まず3次元情報の1次元的处理あるいは2次元的处理を考える。次に、そこからの類推として3次元的处理をイメージしてみたい。

(1) 1次元あるいは2次元的处理

3次元的处理をイメージする前に1次元あるいは2次元的处理について考える。視覚的に捕らえられる世界からコンピュータを用いて3次元構造を理解する場合、CCDカメラなどの入力機器を用いて、複数の画像を取り込んで処理する方法が採られる。この方法を情報の次元という視点で見直してみたい。まず入力段階では、入力機器が2次元平面センサで構成されるため、3次元情報は観測面に投影された2次元情報(画像)に変換される。次に、入力機器からコンピュータに転送される段階で、2次元情報は走査線単位に分解された1次元情報に変換される。結局、コンピュータは3次元情報を1次元情報として取り込むことになる。これは、コンピュータ内部でのデータ参照が1次元的アドレッシングであることに対応する。従って、3次元情報として再構成する場合には、データの2次元性と複数の画像間の観測(投影)条件を考慮して処理することになる。このように、2つのハードウェア的制約、即ち観測方法とデータの2次元性を考慮して処理する形態は、1次元的处理として考えられる。

2次元的处理は、1次元的处理の延長として考えられる。前記2つの制約の中の1つ、

即ち2次元情報を1次元情報に分解する過程を除去することである。例えば、2次元処理として、入力部の面センサの各素子にプロセッサやメモリを対応させるものが考えられる。一旦2次元メモリに取り入れられた2次元情報を、対応する2次元プロセッサに展開して処理する形態も考えられる。いずれにしても、情報の2次元性は処理過程で自動的に保持されるので、処理アルゴリズムは観測条件のみを考慮して複数の画像を扱うことが出来る。このように、データの2次元性を前提として面単位に処理するハードウェア的形態が2次元処理である。また、画像処理における逐次処理と並列処理のハードウェア的側面が、1次元処理あるいは2次元処理として対応づけられる。

(2) 3次元処理

1次元あるいは2次元処理から類推される3次元処理は、残るハードウェア的制約、即ち観測方法の制約を解放することである。3次元空間を2次元情報から再構成するためには、時間的あるいは空間的に異なった2次元情報が必要になり、従って、互いの観測条件の関係が必要になる。単独の観測で空間理解できるためには、入力機器が3次元センサであることが前提となる。3次元センサは、対象の3次元構造を反映した内部表現をセンサ内に実現するものである。そして、更に3次元プロセッサや3次元メモリが必要になる。以上のことから、3次元処理は、3次元センサの各素子にプロセッサやメモリを対応させて並列的に処理するものとしてイメージされる。従って、2次元処理が写像面を処理単位とするのに対して、3次元処理は写像空間を基本的な処理単位とする。

人間の空間理解は、両眼による画像処理を基本にした2次元処理として考えられる。ステレオ画像処理に代表される立体視は、人間の方式を模倣するものである。3次元処理は、人間の方式を越えるものである。しかし、実際には、3次元センサは見当たらないので3次元処理をイメージすることが難しいのである。

環境理解の問題における3次元処理の課題は、3次元センサ及び3次元プロセッサやメモリを組合せた情報処理装置の開発ということになる。3次元センサの実現により、2次元処理で遭遇する不良設定問題から解放される。そこでは、既に得られた3次元情報の内部表現からノイズ除去や特徴抽出の処理によって環境理解が可能となる。環境理解とは異なるが、3次元の内部モデルが実現されるものとして、自然（物理）現象のシミュレーションがある。この場合には、3次元の内部表現が外界から獲得されるのではなく、設定されることになる。

8. 3次元情報処理と群情報処理

前章までの報告書がほぼまとまりつつある時点で、「親委員会」のもとに設置されたタスクフォースから、群情報処理という考え方が出てきた。そこで、本WGで検討を行った3次元情報処理とこの群情報処理との関係について考察を行い、今後の検討に資することにした。従って、必ずしもWG内で十分な議論を尽くした結果ではないことをはじめにお断りしておきたい。

(1) はじめに

本WGの議論では、3次元情報処理技術が、3次元情報の処理、情報の3次元処理、次元を自由度としてとらえる新しい多次元情報処理、の3分野の大きな枠組みに整理できることを明らかにした。すなわち、“3次元”の意味として、立体形状のように次元を空間的にとらえること以外にも、平面と時間との組合せ、センサ融合のような異種情報の組合せ、さらには3次元情報のn次元処理や次元を自由度としてとらえる柔軟な考え方まで幅広い概念が含まれることが明らかになった。また、例えば時間軸上に並べられたデータ列にも多様な情報が含まれているように、一つの次元をとってもその中に更に細部構造が存在している。3次元ともなるとその概念には更に多様な要素を含む複雑な構造が予想される。

このようにその中の多様な概念や要素を含めて考えると、“3次元”はその総体を“群”としてとらえることが出来る。すなわち見方を変えると、①3次元情報の処理⇔群情報の処理、②情報の3次元処理 ⇔ 情報の群処理（超並列・超分散処理）、③多次元情報処理 ⇔ 柔らかな情報処理、の図式である。これらは従来の逐次型処理をベースとする情報処理とは異なる新しい技術体系に属するものであり、今後の新たな研究課題といえることができる。

以下、3次元情報処理WGでの議論の内容を新機能技術、基盤技術と基礎理論に分類要約することにより、群情報処理への対応付けを行う。

(2) 3次元情報処理と群情報処理

① 3次元情報の処理 ⇔ 群情報の処理（新機能技術）

3次元情報の処理の応用の一例としてCTスキャナがあげられる。これは透過X線分

布から断層画像を再現するもので、複数の断層画像から3次元構造が求められる。しかし現状の装置では、データ入力するのに40分～1時間を要し、心臓などの運動する対象のデータ入力には適用できない。従って、複数のX線同時曝射による高速化が考えられているが、入力データを処理して3次元再構成するのに非常に時間がかかる。これは、観測方法の物理的制約のために不足したデータから再構成する不良設定問題を解く必要があるためである。その対策として、付帯拘束条件とシミュレーテッドアニーリングを組合せた処理等が考えられている。しかしながら、処理時間は数時間以上にも及ぶ。医療機器においては、患者を待たすことなくデータ入力から出力まで短時間に処理できる機器が求められている。

実在世界を対象とした視覚情報処理装置は、研究段階にあり実用化されていない。処理内容は、空間認識や物体（形状）認識などの時空間情報の処理である。その障害は、やはり処理時間と不良設定問題に起因するものである。例えば、コンピュータビジョンにおいては、ステレオ立体視や運動立体視における画像の対応問題がある。単純な相関処理を行うと対応点のない場合や複数の点に対応する場合が存在して望ましい解が求められない。これを解決する手段として、正則化手法を取り入れた計算アルゴリズムの改良と観測方法の拡充（空間的、時間的）による方法がある。しかしながら、一般的に、アルゴリズムの改良は処理を複雑にし、観測方法の改良はデータ量の増大を引き起こす。現在のところ、この問題解決の有効な方法はハードウェアを含めて確立されていない。

ロボットには、視覚センサだけでなく触覚センサ等必要に応じて様々なセンサが備えられている。異種情報を扱うセンサ情報処理は、4項目に分けられる。即ち、センサごとの固有の情報処理（知能センサ）、多数センサによる並列分散処理、センサ出力信号を処理して妥当な判断を行うための融合処理（センサフュージョン）と運動機能を制御した能動的センシングである。ここでの課題として、膨大なセンサデータを高速処理する方法と異種情報から信頼できる情報を抽出する融合の方法があげられる。

空間認識と並ぶ形状認識は、3次元情報の処理の一方の柱である。最近の試みとして、光ニューラルコンピューティングを利用したパターン認識の実験がある。ここでは、従来の特徴に基づく認識ルールのプログラミングを学習により実現している。更に、欠陥パターンに対してのロバスト性も備えており、将来への可能性が期待されている。現在は、小規模な構成であるが、今後大規模なニューラルネットの実現により

情報処理装置としての有効性を実証する必要がある。

② 情報の3次元処理 ⇔ 情報の群処理（基盤技術）

(a) モデル

情報の3次元処理とは、実在する3次元情報を1次元あるいは2次元の情報に分解しないで処理する考え方である。通常、3次元情報は面センサなどの入力機器により2次元情報として取り込まれ、さらに走査線に分解されて1次元情報として処理装置に入力される。その後、1次元情報は計算アルゴリズムに従って処理装置上に展開されて認識処理されるのが普通である。これは、1次元情報の時空間的組合せによって3次元情報を処理しており、実質的に1次元処理と考えられる。2次元処理としては、入力部の面センサの各素子にプロセッサを対応させるものと入力後の1次元情報を平面的に配置されたプロセッサ群へ展開して処理するものが考えられる。そこでは、2次元情報の構造が保持され、2次元情報の時空間的組合せによって3次元情報が処理される。同様の類推から、3次元処理として、入力部の3次元センサの各素子にプロセッサを対応させるものと、1次元あるいは2次元情報を3次元構造に配置されたプロセッサへ展開して処理するものが考えられる。そこでは、対象の3次元構造が保持されており、情報の3次元構造を反映した形態で3次元情報が処理される。

2次元処理や3次元処理は並列処理モデルであるが、入力形態や情報処理の手法（計算アルゴリズム）と関係づけられて評価されるものである。さらに、時間軸に対応するためには、2次元あるいは3次元的に配置されたメモリ要素を取り入れる必要がある。

(b) ハードウェア

2次元情報の並列処理には積層型3次元構造が考えられ、3次元処理には超並列型3次元構造が考えられる。3次元情報としての入力装置あるいは超並列3次元構造の実現には、光が果たす役割は重要である。3次元入力にはホログラフィのような光の位相情報を応用したものが考えられ、また、超並列における大規模結線には光インターコネクションの考え方が有効である。また、処理装置として、マイクロ 옵ティクス、ホログラム、空間光変調デバイスやOEICなどを応用した光情報処理も有効である。メモリに関しても連想メモリや多重記憶など光技術の役割は重要である。

③ 多次元情報処理 ⇔ 柔らかな情報処理（基礎理論）

多次元情報処理は、次元を空間構造に限定しないで処理の次元としてとらえるものである。ここでは、重複する面もあると思われるが次元の考え方を示す。3次元情報の代表的なものとして、人間が知覚する五感情報がある。それらの情報源は、すべて時間空間的構造を備えている。人間は、それらの異なった情報を処理して総合的に判断する能力を持つ。工学的に実現しようとするセンサ情報処理の分野では、処理の次元をセンサ情報で構成される空間の次元として考える。一方、観測データから情報源の3次元構造を再構成する問題は、逆問題としてとらえられる。通常、その逆問題は連立方程式で定式化されるので、処理の次元をそのベクトル空間の次元として考えることもできる。また、情報の処理目標に対して、情報を有効な表現形態に変換して処理することがある。例えば、光はスペクトル空間でとらえることも出来るが、RGB 表色系などの色空間でとらえたほうが有効な場合もある。この場合には、処理の次元を、スペクトル空間あるいは色空間のように情報の表現形態に依存した次元として考える。このように、処理の次元は、情報処理の目標に適合した計算アルゴリズムの構造に依存するものであり、情報の空間構造に拘束される必要はないと考えられる。

情報処理一般に現われる問題の多くは不良設定問題や非線形問題の解法である。それは、個別の次元の情報処理に対しても現われ、さらに、異なる次元を持つ情報から総合的に判断するような場合にも現われる。従って、それらを克服するための最適化処理方法や非線形問題の解法の確立、更には異なる次元の情報の統合（融合）方法が今後の重要な課題である。

(3) パラダイムの変遷

数値計算を主体としたコンピュータは、計算スピードの高速化の流れの一方で、知識データベースを活用する推論マシンへと変遷してきた。これをハードウェアの側面から見ると、プロセッサの高速化とメモリの大容量化に符合する変遷と見ることができる。それに対応する現在の状況は、多数のプロセッサを積極的に利用する時代であると考えられる。多数のプロセッサの並列動作により、処理能力は飛躍的に増大することが予想され、それにより情報処理の質的变化までも期待される。その結果、人間が時々刻々変化する多様な五感情報を処理できるように、膨大でしかも形態の異なるデータをリアルタイムで処理できるのではないかとと思われる。人間の脳は、四元（上脳、下脳、左脳、右脳）に機能分化し、さらに全体として統一的にまとまって機能する。超並列分散処理

マシンの実現は、その人間の脳の機能を模倣しようとするものである。

超並列分散処理マシン実現の結果として、実際の3次元空間からの生の情報、すなわちノイズの混じった不確定でしかも動的構造を備えたデータから意味の有る知識を獲得（形成）できるのではないかという期待が起こる。これは、知識を活用する従来の情報処理から知識を生成する新しい情報処理への変遷としてとらえることができる。すなわち、超並列分散構造を用いた自律学習型の情報処理装置である。外界を理解・認識しながら自律的に判断することができ、知識を自ら生み出す様な、外界に開かれた情報処理システムである。その基礎として、多次元情報処理（柔らかな情報処理）は有力な考え方である。こうした変遷は、常識を備えて情報を処理することができ、更には創造性あるいは想像性を手に入れた新しい次元の知的（頭脳型）コンピュータへ進む1ステップとして位置づけられる。

9. あ と が き

3次元処理という、イメージの湧きにくい課題を前にして、関連するかもしれない事項の調査と、ある程度のブレインストーミングを行った結果をまとめたのが本調査報告書である。調査期間からの制約のために課題の洗い出しは十分には行えなかったが、残された部分は来年度に本調査報告をたたき台にして議論を深めるに際して補充して行くこととした。

十分な調査ではなかったとはいえ、本調査を行う過程で幾つかのことが強く認識されるに至った。その一つは、本WGの名称にある「3次元情報処理」が、この調査研究の他の分科会、WGの調査主題のすべてにかかわっているということである。このため、「3次元情報処理」という側面からではあるが、新しい情報処理の技術シーズ、ニーズの全体に取り組まざるを得ない特殊な立場に立つことになった。

もう一つは、これまでの電子計算機のパラダイム、すなわち単位素子を単純強引に積み重ね、その単位素子を微細化し、その動作を高速化するというものでは済まなくなっているということである。しかしながら、次のパラダイムの背骨になりそうなものを同定するのは至難の業であることも認識された。このような状況にあっては、パラダイム探索活動を刺激するような強力な技術開発プログラムを用意する必要がある。そして、そのようなプログラムの目的から、単一のシステムを構築するようなものではなく、幾つかのアプローチを平行して試みるというものでなければならない。関係者によってこのような手段が講じられることを希望するものである。

—— 禁無断転載 ——

平成 2 年 3 月 発行

発行所 財団法人 日本情報処理開発協会

東京都港区芝公園 3 丁目 5 番 8 号

機 械 振 興 会 館 内

TEL (432) 5405 (代表)

印刷所 三協印刷株式会社

東京都渋谷区渋谷 3 丁目 11 番 11 号

TEL (407) 7316

01-R013

