

# 新情報処理技術に関する総合的調査研究

## —統合型コンピューティングWG報告書—

平成 3 年 3 月



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2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。

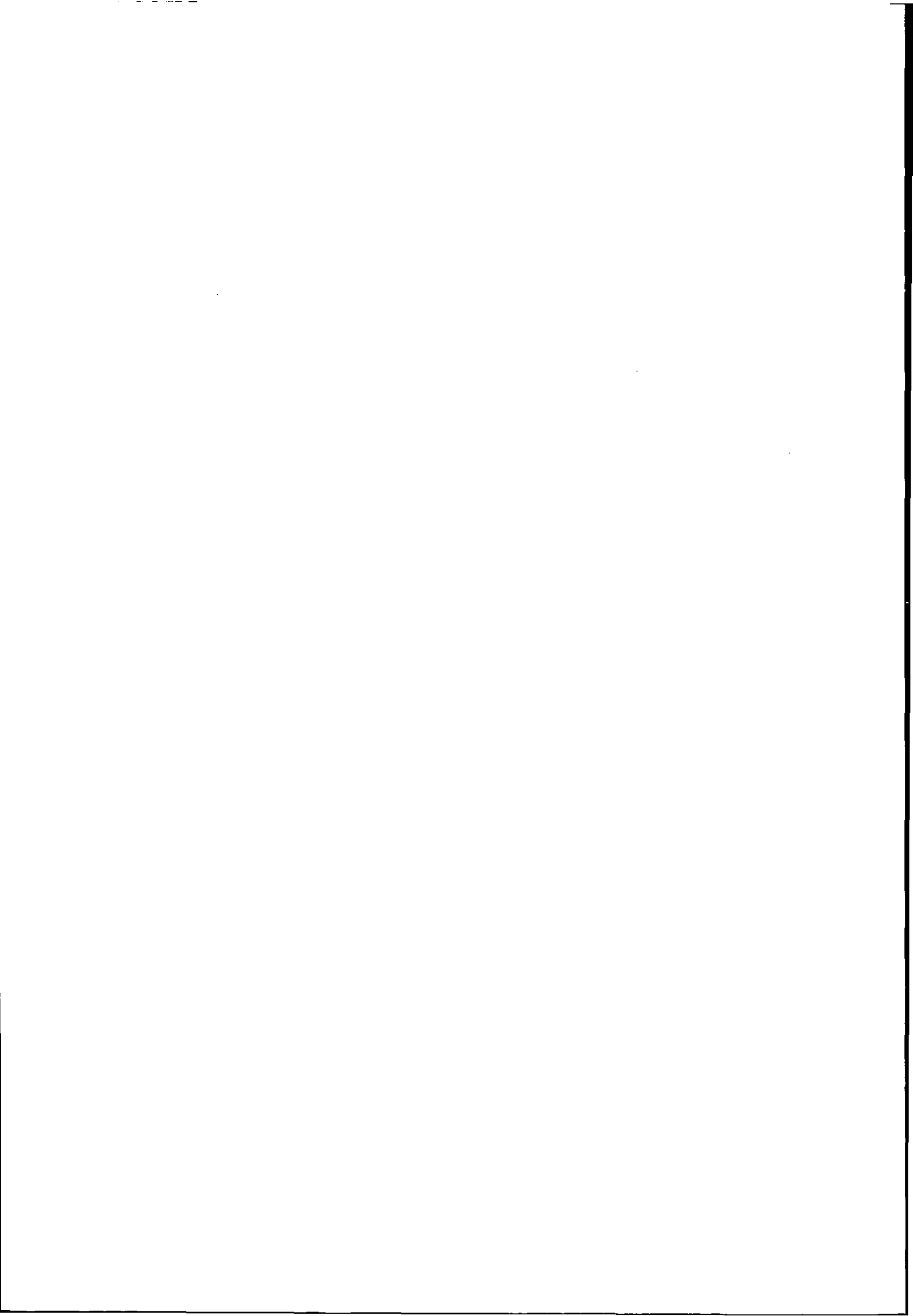
このため、従来のコンピュータが不得手とする、人間の脳が行っているような、高度かつ多彩な情報処理の実現に向けて、必要とされる機能、計算原理及び実装技術、さらには、革新的な情報処理技術と社会の係わり等を含めた総合的な調査研究を、平成元年度から開始した。

2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、当協会に基礎研究、計算機科学、社会応用の3分科会及び統合型コンピューティングと光コンピュータ・テハイスの2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、海外動向調査等により、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、ニース、ノース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及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3年3月

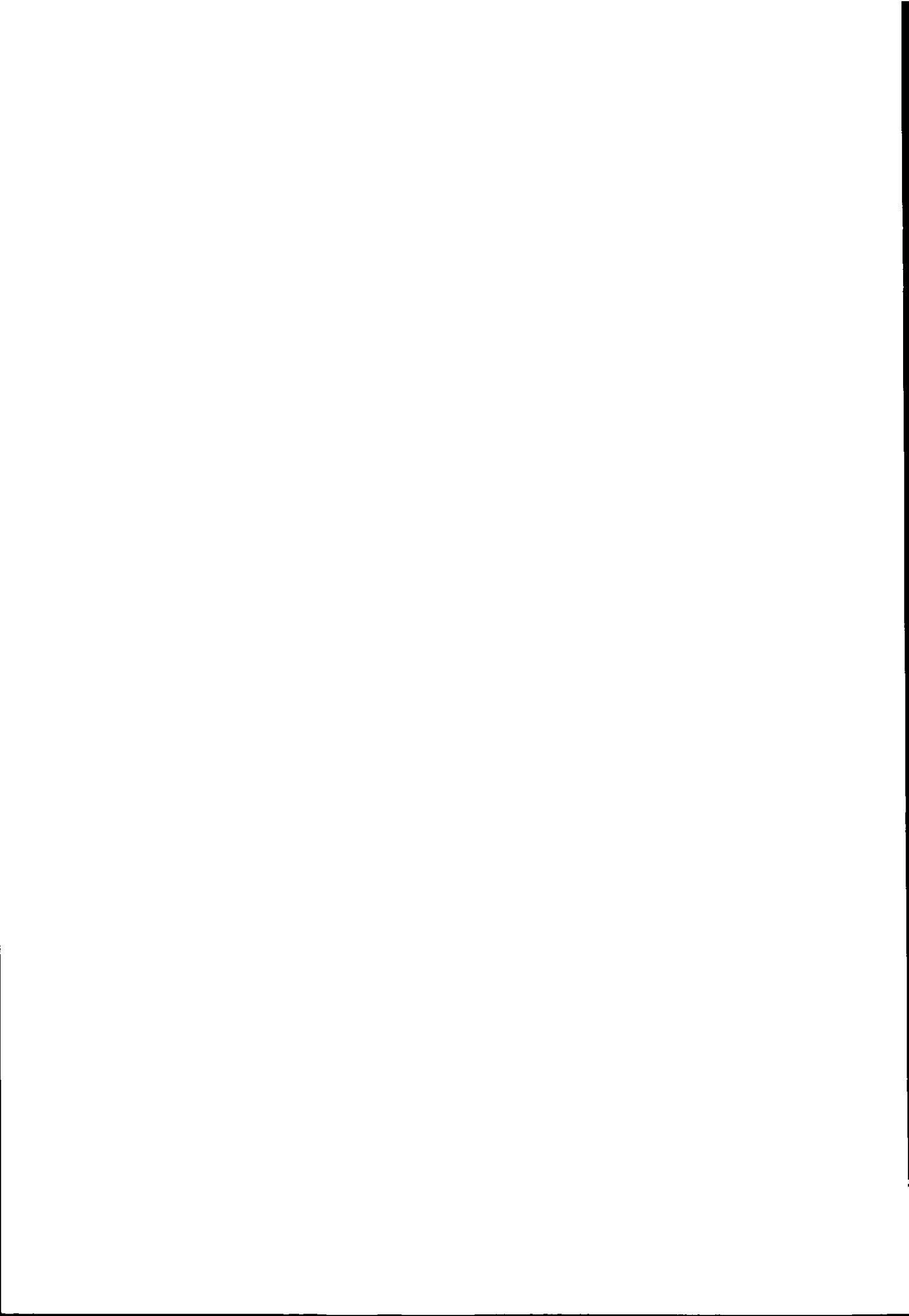
財団法人 日本情報処理開発協会



# 「統合型コンピューティングWG」委員名簿

(順不同)

主査	弓場 敏嗣	工業技術院電子技術総合研究所 知能システム部長
副主査	岡部 洋一	東京大学 先端科学技術研究センター教授
幹事	大津 展之	工業技術院電子技術総合研究所 首席研究官
委員	浅川 和雄	(株)富士通研究所 システム研究部第一研究室長
	石井 光雄	(株)富士通研究所 システム研究部長
	井原 茂男	(株)日立製作所 中央研究所第7部 研究員
	上坂 吉則	東京理科大学 理工学部情報科学科教授
	上田 和紀	(財)新世代コンピュータ技術開発機構 研究部 主任研究員
	小柳 滋	(株)東芝 総合研究所情報システム研究所 主任研究員
	梶原 信樹	日本電気(株) C & C システム研究所コンピュータシステム研究部 主任
	全子 克幸	松下電器産業(株) 半導体研究センター 超LSI デバイス研究所 技師
	河原 英紀	日本電信電話(株) NTT基礎研究所情報科学研究部 主幹研究員
	菅 隆志	三菱電機(株) 情報電子研究所 並列処理グループマネージャー
	小池 誠彦	日本電気(株) C & C システム研究所コンピュータシステム研究部長
	佐藤 知正	工業技術院電子技術総合研究所 自律システム研究室長
	島田 俊夫	工業技術院電子技術総合研究所 計算機方式研究室長
	清水 雅久	三洋電機(株) 情報通信システム研究所コンピュータ研究部 主任研究員
	下原 勝憲	日本電信電話(株) NTT ヒューマンインターフェイス研究所 主幹研究員
	白井 克彦	早稲田大学 理工学部電気工学科教授
	立石 雅彦	沖電気工業(株) 総合システム研究所 知識情報処理研究部
	田中 厚夫	ソニー(株) 情報システム研究所 部長
	長島 重夫	(株)日立製作所 中央研究所第6部長
	西村 和夫	(株)東芝 システム・ソフトウェア技術研究所研究第2部 主任研究員
	根岸 道郎	三菱電機(株) 情報電子研究所 推論コンピュータグループ 主事
	平井 有三	筑波大学 電子・情報工学系助教授
	廣瀬 通孝	東京大学 工学部産業機械工学科助教授
	松葉 育雄	(株)日立製作所 システム開発研究所 主任研究員
	松本 憲洋	NKKエレクトロニクス研究所 コンピュータシステム研究部長
	村岡 洋一	早稲田大学 理工学部電子通信学科教授
	山田 稔	(株)日立製作所 中央研究所第8部 主任研究員
	山本 和彦	工業技術院電子技術総合研究所 画像研究室長
	吉澤 修治	東京大学 工学部計数工学科助教授
	米澤 明憲	東京大学 理学部情報科学科教授
オブザーバ	平木 敬	工業技術院電子技術総合研究所 計算機方式研究室主任研究官
	坂井 修一	工業技術院電子技術総合研究所 計算機方式研究室





# 目次

1 序と概要	1
1.1 背景	1
1.2 内容	1
1.3 調査の経過	2
2 柔らかな情報処理の理念	9
2.1 柔らかな情報処理パラダイム	9
2.1.1 情報処理技術の潮流	9
2.1.2 技術的社会的要請	11
2.1.3 新パラダイムとしての柔らかな情報処理	12
2.2 柔らかな情報処理の技術体系	13
2.2.1 新情報処理技術のキーワード	13
2.2.1.1 柔らかさ	13
2.2.1.2 統合機能	13
2.2.1.3 学習 自己組織化機能	14
2.2.1.4 超並列超分散情報処理	15
2.2.2 技術体系の枠組み	15
2.2.3 研究開発協力の枠組み	16
3 柔らかな情報処理の理論基盤	19
3.1 情報処理の一般的な枠組み	19
3.2 知的情報処理研究の現状と問題点	20
3.3 研究の目標	22
3.4 研究の内容	22
3.4.1 パターン認識の再認識	22
3.4.2 制約充足パラダイム	23
3.4.3 一般理論構築への確率論的アプローチ	23
3.5 研究項目と課題	24
3.5.1 柔らかな情報表現	24
3.5.2 情報の柔らかな処理 (統合)	25
3.5.3 情報の柔らかな評価	25
3.5.4 最適化、および学習 自己組織化	26
3.6 研究の進め方	26

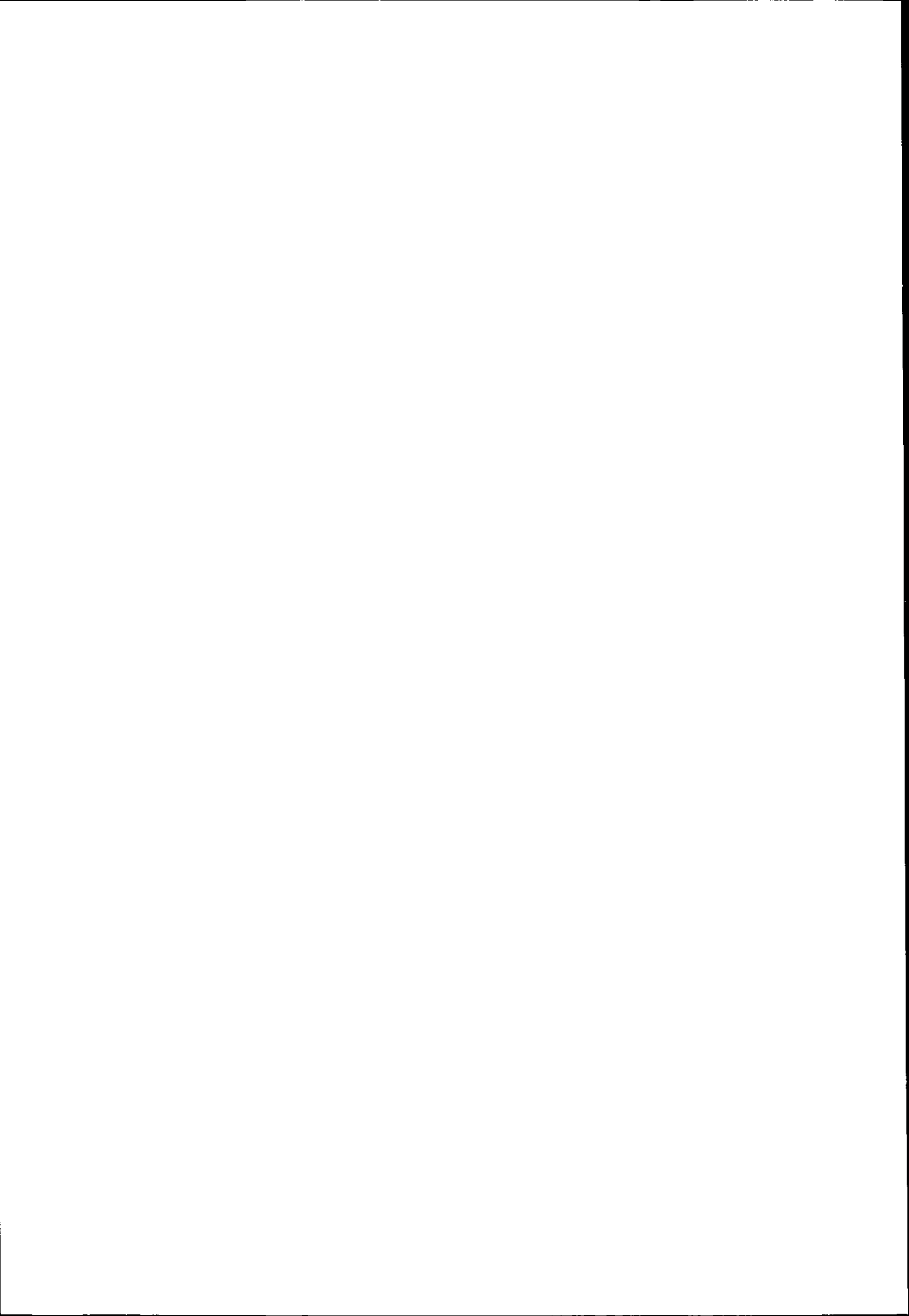
4	柔らかな情報処理をもたらす新機能	27
41	新機能領域の展望	27
42	柔らかな認識 理解	28
421	画像技術	28
4211	現状と問題点	28
4212	研究の目標	29
4213	研究の内容	30
4214	研究課題	32
4215	応用のイメージ	32
422	音声および自然言語技術	33
4221	現状と問題点	33
4222	研究の目標	33
4223	研究の内容	34
4224	研究課題	37
4225	応用のイメージ	37
423	メディア統合技術	38
4231	研究の現状と目標	38
4232	研究課題	39
4233	応用のイメージ	40
43	柔らかな推論 問題解決	40
431	推論 問題解決	40
4311	現状と問題点	40
4312	研究の目標	41
4313	研究の内容	41
4314	研究課題	42
4315	応用のイメージ	43
432	情報ベース技術	43
4321	現状と問題点	43
4322	研究の目標	44
4323	研究の内容	44
4324	研究課題	45
4325	応用のイメージ	46
44	ヒューマン インタフェースとシミュレーション	46
441	ヒューマン インタフェース	46
4411	現状と問題点	46
4412	研究の目標	47
4413	研究の内容	47
4414	研究課題	48
4415	応用のイメージ	49
442	シミュレーション	50
4421	現状と問題点	50
4422	研究の目標	50
4423	研究の内容	50

4 4 2 4	応用のイメージ	54
4 5	柔らかな制御と機能統合化技術	54
4 5 1	柔らかなロボット技術	54
4 5 1 1	現状と問題点	54
4 5 1 2	研究の目標	55
4 5 1 3	実現のためのキーポイント	55
4 5 1 4	研究課題	59
4 5 2	機能統合化システム	60
4 5 2 1	現状と問題点	60
4 5 2 2	研究の目標	60
4 5 2 3	研究の内容	61
4 5 2 4	研究課題	63
5	柔らかな情報処理のシステム基盤	65
5 1	ニューラルシステムからの検討	65
5 1 1	基本的考え方	65
5 1 2	ニューラルネットワークモデル	66
5.1.2.1	ニューラルネットワークの構造	66
5 1 2 2	ニューラルネットワークの学習	71
5 1 3	ニューラルシステム	75
5 1 3 1	ニューラルシステムアーキテクチャ	75
5 1 3 2	ニューラルシステムハードウェア	77
5 1 4	超並列システムとの統合	80
5 1 4 1	統合システムアーキテクチャ	80
5 1 4 2	統合システムへのアプローチ — アクティブコグニションを例として	83
5 2	超並列システムからの検討	89
5 2 1	基本的考え方と概要	89
5 2 2	柔らかな計算モデルとそのアーキテクチャ	92
5 2 2 1	マルチパラダイムモデル	92
5 2 2 2	対象指向型データ駆動モデル	93
5 2 2 3	柔らかな相互結合網	94
5 2 3	柔らかなソフトウェア	96
5 2 3 1	言語の柔らかさ	96
5 2 3 2	OS の柔らかさ	98
5 2 4	超並列システムの実現	100
5 2 4 1	5-10 年後のデバイス技術と実装技術	100
5 2 4 2	相互結合網のトポロジ	103
5 2 4 3	実装可能なシステムのイメージ	105
5 2 4 4	超並列入出力/保守アーキテクチャ	108
5 2 4 5	超並列アーキテクチャ開発支援環境	110
5 2 4 6	超並列オペレーティングシステム	111
5 2 4 7	超並列プログラミング環境	112
5 2 5	超並列システムの開発に向けて	113

5 2.5.1	ゴール、サブゴールの設定 . . . . .	113
5 2.5.2	ソフトウェア開発環境としてのテストベッド . . . . .	114

# 第 1 章

## 序 と 概 要



# 第 1 章

## 序と概要

### 1.1 背景

21 世紀に向けて高度に情報化された社会を実現するためには、情報技術の観点から克服すべき極めて重要な技術課題が存在する。情報技術の究極の目標は、機械による人間の情報処理機能の代替と拡大にある。人間が日常的に行っている情報処理機能には、論理的情報処理と直観的情報処理の二つの側面がある。コンピュータの誕生以来 50 年の歩みの中で、それまで人間が行ってきた論理的情報処理機能をコンピュータによって代替する営為が行われてきた。コンピュータの高速かつ大規模な論理的情報処理能力は、今日の情報化社会の基盤を支えており、産業的意味のみならず文化的にも社会にとって不可欠の存在となっている。しかしながら、直観的情報処理については、従来コンピュータの苦手とする分野として扱われ、現在に至るまで技術的発展が著しく遅れている。現在のコンピュータは高速計算能力、データの直接的な記憶能力において人間をはるかに超えている。しかし、限られた時間内に、不完全なあるいは曖昧な情報をもとに状況を認識・理解する能力、総合的に判断してそれなりに適切な行動を起こす能力、そして最初は下手でも繰り返しているうちに次第に上手になるという学習能力などの、人間にとっては日常的ないわば「柔らかな情報処理」能力において、コンピュータは著しく人間に劣っている。現在のコンピュータに欠如しているこうした柔らかな情報処理能力の必要性は、パターン情報処理、知識情報処理、知能ロボトなど今日の先端的情報技術のさまざまな分野において共通した要請となっている。

限られた時間内に、限られた物量によって柔らかな情報処理を行なう機能の実現をはかることを考える。その実現環境として、自律協調的あるいは学習的な情報処理機構を付与された、数多くの並列分散的に動作する処理要素からなるシステムが適合している。この意味において、柔らかな情報処理技術のシステム基盤は、「超並列超分散情報処理」という計算の枠組みを反映したシステムによって与えられるといえる。人間の情報処理機構を考えると、柔らかな情報処理機能か脳という超並列超分散情報処理を行うシステムの上の実現されている。柔らかな情報処理と超並列超分散情報処理はいわば究極の情報技術にいたる車の両輪であり、両者の接点を探ることによって新たな情報技術の展開が期待される。そこで得られる知見こそが現在のコンピュータの限界を打ち破るものであり、21 世紀を展望した新しい情報技術の基盤を与えるものである。

### 1.2 内容

本報告書は、21 世紀を目指した新しい情報処理技術体系の確立を狙いとしている。具体的には、平成元年度にとりまとめた「新情報処理技術調査研究報告書（平成 2 年 3 月）」を踏ま

え、そこで提案されている「柔らかな情報処理パラダイム」を具体化し、その有効性、重要性について吟味することか平成2年度調査内容の主眼である。

本報告書では、まず柔らかな情報処理パラダイムの理念を明らかにする。本提案の思想的基盤を与える基本パラダイムとしての柔らかな情報処理について、情報処理技術の潮流の中でその必然性を位置づける。あわせて柔らかな情報処理の技術体系の枠組みを与える。ついで、柔らかな情報処理の理論基盤とそこでの研究課題、柔らかな情報処理のもたらす新しい情報処理機能について展望する。最後に、それらの機能の実現を支えるシステム基盤についての検討結果を示す。

ここで提案する研究開発計画では、柔らかな情報処理の理論基盤に関する理論研究を含むのみならず、それを基盤とする形でその上に広がる新しい情報処理機能の展開を指向した研究開発を内包する。理論基盤の確立とその適用分野としての新機能の開拓を相互干渉させながら、柔らかな情報処理パラダイムの実現を目指す。具体的な新機能領域としては、次のような分野を提案する。

- 1 画像、音声などの各種メディアの柔らかな認識・理解
- 2 自然言語、情報ベースなどにおける柔らかな推論・問題解決
- 3 人工現実感などの柔らかなヒューマンインタフェース
- 4 不完全問題の柔らかなシミュレーション
- 5 知能ロボットなどにおける柔らかな制御と統合化

柔らかな情報処理のシステム基盤を与えるものとして、ニューラルシステムと超並列システムについて目指すべきシステムイメージを与える。デバイス技術、実装技術の進歩について検討を行い、10年後に実現可能な具体的イメージと物量や電力消費量などの技術課題を示す。両者の統合化については、想定されるいくつかのシステムイメージを与える。超並列システムについては、10年間の研究開発期間を想定した場合の中間目標と最終目標、さらには研究開発を進めるうえで必要なシステム環境についての検討結果を示す。

結果として、昨年度報告書と比較して、具体化に向けて3歩ほど進めた内容になっている。時間的な制約から十分な議論が尽くされたとは言い難いが、今後さらに内容を深めるべく検討すべき研究開発計画の枠組みと方向性を与えている。

### 1.3 調査の経過

統合型コンピューティングWGにおいては、本年度実施すべき調査内容の確認を行ったのち、効率的な調査活動を行うためのWG体制について検討した。その結果、前年度報告書の具体化・詳細化を進めるためには、WGをサブグループに分割し議論を専門化することが必要であるとの認識で合意が得られた。本WGの担当する調査内容、WGの委員構成を勘案し、新機能 理論Sub WG、ニューラルシステムSub WG、超並列システムSub-WGの三つのサブグループに分け、調査活動を進めることとした。Sub WGの主査、幹事からなる幹事会を設置し、サブグループ間の連絡調整を行った。具体的な活動の経過は以下に示す通りである。



## 統合型コンピューティング WG

### 第1回 [9/14(金)] 17 30 ~ 20 00

- 1 平成2年度調査研究について
- 2 WGの調査体制および調査研究の進め方について

## 新機能・理論 Sub-WG

### 第1回 [9/26(水)] 18 00 ~ 20 00

- 1 Sub WGの体制についての説明
- 2 Sub WGの今後の運営、狙いについて討議
- 3 当面の調査課題の設定
  - ・ 「統合」についてどう考えるか
  - ・ 「柔らかさ」についてどう考えるか
  - ・ 新情報処理技術のポイントとしてどこか重要か

### 第2回 [10/18(木)] 17 30 ~ 20 15

- 1 「統合」、「柔らかさ」などの新情報処理技術のコンセプトについて各委員よりの報告と討論
- 2 第1回幹事会提出資料について意見交換

### 第3回 [11/ 6(火)] 17 30 ~ 20 30

- 1 議論をさらに詰めて行くための検討体制について討議し、運動制御、音声、画像、ヒューマンインターフェイスとシミュレーション、問題解決とデータベースの5つのグループ体制をとることに合意
- 2 国際ワークショップ（報告内容、報告者、招聘者等）について検討
- 3 第1回幹事会報告
- 4 ひきつづき「統合」、「柔らかさ」などについて討議

### 第4回 [11/19(月)] 18 00 ~ 21 00

- 1 国際ワークショップにおける報告内容の確認
- 2 各検討グループからの報告と討議
  - ・ ブレインマシンを核とした柔らかいシステム  
ロボット群の安定な動作に必要な機能と理論
  - ・ 音声応用における柔らかな情報処理
  - ・ 制約充足アプローチによる認識・理解
  - ・ 不良設定問題の変分問題への帰着  
量子力学計算機  
人工現実感と仮想環境  
新情報処理における問題解決

第5回〔12/10(月)〕 17 30 ～ 20 00

- 1 国際ワークショップの報告
- 2 各検討グループからの報告と討議  
音声認識理解・中間報告に向けて  
・ 柔らかな問題解決のポイント
- 3 中間報告のまとめ方および報告書目次案の検討

第6回〔1/11(金)〕 17 30 ～ 20 00

- 1 本年度 報告書の取りまとめ

ニューラルシステム Sub WG

第1回〔10/ 8(月)〕 17 30 ～ 20 00

- 1 第4回親委員会、第1回計算機科学分科会の報告
- 2 調査の進め方および議論すべき項目についての検討

第2回〔10/18(木)〕 15 00 ～ 17 00

- 1 ニューラルネットについて報告と討議  
・ ニューラルネットの多層化とモジュール化の手法  
・ ニューラルネットの多層化、モジュール化、自己組織化  
・ ネットワークの多層化と層当たりの多数化
- 2 今後の調査方針について検討

第3回〔11/ 8(木)〕 15 00 ～ 17 00

- 1 国際ワークショップ（報告内容、報告者、招聘者等）について検討
- 2 第1回幹事会報告
- 3 統合システムについて報告と討議  
・ ニューロモジュールの提案  
何かできるとおもしろいか  
・ 大容量超並列システム

第4回〔11/19(月)〕 15 00 ～ 17 00

- 1 個別検討課題の報告と討議  
・ アクティブレコグニションシステム  
・ 統合システムについて
- 2 国際ワークショップの報告用資料の確認
- 3 中間報告書のまとめ方について

第5回〔1/11(金)〕 17 30 ～ 20 00

- 1 本年度報告書の取りまとめ

## 超並列システム Sub-WG

### 第1回〔9/26(水)〕 17 30 ~ 20 00

- 1 第4回親委員会、第1回計算機科学分科会の報告
- 2 本年度の調査対象およびまとめ方について

### 第2回〔10/19(金)〕 15 00 ~ 17 00

- 1 調査課題（調査対象、まとめ方の骨子、調査アプローチ、および議論すべきトピックス）の説明と討論
- 2 海外調査の概要報告
- 3 「超並列システム技術」（電総研）の紹介

### 第3回〔11/5(月)〕 17 30 ~ 21 00

- 1 第2回計算機科学分科会の報告
- 2 Sub WG の調査研究課題について
- 3 調査研究課題の報告と討議
  - ・ 統合システムのイメージ
  - ・ マルチパラダイム・アーキテクチャ
  - ・ インターフェイスにおける柔らかさ
  - ・ 将来のデバイス・実装技術
  - ・ システムのロバストネス
  - ・ 超並列言語と計算モデル
- 4 国際ワークショップについて

### 第4回〔11/21(水)〕 17 30 ~ 21 40

- 1 国際ワークショップにおける報告内容の検討
- 2 Sub-WG としての全体的課題の検討
  - ・ 狙うのは Brain-like Computing System か、新概念のコンピュータか？
  - ・ 超並列システムの汎用性と専用性のトレードオフ
  - ・ システムの柔らかさが依拠すべき理論
- 3 個別課題の検討
  - ・ 統合システムについて
  - ・ Where is the Bottleneck?
  - ・ 超並列言語、計算モデル、超並列対象指向モデル
  - ・ マルチパラダイムアーキテクチャの具体化
  - ・ 超並列システムの実現イメージ
  - ・ W S I を用いた実装の検討
  - ・ 100 万から 10 億 P E 規模の実現イメージ
  - ・ W S I におけるネットワークの再構成法

第5回〔12/10(月)〕 17 30 ~ 21 00

- 1 国際ワークショップの報告
- 2 Sub-WG としての全体的課題の検討
  - ・ 「柔らかなシステム」パラダイムについて
  - ・ 機能の柔らかさとシステムの柔らかさの関係
- 3 個別課題の検討
  - ・ 柔らかなヒューマンインターフェイス
  - ・ 100 万から 10 億 P E の実現イメージの整理
  - ・ 超並列システムの分類 (系統樹)
  - ・ 研究拠点を結ぶ超高速光通信網
  - ・ ニューラルシステムとの接点
  - ・ データフローで 100 万から 10 億セルのシステムは可能か?
  - ・ データ駆動オブジェクトモダルの提案
  - ・ 無色透明アーキテクチャについて
  - ・ Brain-like Computing へのこだわり
  - ・ 超並列システムの開発戦略
- 4 Sub-WG の報告書目次案について

第6回〔12/20(木)〕 15 00 ~ 17 00

- 1 第3回計算機科学分科会報告
- 2 Sub WG としての全体的課題の検討
  - ・ 今までの議論で欠けていた点について
  - ・ 目標とする超並列システムアーキテクチャの提案
  - ・ 本年度報告書のまとめ方
- 3 個別課題の検討
  - ・ 無色透明な汎用超並列計算機
  - ・ 超並列システムの分類系統樹
  - ・ ハードウェアイメージと消費電力の見積
  - ・ 超並列システムの開発戦略
- 4 本年度報告書の目次案について

第7回〔1/11(金)〕 17 30 ~ 20 00

- 1 本年度報告書の取りまとめ

## 幹事会

第1回〔10/19(金)〕 17 30 ～ 20 00

- 1 海外調査の概要報告
- 2 各 Sub WG の活動報告と意見交換
- 3 国際ワークショップの招待者の検討

第2回〔11/26(月)〕 17 30 ～ 20 00

- 1 各 Sub WG の活動報告と意見交換
- 2 国際ワークショップのプログラムおよび報告内容の検討

第3回〔12/14(金)〕 15 00 ～ 17 00

- 1 中間報告書の目次案についての検討

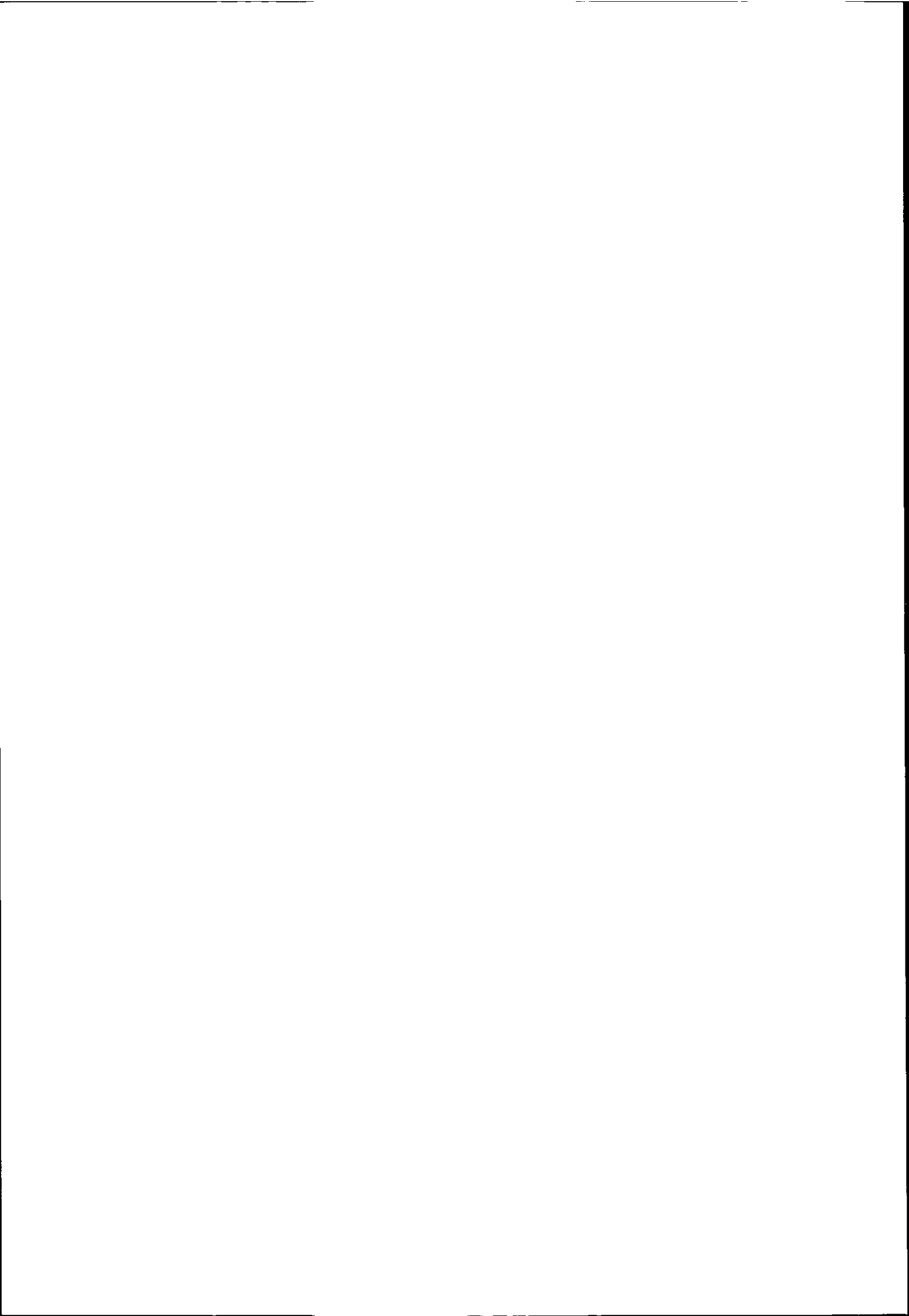
第4回〔1/25(金)〕 17 30 ～ 20 00

- 1 第4回計算機科学分科会の報告
- 2 本年度報告書の取りまとめ



## 第 2 章

### 柔らかな情報処理の理念





## 第 2 章

### 柔らかな情報処理の理念

従来の個別逐次的な固い情報処理方式の枠を越えて、21 世紀を目指した新しい情報処理パラダイムとして、柔らかな情報処理（より人間に近い柔軟な知的情報処理）の展開が望まれている。本章では、情報処理技術の歴史的な流れと、現在の技術的社会的要請をふまえながら、「柔らかな情報処理」の理念（why, what, how）について述べる。

#### 2.1 柔らかな情報処理パラダイム

##### 2.1.1 情報処理技術の潮流

そもそも情報処理とは、人間（生体）が環境の中でしなやかに生存していくために、長い進化の過程で形成した脳の機能である。それは、状況を認識し判断し、そして予測し行動を行うといった多面的で階層的かつ統合的な機能であるが、しいて2分化すれば、

A. 論理的情報処理（意識的、分析的、直列集約的、デジタル的）

B: 直観的情報処理（無意識的、総合的、並列分散的、アナログ的）

の2つの側面に分けて考えることができる。

情報処理技術は、本来、そうした脳の情報処理機能を機械化する試みであるが、歴史的には、技術的に実現しやすくまた理論的にも追求しやすい一方の側面 A（論理的情報処理）を、チューリングマシンを基本モデルとするフォン・ノイマン型計算機の上にデジタルな逐次手続的情報処理方式として展開した。そしてそれは、ハードウェア技術の驚異的發展に支えられて飛躍的に発達し、今日の支配的な情報処理パラダイムとなっている。数値計算や人工知能・知識工学における論理を主体とした記号処理はその流れに沿っている。

一方、「面倒、良く分からない」ということで切り捨てられてきた情報処理のもう一つの可能性、B の側面（直観的情報処理）については、認識機械の基本モデルとしてのパーセプトロンの提案以来、パターン認識や学習の分野で、また平行して多変量データ解析の分野において研究されてきた。直観的情報処理は、本来、曖昧で不完全な情報の並列分散的な処理であるか、従来型の逐次手続的情報処理方式の枠内で数値処理として研究されてきた。

しかし近年、記号と論理を主体とする固い情報処理方式、閉じた世界での理詰めの情報処理方式に対する反省から、また発達したハードウェア技術のポテンシャルにも支えられて、並列分散処理としての直観的情報処理の側面をもう一度再検討し、この方向を本格的に追求しようとする機運が興っている。今日のニューロコンピューティング、コネクショニズムのブームがそうであり、新しいパラダイムとしての並列分散学習型情報処理の計算原理の究明、そして柔軟で「より人間的」な情報処理技術の展開を求める新たな流れとなっている（図 2.1 参照）。

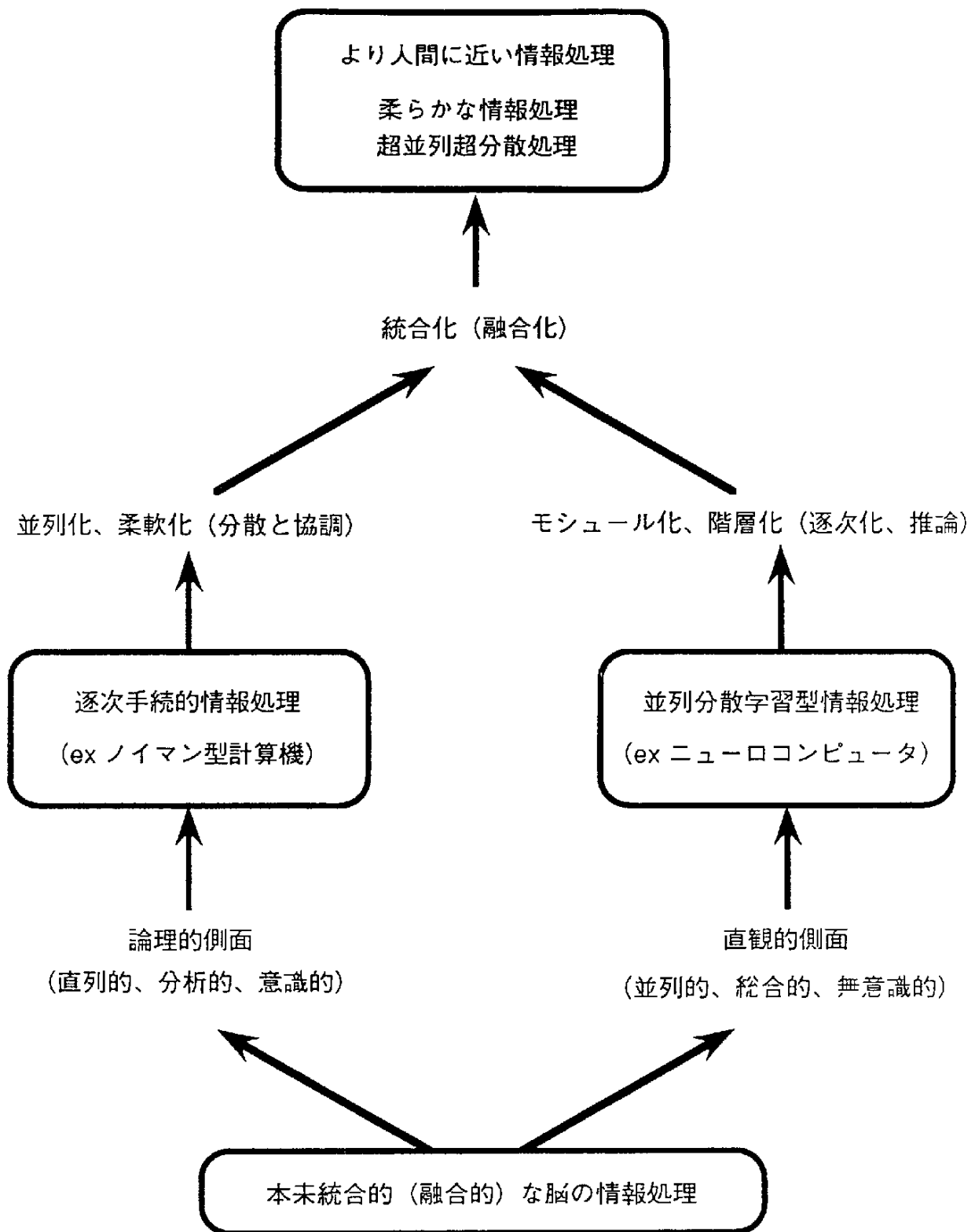


図 21 情報処理技術の分極化と統合

これら2つの情報処理技術の流れは、現在、方法論的にも分極化した2つの立場をなしているか、今後21世紀を目指した新しい情報処理技術の大きな流れとして、統合されて行かねばならない。実際動向として、従来の逐次手続型情報処理の流れは、分散と協調といった並列化の方向に進みつつあり、今後さらに柔軟化の方向を目指すと思われる。一方、並列分散学習型情報処理としてのニューロコンピューティングの研究は、現在の単一な機能から、構造化（モジュール化、階層化）を押し進め、推論機能、問題解決といったより高次の逐次的な機能の実現方向へと向かうと思われる。そして両者の流れは、統合化に向けて近づいて行くであろう。

### 2.1.2 技術的社会的要請

計算機技術、通信技術、さらには各種センシング技術のめざましい発展に伴い、我々の処理すべき情報の量と取り扱う情報の範囲（種類、質）は急速に増大しつつある。そして情報ネットワークの発達によって、ますます複雑化しつつある。このような情報化社会にあって、従来の情報処理パラダイムは果して十分に対処できるのであろうか。

従来型逐次情報処理方式は、与えられた課題に対して、問題をモデル化し、情報を数値／記号（＝概念）で個別集約的に表現し、それらの関係を決定論的な構造（方程式／論理・知識）として記述し、解法のための逐次手順（アルゴリズム）を陽にプログラムとして与えて行う情報処理方式である。いわば「完全情報の厳密処理」である。原理的には、問題が well-defined（厳密にモデル化でき、情報が完全に与えられ、かつアルゴリズムが存在する）であり、また計算時間を無視すれば（例えば、離散最適化問題の場合の組合せ的爆発）、チューリングの言うようにコンピュータは計算可能で万能であり、答えはいつも正しいであろう。

しかし、情報処理の応用範囲を拡大し、取り扱う情報の質と量、そして「情報処理」そのものの意味を広げて「本来、広く人間の行う情報処理の機械化」と考えるならば、「固い論理」に基づく上記の従来パラダイムの限界は明らかである。それは想定された状況（閉じた世界）での特殊な情報処理方式であり、一見無駄がなく効率的だが、余裕がなく柔軟性に欠ける。そのような逐次処理方式が実際に効率を含めて有効な範囲は意外と狭いことがわかる。事実、記号と論理を主体とし誤りを許さない従来の逐次方式の限界は、巨大ソフトウェア開発の困難さ（ソフトウェア危機）や、固くて狭いマンマシンインタフェースへの不満、そして多機能で融通性を持ったシステムや、人間に近い柔軟な知性を持った情報処理へのニーズ、といった形で現れている。

従来方式の単なる延長と計算パワーの増大では解決困難な情報処理の多くの問題、従って今後の新情報処理の扱うべき問題領域は、

- 問題や情報自身が曖昧性や不完全性を含む
- アルゴリズム（解法）がよく分からない、従って定式化（プログラム）出来ない
- たとえ出来ても、逐次方式では膨大な時間か掛かる（組合せ的爆発）
- 厳密な最適解でなく近似解でよいから高速（実時間）に得たい
- 条件や状況が時間とともに変化し、自律的な適応性が必要
- 不測の事態に対しても、ダウンすることなくそれなりに対処できること

といった性格のものであり、ill defined な極めて多くの問題領域を含んでいる。

従来方式がこれらに対して抱える基本的な問題点と、認識すべき [現実情報の持つ性質] は、次の3点に要約されよう。

- 曖昧あるいは不完全な情報の表現および処理の欠如 [情報の部分性 不確定性]
- 多数の要因が相互に複雑 ダイナミクに絡み合った問題の記述および処理原理の欠如 [情報の相互関連性・並列性]
- 適応性や汎化性の欠如 [情報の変容性・変動性]

そしてこれらは、実はさまざまなレベルでの情報の評価と近似の概念の欠如に起因している。

一方、人間はそのような状況においても実にうまく情報処理を行っている。全ての情報を一律にまともに処理するのではなく、状況に応じて必要な（重要な）情報とそうでない情報とをすばやく評価し、階層的な知識体系に照らして適当に要約 近似を行い、効率よく（手を抜きながら）柔軟に処理を行っている。

従って、今後ますます情報の溢れる情報化社会においては、そうした情報の評価と適切な要約・近似を積極的に取り入れた柔軟で効率よい情報処理技術を確立することは、必要不可欠で緊急な研究課題となっている。

### 2.1.3 新パラダイムとしての柔らかな情報処理

以上に述べた情報処理技術の流れと技術的社会的な要請をふまえて、従来の個別逐次的な固い情報処理方式の抱える問題点に対処し、その枠を越えて、21世紀を目指した新しい情報処理パラダイムとしての「柔らかな情報処理」（人間に近い柔軟で高度な知的情報処理）を展開するためには、まず、これまで切り捨てられていたもう一つの情報処理の側面である直観的情報処理を、もう一度基礎に戻ってその原理から研究し、新しい並列分散情報処理技術体系として大きく育てる必要がある。そして従来の論理的情報処理と統合（融合）していかなければならない。

そのためには、現在の分極化した記号処理とパターン処理とのギャップ、および論理的手続的な処理と直観的総合的な処理とのギャップを止揚し、非常に多数の多値（アナログ）量が空間的 時間的に分散的に存在するパターン情報と、集約的表現として論理的な構造を持った記号情報とを統一的 総合的に扱えるような、両者を包含できる情報処理の一般的な枠組みを構築した上で、根底となる論理のレベルから、「柔らかな情報処理」の理論的枠組および理論的基盤を構築する必要がある。

扱う変数が多種多様で数が多いことから、そのような「柔らかな情報処理」に必要な、そしてそれを特徴づけるさまざまな機能が導かれる。まず、ある時点での世界の完全な状態を知ることが実際的には不可能になる。従って、情報の不完全さ、曖昧さは不可避となり、これらを許容する柔軟な枠組みが必要となる。値の決まらないものや確率的にしか決まらないものを含む多くの変数を、従来方式で個別逐次に厳密に処理することは不可能となり、それらを全体として並列的総合的に取り扱う処理方式において情報を統合する機能、またそのような処理手続きを記述することも難しい場合には、問題解決（情報処理）の手続きを明示的に記述せずすみ学習 適応機能が必要となる。

さらに、そうした処理過程を実時間で実現するためには、計算基盤として現行方式の並列化 分散化の枠を越える新しいパラダイムの「超並列超分散情報処理」が必要である。そこでは、自律・協調的に、あるいは自己組織的に処理過程を実行するメカニズムが必要となろう（「超」の意味はその意味であり、単に大規模というスケールの問題として捉えるべきではない）。「柔らかな情報処理」は、この意味で「超並列超分散情報処理」と密接な関係にあり、前者の処理機能は、その実践に適したアーキテクチャといった後者の処理形態を規定あるいは示唆するであろうし、また前者の実時間での実現と応用は後者の強力な計算基盤を必要とする。

このように、新パラダイムとしての「柔らかな情報処理」とは、従来の確定的な世界での完全情報の逐次厳密な処理の枠を越え、より一般的で統一的な立場に立って、広く実際の情報の持つ曖昧さ・不確かさ・不完全さ、そして変容性・変動性を許容する情報表現と評価・近似の枠組みにおいて、記号やパターンといった多種多様な多数の情報を並列・同時に総合的かつ柔軟に処理し、またその枠組みの上に適応・学習機能を持つといった、人間に近い柔軟性と適応性を持った情報処理をいう。

そのポイントは、現実世界（利用者も含む）の生データから「現実的」な解を求めること、つまり生の情報（部分的な情報、解釈の定まらない曖昧な情報、矛盾を含む情報、不確かな情報）を総合し重要な情報を抽出して、実時間でもっともらしい解を（必要な範囲で近似的に）得ること、そして結果を現実世界に提示することのできる、いわば現実的情報処理といえよう。

## 2.2 柔らかな情報処理の技術体系

### 2.2.1 新情報処理技術のキーワード

パラダイムとしての「柔らかな情報処理」を、新しい情報処理技術として展開するうえで、まずそれを特徴づけるいくつかのキーワードの意味と相互の関わりについて、それらを掘り下げて考察しておく必要がある。

#### 2.2.1.1 柔らかさ

「柔らかさ」とは、論理と記号操作を主体とする従来の厳格な逐次情報処理の持つ「固さ」に対比して用いられている。従って、補集合としての多様性があり、そこにはさまざまな意味が込められている（頑健性、信頼性、適応性、汎化性など）。処理機能としての「柔らかさ」は、基本的には以下のようにまとめることができよう。

- 不完全 曖昧・不確かな情報をも許容してそれなりに処理できる柔らかさ
- 相互に関連し合った情報をそのまま統合（総合）して処理できる柔らかさ
- 状況に応じて情報を適切なレベルに要約し近似を行って処理できる柔らかさ
- 一を聞いて十を知るといった融通性（汎化性）を持って処理できる柔らかさ
- 時間や状況とともに変化する情報にも適応してしなやかに処理できる柔らかさ

そして、このような機能としての柔らかさは、処理方式やシステムとしての柔らかさ、さらには外界や人とのインタフェースの柔らかさなど、情報処理の側面や応用の局面において、さまざまな形で「柔らかさ」となって現れるが、それぞれ具体的に追求されねばならない。

これらの「柔らかさ」を支える最も基本となる機能は、先にも述べたように、「情報の統合機能」と「学習・自己組織化機能」である。そしてそれらを支える計算基盤が「超並列超分散情報処理」の枠組みである。従って、パラダイムとしての「柔らかな情報処理」は、より具体的な機能的な側面での言い方をすれば、「統合 学習型情報処理」と言うこともできよう。また、計算レベルでの処理形態的な側面を強調すれば「超並列超分散情報処理」と言うこともできよう。

#### 2.2.1.2 統合機能

ここで、「統合」と言うキーワードも、従来の個別分析的で分極化した情報処理方式やシステムへのアンチテーゼとして、情報処理のさまざまなレベルにおいて多義的に用いられる。

まず、より広い意味でパラダイム的には、

- 分極化 分業化された現在の論理的情報処理と直観的情報処理の統合
- 記号処理とパターン処理の統合
- 計算原理・計算モデルとしての逐次局所処理と並列分散処理の統合（例えば、フォン・ノイマン型コンピュータとニューロコンピュータの統合）

といった形で述べられる。そこでは、単に従来型をハイブリッドにするだけではなく、それらを統合し止揚する意味が込められている。

また、システムレベルでの「統合」としては、

- 要素機能（認識、推論、学習、最適化、行動など）の有機的な統合
- 部分と全体の統合

などが挙げられるが、そこには、単なる部分の組合せでなく、部分要素が他の部分あるいは全体と有機的に相互作用して、全体として統合されて新たな機能を実現することが期待されている。これはさらに、「機械と人との統合」といったヒューマンインタフェースの場面にも展開されよう。

これらの「統合」の意味、そしてそれらを成り立たせる条件を更に突き詰めて考えてみると、より根元的なレベルにおいて、

- 情報階層の統合（記号情報とパターン情報の統合、融合）
- 多数の多形態情報の統合（情報要約、総合判断）

といった、情報の縦の階層レベルあるいは横の空間的な広がりにおける多様な表現形態（モダリティ）を、それらの内包する曖昧さや不確かさを許容しつつ如何に統合的に処理をするかという「情報の統合機能」が中心的な課題であることがわかる。そこでは、上位情報表現形態を如何に作り出すか？（情報要約）、下位レベルでの情報形態と処理内容が上位レベルにおける相互作用の機能とどのように結びついているのか？、さらに記憶・知識がどのような形で関係するのか？、が重要な問題となる。概念形成や学習の問題、認識や推論の問題も、こうした各種の情報モダリティとそれらの関連（統合過程）の中で考える必要かあろう。

### 2.2.1.3 学習・自己組織化機能

「学習」というキーワードは、古くて新しい概念である。そこにも情報処理の側面とレベルにおいて、

- 外界の情報構造を概念 モデル・知識として形成する機能
- 情報の処理機能 方式を習得する機能
- さらには人間の感性や個人差へのシステムの適応機能

など、「適応化」、「最適化」、「自己組織化」としてのさまざまな意味が含まれる。

新情報処理技術では巨大システムを扱うことになるが、その場合、はしめからシステムの全ての構造を詳細に与えることは殆ど不可能となる。従って、システムの概要をモジュール化し、それぞれの内部構造や処理機能、モジュール間の結合構造に柔軟性（自由度）を持たせ

て、その後の使用状況に応じて最適となるように、学習・自己組織化機能を持ったシステムとして設計しておく必要がある。これによって、環境の違いや経時的な変化に適応する柔軟さや、さらには予期せぬ変化に対処しえる頑健さをシステムに持たせることかできる。

このように、学習・自己組織化は、情報処理の枠組みを、評価と最適化そして近似の枠組みにおいて、適応的に最適化するメタな処理過程とみることができ、階層に応じて、また最適化の方式において、さまざまな形での学習・自己組織化が考えられる。

#### 2.2.1 4 超並列超分散情報処理

以上のような「柔らかな情報処理」の実現には、多形態情報を分散的に表現し、並列分散的に実時間で処理することか要求される。現行方式の並列化・分散化の枠を越える新しいパラダイムの「超並列超分散情報処理」が必要である。人間の感覚系、記憶、思考の階層の中では、様々なモジュールが殆どランダム（非同期）に動作し相互作用する中で、ある集団的处理が起こる。この処理は極めて無駄が多い上に、常に完全な論理が展開されるわけでもない。しかしある程度型にはまった処理（統合処理）か独立的に進行し、そのいずれかが選ばれるという「競合と協調」のイメージである。従来の情報処理パラダイムは、曖昧性を排除して効率を図り無駄をなくすことだったが、新情報処理はこの考えを変えるであろう。そこでは、曖昧な対象（情報）を超並列超分散システム内でどうモデル化（表現）するか？、また階層性やモダリティーが表現できる（しやすい）こと、が重要な課題となろう。

#### 2.2.2 技術体系の枠組み

「柔らかな情報処理」を新情報処理技術体系として大きく育てるためには、その原理（記述の枠組と処理原理）を究明し新技術の理論的な基盤の確立を目指すとともに、超並列超分散処理のための計算基盤を開発・整備して、その上に新情報処理の基本要素となる新機能を実現し広く実際の応用の展開を図ることが重要である。そしてこれらか新情報処理研究開発の内容となる。応用のための新機能、その理論基盤としての基礎理論、そしてそれらを支えるシステム基盤（計算基盤）、この3層構造か新情報処理研究開発の大枠である。以下、それぞれの概要を示す（図2.2参照）。

##### (1) 理論基盤（基礎理論）

新情報処理技術の理論的基盤として、多種多様な情報の記述の枠組みと統合処理の原理、さらには認識や学習・自己組織化といった新情報処理の新機能の基礎となる柔らかな情報処理の理論体系の確立を目指す。もちろん、理論の実践に適した計算モデルやアーキテクチャといった計算基盤への示唆を与える理論的研究も重要である。

##### (2) 新機能・応用

新情報処理技術の応用の基礎となる新機能としては、まず要素となる高次の機能として次の4つを挙げることかできる。

- 柔らかな認識 理解機能
- 柔らかな推論・問題解決機能
- 柔らかなヒューマンインタフェースとシミュレーション
- 柔らかな制御機能

そしてこれらを実現するために基本となる機能としては、次の3つが考えられる。

- 多形態情報の統合機能（パターン情報と記号情報の統合も含む）
- 不完全情報処理機能（曖昧情報処理機能、意味情報処理機能も含む）
- 学習・自己組織化機能（適応化、機能分化、階層化も含む）

### (3) システム基盤（計算基盤）

新情報処理技術の計算基盤として不可欠な、そして柔らかな情報処理に適した超並列超分散情報処理を行うシステム（ニューラルシステム、超並列システム、およびそれらを統合したシステム）の研究開発を行う。また基礎技術として、それらのシステムのためのアーキテクチャ、ソフトウェアの研究開発も行う。

## 2.2.3 研究開発協力の枠組み

新情報処理技術の研究開発は、新しい情報処理パラダイムとして「柔らかな情報処理」の実現を目指し、統合・学習機能を備えた並列分散情報処理の原理究明と理論基盤の構築、および計算基盤（超並列超分散処理）の構築の上に、認識・理解 推論・問題解決・制御など、柔軟な知的情報処理の要素となる新機能の実現と広範な応用を目指す総合的かつ構成的（工学的）なプロジェクト（むしろ、より広大なプログラム）として位置づけられる。

従ってそこでは、理論基盤、新機能応用、計算基盤における研究開発の密接な連携が必要であり、学際的、国際的な規模での研究開発協力の枠組みが必要とされる。

特に、理論基盤の役割は、新しいコンピュータのアーキテクチャ、さまざまな新機能応用システムの設計原理・基礎モデルを与え、全体を統合する柱として極めて重要であり、これら計算基盤、応用との密接な連携、他の関連分野の基礎理論との学際的かつ国際的な研究協力が必要である。



より人間に近い情報処理

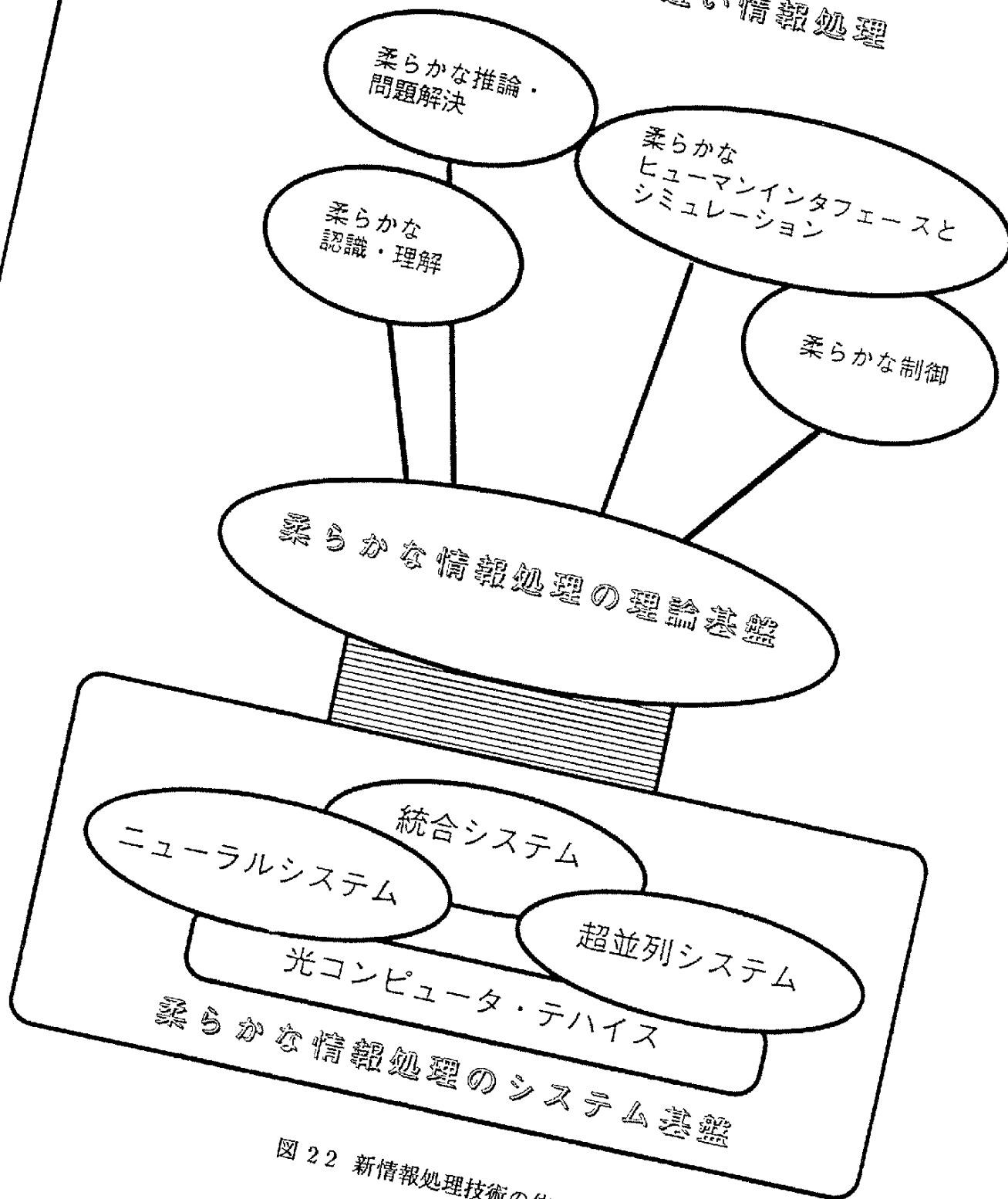
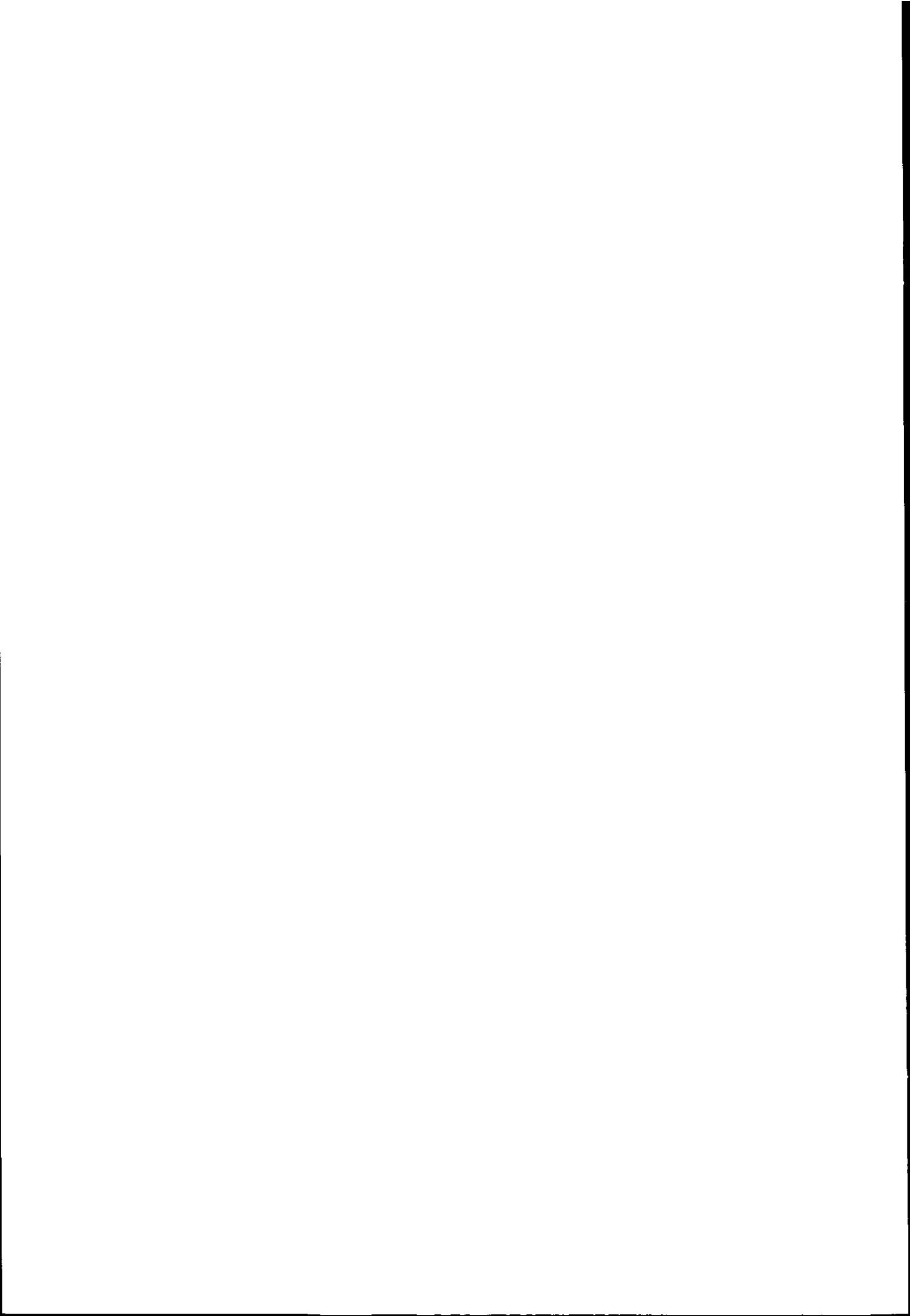
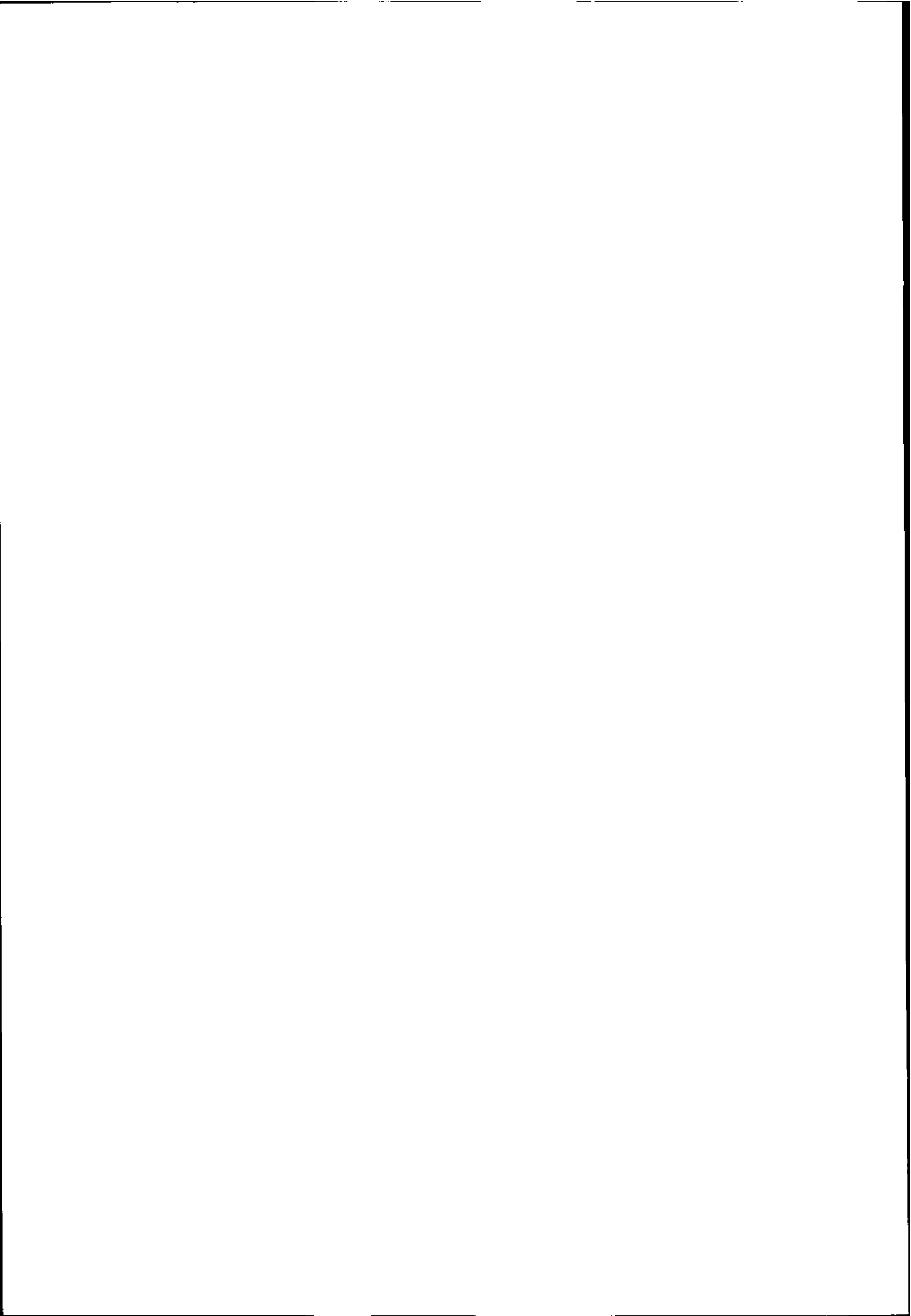


図 22 新情報処理技術の体系



## 第 3 章

### 柔らかな情報処理の理論基盤



## 第 3 章

### 柔らかな情報処理の理論基盤

#### 3.1 情報処理の一般的な枠組み

「柔らかな情報処理」の理論基盤について考察するにあたって、まず、情報処理の一般的な枠組みについて考察する（図 3.1 参照）。

情報処理は、基本的には、入力情報（表現  $\Pi_1$ ）を出力情報（表現  $\Pi_2$ ）に変換する過程（処理  $\Psi$ ）と考えられる。もちろん、得られる出力は何らかの意味で好ましいものでなければならず、そこには何らかの評価  $\Gamma$  が存在する。そしてそのような評価に基づき、処理  $\Psi$  は可能なかぎり最適化される（ $\Omega$ ）。最適化においては、何らかの知識（ $K$ ）が必要とされる。フィードバックとしての最適化は、処理に対するメタな処理であり、それは学習・自己組織化として捉えることもできる。その場合、最適化は知識に対しても行われる（アクティブなシステムでは、入力の選択などの最適化もありえる）。

従来の逐次情報処理は、入力から出力への変換過程（処理  $\Psi$ ）をアルゴリズム（プログラム）として厳密に陽に与える方式であり、評価や最適化および知識といったメタな部分は、通常、システム的设计者やプログラマーの頭の中にある。これに対して「柔らかな情報処理」は、前章で見てきたように、図中における情報処理の基本要素である情報の表現・処理 評価・最適化（学習）の枠組みを柔らかなものに拡張し、現在の分極化した情報処理技術を統合して、より柔軟で豊かな情報処理技術を展開しようとするものである。両者を図に照らして対比的に示すと、

##### 従来の逐次手続的情報処理

固い論理に基づく

$\Pi$  個別情報（記号 / 数値情報）

$\Gamma$  真 / 偽か中心 (implicit)

$\Psi$  逐次的な個別情報処理（手続き、変換規則）として与えられる (explicit)

$\Omega$  設計者の頭の中、あるいは試行錯誤的 (implicit)

$K$  設計者（エキスパート）の経験 (implicit/explicit)

##### 新情報処理（柔らかな情報処理）

柔らかな論理に基づく（拡張）

$\Pi$  多形態情報（パターン+記号）（拡張）

$\Gamma$  柔らかな（曖昧さ、不確かさ、不完全さを許容する）評価（拡張）

$\Psi$  統合的な処理（可変、評価  $\Gamma$  に基づき学習  $\Omega$  によって習得） (implicit)

$\Omega$  システムに積極的に組み込まれる

$K$  例からの学習によって帰納的に形成

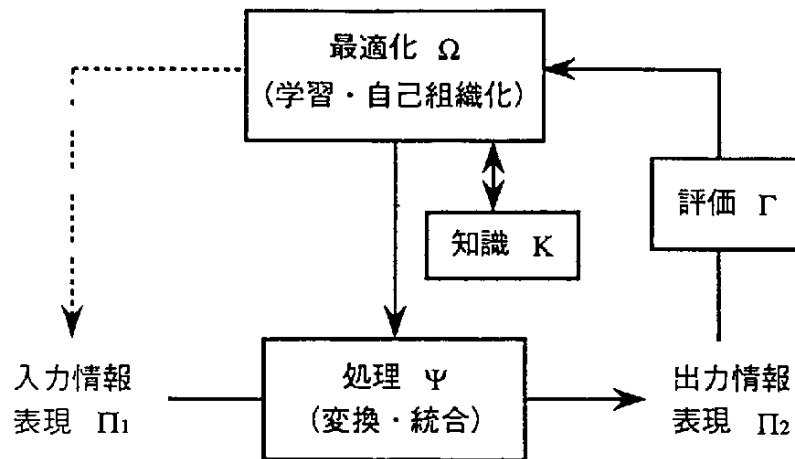


図 3.1 情報処理の一般的な枠組み

のようになり、「柔らかな情報処理」の枠組みは、従来方式をその特殊な（限定された狭い）場合として含む、より一般化された枠組みとなっていることがわかる。

### 3.2 知的情報処理研究の現状と問題点

ここで、知能のモデル化とその工学的実現（機械化）を目指す現在の知的情報処理の研究分野について、その現状と課題を概観してみよう。

#### (1) 人工知能・知識工学

記号表現と形式論理（固い論理）の決定論的な立場から、主に高次の知的推論の機械化の問題を追求してきた。論理の演繹的側面と知識表現に関しては一定の成果が見られるが、その下部を支える曖昧な帰納的側面（知識獲得と学習、いわばパターン認識の問題）の形式化が課題である。最近では、曖昧な命題を操作するファジィ推論（論理）も再考されているが、そこでのメンバーシップ関数や演算は必然性に欠ける嫌いがあり、帰納的側面からの一貫性のある議論は乏しい。その他、「固い論理」の柔軟化の方向としては、様相論理や時制論理などの研究、また並列分散化の傾向としては、並列推論、分散 AI、エージェント指向などの研究があるが、そうした論理と記号処理的な方式の延長だけでは、知能へのアプローチとして記号世界の限界を脱することは困難と思われる。新しいパラダイムの変換が必要と思われる。

#### (2) パターン認識と学習

確率 統計など非決定論的な立場から、主に低次の認識・学習といった直観的情報処理（主に帰納的側面）の機械化の問題を扱ってきた。特に統計的決定理論の応用（流用）は、初期の理論において、誤り最小識別（ベイズ識別）のための理論として成功したが、本来、推論と

いった論理の演繹的側面の問題意識は少ない。その後、研究は個別専門化して、実際的な手法、特に特徴抽出の技法と実験的な評価が中心となり、パターン認識全体としての理論的枠組みの意識は希薄となっていった。最近、知識の利用など、高次の人工知能の手法との結合も試みられているが、なかなかしっくりとは行かないでいる。また近年、「ビジョン」に関する理論として、不良設定問題（例えば2次元画像から3次元シーンを理解する問題）を制約付き最適化問題の枠組みで解く正則化理論など、新しいアプローチがあるが、そこでの制約条件（エネルギー関数）の導入は、未だアドホックな感しを免れない。

### (3) 多変量データ解析

対象に対して観測された多数の特性値データを個別に解析するのではなく、相互関係（相関）を考慮に入れて同時に統合的に取り扱い、データの持つ情報を効率よく要約し、我々の的確な評価や直観的総合的な判断に有用な形にまとめるデータ解析法である。主に曖昧な対象を扱う人文・社会科学において発達してきたが、柔軟な知的情報処理に積極的な形で組み込んで工学的な応用を図る立場は重要であろう。特に質的（記号的、2値論理的）なデータを量的（数值的、位相的）なデータに変換して取り扱う数量化理論は、質的パターンを量的パターンに還元する過程、また高次の記号レベルでのパターン認識や理解のモデル・手法として利用できよう。しかし、手法の多くは線形モデルでの定式化のため、それが限界ともなり、また手法の相互関係や本質的な意味は明確ではない。

### (4) ニューロコンピューティング

近年、ハードウェア技術の飛躍的發展にも支えられ、コネクショニズム、ニューラルネットなど、並列分散情報処理（PDP）の実際的で応用的な研究が盛んである。これは現在のところ、過去のパターン認識、特に学習の研究（パーセプトロン、連想記憶など）の実践レベルでの再燃、また記号論理的な認知研究の限界に対する反動と見るべきであろう。脳の情報処理様式を参考とする並列分散学習型の情報処理の原理的な可能性の追求、そして人間に近い柔軟な情報処理の可能性を示すものとして興味深い。しかし、そこでの並列非線形の相互作用による情報処理は解析が困難であり、結果の解釈や何が本質的であるかの理解を困難としている。またパターン認識理論（特にベイズ推定や多変量データ解析）との関係も、あまり明確にされていない。

このように、知的情報処理研究の現状は、高次の「思考」レベルに関する人工知能や知識工学における質的（記号的、論理的）情報処理と、低次の「認識」レベルに関するパターン認識や多変量データ解析、またニューロコンピューティングにおける量的（数值的、位相的）情報処理とに分極化（分業化）している。そして両者の間には未だ大きなギャップがあり、統合的ではない。これは、前章で指摘した論理的側面と直観的側面との分極化に相当している。

本来トータルで統合的な知能の機能的側面としての「認識」と「思考」、そして「学習」の側面が、分断的にそれぞれの方法論でモデル化されていて、相互の関係があまり意識されていない。そしてそのことが、それぞれの展開の限界と問題点をなすとともに、統合化を困難にしている。

今後、知的情報処理技術の応用範囲の拡大と高度化を図り、より人間に近い「柔らかな情報処理」の研究開発を押し進めるためには、これまでの分極化された質的情報処理の体系と量的情報処理の体系とのギャップを補間し統合するような、統一的な立場からの新しい理論的な基礎付けが望まれている。

### 3.3 研究の目標

以上に述べた研究の現状と問題点を踏まえて、「柔らかな情報処理」の理論基盤としての研究の目標は、次のように設定されよう。

これまでの個別分極化された関連分野の理論を整理統合して、背後のより本質的な一般理論の構築を目指すとともに、そのような理解に立って、より実際的な応用に即した新しい理論を展開する。これによって、新情報処理、すなわち機能としての「柔らかな情報処理」、またその計算方式としての「超並列超分散情報処理」の理論基盤を構築する。

具体的には、多変量データ解析、パターン認識、学習、確率的推論などを統合する「柔らかな論理」とベイズ推定の枠組（正則化理論を含む）を明かにし一般理論の構築を目指すとともに、その実際的な意味での近似、および並列分散コンピューティング方式として、ニューロコンピューティング、確率的弛緩法、アニーリング、制約充足・伝播などを包括する統合型コンピューティングの理論を展開する。

### 3.4 研究の内容

#### 3.4.1 パターン認識の再認識

そのためには、原点に立ち戻って、人間の持つ柔軟な知的情報処理の基礎をなす「認識」の問題を再検討する必要がある。いわば「パターン認識の再認識」（温故知新）が必要である。

パターン認識は、情報処理の入口として重要であるばかりでなく、連続的分散的情報表現（パターン）と離散的局所的情報表現（概念、記号）との接点にあって、本来、並列的な総合判断を特色とする。またパターン情報の持つ曖昧さや不確かさを扱わねばならない。その意味では、「柔らかな情報処理」の基本的な課題を含んでいる。また論理の基本的な側面も含んでいる。帰納的側面としての知識の獲得：事例（データ、経験）から、個々のパターンの特徴と概念との確率統計的な対応関係を学習することと、演繹的側面としての識別：未知パターンに対し、その特徴と知識から概念を推定することである。

従って、単に既存の確率論の応用としてパターン認識を考えるのではなく、パターン認識を特徴抽出を含めたトータルな枠組みにおいて理論的に考察し、背後に内在する「柔らかな論理」の現れとしての確率・統計的な論理構造を考察することが重要である。このような柔らかな論理の構造を明かにすることは、知識の学習形成、認識と推論、並列処理、総合判断といった、柔軟な知的情報処理の統合化の基礎として重要である。

特徴抽出に関する非線形理論の研究によれば、パターン認識や学習の背後の本質的な枠組みとして、ベイズ推定の枠組み、および帰納的確率論理（階層化された確率論理）としての「柔らかな論理」の枠組みが帰結される。そして、その線形近似として多変量データ解析の諸手法が統一的に眺められる。

また、ニューロコンピューティング、特に近年、パターン認識や制御の学習に盛んに応用されている多層アナログパーセプトロンの誤差逆伝播学習は、実は上記のベイズ推定の枠組みを、ネットワークの表し得る非線形変換の範囲で最小2乗近似していることが示される。

また、「柔らかな論理」の枠組みは、従来の確率論を階層的な確率構造の総体を扱えるように拡張したものとなっていて、上位概念（記号）間の関係（位相）か、それらが下位概念に対して持つ確率的対応関係の統計的要約として帰納されることを示唆している。これは、記号論理的な構造体と数値的な情報とを階層的に統合するための理論的な枠組みともなり、確率的な推論（帰納と演繹）や類推といった柔らかな推論方式の基礎となろう。



### 3.4.2 制約充足パラダイム

このように、不確かな情報を扱う「柔らかな情報処理」を、一般に確率統計的な推定の問題として「ベイズ推定」の枠組みから捉えるパラダイムに対して、もう一つの観点は、いわゆる「制約充足パラダイム」である。これは、情報処理における問題解決を、与えられた制約を満たす解を求める問題として捉える（例えば、連立方程式）。

しかし実世界の多くの問題では制約条件が完全に与えられることは少なく、部分的に与えられるのみである（情報の部分性・不完全性）。従って論理的には、解は一意には決まらない（不良設定問題）。このような場合にも「それなりの妥当な解」を求める「柔らかな情報処理」の立場からすれば、他の何等かの評価規準を主観的な制約条件として付け加えることによって、そのような解を一意に求めることができる。

先に述べた正則化理論は、このような制約充足の考えを条件付き最適化問題として定式化したものであり、そこでは、制約条件は一般にエネルギー関数（物理からのアナロジーであって、いわゆる評価関数と考えてよい）で統一的に表される。そして最小化すべき目的関数は、[客観エネルギー] + [主観エネルギー] で与えられる。一般に、客観エネルギーは「モデルとデータとの誤差」、主観エネルギーは「モデルに関する複雑さなどの評価」であり、ある種の最小2乗モデルフィッティングと考えられる。

ニューロコンピューティングのネットワークとして、エネルギー最小化ダイナミクスによる Hopfield ネットワークや Boltzmann machine に代表される相互結合ネットワークがある。これらは、並列分散処理の新しいパラダイムとして、離散組合せ最適化問題の柔らかな（組合せ的爆発を回避する）解法として応用されている。また視覚情報処理への応用としては、初期視覚のレベルではあるが、画像修復の確率的弛緩法や、その他の不良設定問題の正則化の処理方式として応用されている。これらは、いわゆる制約充足パラダイムを、相互結合ネットワーク上のダイナミクス（並列分散処理の逐次反復計算）として実行していると見なすことが出来る。問題をニューラルネット（一つの並列分散処理モデル）や熱力学的なダイナミクス（確率的弛緩法 + アニーリング）で解くことは、必ずしも問題の本質的な理解にはつながらないか、一つの実際的な（近似）計算方式としては大切である。

理論によれば、大域的な性質（エネルギー、ポテンシャル）が局所的な関係（Markov Random Field 条件つき確率構造）に等価に対応づけられ、そして前者の最適化問題が統計的推定（ベイズ推定や最尤推定）の枠組みに帰着されることが知られている。このことは、上記のベイズ推定と制約充足のパラダイムが統一的に関連を持つことを示唆している。実際、ベイズ推定での先験確率の主観性は、制約充足の主観エネルギー項に対応している。こうした主観項は、アドホックに流れやすいか、情報処理における主観的な評価や価値の定式化の問題として重要であり、実は情報処理の本質的な部分でもある。

### 3.4.3 一般理論構築への確率論的アプローチ

以上の考察を踏まえて、一般理論構築への確率論的立場からのアプローチ（戦略）の素描を以下に示す。

- 一般的な情報表現の枠組みとして、確率表現を用いる（時間的な因果関係も条件付き確率として）。
- すべての情報および知識は、その変数空間上の（主観的な、拡張された）確率分布に関する制約であると考えられる。通常の情報とは、ある時点における個々の確率変数（あるいはその

組合せの値)に関する制約、通常の知識は、ある程度の時間範囲において成り立つ確率分布に関する制約(構造)と考える(例えば「柔らかな論理」)。

- このとき、情報処理の問題は、一部の変数についての制約(値や条件)か情報(証拠)として与えられときに、他の変数(仮説)の値を、知識の制約のもとに最尤的に(事後確率最大的に)推定する、一般的な確率的推論(ベイズ推定)の問題として定式化される。
- これを、そのまま逐次弛緩的に最適解探索する立場が制約充足や相互結合ニューラルネットであり、関数(写像)の形で陽に近似する立場が多変量解析や多層ニューラルネットである。
- 制約充足原理や正則化理論におけるエネルギー関数  $E$  は、Gibbs 変換  $P = \exp(-E/T)/Z$  によって事後確率分布  $P$  と対応づけることができ、エネルギー最小化は事後確率最大化、すなわちベイズ推定であると解釈できる。
- 推定を効率的に実現するための唯一の手段は、分布関数を必要な範囲で局所的に、簡単なモデルによって近似することである。近似がうまくいけば、実際的な速度で問題の解を求めることかできる。
- こうした広い枠組みにおいて情報処理の問題をとらえることにより、パターン認識・学習や人工知能の問題は、モデルおよび変数値の推定問題として、統一的にとらえられ、これらをベースとして「柔らかな情報処理」の理論的基盤が構築されよう。

以上が統一的な一般理論の構築の概要であるが、実際的には、その近似的な確率計算の手法の研究などが重要である。その際、理論の大枠を、例えば個々の問題の特殊性を考慮して、簡略化し具体化すること、計算メカニズムまで帰着させることか重要である。また、時間的なダイナミクスを含められるような拡張も望まれる。計算基盤の発達は、こうした新しい情報処理パラダイムのリアリティを十分支えるものと思われる。

### 3.5 研究項目と課題

柔らかな情報処理においては、情報処理の基本要素(情報の表現、処理、評価、学習 自己組織化)の枠組みを柔軟なものに拡張する必要がある。従って、柔らかな情報処理の理論の研究は多岐に渡るか、基本的には次の研究項目に整理される。

- 情報の柔らかな表現
- 情報の柔らかな処理
- 情報の柔らかな評価
- 最適化、および学習 自己組織化

以下、それぞれの項目について、研究すべきより具体的な課題を示す。

#### 3.5.1 柔らかな情報表現

記号処理では、離散的な記号による情報の集約的表現が前提とされ、パターン処理では、連続な数値による情報の分散的な表現(位相的表現)が前提とされている。これらの情報を柔軟かつ統合的に取り扱うためには、両者を包含し不完全性や曖昧性を許容する記述の枠組みとして、柔らかな情報表現の理論をまず構築する必要がある。

- 記号情報とパターン情報を含む多数の多形態情報の統合のための柔らかな表現の枠組
- 多変量データ解析における数量化理論の拡張
- 記号、代数系の理論に位相的表現という視点を導入すること
- 分散的表現と、空間的 位相的な表現の枠組

### 3.5.2 情報の柔らかな処理（統合）

柔らかな情報表現によって記述された情報を、曖昧性や不完全性を許容しつつ近似的に最適に処理するとともに、それらを統合的に処理することによって、有用な情報を得るための柔らかな処理（統合化）の理論が必要である。また処理過程自体の記述も柔らかな表現として処理の対象にできるような、処理の階層性を保証することが必要である。

- 多形態情報の統合と情報抽出（要約 近似）（認識、総合判断、理解）
- 線形および非線形多変量解析の理論、柔らかな論理の応用
- 最適化や最適解探索
- 非線形最適化による離散問題の近似解法
- 制約充足や正則化による ill posed 問題（不完全問題、逆問題）の処理（解法）
- 知識とデータの柔らかな統合による柔らかな推論 連想・類推
- implicit な意識下の直観的処理と explicit な意識上の論理的処理との統合
- 処理の階層化

### 3.5.3 情報の柔らかな評価

上記の情報の近似処理や統合処理を含む柔らかな処理においては、処理結果の評価が重要であり、最適化とも密接に関係する。また処理モデルの選定の評価も、学習 自己組織化と関連して重要である。評価の問題は、理論的にもしっかりと研究整理する必要がある。また応用分野の拡大とともに、そのような評価基準を豊富に拡張することも重要である。

- 柔らかな評価の理論的枠組（近似の良さ、尤らしさの評価、価値や感性も含む）
- 近似誤差の評価
- 結果の確からしさの評価
- 最適解の確率的評価
- 価値観や感性を評価に取り込む方法

### 3.5.4 最適化、および学習・自己組織化

処理結果の評価や問題の特性を利用して、処理過程を近似的に最適化する過程として学習や自己組織化を考えることができる。すなわち、学習・自己組織化とは、処理過程を対象とした処理（メタ処理）である。さらに、こうした学習・自己組織化自体も、より高次の処理の対象となるように処理の階層を構築できる必要がある。その場合、ジェネティクアルゴリズムや発達概念など、生理学や心理学から示唆される知見を踏まえた研究も重要であろう。また、学習可能性や汎化能力の評価といった基礎的な問題の理論研究も大切である。

- 柔らかな論理に基づく帰納推論としての学習法
- 柔らかな知識の形成法（階層化）
- 機能のモジュール化・構造化・階層化、およびその自己組織化
- 情報処理の階層化による学習・自己組織化の階層化
- 学習可能性や汎化能力の評価の基礎理論

### 3.6 研究の進め方

前半では、ニューロコンピューティングや多変量解析など、これまでの並列学習型情報処理の理論やモデルを、「柔らかな論理」の観点から理論的に整理するとともに、比較的低次の認識や推論など基本的な新機能の構成理論を展開する。また具体的なインプリメンテーションと検証を通して、問題点や限界を明らかにする。

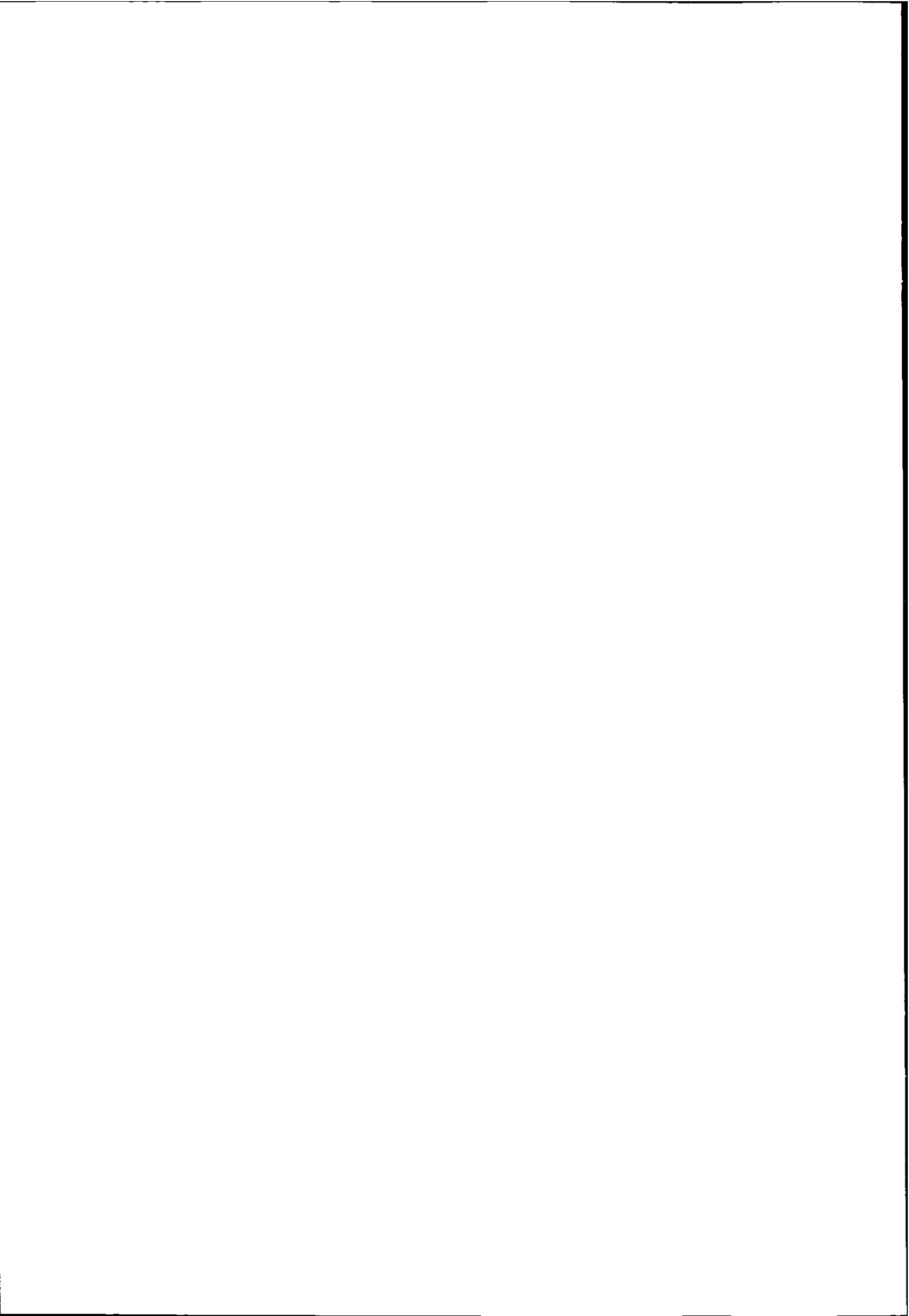
後半においては、これらの上に、より高次のより複雑な（構造化された）機能実現のための理論・モデルへと、構成的に理論のビルドアップを図り、柔らかな情報処理の理論体系の構築を目指すとともに、システム的な応用研究も行う。この段階では、研究実験環境としての超並列システムの開発かなされてきて、それらを利用できることが望ましい。

理論の研究においては、理論のための理論研究に陥ることのないように、絶えず他の学問領域（神経科学、認知科学、情報科学）の成果や知見をにらみつつ、応用を目指した方向で研究を進める必要がある。そのためには、他との有機的な連携が重要であり、それを確保するための研究開発体制をしっかりと考えておく必要がある。理論、アーキテクチャ、応用といった従来の線形な展開フェーズではなく、かといってそれぞれが独立平行に進んではならない。理論と他がうまく連携できる新しい強力な仕組みを考えることは、研究開発体制の重要なキーポイントとなろう。

そのような理論と応用の連携の中継点は、基本機能や要素機能のレベルとなろう。このレベルにおいて、理論グループはシードを出し、応用グループはこれらを実際の応用システムに生かす。また逆に、応用グループは具体的な問題をこのレベルに掘り下げて理論グループに提起し、理論グループはこれを受けて、新たな理論・モデルの構築を行い、フィードバックを図る必要がある。

## 第 4 章

柔らかな情報処理のもたらす新機能



## 第 4 章

### 柔らかな情報処理のもたらす新機能

#### 4.1 新機能領域の展望

従来の情報処理方式は、完全に整ったクリーンなデータの入力や、データの発生源についての完全な情報が利用できることを前提としている。このため、利用者は、実現したい機能に応じて情報処理方式が前提とする枠組に適合したクリーンなデータやデータ発生源についての情報を入力／設定することが必要であった。言葉を替えれば、これまでの情報処理システムは、利用者の努力に助けられて受動的に現実世界の把握を行ってきたと言えよう。さらに、これらの把握結果に基づいて外界を制御する場合も、現在の方式では、十分に素性の分かっている対象を管理された環境の下で操作することを前提としている。この場合も、人間による支援があってはじめて、与えられた枠内で外界に関与することが可能であった言えよう。

近年、情報処理の高度化と分野の拡大に伴って、これらの人間の支援を前提とせずに、(人間を含む)外界を理解し直接外界に働きかけることのできる情報システムを実現し、むしろ人間を支援してその問題解決能力を拡大するような方向での技術革新への期待が高まっている。しかし、“確定的な世界での完全な情報の厳密処理”を基本とする従来の情報処理方式では、

- 1) 曖昧あるいは不完全な情報の表現および処理、
- 2) 多数の要因が相互に複雑 ダイナミックに絡み合った問題の扱い、
- 3) 情報システムの環境 状況への適応能力および汎化機能の実現、

等に対する方法論の欠如のため、これらの要求に応えるのは極めて困難であると認識されるに到っている。

「柔らかな論理」を理論基盤とし、広い意味での超並列システムをシステム基盤とする「柔らかな情報処理」の概念は、上記 1)~3) の問題点を解決するための情報表現と処理原理を確立し、上記の期待に応え得る新たな情報処理技術体系を構築しようというものである。これは、基本的には、外界の変容 変動に対して強固 (ロバスト) な情報システムを実現することである。応用システムのレベルでは、例えば、人間の支援や協力を頼らずに現実の世の中において機能することのできる情報処理システムの実現や、多数の感覚モダリティーや自然言語等を駆使したインタフェースを介して人間との相互作用のバンド幅を拡大することで経済、環境問題等の複雑で相互に依存する大規模な問題の解決を支援できるシステムの実現である。これらの応用システムを実現するためには、単一のモダリティーのみに依存することなく多数のチャンネルを介した外界との相互作用を通して能動的に外界のモデルを構成していくための方法論と、入手し得る不完全な情報とモデルに基づく総合的な状況判断の結果に応じて柔軟に処理方策を選択し変更できる情報処理の枠組が必要である。

柔らかな情報処理の技術体系の確立には、求められている個別の具体的な応用システムの基本となる“高次の機能”(新機能)を抽出し、前章で述べられている理論基盤を活かしつつ機能領域に固有の制約を取り入れることによって、それらを実現する必要がある。新機能を要素技術のレベルで眺めると、現実の世界における画像や音声のような曖昧で不完全なパターン情報の柔らかな処理であり、膨大な常識に基づく柔らかな推論を必要とする自然言語の処理である。これらの要素技術を現実的な応用に耐えるレベルで実現するための基盤は、超並列超分散型のアーキテクチャに適合した情報表現と処理方式による信号処理から推論、問題解決、シミュレーションに至る各々のレベルにおける高速処理である。さらに、これらの要素技術を用いてより人間に近付いたインタフェースを実現するための複数のメディアの統合機能、ロボトにおける機能の統合化等のよりマクロ的な機能の実現も必要である。また、個々の機能に内在する共通的な基本機能として学習 自己組織化がある。

このように、柔らかな情報処理技術体系の確立には、相互に関連した様々な領域での様々なレベルの高次機能の実現が必要であるが、以下では、これらの新機能領域を

- 1) 柔らかな認識 理解、
- 2) 柔らかな推論 問題解決、
- 3) ヒューマン インタフェースとシミュレーション、
- 4) 柔らかな制御と統合化技術、

の四つに整理し、それぞれについて「柔らかな情報処理」の立場からの研究の方向を明らかにするとともに、具体的な研究開発課題とその内容を提示する。また、これら新機能の応用イメージにも言及する。

## 4.2 柔らかな認識・理解

### 4.2.1 画像技術

#### 4.2.1.1 現状と問題点

画像の認識とは、外界を観測して得られた画像データを入力として、対象を計測、分類あるいは発見することであり、広い意味で入力画像を“解釈”することが基本となる。例えば3次元シーンの画像から物体を認識するためには、画像から手がかりとなる特徴を抽出する一方、コンピュータ内部に持っている対象のモデルから画像に現れる特徴を予測する。そして、入力画像から得られた特徴とモデルから予測された特徴を照合することによってシーンを3次元的に解釈する。この種の問題では、

- 1) 多数の要因(視覚モジュール)が複雑かつダイナミックに絡まっており、問題の全体を明確に定義することが難しい(不整形問題)、
- 2) 問題を分解して部分問題を定式化できたとしても、与えられたデータだけでは情報が不足し、解が一意に決まらなかったり、また逆に、データが誤差を含んでいるために、データと完全に矛盾しない解は存在しなかったりする(不良設定問題)、
- 3) 解釈の可能性をすべて調べて厳密解を求めようとすると計算量の爆発を招く、



といった困難がある。このことは、我々が外界を認識している過程をアルゴリズム化するよう求められても、(今のところ)「よく分からない」し、3次元シーンの2次元投影像を3次的に解釈する場合に、解釈の可能性が膨大で一意に定まらないことも多いという経験から容易に想像できよう。

上記の困難に加えて、情報そのものが不完全であるという問題も抱えている。すなわち、

- 4) 対象を完全に観測することは不可能であり(通常の画像は、ある特定の方向から見た対象の情報を限られた空間分解能で取得しているにすぎない)、また、対象の完全なモデル化も一般には不可能である、
- 5) 入力された情報からの特徴抽出も不完全であり(例えば、完全なセグメンテーションは期待できない)、前段での処理の完全性を仮定すると破綻をきたす、

といった問題である。このような困難のため、個別事例的なアドホックなプログラムを書くということになりがちである。このため、従来実現されているシステムでは対象世界あるいは実現する機能を極端に限定せざるを得なかった。例えば、対象について多面体や剛体の仮定をおくことか多く、簡単な分類を行っているにすぎない。

しかし今後、認識対象を人間を含む自然界に拡大しようとする複雑に絡みあった動的な軟体をも対象として取り扱う必要がある。また、現実の世界は情報が時空間のパターンとして分布しており分布の形そのものに意味があり、個々の要素を繊細にみるとかえって不明確になるなど、空間における分解不能性、時間における分解不能性がみられる。このことは情報は個々の要素だけでなく要素相互間の関係に有ることを示している。

このような認識・理解に固有の困難を克服するためにはどうすればよいのだろうか。我々人間の視覚センサ部は特別に高精度なものではなく、入力情報は不正確である。このような個々の不正確な情報から、ある特定の解釈が瞬時に導かれるのは何故だろうか。画像理解においては、「そもそも情報が完全に与えられることはなく、不完全なデータと問題の解空間を限定する“部分的な制約=知識と仮説”しか与えられない」という観点に立つ必要がある。今後は、このような観点から、入力情報の不完全性に対処し、同時に計算量の爆発を回避しながら近似解を高速に得る研究パラダイムの構築が不可欠である。これは「超並列システム」を想定した「柔らかな情報処理」の研究開発に他ならない。

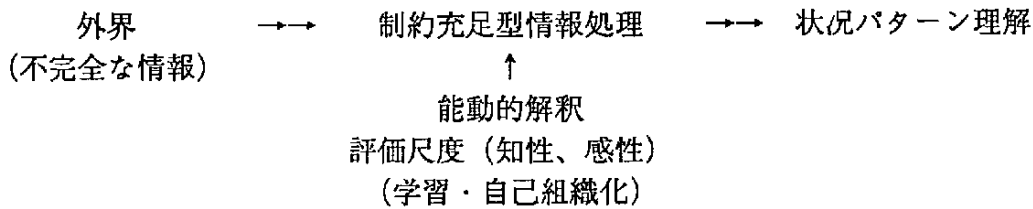
#### 4.2.1.2 研究の目標

人間の持つ環境および状況に対してロバストな認識・理解機能を工学的に実現する。具体的には、外界の情報が不完全で矛盾を含んでいるために数学的に不良設定な認識問題に対して、対象の性質やおかれている状況を制約条件として付加することにより良設定な最適化問題を定式化し、そのための解法について研究開発を行う。また、高速に準最適化を得るために、超並列システムでの実行に適した並列分散処理による近似解法の研究を行う。さらに最終的には、統合認識システムプロトタイプにおいて実現機能を検証する。

##### (1) 画像理解における最適化問題の定式化

画像理解における上記問題点を克服するために、置かれている状況を把握し、新たな思い込みや、視覚のハードウェア的な制約などの制約条件を導入することによって、制約付き最適化問題として定式化する。すなわち、問題を制約充足問題として捉え、情報の不完全性を許容する形で問題を厳密に定義する。また、このような定式化を明示的に与えることのできない問題

に対しては、事例から問題の定式化そのものを学習するような高度な自己組織化機能も必要となる。



## (2) 画像理解のために定式化された問題の解法

制約付き最適化問題として定式化された画像理解の問題を解決するために、多数の変数とモジュールの相互作用による超並列、超分散、協調形の計算を基本として、制約伝搬による制約充足型情報処理手法の研究開発を行う。その場合、厳密解の追求とともに、高速に近似解を得るための近似解法の探求も必要である。

## (3) モデルを基礎とした認識

人間は経験を通じて、脳の中に多くのモデルを築いていると考えられる。環境を理解するときに、それらが有機的につながりあわせて使用されるものと考えられる。そこで、人間に近い視覚認識機能を実現するためには、モデルの記憶の形式、モデルの想起 連想法、入力画像から得られる記述とモデルとのマッチングなどについて研究を行うとともに、これらを有機的に結び付ける統一的な枠組を開発する必要がある。また最近、動きに伴って連続的に入力される外界の情報は記号情報だけでなく記号に付随するイメージ情報そのものも記憶されると考えられて来っており、このようなパノラマ記憶の形式を明らかにし、工学的な実現を図る必要もある。

### 4.2 1.3 研究の内容

#### (1) 最適化問題の定式化と目的関数の学習

不良設定問題の解法はパターン認識や学習全般に深く関係しており、これを解くために、通常、目的関数(エネルギー関数とも呼ぶ)を定義し、これの最小値あるいは最大値を探索する最適化問題が定式化される。このエネルギー関数は一般に客観的エネルギーと主観的エネルギーに分解される。ここで、客観的エネルギーは外界から入ってきたデータとモデルとの誤差であるが、この項だけでは上記のような不完全な情報の場合には解けない。そこで、対象の一般的な性質、それか置かれている状況、ものの見え方と認識主体の見方などの制約条件を主観的エネルギー項として表現することによって問題を良設定問題に変換して解こうという枠組である。

このような最適化アプローチにおける重要な課題は、エネルギー関数の中でも主観的エネルギー項をどのような形に定めるかということであり、前もって与えることかできないことも多い。このため、多くのデータからデータの背後にある規則を獲得し、エネルギー関数の形を求める学習の問題が重要である。また、最適化手法は個々の視覚モジュールを実現するレベルとともに、モジュールを統合するレベルでも有効であると考えられるか、後者については具体的な研究事例がほとんどなく、最適化原理によるモジュールの協調動作などの有効性の実証は今後の研究開発に負うところが多い。

#### (2) 最適化問題の解法

上記のように定式化された最適化問題は、一般には線形でなくいくつかの局所的なローカルミニマが存在する。このため、これらの問題の解決には、シミュレーテッドアニーリング (simulated annealing) や遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm) などの大局的最適化手法の利用が考えられる。しかし、これらの手法には、現在のところ逐次的な要素が内在しており、最適解 (あるいは近似的な準最適解) を得るまでには膨大な計算時間を要するという問題がある (収束の遅さ)。高速化を図るために超並列アーキテクチャに適した並列分散最適化アルゴリズムの開発が必要である。また、ここでの最適化アルゴリズムの計算構造がアーキテクチャに指針を与えることになろう。

### (3) 時空間把握のための柔らかなモデル

従来は、主として単純な形状の剛体を基本要素とし、その論理的な結合を議論する幾何学的な形状モデルが考えられてきた。このままでは、自由形状や成長をとまなう対象、あるいは環境の変化によって変形する対象を扱えない。

軟体や連続的に変化する対象を柔軟に表現するために、入力情報と多様に対応づける変形可能な形状モデルの開発を行う。ここで、モデルと画像との照合は、画像特徴からのポテンシャルと“よい連続の法則”からくる対象の連続性や滑らかさなどを制約条件とした最適化問題として捉えることによって柔らかな照合が可能となる。さらに、コンピュータグラフィクス技術との融合の視点から、これらの形状のモデル化手法の開発とともに、モデルからの特徴生成、画像生成機能を合わせもった認識用形状モデルの開発を行う。

### (4) モデルと特徴統合

画像理解のきっかけは、対象画像領域の輪郭、濃度変化、テクスチャ変化などであり、これら個々の特徴の統合的処理と情景や対象の空間的配置などから対象物のモデルを想定し、これを用いて対象物を能動的に理解する。そのために画像理解アルゴリズムは、画像の特徴から状況理解の記号による表現にいたる多くの階層に係わる問題をアドホックでない方法で解決することが求められる。

具体的には、空間的に配置された特徴を有機的に統合し、それらを適切な段階の階層に表現するアルゴリズムを発見する研究を行なう。そこでは、入力画像から得られるものと、先見的な知識から得られるものの融合が求められる。また、これらの処理アルゴリズムは画像パターンの持つ局所的で一様である性質を本質的に反映し、かつ全体的には各階層の要素の組合せの爆発を準最適にはあるがさける形で解くものであることが要求される。

### (5) ビジョンプログラム合成 — 認識戦略の自己組織化 —

画像認識・理解の要素は、いくつかの機能モジュールで構成される。具体的な応用の側面では、個々の機能の実現や高度化のほかに、各種機能を手軽に利用できるためのソフトウェアのモジュール化や、情報表現の統一などが重要である。さらに、与えられた最終目的からタスク (何をすべきか、どうすべきか) の分析を行って全体のプログラムを生成する段階では、モジュールの選択やパラメータの指定を、サンプルの例示によって自動的にを行う自己組織化の能力が要求される。このために、いくつかのモジュール列を発生し、複製をゆるすことによって環境に適応したモジュール列が支配的になるような遺伝的アルゴリズムによるビジョンプログラム合成の研究を行う。

### (6) 画像理解システムプロトタイプの開発

超並列システム上に上記の個別基本機能を実現し、機能実現の検証を行う。また、画像認識理解の典型的な応用例を設定し、超並列システム上での個別機能の統合による画像理解システムプロトタイプを構築し、実際的な応用の可能性を示す。

#### 4.2.1.4 研究課題

- 視覚機能の階層とモジュール化
- 複数モジュールの統合メカニズム、モジュールの協調メカニズム
- 制約表現
- 制約充足処理
- モジュールと状況の相互作用
- 分散最適化手法
- 学習、自己組織化
- 画像の世界モデル表現、柔らかな形状モデル
- 理解状況の記述
- 画像理解システムプロトタイプの構築

#### 4.2.1.5 応用のイメージ

##### 1) 高度な映像情報の編集、加工システム

通信手段の発達、データベースの整備などで、21世紀には全世界のデータがいつでも、どこでも利用可能になる。すなわち情報過多になるので、情報を人に見やすく整理する技術が要求される。特に無秩序に入ってくる映像情報を、企業や個人が、分かりやすく、使いやすい情報に変換し、提供するシステムを提供する。

##### 2) 学校教育におけるインテリシエントアシスタント機器や教育の効果の評価

情報処理システムの頂点にある人間の情報処理、情報表現様式に近い方式を用いることで、教育に必要な「直接操作性」「表現の豊かさ」を実現すると共に、体感ゲーム等における面白さをも飛躍的に向上させる（アミューズメントコミュニケーション）。

##### 3) 高齢化社会をむかえ医療福祉や家庭教育のためのデータ入力や表示

障害者・高齢者等の低下した機能の補綴システムとして、高福祉社会の到来にふさわしい誰でもか情報化社会の恩恵に浴せられる為の技術とシステムの提供。

自然な動きをする補助機能、五感の代わりにする高度センサー、動きを認識してコマンドに変換する機器等。

##### 4) 周囲を気使う視覚ロボット

おおまかな作業内容の指示と例示だけで、視覚的に作業内容を把握できるロボット、周囲の安全を確認し人間を気使いながら共同作業のできるロボット。

いずれも人間を含めた自然環境を対象とするため、ゆらぎのある状況に対する柔らかな画像理解技術が必要である。

## 4.2.2 音声および自然言語技術

### 4.2.2.1 現状と問題点

音声認識技術は、最近の計算機の能力の急速な向上に支えられて、大規模データベースが可能となり、これらを利用した確率論的な方法である隠れマルコフモデル (HMM Hidden Markov model) や統計的言語モデル、非線形の識別領域を容易に実現できるニューラルネット等が導入されたことにより、最近、急速に能力を向上させつつある。HMMでは、言語学的単位 (音節、単語等) のモデルとして直接観測できない状態間の遷移に音声の物理的特徴の出現確率が付与されたモデルを用い、多量の訓練データからこれらの遷移の事前確率を推定しておくことにより、観測された音声の物理的特徴を生み出す事後確率を最大にするように認識を行うものである。言語モデルにおいても、部分系列の出現確率等の統計量を取り入れることにより、HMMと同様に事後確率を最大にする方策を用いることが行われている。ニューラルネットは、原理的には万能の関数近似機構であり、同様に十分な訓練データが利用できる場合には、異なったカテゴリの間の複雑な識別境界をいくらでも良く近似することが出来る。これらの最近の動向を要約すると、古典的なパターン認識を構成していた各段階か、より精密化された確率論的な枠組の下で統合に向かっていると言えよう。これらの方法を用いることで、明解に発声された音声については、話者や使用条件が限定されたものであれば、用途によっては既に実用に供することのできるレベルに達している部分もあり、数10MIPS程度のDSPを用いたシステム化も行なわれている。しかし、耐雑音性、語彙の大きさ、発話の方法に対する制限などの条件を日常の実際的な利用条件にしたときには、極端に探索空間が拡大することやロバストネスの面など多くの問題があり、超並列超分散的な処理能力と新たな情報処理の枠組が必要となる。

自然言語処理技術を発展させる際に問題になるのは次のような点である。まず、第一に、現在の自然言語処理は、一文ごとの処理が主体になっている。また、その文は文法的に完全な文であって、言いまわしなどを含んだ文を処理するのは、現在の技術ではそれほど容易ではない。第二に、文を超えたレベルの、いわゆる談話処理は、首尾一貫性、代名詞の同定などが一部分研究されているのみである。世界知識 (つまり常識) を用いたり、言い換えに的確に対処するのは現在の研究レベルでは困難である。

また、音声言語を用いた日常のコミュニケーションに認められる不完全性、曖昧性、変形、誤用、話題の転換、非協力的な話者等を許容できる柔軟な自然言語処理技術や、韻律、語り口、間、声色等の音声に付随する非言語的情報を統合して活用/制御する技術は、音声をインタフェースに用いる場合に必須の技術であるが、現在のところ極めて未熟な段階にある。

### 4.2.2.2 研究の目標

#### (1) 自然な音声言語による人間と機械のコミュニケーション

情報の発生および相手とのインタラクションの速度の観点から眺めると、音声は人間にとって最も容易で効率の良いコミュニケーションの手段である。音声をういたコミュニケーションの能力は、幼児期からの長い訓練の末に獲得されるものであるか、成人では殆ど努力を要せず利用することができるため、その過程でいかに複雑で困難な情報処理が行われているかについて意識されることはない。さらに、人間は音声言語をもとにして、文字言語を使用するのみでなく、論理的な思考を含めて、言語を思考の道具としても用いている。このことは、音声を機械とのコミュニケーションの手段として用いる場合に、非常に高度な水準が要求されることを意味する。実際、日常的な状況の中で有効なものとして音声を利用されるためには、この高い

要求水準を満たすことが必要である。このようなコミュニケーションを実現するための具体的な目標となるシステムあるいは技術としては次のようなものが考えられる。

- 自発発声音声 (spontaneous speech) の認識理解技術
- 対話音声・言語理解システム
- 騒音環境下における音声の雑音抑圧と音声認識技術
- 自然性の高い音声の規則合成システム (人間の生の声に近い音声)

これらの技術、システムの実現を、精密音声分析モデル、音声特徴抽出モデル、音声対話モデル、超並列超分散アーキテクチャをベースとした柔らかな推論機構、問題解決機構の技術を用いて実現する。

## (2) 非言語的な音声の利用

非言語的な機能としては、音声知覚は視覚的に調べることの出来ない機械内部の動作異常や死角からの危険物の接近の検出など、外部状況の把握において視覚を補完する重要な役割を担っている。また、音楽等の例に認められるように、音は感情や情緒に直接的に働きかける特異な性質を有しており、コミュニケーションに豊かさを付与している。これらの利用技術は、現実環境を把握する統合システムの基本技術となる他、合成音声に適切な情緒を付与したり、音声認識において話者の状態を同時に把握するなど、柔軟なヒューマンインタフェースの実現の基本技術となる。

## (3) 自然言語処理システム

談話処理や、不完全な文に即応できる自然言語処理システムの構築を目指す。そのために、人間の持つ多量の知識や概念を蓄えた大容量の知識ベースを背景とし、対話の場面に応じてその内容が変化する、すなわち学習機能を有するものを構築する。また、システム自体も、対話や解析の進行状況によって、使用する知識の範囲や領域を変化させる機能を有する。さらに、音声や画像との結合をはかり、それらの前処理や後処理は言うまでもなく、それらの情報と融合した形での有機的な情報処理システムの構築を目指す。

### 4.2.2.3 研究の内容

人間同士の自然な音声会話を考え、人間と機械の対話においても人間にかなり自由な話し方を許すとすれば、音声言語には、たとえば構文規則の自由度、言いよどみや言い間違い、省略など様々な問題が生ずる。そこでは、従来の音声認識、自然言語処理より広い話者間の協調など双方向の問題がある。

日常生活の場で遭遇する、環境条件、話者、文脈等の影響を受けて高度に変容するとともに周囲の環境音と渾然一体となっているような音声に対しても人間に比肩する能力を実現するためには、入力の不完全性を前提として、単一の方策に頼ることなく音声言語に固有の性質や周囲の状況、文脈等についての部分的な知識を取り入れて音環境の中から目的とする音声を能動的に取り出すとともに視覚や運動等の異質の情報をも統合して不完全な部分を補うことを可能にする柔軟な機構が必要である。

物理的には音声は、声門の開閉によるバズ音や声道の狭窄により発生する乱流雑音や破裂音が、喉頭、咽頭、舌、口蓋、顎、唇、等の調音器官から構成される空洞の伝達特性により変形

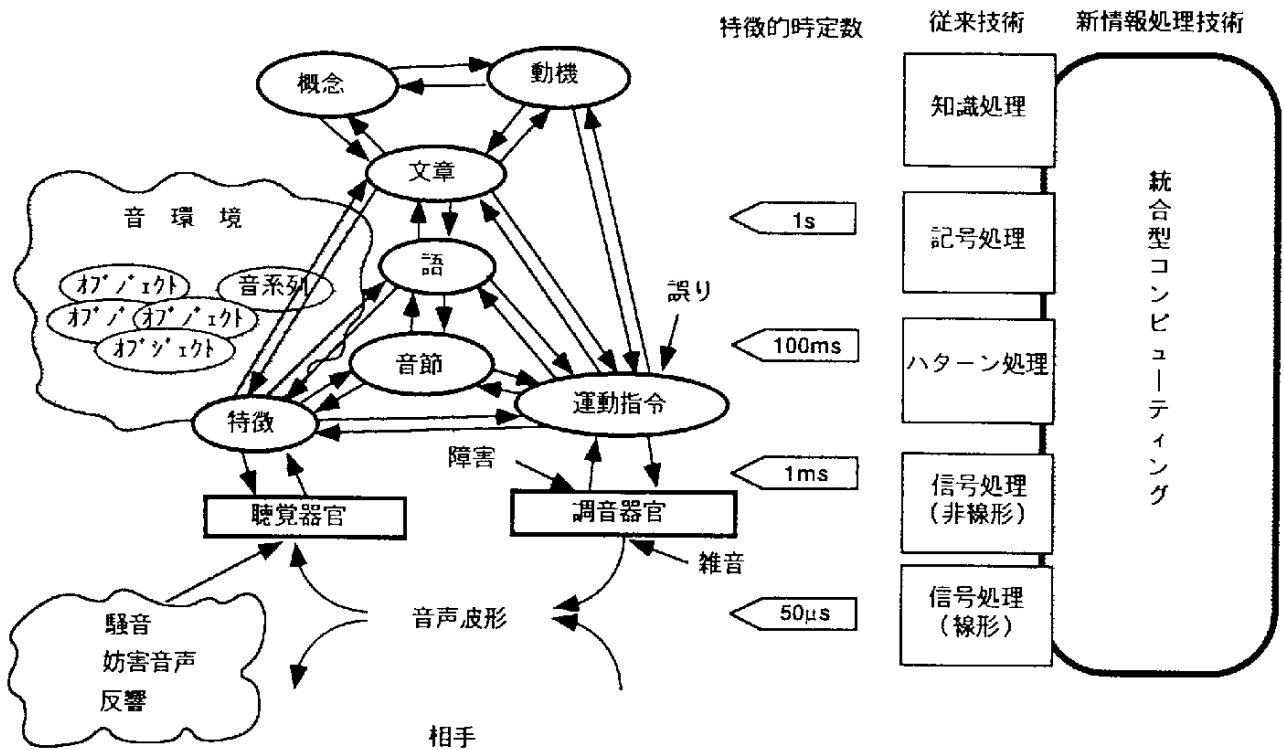


図 4.1・音声言語によるコミュニケーション過程

を受けて生ずる。言語情報は、調音器官の運動により、物理的には音声波形の物理的性質の時間的变化として顕われる。これらの言語情報の正書法による表現あるいは音声字母による表現と音声波形の間には多段階の変換過程が介在しているために、それらの対応関係は時間的にも物理的にも錯綜したものとなり、必然的にゆらぎや誤り／雑音を含んでいる。

上記のような問題に対処するため具体的には、音環境の把握のための時空間音響信号処理技術、それらの環境をオブジェクトの集まりとして分節化する pre-attentive なレベルでの超並列超分散特徴抽出技術、それらのオブジェクトの中から目的とする音声抽出する注意機構、話者や状況や文脈に依存する変動を把握しそれらの拘束条件を利用して欠落部分や不足する情報などを補って能動的に言語情報を抽出する技術、および、それらの情報と他の情報源との統合を可能にする情報の表現方式、処理技術が必要である。

また、音声認識技術を人間とのインタフェースの手段として有効に活用するためには、人間の言語行為に対する理解に基づいて、入力か曖昧なままでの解析を許容する自然言語処理技術と、解析や対話の生成において必要となる柔軟な検索を可能とする辞書・データベース、推論機構、対話のモデル等が必要である。言語理解では、記号として明確に記述されている入力から解析を開始する場合であっても、意味を表す概念への変換を行うには、不完全で部分的な情報に基づく推論が必要となるが、そのための方法論は、確立されていない。この変換の過程では、文法などの言語学的な情報や言語表現が表している専門的な知識のみではなく、大量の一般的常識などが用いられることか必要である。このような多種多様でかつ多量の知識を駆使して瞬時に意味を理解するためには、超並列協調型の計算を基本にした情報処理システムが有力な手段の一つである。このように、言語理解は、従来型手続的情報処理と新情報処理との接点としての意味が大きい。

現在の自然言語処理システムでは、文が完結した段階で、まず構文解析を行ない、その結果に基づいて意味解析や談話解析を行なっているシステムが多い。人間の場合には、時系列的に、読んだり聞いたりした順に、ある程度の予測を交えながら構文解析と意味解析を同時に行なっていると考えられる。そこで、実時間で構文、意味、談話解析を行なうシステムの開発を行なう。また、予測かはずれたり、文が不完全であっても、解析結果を出せる頑健 (ロバスト) なシステムを目指す。

このような高度な機能かどのように人間において実現されているかは、未だに明かになっていないが、末梢から中枢に至る各レベルにおいて共通に認められるフィードバック結合の存在は、多数の異質の処理モジュール間の相互作用による制約充足型の処理の存在を強く示唆する。また、最近の心理学的実験の結果によれば、人間は状況に応じて柔軟に認識の単位やレベルを変更しており単一の方策には依存していないことか示されており、従来の階層構造よりも様々な異質のモジュールが相互作用を行う散層 (heterarchy) 構造モデルがより適切であることを示唆している。現在の音声認識システムで用いられている音声情報の表現は、このような観点からは、かなり粗い処理レベルのみに対応しており、表現の多様性を欠いている。新機能の実現では多様な処理を可能にするための様々な粒度の情報表現および処理モジュールとそれらを用いた pre-attentive な処理に基づく注意の制御機構が必要である。

これらの新機能を実現する問題の多くは、利用できる不完全で部分的な情報と領域固有の様々な制約条件あるいは主観的な価値判断から構成される制約つき最適化問題として定式化され得る。また、これらの制約条件や適切な情報表現自体を環境との相互作用を通して形成して行く自己組織化・学習の問題としても定式化される。したかつて、これらを包含する柔らかな情報処理の理論は、将来の音声および自然言語技術の研究開発を進めるための重要な基礎を与えるものである。また、柔軟な評価・制御機構も、柔らかな情報処理の理論に基づいて実現される



ものである。

これらを勘案すると、新情報処理技術プログラムにおいては、より広い人工的聴覚系の実現という長期目標を達成する道筋として、音声信号処理、音情景分析、耐環境性の高い音声認識、ユーザインタフェース、自然言語処理等の基本技術および応用システムの研究開発が位置付けられる。

#### 4.2.2.4 研究課題

- 多様な聴覚情報表現
- 音声特徴抽出モデル
- 精密な音声生成過程モデル
- 聴覚機能の散層的モジュール化
- pre-attentive な処理に基づく注意機構
- 情報表現、処理機構の自己組織化、学習
- 言語機能の散層的モジュール化
- 音声処理と言語処理の統合アルゴリズム
- 制約つき最適化問題、確率的問題としての定式化
- 対話モデル
- 不完全情報に基づく自然言語処理方式
- 非言語的音声情報の抽出表現
- 自然で柔軟な音声の規則合成方式
- 音環境の理解
- 知識獲得による自然言語処理
- 協調的対話モデル

#### 4.2.2.5 応用のイメージ

##### 1) 音声信号処理

周波数分解能・時間分解能を実用的に両立させる非定常信号の分析法や局所的な周期性の検出、多数の集音点からの情報の統合処理。

- 信号処理レベルのカクテルパーティー効果
  - ・多数の音源の同定と選択的抽出／抑圧、非定常な信号処理
- 音声診断システム
  - 音声障害の発見、診断と治癒の評価
  - ・音響による装置の異常の早期発見
- 楽器、エフェクターへの応用

## 2) 音情景分析

新しい音声信号処理方法に基づく、多様な特徴の抽出・様々な処理粒度の実現。音のオブジェクトとしての表現に基づく pre attentive な処理と選択的注意。聴覚における時間の階層構造の模倣。多種類の音のセマンティックな制御を含む弁別。

- 聴覚障害者の補綴
  - ・聴覚系における情報の自然な表現への変換、音のオブジェクト化と視覚的表示
- カクテルパーティー効果
- 自動採譜

## 3) 耐環境性の高い音声認識システム

- ロボットへの応用、返事をする機械
- 機械のコントロール

## 4) ユーザインタフェース

- ポインティングデバイスとの併用による操作性の改善
- 韻律等、非言語情報を利用した感情の通うインタフェース

## 5) 自然（音声）言語処理

- 知識ベースの作成、検索
- データベース検索、シミュレーション、自動書記
- 自動翻訳、自動通訳

### 4.2.3 メディア統合技術

#### 4 2 3 1 研究の現状と目標

画像、音声及び自然言語など個別の技術課題については、前節までに述べられてきているようにそれぞれ議論され、柔軟な情報処理の枠組みで解決されていく必要がある。しかしながら、音声認識理解と自然言語処理との融合は、前節にもあるように、取り扱う情報の曖昧さ・不完全さに違いはあるものの、同しく言葉を扱うという点からは本来別々に議論されるものではないと言える。また、人間は人の話す言葉を聞きながら同時に目でも状況を確認しており、音声情報と視覚情報の統合作用により、より確かな情報の抽出を行うことができる。人間が行っているあらゆる形での自己表現を、そのままの形でコンピュータが解釈できれば、融通のある形で、より信頼性の高い情報収集が出来ることになり、より感性の高いコンピュータのマシンインターフェイスの実現に近づくことができる。

このようにメディアの統合により、各個別の技術課題のみでは得られない機能の実現、より人間の感性に近付いたコンピュータ及び自然なマシンインターフェイスの実現の可能性がある。メディア統合には、各技術課題での階層・モジュールを包含した部分的、全体的な融合・統合による、更に高次の制約条件を含むより一層一般的処理枠組みの構築を必要とする。本開発項目は、音声、言語、画像の認識理解それぞれの個別課題についての開発とは別に、各認識理解モダリティー間の相互作用及びその統合を行い、総合的な認識理解の機能を工学的に実現することを目的としている。

#### 4.2.3 2 研究課題

##### 1) 周囲の時空間的に広がった状況パターンの総合理解

音声、言語、画像の各認識理解そのものが不完全な情報に基づいて多くの弱い制約条件下での最適解を求めるプロセスであり、更にマルチメディア統合となれば、一層各メディア間相互のあらゆる状況をあらかじめ想定できなかつたり、そのモデルをインプリメントするのに膨大な作業や時間を必要とする。即ち、各認識モダリティー内部の階層構造や異種モジュールが混在するためこれらがどう関連付けられるかはモデル化しにくい面がある。このため、統合的機構の自己組織化や、動機付け機構など、より高次の制約条件の下に、より一層強力な能動的メカニズムによる総合的な状況理解の機構を開発する。

##### 2) 動機付け機構のモデル化と能動的情報獲得

注意の分散 集中など、単に周囲の状況のみに依存するのではなく、一種の行動原理としての制御戦略を内部にもたせて高次の制約条件として導入し、入手情報の不完全さによるデッドロックなしに処理を継続できる動機付け機構を搭載するとともに、不足している情報を積極的に獲得する能動的処理機構を統合する。これにより、マシンの行動パターンへの傾向を与えるメンタルモデルとして、ある種の個性や価値感をマシンにインプリメント出来ることになる。

##### 3) 情報表現の階層化 モジュール化と、異種モダリティーの統合

情報や行動パターンなどをモジュール化し、それらを関連付けて階層化・構造化する表現方法を探求する。メディア統合は、異種認識モダリティーの内部モジュール間の結合などローカルなモジュール間結合、階層化、異種モダリティー間の結合など多数の処理ユニットの相互作用に基づく制約充足型情報処理、制約付き最適化問題になっており、その処理枠組み（協調メカニズム）を構築する。

##### 4) 統合的認識理解機構の自己組織化

メディア統合など、システムの規模が巨大になり、複雑になると、はしめからすべての情報処理の構造を詳細に与えることは不可能になる。このため、構成要素を併合や拡張・統廃合により拡充・発展させ、状況変化に応じて自己組織的に統合的認識理解機構の洗練・高度化を行う学習・適応機能が不可欠な要素になってくる。ここでは、発達するシステムを構築するための自己組織化方式を開発する。

##### 5) 利用者の状況を把握して応答を変える適応型情報システム

ユーザ自身の考え方、行動、動作、話し方などの個性やユーザの状況を多面的に把握・学習して、その変化に適応し、これに応じて応答の仕方を変え、ユーザとマシンの持つ個性とのバランスをうまくとっていくユーザ適応型情報システムを開発する。これらの判断方法自体も、ユーザとの付き合いを通してより快適で円滑なものに変化させていく。

上記の技術要素を構築し、多くの知覚チャンネルをうまく使って状況理解を行い、頑健（ロバスト）で融通性・信頼性の高い人間の感性に近付いたコンピュータ、自然なマンマシンインターフェイスを開発し、より一般化された柔軟な理論的処理体系、超並列超分散情報処理アーキテクチャーを想定した超並列システム上で統合型認識理解機能を実現するとともに、そのプロトタイプを開発する。

### 4.2.3.3 応用のイメージ

文書データを考えた場合、契約書、カタログ、特許、地図、雑誌、新聞、帳票など様々な文書形態があり、メモなどの手書き文字、活字、サイン、印鑑、文字の大きさ、位置、フォントなどを判別する多種多様な認識モジュール群の統合、言語処理、知識処理との融合など文書紙面だけを考えても異種情報が複雑に絡み合う状況があるのが分かる。この場合、文字、図形や画像などの各メディア単体及びその混在を取り扱うことのみならず、表、段組、文書構成といったフォーマットや、テキストチャー、写真、色情報を含めた融合体としてのメディアの統合を取り扱う機能が今後の文書処理機器には必須になっていく。既に現在、オフィスにおける文書処理の発展に伴い、紙面の一括自動符号化という観点から、或いは、入力紙面に限定を加えることなく、より融通性の高いインテリジェントドキュメント処理を行うという観点からも、着実に発展の見られる応用領域となっており、文書紙面のメディア統合技術はそのキーテクノロジーとして期待される。

これらのメディア間の統合は、単に文書紙面に限るまでもなく、広く人間の視覚情報処理において日常的に行われている処理であり、画像の中に現れる文字情報は、単に物体の解釈に役立つ付属情報というにとどまらず、その画像やシーンの解釈、状況の理解に大きな情報を与える場合が多い。

次に、音声と画像の認識理解統合システムを考える。着目している人の音声及び姿を追跡してその人の発話内容をディクテーションしたり、その人の意図に応じるシステムを想定する。人間と同様、両耳効果による音源定位と視覚情報による位置推定により、より正確にその人の位置を特定できる。また、その人の顔の表情、口の動き、仕草、身振り手振り、声の調子などから総合的に解釈して、その人の感情的な側面を推し量ることも考えられる。その結果は人の発話内容の理解に役立つとともに、人間が行っているあらゆる形での自己表現を、そのまま利用できる。即ち、ボディアクションやジェスチャーの解釈はシステムにリアルタイムな反応のチャンネルを広げ、音声とアクションを取り入れたマンマシンインターフェイスの実現につながる。

このようにメディア統合は、音声、言語、画像などを複合的に用いてより信頼性の高い情報を融通のある形で抽出する能力をシステムに与え、多様で柔軟なマンマシンインターフェイスの実現には欠かせないテクノロジーとして期待される。

## 4.3 柔らかな推論・問題解決

### 4.3.1 推論・問題解決

#### 4.3.1.1 現状と問題点

従来の人工知能では、人間が行う問題解決という知的操作を、記号表現化された実世界の知識の中での探索問題に変換することにより実現している。このような方法は、限定された問題や厳密に抽象化された問題には有効であるか、現実世界で要求される広い範囲の問題解決に応用するためには多くの問題点がある。

第一に、記号処理の枠組みの中で現実世界の物理的な時空間の問題や多面的かつあいまいな情報を形式化することができるかどうかは疑問である。現在、人間の常識に基づいた推論をシミュレートする手段として、サーカムスクリプションや非単調推論などの推論システム、位置関係などの素朴な知識や概念的実体の知識表現等が検討されている。しかし、複雑な構造を持った実体を記号で表現することが、すでに問題自体を大きく限定している側面を持っている。

次に、探索空間の組み合わせ的爆発の問題がある。記号による記述では、問題の対象が複雑化

すれば探索空間が増大し、実時間での問題解決は困難になる。現状では探索の枝刈り等の探索の制御戦略や並列探索の研究が行なわれているが、十分な解決が得られているとは言い難い。

第三に、知識獲得ボトルネックの問題がある。従来の記号処理では、人間が知識を抽出して論理的な規則の形に変換しなければならなかったため、問題処理機構の開発や保守に非常に時間がかかっていた。現在ではこのような知識ボトルネックの解消に向けて帰納学習、EBL、バージョン空間法などの研究が進んできてはいるが、このような学習にはやはり時間がかかり、ノイズに弱い。

以上の問題点から、記号を超えた情報表現、超並列処理による問題解決、知識獲得技術の開発が重要であると言える。

#### 4.3.1.2 研究の目標

広い分野にわたって人間の問題解決を支援 代行したり、機械の作業計画の作成や制御を行うシステムの研究開発を行う。この技術は、従来記号処理技術で実現されてきたエキスパートシステム、意思決定支援システム、プランナなどの機能を含むが、次のような意味でより「柔軟か」なものである。

##### (1) 柔軟な問題解決

目標とする問題解決システムは、様々な分野の人や計算機の知識のない人でも使うことができるものでなければならない。従って、対象となる問題のなかには完全な問題の記述が不可能な問題や、従来の記号処理が不得意とするパターンの処理、直感的処理、大量の常識を必要とする処理、状況 文脈処理、非単調性を必要とする問題も含まれることになる。また、実用的な時間内に妥当な解を求めることのできる能力も必要である。

これらの問題を解決するために、記号とパターンを統合する柔軟な情報表現、確率論やファジィ推論等を統合した柔軟な論理、不良設定問題や暗黙的な多くの仮定を含んだ問題を高速に解くための制約充足機構、などか用いられる。これらの問題解決機構は並列処理を基本とし、超並列 超分散ハードウェアにより高速に実行される。

##### (2) 柔軟な自動的知識獲得

柔軟な知識獲得は認識、行動サブシステムを通して、実世界とのインタラクションにより自動的に行われる。例えば、専門家がどういう状況においてどういう操作を行い、その結果状況かどう変化するかを学習する。このような学習に含まれるデータは一般的にはパターンデータを含んだ時系列データであり、また部分的であったり、矛盾・誤りを含む、多義的であるといった不完全性を持っている。柔軟な知識獲得はこのような時空的に広がりを持つ不完全なデータから確率的な外界のモデルを生成する。

#### 4.3.1.3 研究の内容

これらの目標を達成するため、柔軟な知識獲得、柔軟な推論・問題解決機構、及び人間の問題解決機構の研究の3つの枠組みを設定して、研究開発を進める。この分野では特に、従来の記号処理による問題解決に比べて何か特色であるのかを念頭において研究開発を行うのが重要である。

##### (1) 柔軟な知識獲得

外界の確率構造の学習（表象と位相の学習）、行動とそれによる外界の変化の学習（因果モデルの学習）の研究を行う。また、巨大な時空間の広がりやノイズの中から因果率を見つけ出すスポノティングの技術、注意機構、文脈・状況の認識が必要である。また、人間との会話による知識獲得も重要である。要素技術として、モジュール的知識の形成方法、ニューラルネットの中間層に現れる分散表現の解析、リカレントネットワーク、柔らかな論理に基づく知識のATMS (Automatic Truth Maintenance System) も研究対象となる。

## (2) 柔らかな推論・問題解決機構

柔らかな推論・問題解決機構は、知識獲得により得られた外界の情報構造をもとに推論、プランニングを行うものである。研究課題としては柔らかな論理の基本原則に基づく確率的推論、制約充足型推論機構、プランニング、複数エージェントによる問題解決を設定する。

確率的推論では確率論、確信度付き推論、様相論理、統計学、多変量解析を統合した「柔らかな論理」に基づき、記号間の位相的関係を反映した推論を実現する。人間とのコミュニケーションのためには、推論の説明機構と逆向き推論の機能も必要である。

制約充足型推論では、推論のための超並列制約充足モデル、文脈・状況の制約による表現を課題とする。また、制約と確率理論（柔らかな論理）との統合も課題となる。

プランニングでは柔らかな論理の基本原則に基づいたプランニングについて研究する。例えば、確率論的モデルを外界の各状態とそれらを遷移させる行動（自然の遷移を含む）からなるネットワークとみると、問題解決は目的状態への最適な経路を見つける問題になる。研究課題としては特に動的プランニング、プランニングと制御の関係、プランの確信度と危険性の算出、線形仮説の成立しない課題に対するプランニングを設定する。

また、問題領域に依存しない柔らかな問題解決機構を目指すとともに、個々の分野の問題解決能力を持つ複数エージェントの協調による問題解決も研究対象となる。複数エージェントによる問題解決では、人間を含めた問題解決エージェント間の協調による問題解決機構とその超並列システムによる実現方式を研究する。

## (3) 人間の問題解決過程のモデル化

柔らかな推論・問題解決技術の1つのポイントは、人間が扱う問題を人間と同様に扱い、人間の推論・問題解決をサポートできることである。これを可能にする研究開発として、人間の知識・記憶モデルの研究、人間の問題解決過程のモデル化研究、日常的推論、各種の問題解決過程モデルの計算機インタフェース化に関する研究を推し進める。

### 4.3 1.4 研究課題

#### 1) 柔らかな知識獲得

- 確率構造の学習、知識のモジュール構造化
- 因果モデルの学習（能動型知識獲得）
- 対話型知識獲得
- 注意機構、スポノティング
- 文脈・状況認識

#### 2) 柔らかな推論・問題解決機構

- 確率構造的知識をもとにした推論・問題解決機構

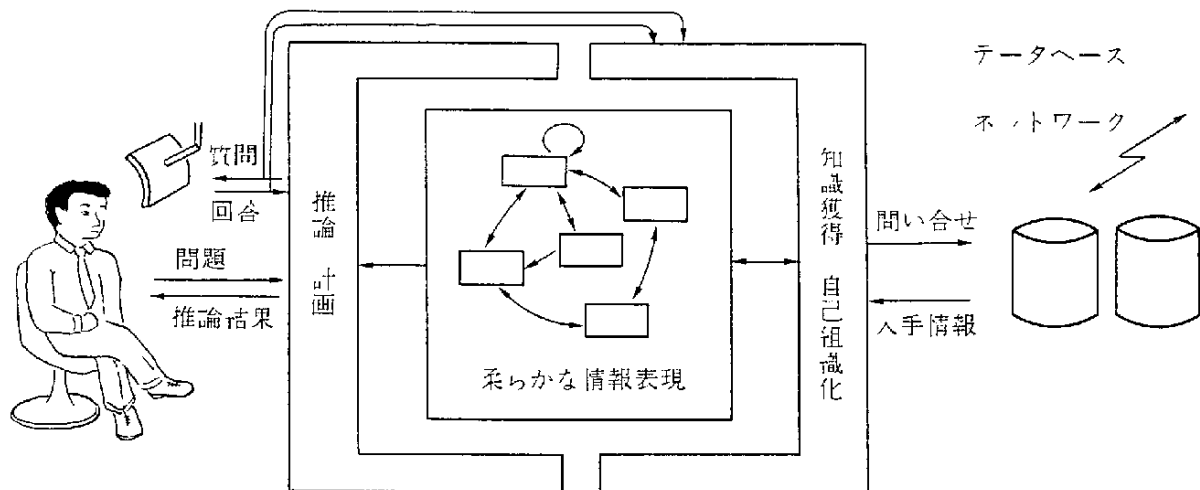


図 4 2 柔軟な問題解決のシステムイメージ

- 確率構造的知識をもとにした予測 シミュレーション
- ニューラル・ネットワーク (特に隠れノード)、ファジィ論理、記号論理、様相論理、確信度付き推論、制約論理、統計学、多変量解析との理論的關係の研究
- マルチ エージェントによる推論・問題解決機構

### 3) 人間の問題解決過程のモデル化

- 人間の知識・記憶 問題解決モデルの研究
- 日常的推論

#### 4.3.1.5 応用のイメージ

まず従来からの人工知能の応用の対象であるエキスパートシステム、ロボットの行動計画、機械翻訳等への応用が可能である。

また、实例から学ぶ能力を生かした法律相談等のコンサルティング、複雑な相互関係をシミュレートする能力を生かした意思決定支援、将来予測、生態系シミュレーション、大胆な類推や予測、低確率での推論 (例えばアニーリング温度を上げる) を用いた創造的思考支援などの応用がある。

### 4.3.2 情報ベース技術

#### 4.3.2.1 現状と問題点

データベースでは、実世界の情報構造を柔軟に内部に表現する技術と、ユーザの意図に対して正確かつ柔軟に対応できる問い合わせ処理を行う技術が特に重要である。データベース技術として現在ではオブジェクト指向データベース、演繹データベース、マルチメディアデータベー

スが活発に研究・応用され、手続きの知識、宣言的知識、マルチメディア情報等の多彩な取り扱いが可能になってきている。

しかし、柔軟な問題解決、認識、行動等の機能をコンピュータ上に実現するためには、情報の記憶手段として、現在のデータベースに残されている課題も多い。

第一は、記号や数値主体の表現形態による実世界の記述の限界の問題がある。実体の持つ多面的な情報を記号のみで表現することは一般的には困難である。一方マルチメディアデータベースではマルチメディア情報とその内容の論理構造の両方を格納するか、マルチメディア情報の内容そのものを手掛かりに検索することは困難で、論理構造は多面的な情報を表現することができない。

第二は、データベース内部の表現を柔軟に拡張する能力が不十分な点である。現在のデータベースでは、部分的な情報や曖昧な情報をそのまま受け入れていくことができない。

第三は、現在のデータ構造と逐次処理による問い合わせ処理能力の限界の問題である。現在のデータベースは、内部的にはポインタを介して線形的にデータを管理している。そのため、逐次的に情報を検索する方法では、情報量が増大するに伴い検索時間が長くなることは避けられない。

以上の議論から、現在のデータベースに不足している技術として、実体の持つ位相性も含めた柔軟な情報表現技術、外部環境からの情報に適應して内部的な情報構造を柔軟に拡張できる自己組織化技術、超並列処理技術による高速検索技術を挙げることができる。

#### 4.3 2 2 研究の目標

新情報処理における情報ベースの研究の目標は、自己組織化／情報獲得／情報提供機能を備えた情報ベースの構築／運用技術の確立である。

情報ベースとは、大量の生データや知識 手続き等を統一的かつ統合的に処理することを可能とするようなシステムである。従来のデータベースのように記号化された情報だけを扱うのではなく、音声 画像などの非記号データをも対象とし、マルチメディアデータの自己組織化と内容の論理構造をもとにした情報処理を行う。情報ベースシステムにおいては、種々雑多なデータが不完全なまま、またデータ間の論理的な整合性もないままに取り込まれ、自己組織化される。

これまでのデータベースと情報ベースとの関係は、倉庫的図書館と活動的情報センターとの関係にたとえられる。すなわち、従来型データベース（倉庫的図書館）では定形的情報（書籍）だけを蓄積し、検索要求に答える（来館者の閲覧）だけであった。これに対し情報ベース（活動的情報センター）では、一定分野に関する生データ（原稿／観察記録）、非定形的情報、知識及び理論等を蓄積する。そして、情報の自己組織化機構（研究部門）を持ち、情報の評価及び情報の概念スキーマの変更（資料の分類方法の変更）を行う。この結果、情報の不足が明らかになった場合には、自律的に活動し得る情報獲得機構（観測隊）を編成・起動する。また、検索の柔軟化（読書相談）、情報提示の多様化（展示の工夫）はもとより、検索以外の情報提供（非来館者を含めた広範囲の利用者への広報活動）も行う。

#### 4.3 2 3 研究の内容

情報ベースの構築／運用技術の確立のためには、自己組織化／情報獲得／情報提供といった各機能に関する研究と実装／統合化に関する研究が必要であるが、実際には各研究のそれぞれの中で、他の機能に関しても研究開発がなされる。

##### (1) 情報の自己組織化技術



情報ベースの自己組織化の基本的な契機としては、データの入力及び検索要求の2つがある。前者の一部は外部スキーマの変更すなわち情報提供部の問題として扱われる。データの入力は、すでに構築されている情報ベースの各データとの関係、従来の理論／分類体系との関係のテストを促進し、これにより、データの格納法、または理論／分類体系そのものの変更が行なわれる。また、情報の価値の評価を行い、不必要な情報は切り捨て、必要な情報は組織化して取り込む。連想記憶、複合アーキテクチャを持つニューラルネットワークの学習法、特徴抽出、自動インデクシングも研究対象となる。また、時間を取り扱うためのリカレントな結合を持った超分散 超並列システムの研究も必要である。

情報ベースにおける自己組織化は、大規模知識ベースの自己組織化と共通する部分もあるが、知識ベースにおける抽象化された要素に比べ、情報ベースにおいては、生に近いデータを扱うため、定形的でない多くの関連情報が存在し、独自の研究対象となる。

## (2) 情報獲得技術

自律的情報獲得の契機となるのは、情報ベースの自己組織化に伴う不足情報の明確化または検索要求であり、何を獲得すべきかは他から指定される。しかしながら、如何にして情報を獲得すべきかまでは指定されない／できないと考えられ、計画を立て、獲得行動の中にある不確定性を考慮して情報を獲得する能動的情報獲得機能は、ひとつの分野として研究されるべき課題である。システムからユーザに対して質問をする行為は、情報提供の中で考えるのか自然である。

## (3) 情報提供技術

情報提供技術には、従来の検索—回答のサイクルをより柔軟にする問題と、検索を直接の契機としない「広報活動」の2種の課題かあると考えられる。

前者の検索—回答サイクルの柔軟化としては、不完全／曖昧要求の推論／対話による完全化、人間の感覚に整合した形での検索要求の受け付け／情報表示（メディアスーツ：擬似的な人工体験感）、等がある。情報提供は能動的に行なわれる。すなわち、獲得した知識やデータを構成し直したり、様々な仮定によりシミュレーションを行う機能を有している。生のデータをそのまま示すだけではなく、抽象化・要約して提示する能力も必要とされる。

後者の広報活動は、それ自身が自己組織的であるマスマユーザーモデルに基づいてなされるものである。

## (4) 実装／統合化技術

オブジェクト指向の特徴であるデータと手続きの一体化、カプセル化、部品化などの概念を考慮した上で、大量の情報を検索する検索能力の飛躍的な増大のために、専用のマシンの研究開発またはソフトウェア技術の開発を行うことが必要である。論理構造の獲得・検索技術は4.3.1 推論・問題解決と共通する部分が多い。また、情報提供技術には4.4 ヒューマン インタフェースとシミュレーション技術が不可欠である。

### 4.3.2.4 研究課題

#### 1) 情報の自己組織化技術

- 自動的構造／類似度抽出手法
- 曖昧情報表現法

#### 2) 情報獲得技術

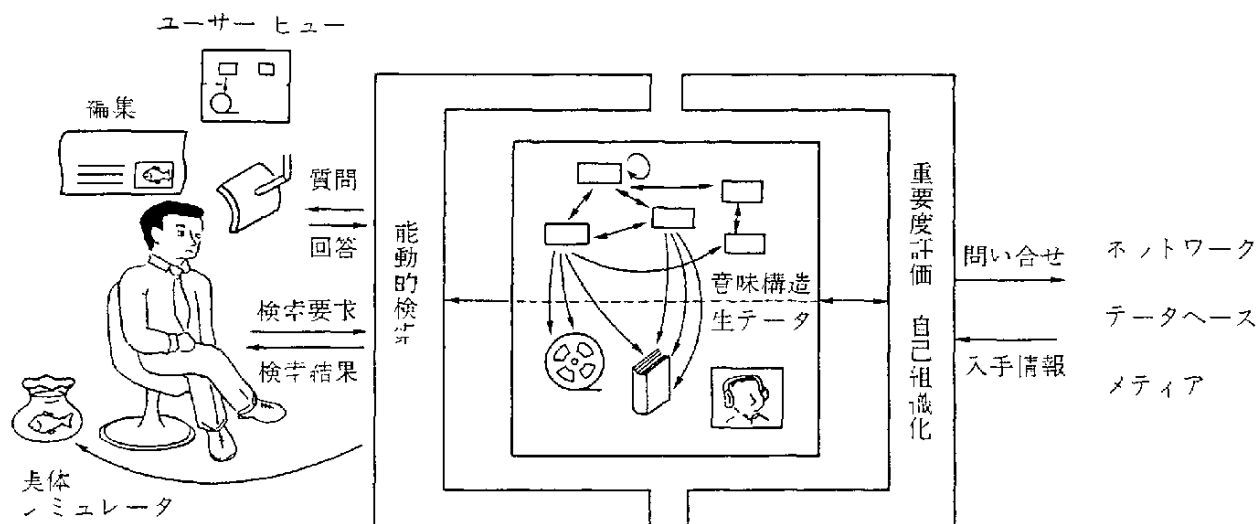


図 4.3 情報ベースシステムのイメージ

### 3) 情報提供技術

- 検索応答の高度化
- 能動的広報機能の実現

### 4) 実装/統合化技術

- 専用マシンの開発
- 情報ベースソフトウェア開発

#### 4.3.2.5 応用のイメージ

情報ベース技術が確立されれば、現在のデータベースに乗りにくい情報の蓄積/利用分野を広く産業界/学会などに提供するとともに、書籍などの現存する膨大な人間向き情報の自動電子化入力システムの開発、宇宙/海洋などの自律的観測システム（観測ロボット）による研究活動（テレサイエンス）等への具体的応用が期待される。

## 4.4 ヒューマン・インタフェースとシミュレーション

### 4.4.1 ヒューマン・インタフェース

#### 4.4.1.1 現状と問題点

1990年代の情報処理の特色のひとつは、人間と計算機とが密接に結合した高度な情報処理が全体として論じられるところにあるであろう。これまでの情報処理は、計算機単体としての能力向上を極限まで高めるといふ点に力が注がれてきたように考えられる。その努力の結果、計算機は「人間のパートナーとして作業を分担しうるだけの能力」を身につけることが出来たと言えよう。また一方で、計算機の得意な分野、不得意な分野も技術的に明らかになって来た。

従って、次の目標のひとつは、人間と計算機という2つの異なる性格を有する知的主体を有機的に結合し、最高のパフォーマンスを発揮させることであるに相違ない。“いかに高度な情報処理が計算機の内部で行われようとも、その成果を人間に伝える術無くしては、何の意味ももたない”という哲学は、1980年代の初頭に、ヒューマン・インタフェースという研究分野を確立した。1990年代は、この情報処理における新分野が、計算機科学のより中核部に据えられ、洗練化されていく時代であると考えられよう。

より中核部に据えられるとは、ヒューマン・インタフェースの分野が情報処理研究自体を牽引していく立場におかれるだろうということである。もともとヒューマン・インタフェースは、初心者に対して、計算機科学の成果を享受させるようにという目的で研究が開始された分野である。つまり従来のヒューマン・インタフェースとは、主に、“ユーザ・フレンドリシステム”という方向を向いていたといえよう。マウスとアイコン、マルチ・ウィンドウ・システム、などなど、計算機利用のためのユーザ負担は大幅に軽減されたといつてよい。従って、利用しようという情報処理の技術それ自体はすでに完成したものであって、そこから何か新しいものが得られるという性質のものではなかった。

#### 4.4.1.2 研究の目標

しかしながら、1990年代のヒューマン・インタフェースは、これとは若干性格を異にすることになるかも知れない。初心者に簡単な操作を行わせるのみならず、より高度な成果を得るための技術である。ヒューマン・インタフェースの充実によって、人間は、よりレベルの高い知的作業に集中できることになるであろうし、またそうしなければ巨大化、かつ洗練化されたシステムを開発することは不可能である。そのためには、従来とは比較にならないほどの努力の傾注が必要であり、単に“ヒトに優しい”という形容詞でくくれない状況になって来るであろう。

AI (Artificial Intelligence) に対して IA (Intelligence Amplification) という言葉があるが、今後は計算機と人間との間に、いかに大容量のコミュニケーションチャンネルを準備し得るかが大きな技術課題となるであろう。そのために先述の80年代のインタフェースを大きく越えるシステムの開発が不可欠である。

#### 4.4.1.3 研究の内容

現時点で、最も注目を集めている技術の一つが、いわゆる「人工現実感」(AR=Artificial Reality) のシステムであろう。これは、計算機によって、視覚、聴覚などの人間の感覚情報を合成してやろうという試みである。言葉を換えれば、人間の周囲に人工的な「空間」を造出しようという訳である。このシステムは、色々な見方をすることが出来るが、まず第一に非常に進歩したヒューマン・インタフェース技術であることは間違いない。たとえば、従来型のヒューマン・インタフェースであるデスクトップメタファーが、“机上”という2次元空間の上に展開しているのに対し、ARのシステムは、3次元空間を対象としたものである。

ARのシステムは、図44に示すようにして構築されるのが普通である。まず、人間の周囲にリアリティな3次元世界を提示するための各種ディスプレイ群(たとえば、超広画角の3次元映像を供給するHMD (Helmet Mounted Display)、3次元音場をイヤホンを通じて生成するホロフォニクス・システム、etc)、さらに提示された世界に積極的な操作を加えるためのシステム、すなわち人間側の動作をセンシングするシステム(中核となるのは、データグローブのようなジェスチャ入力デバイスや、各種の3次元空間内測定技術など)が必要である。さらに、これらの2システムを結合し、操作と感覚の因果関係のループを閉じるためのシステムが必要である。このシステムはある種のシミュレーションシステムとみなすことも出来る。

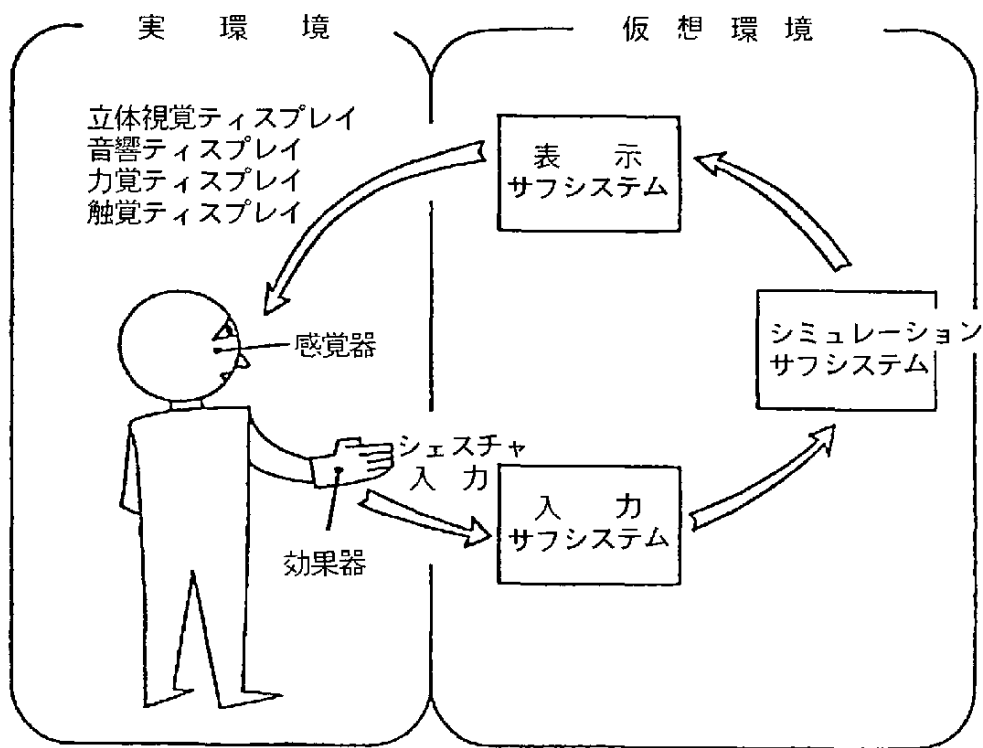


図 44 人工現実感のシステム

このように、ARのシステムは、従来とは比較にならないほどの“表現力”を計算機に与えることになるであろう。原理的には、人間が感覚器によって受容しうる限界までの情報容量を利用することが可能だからである。

#### 4.4.1.4 研究課題

このシステムを具体化する場合の現状の技術課題は以下のようなものが考えられる。

##### 1) 情報提示系

十分な性能を持った情報のディスプレイの開発が必要である。すでに、視覚、聴覚、触覚についてはプロトタイプがいくつかの研究サイトで稼働中である。実用化のためには、これらのプロトタイプの性能を一桁程度向上させる必要がある。これらのディスプレイ・デバイス系の技術は、LCD（液晶ディスプレイ）をはじめとして、我が国が得意とする技術であり、この種の技術開発は、我が国が技術面での貢献を果たす上で、一つの候補となる。

##### 2) 情報入力系

センシングシステムについても、一層の技術開発が必要であり、特に人間の身体などの柔らかいしかも多自由度の物体を3次元的に測定する技術は、先のディスプレイ系の技術とは対照的に、必ずしも本格的な技術開発が行われていない分野である。

##### 3) 感覚統合の知識

情報をどのような形で仮想世界内に可視化すれば良いかについて、人間の感性的諸側面から研究する必要がある。AIが、認知科学という分野と密接な関係を持つに至ったよう

に、ARもまた感覚系の基礎科学から多くの知識を得ることが必要であり、同時に大きな影響を与えることにもなるであろう。

#### 4) 高性能計算機の開発

高性能な計算機自身も不可欠である。すなわち、ARは、進歩したマン・マシン・インタフェースであると同時に、進歩した体験型シミュレーションとしての性格も有している。つまり、ARを構成するサブシステムとして、リアルタイム・シミュレーション・システムが不可欠である。そのためには、現在ようやく射程内に入って来た、リアルタイムアニメーションの専用ハードウェアを1,000ないし10,000倍程度高速化する必要がある。単に、立方体や多角形などの単純な図形のアニメーションだけではなく、複雑な形状やテキストを持った物体のアニメーションが必要である。今まで、一枚数十分を必要とする描画を1/30sec程度で行う必要がある。すなわち約10,000倍以上のグラフィック能力が必要である。

従来のシミュレーションは、事象を論理的にシミュレートすることは出来ても、感覚的にシミュレートすることはなかなか難しかったといえよう。感覚的にシミュレートするとは、十分な表現力を用いてしかもリアルタイムで実行しなければならず、そのためには超並列・超分散の極めて高性能な計算機が必要なのは言うまでもない。

単純なARのシステムを考えても、物体相互の衝突干渉、自由度の拘束などなど、多くの物理的法則を、同時並列的にシミュレートすることが必要である。たとえば、1000個の物体が相互に干渉するような世界をリアルタイムで忠実にシミュレートするには、1,000,000ないし10,000,000MFlops以上の計算機が必要であると言われている。つまり、ARは、新しいシミュレーション技術の開発を促すニーズとなりうる。

##### 4.4.1.5 応用のイメージ

こうした、新しいパラダイムに基づくインタフェースが開発されれば、以下のような様々な応用を考えることができる。

#### 1) テレロホティクス

- 第二世代スペース・ロボットの制御

#### 2) CAD/CAE

- 従来の3面図によらない、より直観的な形状設計システム

#### 3) プレゼンテーション・ビジュアルライゼーション

- シミュレーション結果の直観的表示
- 大規模ソフトウェアの可視化

#### 4) コミュニケーション

- 臨場感通信によるリモート・コラボレーションの研究

#### 5) 教育

- ARによる物理学教育

#### 6) 医療

## ● 医師トレーニングシミュレータ

### 7) アミューズメント

#### 4.4.2 シミュレーション

##### 4.4.2.1 現状と問題点

シミュレーション分野の歴史は極めて長いが、その重要性は、近年に至るもいささかも減少することはない。むしろシミュレーションは、計算機の本質的アプリケーションであり、不可分の関係にあるといえよう。従来のシミュレーションにおいて、問題があるとすれば、まず第一にその表現力の問題であろう。第二には、先述のようにリアルタイム性が追求されるということである。また、第三に、非常に複雑な事象をシミュレートする際に計算容量の点から、様々な制約があるという点である。

##### 4.4.2.2 研究の目標

そこでまず、表現力、訴求力に富んだシミュレーションとは何かを考えてみると、人間の感性に直接的に訴えるシミュレーションということになるだろう。もともと、シミュレーションは、思考支援ツールであるから、いかに内部で高度なシミュレーションを行なおうとも、それが人間にとって役立てられなければ何の意味もない。つまり、大幅なヒューマン インタフェースの改善が必要であろう。先述の人工現実感の研究などは、この分野に大いに貢献するに違いない。

また、一方、巨大なシステムのシミュレーションを行うためには、莫大な計算量を克服するための並列計算機技術と不完全な現象モデルや入力データに基づいて、やわらかなシミュレーションを行うための技術が必要である。

##### 4.4.2.3 研究の内容

###### (1) 体験型シミュレーション

シミュレーションは、基本的には思考支援のツール、すなわち試行錯誤のための道具である。シミュレーションに表現力を付加することは、試行錯誤のサイクルをはやめ、全体として迅速な問題解決を可能にするという効用を持つ。たとえば、図 4.5 は、米国 JPL (ジェノト推進研究所) による火星表面の景観シミュレーションである。これは、色々な火星探査機から送信された数値計測データをもとに再構成された現実である。(測定計器による惑星表面の高度データをもとに表面の形モデルを作成し、さらに航空写真による表面のテクスチャを、モデル表面にマンプしたもの) この場合、トータルな情報量は増大している訳ではないが、収集したデータの活用を図る最良の方法の一つであるには相違ないであろう。

こうした、いわば体験的な方法は、たとえば数式表現のような網羅的な結果整理は不可能な反面、かえって物事の本質的理解に肉迫する可能性を含んでいる。たとえば、相対論の世界を AR でシミュレートし、それを体験する場合、詳細な理解は不可能であるが、この世界が本質的にどんな世界であるかを直観的に理解することは容易である。このような教育 研究体系は、従来の分析中心の体系とは性格を異にするものであり、新しい独創的分野の確立にも役立つことと期待されよう。たとえば、ノースカロライナ大の F P Brooks は GROPE と呼ばれる AR を用いた分子構造設計のシミュレータを開発しているが、現実には目にみることをすら出来ない分子構造を可視化し、その結合 分離を目前で自分の手によって体験することは、単なる化学式の羅列よりもはるかに教育的効果か大きいことを報告している。



図 45 火星表面の景観のシミュレーション

## (2) 予測・解明型シミュレーション

他方、過去に得られた法則（物理法則、経済 環境等の動的システムの法則）から、まだ解明されていない現象を予見したり、未来を予測したりするために使われる一群のシミュレーション技術がある。気象、経済のシミュレーションにみられるように時系列に沿った計算により、任意の時刻における状況を予測したり、事象の因果関係を明確にし状況をコントロールしようとする場合や、原子や電子レベルでの材料設計、ディープサブミクロンの半導体デハイスの設計支援等のように、現象の予測 解明によって、製品の信頼性を向上させる目的で使われるものとかある。このようなシミュレーション技術では、大きく分けて2つのアプローチがある。

### 1) 支配方程式が確立している場合

この場合ミクロな要素の振舞いと要素同士の相互作用を記述した数理モデルを構築し、支配方程式から、人間にとって意味のあるマクロな振舞いを予測・解明することが可能である。しかし方程式が明確であるにもかかわらず、問題が非線形であったり、本質的に多数個の要素間での作用を扱う多体問題であったりするため、問題を解くのは数値計算をもってしても一般に困難である。

最近、従来異なる分野で用いられた手法を取り入れて統合化することにより、従来は困難とされていた分野に新しい発展が見られる。その発展について以下述べる。従来、物理の材料作製や統計力学で用いられていたアニーリングの方法（系を活性化、例えば高温にし、ゆっくりと冷ましていくことによって系の安定状態を求める）をシミュレーションに応用し、並列計算機の負荷分散や回路の配置配線等の最適値問題を解くことが容易になった。

材料のシミュレーションでは、従来独立に発展してきた分子動力学と電子構造計算の手法を統合化することによって新しい地平が開拓された。統合化により、a) 分子動力学（原子の運動

を追跡し、時間平均操作から系の物理量を求める手法)で用いる原子間ポテンシャル(従来は実験値から経験的に求めていた)にバンド計算の手法を取り入れて量子力学的基礎を与えることができるようになった。b)運動方程式の積分計算で、電子の固有値問題をシミュレーテッド・アニーリングを用いて動的に同時に解く事によって、計算の高速化を行ない、従来のバンド計算ではできなかった大きさの系に対して精密計算ができるようになった。

この場合でも、シミュレーションを実行するには膨大な計算量が必要になる。例えば電子状態を考慮した分子動力学を行なう場合100個程度の原子について数ピコ秒の様子を調べるのに、現在手に入る最高速のベクトル計算機で数十時間、記憶容量は1Gバイト必要である。さらに、ニーズとしては数千個の原子のナノ秒の様子の計算が望まれており、単純に推計すると、 $3 \times 10^9$ 時間、30Tバイトが必要となる。従って、超高速な計算機は欠かせず、技術的に並列計算機が必要となっている。

このように計算対象ごとの最適手法の選択・統合を容易にするアルゴリズム生成は、数値計算のアルゴリズムの改良だけでなく、さまざまな分野においてブレークスルーをもたらす上で欠かせないアプローチである。一方、解を得るために導入した近似法あるいは入力データの正当性を観測値から吟味することも重要である。

実際のシミュレーションの実行過程においては、計算の収束性にあわせてシミュレーションパラメータを変化させたり、シミュレーション結果から中間的モデルの最適なパラメータを抽出する等が人手によって行なわれているが、本来は計算機によってなされるべき仕事である。これらのことを能率的に行なっていくための機能の柔軟な計算機の出現が待たれている。

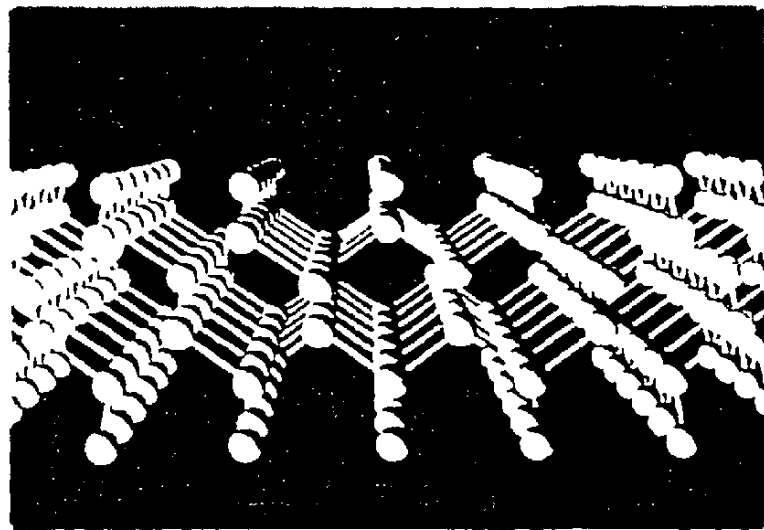
## 2) 支配方程式が決まっていない場合

現象が極めて複雑であったり、現在の我々の知識が不完全なため確率論的にしか現象を記述できない場合や、本質的に支配方程式が決まらない場合がある。これらの典型的な例は、計量経済学のマクロ経済予測、意志決定支援による経営予測、国際政治、交通システム等の社会現象である。構成要因である単一要素の果たす役割は平均化して扱うことができるが、その果たす役割の大きさやその変化は確率論的にしか定まらず、時系列的に大きく変化する。そのため数理モデルの構成は困難である。この場合、多くの経験あるいは観測値から現象論的に現象を記述するモデルを推定し、そのモデルに基づいて予測・解明を行なうことになる。このとき観測値を尤もらしく再現するよう逆にモデルを再構成する必要がある。

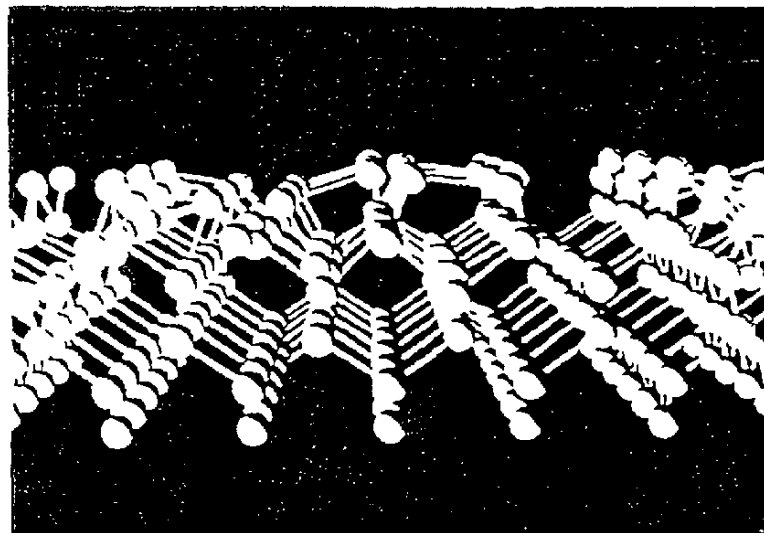
ある場合には、モデルを階層化したうえで、マイクロモデルの情報を統計的手段により平均化し、その上位レベルのモデルはある支配方程式に従うように中間モデルを構成していくスケールリング、あるいはくりこみといった手法が用いられる。モデルの再構成を可能にするには、観測値の予測平均からの逸脱を考慮してモデルを組直せる柔らかな情報理論に基づく枠組みが必要である。

1)、2)いずれの場合にも入力データ、境界条件等は不完全にしか与えられず、用いられる近似の正当性も明確ではない。そのためモデルおよびその解法アルゴリズムの最適化が必要になってくる。従ってシミュレーションの実行プロセスをシステムとしてみれば、システムは不完全である。不完全にしか与えられない観測値をもとに、ある意味でシミュレーションシステム(入力パラメータ、近似モデル、数値解法、アルゴリズム等)を再導出することが必要になる。すべての方法、全てのパラメータ群についてシミュレーションを行なうことは不可能であり、不完全な情報から最適値を求めなければならない。このような制約のもとで、モデルを導出するには、情報量基準最小化に基づく適用型のモデル化手法が有効である。このアプローチは、実用設計段階で特に重要になる。実際、限られた数の観測値をもとに逆にモデルを推定





(a) 0 [f s] へき開直後



(b) 160 [f s] 経過後

図 4 6 分子動力学の計算例

電子構造計算（電子密度汎関数法）を併用した分子動力学の計算—S1の再構成構造  
 表面のS1原子はホントか切れた状態から、2つつつホントかつなかつた状態へと変化し、複雑な表面の再構成構造を形成する。その数分の1ピコ秒での過程をノミュレーションで捉えることかできる。

し、そのモデルから得られる結果を最適なものにするようモデルを変化させ最適モデルを求め、それに対応するデバイスを実際に製造するといったことを設計段階で行なうことが多い。シミュレーションから有効な予言・解明を行なって、実り多い結果を得ようとするとき、不完全な情報しか得られないが、その情報を取捨選択し、対象物の理論的背景が明確でない物に対しても計算できるという柔らかな情報処理論に基づく計算機に対する期待は大きい。

### (3) 電子生態系と次世代シミュレーション

シミュレーションとは現実の世界を模倣することである。世界とは、ある意味で因果関係の連鎖である。例えば、“運動する物体は壁面にあって跳ね返ると同時に壁を倒す。倒れた壁は・・・”式の記述によって世界を規定することが可能である。多くの場合、現実世界の因果関係は、非常に大きなネットワークを形成するのが普通である。しかも世界が世界として安定して存在するためには、丁度生態系がそうであるようにネットワークが安定な閉ループを形成していなければならない。このアナロジから、こうした計算機内部の仮想世界を“電子生態系”などと呼ぶことがある。こうしたシステムには生態系がそうであるように、ある範囲までは、安定性が極めて高い。つまり、多少の因果連鎖の欠如やあやまりに対して、それを補償するようなダイナミクスが系として備えられており、その結果、ネットワーク全体は外乱に対して極めてしなやかに対応することが出来る。このような意味で安定なシミュレーションは、大規模な因果連鎖が不可欠であって、それを円滑に実行するためには、超並列超分散の高能力マシンが不可欠なことは言うまでもない。

#### 4.4.2.4 応用のイメージ

体験型シミュレーションのアプリケーションは、さきの新インタフェース(人工現実感)の項目で述べてある。予測・解明型シミュレーションに関するアプリケーションのほんの一部を示したのか、以下の事例である。

- 並列計算機の負荷分散の計画
- 回路の配置配線等の最適化
- 計量経済学のマクロ経済予測
- 国際政治、交通システムなどの社会システムの計画

## 4.5 柔らかな制御と機能統合化技術

### 4.5.1 柔らかな口ホット技術

#### 4.5.1.1 現状と問題点

従来のロボットは、認識部が外界をセンスして計算機内部にモデルを作り、計画部がモデルに基づいた作業を計画し、動作実行部がそのコマンドを処理すると言う、直列的で固い構成を取っている。まず、認識部と動作実行部が遠く離れているために、作業を巧みかつ敏捷に実行することが困難である。また、モデル化できる情報は限られているので、それを元に生成されるロボットの動作計画の信頼性は低い。モデルを複雑にすれば、より精密な作業が遂行できると考えられたが、モデルに関する膨大な記憶と計算時間の壁にぶつかっている。モデルが固いために、新しい環境や作業への適応性がなく、学習能力、経験の蓄積も期待できない。また、認識部と動作部は独立に研究されることが多く、両者を統合した能動的なセンシングの研究、たくさんのセンサーの情報を活用した作業実行の研究は、まだ緒についたばかりである。

#### 4.5.1.2 研究の目標

ロボットの柔らかさは、いろいろな次元で考えることができる。ロボットの機構の柔らかさ(いわゆるフレキシブルアーム)、扱う対象物やとりまく環境の柔らかさも考慮されるべきではあるが、それにもまして重要なのは、以下に列挙する作業、情報処理(知能)、ロボットの数、人間との関係、などの柔らかさである。

##### 作業の柔らかさ

- ・ 多種多様な作業こなせる(汎用性、適応性)
- ・ 器用な(ソフトな、巧みな)操作(拘束に倣った動作、指先での物体操作)
- ・ 移動の柔らかさ(スムーズな移動、狭所移動、悪路移動)  
認識の柔らかさ(変動する環境への対応、多様な物の認識)
- ・ 失敗の分析と回復(融通性、信頼性)

##### 情報処理の柔らかさ

- ・ 状況の変化の評価と追従(頑健性、信頼性)  
多種類のセンサ情報の統合的利用  
最適厳密解よりも準最適解の実時間探索
- ・ 過去の成功、失敗の教訓を活かせる(学習、自己組織化)

##### ロボットの数、相互関係の柔らかさ

- ・ 複数のロボットのコミュニケーション(ロボット社会)
- ・ 数の変動に対する柔軟性  
効率化のための分散化と階層化

##### 人間との対話の柔らかさ

- ・ 多様な情報媒体(マルチメディア性)  
一人の人間対複数のロボットの対話
- ・ 知能的対話(知的遠隔作業ロボット、人間の行動から学ぶ)

#### 4.5.1.3 実現のためのキーポイント

##### (1) 柔らかな情報処理

ロボットの柔らかさは、以下に述べる理由により、柔らかな論理をその基礎とする柔らかな情報処理によって実現される。柔らかな情報処理には、対象としての情報が柔らかいことと、処理手法が柔らかいという側面がある。

##### 柔らかな情報の処理

ロボットは、実世界の中で動き、環境に何等かの変化を与えつつ情報を収集する。実世界から得られる情報は、以下の理由で柔らかな情報である。

- ・ センサからの情報は必ず誤差を含んでいる(不確定情報)
- ・ 裏側は見えないなどセンサからの情報は不完全である(不完全情報)
- ・ センサ情報はいかようにも解釈できる(曖昧な情報)
- ・ 実世界は多様であり、大量の情報を含んでいる(大量情報)
- ・ センサ情報は様々の物理量に対応し各々は相互に関係する(相互依存情報)

このような柔らかな情報を扱うためには、情報の適切な近似と統合手法が求められる。柔らかな情報処理の理論は、情報の近似と統合の基礎を与えるものであり、これら要求に対する手段を提供する。

### 情報の柔らかな処理手法

ロボトが活躍する実世界は、空間的に多様であり、時間的に変動する。この多様性と変動性に対処するためには、環境と自分自身に対する評価が重要である。すなわち、環境や対象を評価できれば、それに対する認識手法、作業手順を的確に選択することができる。これは、ロボトの重要な性質である適応性、汎用性を高めることにつながる。ロボトが実行しようとしている作業の意味を理解し、作業の進行状況を大局的に評価することができれば、作業の失敗からの回復を計画することか可能になり、信頼性を高めることができる。さらに長期的に、それまでに行った作業の履歴を解析・評価することができれば、未知の状況に対して最も近い経験を適用して行くことで対象作業を徐々に広げられると期待される。評価はまた、次に述べる群ロボトによる分散センシング、作業の分業化に対しても、重要な判断基準を与える。

一方、ロボトのもう一つの重要な特質に、実時間性がある。いくら最適な歩行パターンが計算されるとしても、ロボトが倒れてしまってからでは遅い。従来の固い直列的な手法では、実時間性を高める手段は計算パワーを上げることしかなかった。小型の自律ロボトに搭載可能な限られた計算パワーで、最適でなくともよから妥当な準最適解を高速で発見する手法が望まれている。

## (2) 群知能情報処理

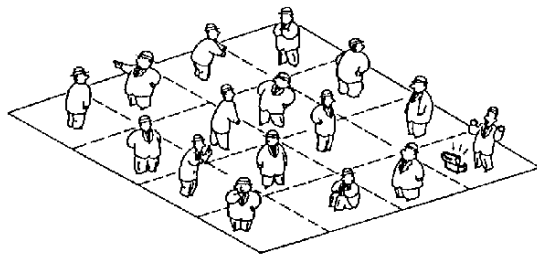
さきに述べた機能拡張や分業という機能は、あらゆる機構や知能を1つの処理主体に埋め込もうとしてもはや限界に達しはしめた今日のロボト技術に対し、自律協調作用を備えたロボトの「群」を用いて目標を達成するという新しいアプローチ「群知能情報処理」によって可能となるものである。

従来の自律機能を実現するための情報処理技法には、直列型計算機上の述語論理、プロダクションシステム、各種発見的方法（ヒューリスティクス）などがある。これらの技法は基本的にしらみつぶしであるか、その場限りの手法である。そのため複雑な問題には計算量の爆発が起りやすく、汎用性を欠くために一般の問題に適用することか困難であった。

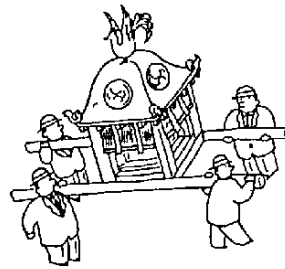
これに対し、群知能情報処理は、機能単位を多数の自律的に活動するモジュールに分散させ、お互いか通信によって情報を交換し、処理結果を評価しあうことで、群として協調的に作業を進めるアプローチである。この処理の単位を、自律性を備えたオブジェクトという意味で、エージェントと呼ぶ。群知能情報処理には、必ずしも最適ではないかもしれないか、合理的な時間内に許容できる計画を見だし（適応性）、これに従って行動した結果を評価して修正を加えることで目的を達したり（頑健性）、多数の並列的探索の経過を見て有望そうな方向に注意を集中して短時間に解を見つけたり、比較的単純な機構で環境の複雑さに応じて複雑な活動を導出できる（汎用性）、その成功例を後の行動に役立てる（学習）などの効果が期待される。

柔らかなロボトは、多くの自由度、多くのセンサを備えた群知能情報処理を基礎として構成されなければならない。作業を、ただ一つの集中的なエージェント（情報処理主体やロボト）によって実施するのではなく、複数のエージェントが並列に働かせることが重要である。群知能処理に期待される利点として、次の点が挙げられる（図4.7参照）。

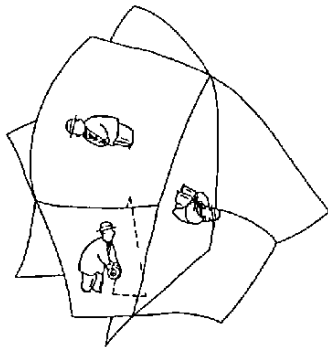
- 1) 宝捜しのように、領域を分担することで短時間に目的を達成できる。



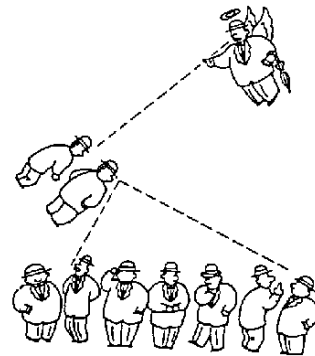
(a) 宝探し (分散探索)



(b) 御輿かつき (協調制御)



(c) ハケノリレー (拘束処理)



(d) 実行役と目付役 (階層的管理)

図 47 群ロボットによる柔らかな作業分担

- 2) お御輿かつぎのように、能力の限られたエージェントの協力によって、単独では困難な作業を能率良く遂行し、失敗をバクアノブする効果が期待できる。
- 3) バケツリレーのように、一人一人の人間は、自分の持ち分の仕事を他とは比較的独立にしか実施しないか、全体として、合目的な作業が効率よく実施される。
- 4) 猿橋（さるはし）のように、ロボット自らが大きな構造物の一部となれば、単体のロボットでは不可能な、大きな作業が実施できるようになる。

### (3) 適応、学習、自己修復機能

柔らかなロボットの実現には、情報処理形態において、質（固いアルゴリズムによる最適解）から、量（共同作業による近似 妥当解）への転換が必要である。一つの問題向きに最適化された解法を、人間から一つだけ与えられたロボットというのは、その個別の問題をいかにうまく解くことができたとしても、単機能の要素機械に過ぎない（汎用性がない）。軽微な環境変化にもついてゆけない（適応性がない）。多くの近似解をふまえ、状況によって作業方法を変更しながら作業を遂行する頑健性が必要である。そのためには、評価と過去の履歴を考慮した再計画機能、作業実行の動的な変更を可能にする動作単位、学習機構アーキテクチャが不可欠である。

従来のロボットは、サーボレベルでのみフィードバック系が構成され、上位の計画系は、実行系とは独立に動作している。柔らかなロボットでは、実行系から計画系へのフィードバックがあり、計画系はその情報から、自分の計画を評価することができる。環境と作業の効果との関係を評価することで、ロボットは環境に対する適応性を獲得することかできるようになる。一つの最適解を網渡り的に実行するのではなく、多くの近似解を用意し、ある解の実行に失敗しそうになったらいち早くそれを察知し、致命的な状況に陥る前に、別のやり方を見つけだしそれにスムーズに移り、結果として頑健に作業を遂行する。ロボットを構成する要素、機能が多数になり、多くの種類の作業に対する汎用性を高めるにつれ、それらの関係をあらかじめプログラムすることか困難になる。この問題に対処するには、作業・環境のメタモデルと、動作の効果を評価することによる上位レベルでの学習フィードバックが重要になる。

メタモデルは、従来の固い幾何モデルに代わる、柔らかなモデルを提供する。メタモデルは、作業や物体の性質、機能、効果などの属性として記述され、環境か定まり、センサから情報が次第に収集されるにつれて、具体的な（従来型の）モデルを生成することができるような、高次のモデルである。メタモデルは、そのロボット自体の機能やセンサーの特質に関する知識も含んでいる。これらの情報に基づき、状況に応じて、センサー情報の解釈法、行動の予測法、作業の監視法か計画される。

柔らかなモデルの記述から実環境に適応するためのモデルを引き出すには、かなりの計算量を必要とする。また、作業を評価しつつ、環境の変化に応じて計画を作り直すには、いわゆるオンサイト・プランニングの技術が必要になる。両方にとって、超並列計算による実時間計算と、分散システムのスケジューリングは、重要な鍵となる。

高度に組織化された複雑なロボット群か安定に機能するためには、各ロボットおよびロボットの各器官か自律的局所的にその機能 形態を保持できることが重要である。定常的に部品を交代する新陳代謝機能と、臨時的（大規模）な自己修復機能とを実現することか重要である。この場合にも、柔らかな評価機能かその基礎を与える。すなわち、各部分は局所的な情報交換を通して全体の構造の情報を確保できるような機能を持たなければならない。

柔らかなロボットをハードウェア的に実現する手段として、自己組織を含む集団化の力学を利用する方向がある。つまり、情報処理機能としての柔らかさとともに、ハードウェアとしての柔らかさとして、たとえば、ロボット全体を一体として設計、実現するのではなく、ある意

味で汎用的な部品ロボト（例えばセルラオートマトン：機能単位としての汎用性ではなく必要に応じて材料から機能単位を構成できる情報と素材をもつ単位素子）の集団化を利用する方向である。

この個体の安定性に対して、ロボト群に集団として適応性、発展性を持たせるために、個体ロボトを越えた情報の伝達、変更の手段として「若返り」の機構を取り入れることも有用であろう。これによって遺伝的進化の仕組みを具体化できれば発展性が期待できる。

#### (4) 統合化手法

多様な環境で多様な作業を実施する柔らかなロボトを実現するためには、情報形態にしても、情報の入力方法（センサなど）、情報処理方式、計算モデルなどにしても、単一のものでことたりることはない。複数のものの統合が重要な技術となる。以下にその具体例を述べる。

##### 感覚系と行動系の統合

実世界の情報はパターン情報として得られることが多く、作業目標は記号情報で与えられる。この意味で、行動システムは必然的にパターン情報と記号情報の統合機能を備えねばならない（統合処理）。記号情報（作業命令、作業知識）とパターン情報（視覚、力覚、触覚、すべり覚、音声信号）の統合、効率の良い記号学習と、並列処理が得意とするパターン学習（記憶）の統合などが求められる。また、実環境から情報を得るために能動的に環境に働きかけるアクティブセンシングの実現にもこの統合が必要である。

##### 感覚器の統合（センサー融合）

同一あるいは異なる種類のセンサーを多数用いることで、効率、雑音、精度、曖昧さ、不完全さなど、単独のセンサーに頼ることの問題を克服し、信頼性の高いセンシングを実現する。また、内部のモデルを活用してセンサの振舞いを予測することで、特定の信号に対する感度を鋭敏にしたり、状況に応じてセンサーの優先度を評価し、矛盾する情報の統合を図る。

#### 4.5.1.4 研究課題

以下に、柔らかなロボト実現のための具体的研究課題を列挙する。

##### 1) 柔らかなモデリング手法とモデル獲得技術

環境、作業、ロボトに関するメタモデルから状況に応じたモデルのインスタンスを生成する技術。そのためには、まず、さまざまな作業のモデルの記述法を個別に分析し、それらを生成するためのパラメータとプリミティブを定める。つぎに、個々のモデルを合成するのに必要な機能的（意味的）なモデルの記述法を研究する。

##### 2) オンサイト・プランニング技術

実行系 感覚系から計画系に至るフィードバックを形成し、環境に応じて実時間で作業を計画する技術。計画には、センサーの利用法、監視の方法等も含まれる。作業が失敗すれば、ただちに失敗の原因を評価し、新たな計画を作成する。

##### 3) 群知能探索手法（分散協調探索手法）

探索空間を多数のエージェントで手分けして探索したり、探索経過を評価して有望な方向を見つけたらその方向により多くのエージェントを投入したり、全エージェントの動作状況からエージェントの役割を分化させたりする手法などをベースに作業目標の達成を計画する技術を研究する。

#### 4) 能動 / 分散センシング技術、分散解釈技術

利用するセンサの配置や種類、センシング処理法などを状況に応じてシステムが自分自身で能動的に変化させる能動的センシング技術、空間的に分散した多種類多数の（必要ならば移動可能な）センサ群や、時間的に異なる複数の情報を協調的に利用する分散センシング技術などを研究する。また、センシングされた多様な情報を分散的に解釈し、総合的に物理解を進める分散解釈技術を確立する。

#### 5) 高度物体操作技術

センサで結果を常に監視しながら物体操作作業を遂行する技術を基礎に、作業の解析とモデル化、そのマルチエージェントによる実現と体系化、その階層的構成の研究を行う。また、このような物体操作ソフトウェアを最も効果的に実施するハードウェアを製作し、マニピュレータや多指による高度物体操作技術を確立する。

#### 6) 群の協調管理技術

知能システムの情動的マルチエージェント構成法とその多層的エージェント管理技術、及び、その動的役割配分を含む群知能システムの協調作業を研究する。

#### 7) 知的対話技術

多様な情報を処理する群知能情報処理のための対話技術を研究する。また、人間と群知能システムとの意志疎通技術、つまり、複数の知能処理単位や知能システムに、重要な情報のみを効率よく報告させる機能や、群知能システムと人間とが共同して作業を実施する機能のための対話技術を核とするインタラクティブロボティクス技術を確立する。さらに、人間を教師とした学習機能を研究する。

#### 8) システム統合技術

以上の技術を統合し、超並列超分散計算機上に統合群知能システムを構築する技術を開発する。さらに、統合群知能システムによって、作業の状況に動的にシステム構造を変化させ、要素システムを協調させることでロバストな作業が実施できることを実証する。

### 4.5.2 機能統合化システム

#### 4.5.2.1 現状と問題点

柔らかな情報処理によって実現されるであろう認識・理解、推論・問題解決（計画）、制御などの要素機能を統合した機能統合化システムはどのようなものであろうか？

従来の制御システムは静的なシステムをその基本にしていた。問題解決の枠組は最初に与えられ固定される。新たな知識が増えることがあってもアルゴリズムが変更されることはない。適応的といってもただか数個の変数を決めたアルゴリズムにしたかって変更するぐらいである。しかしこれでは我々が目標とする動的に変化する外界に対応した柔らかな制御は不可能である。

#### 4.5.2.2 研究の目標

我々が目標とする統合化システムは、動的でしかも確率的な時空構造を持つ外界に対応する必要がある。そして外界とのアクティブな「Interaction」があって始めてそのシステムに本当に必要な処理の枠組や知識の自律的な学習が可能である。



そのような柔軟な制御を実現するためには、履歴を持ち確率的な動作を基本とする動的な要素からなる部分を、外界との「Interaction」によって自律的に階層的、モジュール的に統合していくシステムが必要となる。

そのようなシステムのモデルが図48である。図からは動的な動作は読み取れないが、各要素は履歴を持ちながら確率的に動作する。このモデルはブレインマシン、ブレイン・マシンのためのセンサ群、機械群 + センサ群、HI (Human Interface) 群 + センサ群そしてそれらを取りまく人間を含んだ環境からなる。すべての部分は互いにやりとりしなから自律的に動作する。システムは、モジュール化、階層化により外界の確率的構造を内部に局所的かつ階層的にモデル化する。この統合化システムを実現するためには各部分は未熟でも最初から完全に外界と自律的にインタラクト (interact) するシステムを作ることが重要であると考えている。

モデルの各モジュールおよび各階層は基本的には同じ動作原理に基づいて動く。その動作原理を作り出すべき基本概念を認識の相対性、「Interaction」、現実の複雑性を中心に述べ、研究の方向づけを述べる。

#### 4.5.2.3 研究の内容

今までの研究における認識あるいは概念は、絶対的な視点から語られたものが多い。「ここにある車を計算機に認識させるにはどうするか」といった具合である。そして「車」の概念を用意し、入力とその概念を認識によって結び付けることに力を注ぐ。すなわち認識システム(人間や計算機)とは独立に絶対的な概念が存在し、認識システムはその絶対的な概念をいかに認識するかか問題であるといった立場である。概念の完全な定義か可能な対象に対してなら絶対的な概念も存在し得るが、どんな対象でも完全に定義することは非常に難しい。その難しさは対象の概念の境界の空間的、時間的曖昧さによっており、対象の完全な定義は本質的に不可能である。

こういった概念定義の不完全性にも関わらず人間が対象をほとんど確実に認識してしまうのはなぜであろうか。人間の認識は確率的なものでしかないが、たとえ一つの対象の各部分の認識は低い確率でなされても、各部分の認識を階層的、モジュール的に積み上げる中で認識の確率をほとんど1にするからであると考えられる。

概念の完全な定義が不可能であることから、機能統合化システムにおける認識は各認識システムを構成する場合には、外界とのインターアクションも含めて各要素認識システムのセンサーで認識されたことをとりあえず信じるべき情報とする「認識の相対性」を基本とするべきであろう。

「認識の相対性」を基本にすえても、各認識システムは概念を全く任意に定義できるわけではない。確率的な構造をもつ外界との「Interaction」とシステムに内在する評価によって自分自身にとって意味のある外界の構造を反映した概念と認識過程を作り上げていく。それが「Interaction」の重要性の理由である。

システムが時空に渡って外界に及ぼしたと認識しているものと、その外界からの結果とそれによるシステムの内部状態の変化の認識をもとにしてシステムは自分自身の評価基準にしたがってシステムの状態を変化させる。その結果としてシステムの内部に階層的かつ構造的に外界の確率的構造を反映させ、外界の対象の概念を作る。

認識は絶対的ではなくいつでも新たに認識され得るものが存在する。新たに認識された問題に対して最初の枠組が十分である保証はない。統合化システムに必要なのは、それまでの枠組で解けないような問題に対しては新たな枠組を取り入れて解決してしまうようなシステムである。学習、自律を実現することにおいて生物は決して最初からいろいろな枠組を用意していた

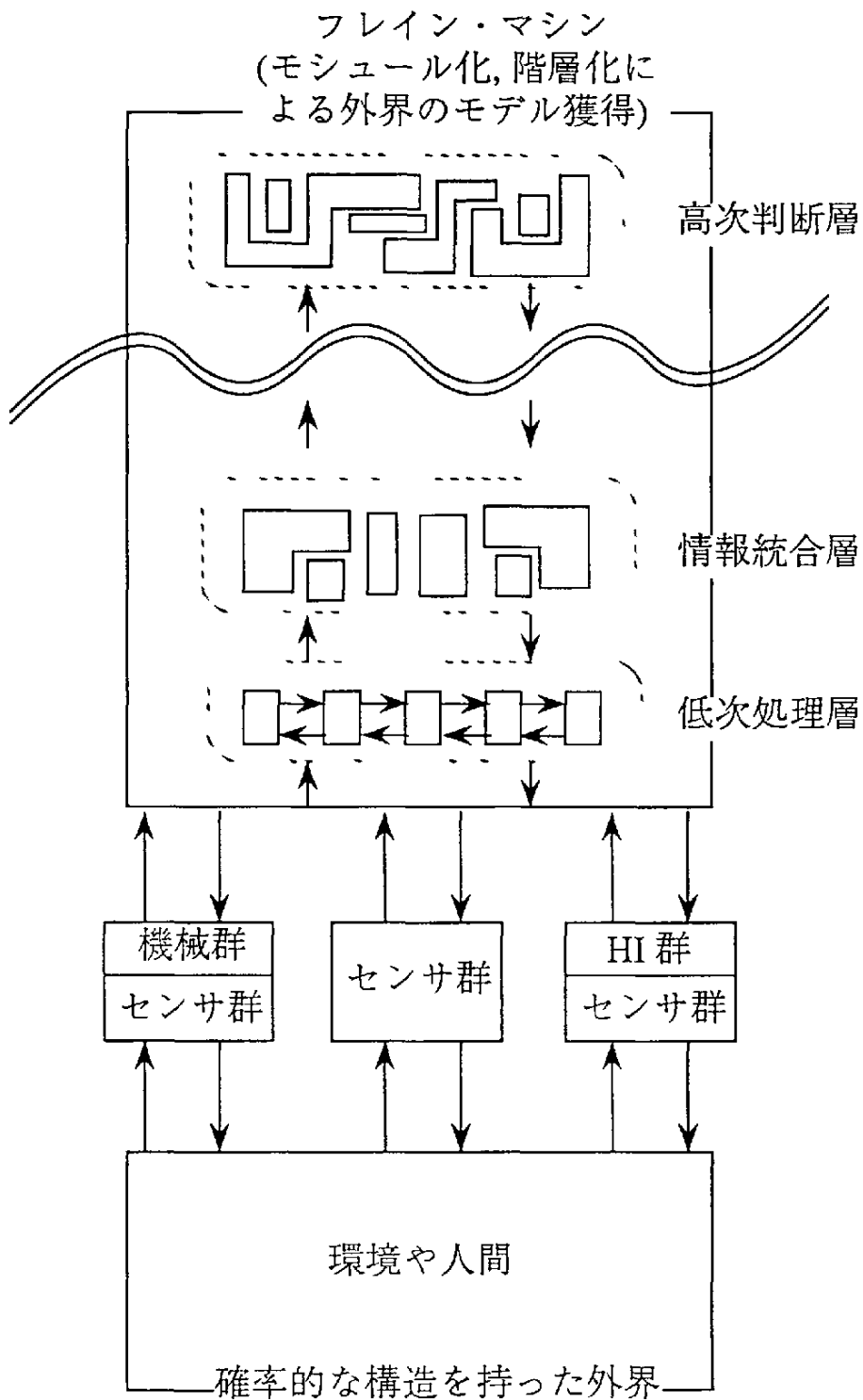


図 48 統合化システムのイメージ

わけではない。むしろ偶然に現実における制約条件を学習、自律を実現するのに使えるのを発見し、それをシステムの中に採り入れていった。

現実の「もの」は時空に渡る広がりを持ち、最初の段階ではほとんど意識されない実に多様かつ複雑な制約条件を持ち得る。統合化システムには必ずしも現実の「もの」を使う必要はないか、たとえソフトウェアでシステムを作る場合でも現実か持つような多様かつ複雑な制約条件を持つ要素からなるシステムが必要である。システム内に多様かつ複雑な制約条件を持つことはそれだけ多様かつ複雑なやり方で行動の全体の空間に確率分布を与えられ、新たな状況や問題に対しても有効な確率分布を与えられる。

#### 4.5 2 4 研究課題

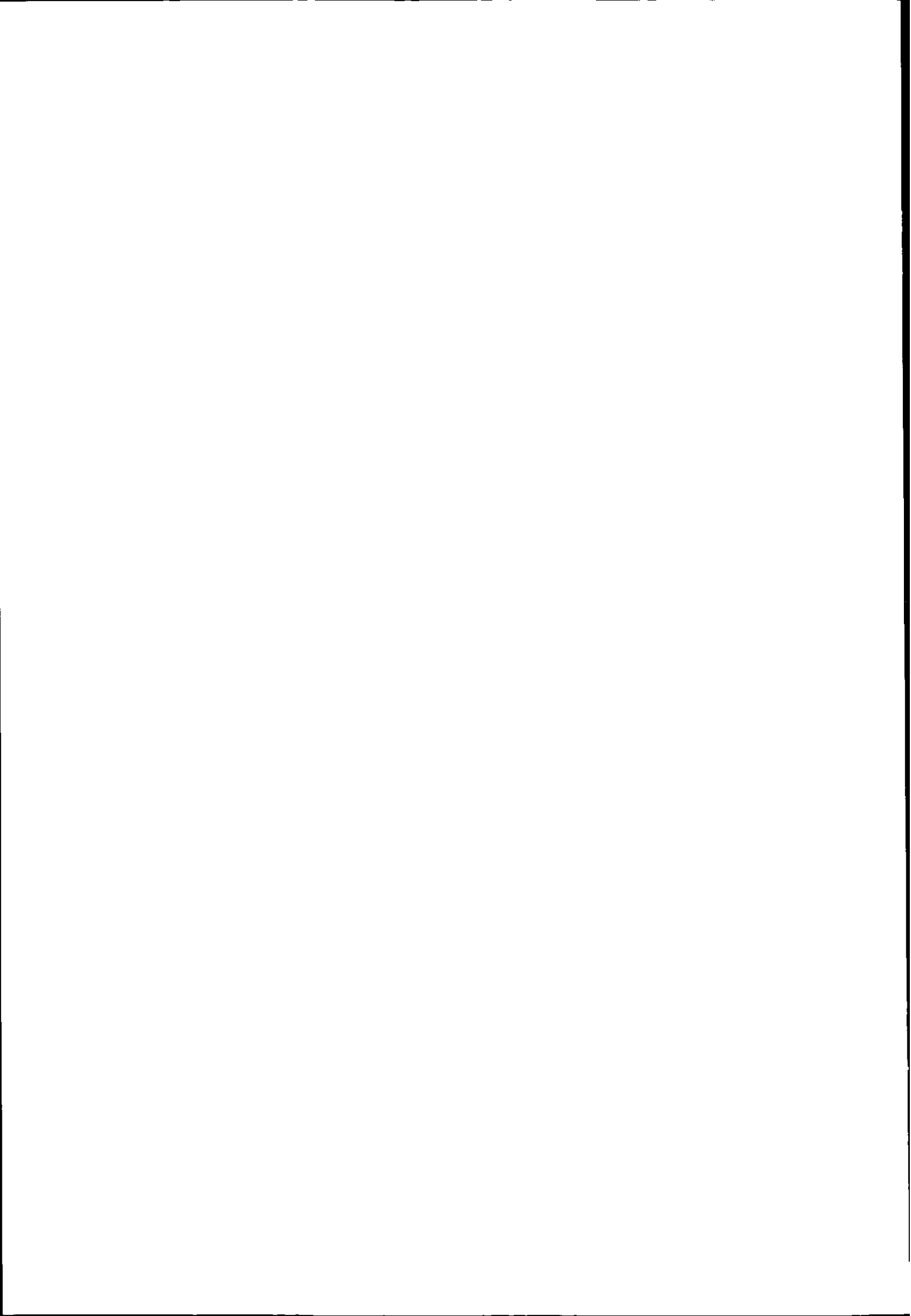
以上の考えを元に機能統合化システムを実現するために必要となる研究は、それぞれの部分か不均一でそれら空間的にも時間的にも多様な関係を持ち得るシステムの時空における状態およびその変化をとらえる研究である。特に「Interaction」を基本にするシステムにおいて連続的な時間方向の解析なくしては本当の状態をとらえられない。システムの状態をとらえる研究の道具として数学の確率論、特に確率過程を用いることにより、確率的にシステムの評価が可能になると考えている。

機能統合化システムの具体的な動作原理は次のようなものを考えている。システムは行動の全体がなす空間に対する確率分布を持っており、その確率分布に従って行動を出力する。その行動の結果を評価し、行動の全体がなす空間に対する確率分布を変えることが学習に相当する。ここでシステムかいかにか多様かつ複雑な制約条件を持ち得るかか学習の可能性、効率を決定する。また分散表現の情報と記号表現の情報の統合は、確率的な構造を持つ外界の分散表現をシステムの階層化、モジュール化を通して確率 1 に近づけることにより実現される。

最適化問題に対するシミュレーテッドアニーリングは確率とダイナミクスを持ったシステムを扱っているという意味で目標とする統合化システムに近く、これからの研究に最も関連する研究分野であると考えている。最適化問題の解空間を適当なシステムの状態で、解の最適性をシステムのエネルギーの最小値で表現する。確率分布のパラメータとなっている温度を下げながらエネルギーと温度で決定される確率にしたかってシステムの状態を変化させ解空間の探索を行なう。統合化システムの研究からみたこのシミュレーテッドアニーリングの問題点とどういった解決法かあるかを指摘する。

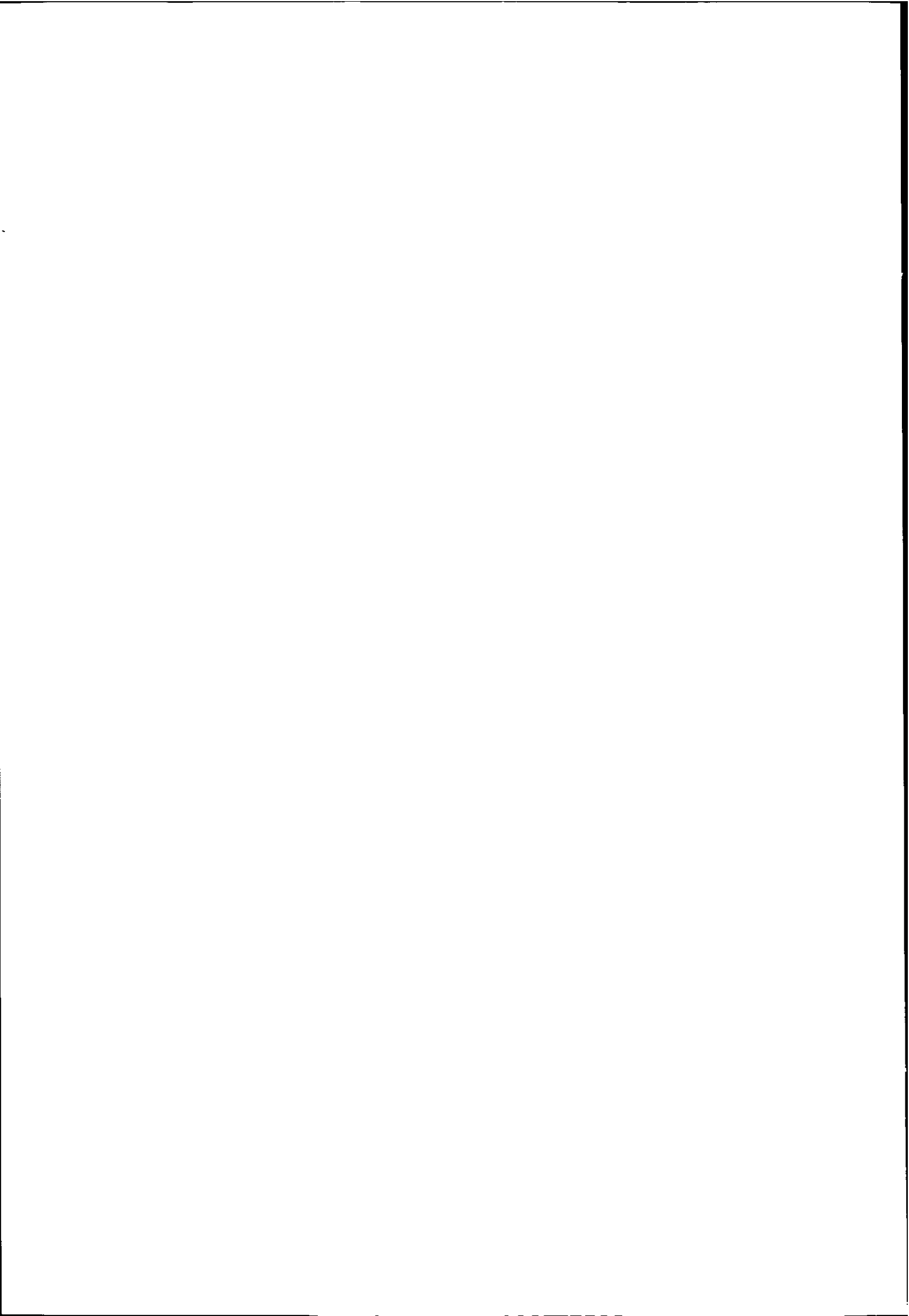
一つはシミュレーテッドアニーリングか複雑な構造を持つシステムに対して適応されていないことである。これは与えられた問題に対して複雑な制約条件を人間か直接与えることが難しいからである。これを克服するには互いにいろいろな関係を持ちそれらか多様かつ複雑な制約条件を持つ要素からなるシステムの自律的に構造を獲得する手段か必要である。

もう一つは最適化問題か時間を持たない対象であることである。シミュレーテッドアニーリングは時間に無関係で静的な関係を徐々にシステムを硬直化することにより実現するといえる。しかし統合化システムの対象は、時系列に対するエネルギーの最小化を必要としたり、最小化すべきエネルギーか明確にならなかつたり、あるいは最小化の対象か時間によって変わっていく。こういった対象に対しては必ずしもその時点の空間的に最適の状態ではないが柔軟性とダイナミクスを残したまま動かすのが有効な手段だと考える。



## 第 5 章

### 柔らかな情報処理のシステム基盤



## 第 5 章

### 柔らかな情報処理のシステム基盤

#### 5.1 ニューラルシステムからの検討

##### 5.1.1 基本的考え方

柔らかな情報処理というと、人間の情報処理にあって、コンピュータの情報処理にないものを期待することが多い。人間の情報処理は神経つまりニューロンで構成される回路網でなされているので、ニューラルシステムは明かに柔らかな情報処理の大きなモデルとなる。

ニューラルシステムの柔らかさの一つは学習可能性である。つまり、システムの応答が環境に即して徐々に変化し、画一的な応答ではなく可変である点である。もう一つは汎化機能である。ある入力に対しある出力がでるようになると、それに近い入力に対しても同様な出力が期待できるといった機能である。これは実際のニューロンがアナログ素子であるからである。つまり、とんでもない応答が発生しにくいことが暗に期待できる。こういった柔らかさの機能は、現在のコンピュータでもプログラム次第で実現することができる。しかし、例えば学習させるとき、どの様な場合に応答をどちらの方向に変化させるべきか、また、どういった規則で変化させると能率良く変化していくか、といったことについては殆ど解っていない。また、汎化機能についても、これをデジタルシステムで実現するとしたら、どの程度の近傍性を持たせたらよいのかも良く解っていない。

では、ニューラルシステムは、すでにこうしたことに解答を用意しているのかといえば、それは否である。現状の研究対象となっているニューラルシステムは、規模からいっても内容からいっても現実の脳神経系からは程遠い。これをなるべく近付けることが、ニューラルシステムに関する研究の重要な課題といえよう。このように述べると、最終目標は脳そのものを金物で構成することと思われがちであるが、必ずしもそうではない。こうした研究のプロセスで、脳の動作原理を把握し、よい機能をピックアップし利用していくといった工学的な研究を行うことが肝要であろう。

現在のニューラルシステムに関する研究の中でもっとも大きな潮流は、昨年度の報告書からも解るように、誤差逆伝播法と呼ばれるシステム学習アルゴリズムである。この方法はまず基本的には、入力から出力に向かって信号が一方向的に流れるフィードフォワード型回路を対象としている。外部に教師がいて、その出力が期待とどのくらい異なるかを教えてくれる。この教師情報を利用して回路構成を変更していく。この潮流から考えて、本研究計画の進むべき方向は大きく二分できよう。まず、先に述べた潮流にのって、さらに高速化、大規模化を進めるテーマが考えられよう。例えば、ニューラルシステムを構成する回路をどのように巨大化し、機能分化させるかといったテーマである。第二は潮流から逸脱するテーマである。例えば、回路内にフィードバックのある場合の回路の動作、および学習ルールの研究、さらには環境から

教師なしで学習情報を得ていくシステムの研究といったテーマである。

前者はどちらかというと開発的なプロジェクト型研究指向であり、後者はどちらかというところと基礎的な探索型研究指向である。この両輪があいまって研究開発を展開することが肝要であろう。研究のツールとしては、対象とするシステムの巨大化、複雑化に合わせ、研究用のニューラルシステムを構築する必要がある。しかし、学習ルールなどまだ未知の部分が多いことから、専用ニューラルマシンと、高い可搬性を持つ制御部分とを必要とする。このあたりで超並列システムとの統合概念が生まれることが期待される。

このような観点から、本節ではまずニューラルネットワークモデルについて議論する。ニューラルネットワークで柔らかな情報処理を実現するためには、回路の大規模化と機能分化が必須である。しかし大規模な回路の構成法や学習の方法はまだ充分研究されておらず、モデルレベルでの研究が非常に重要である。ここではまずモジュール化・階層化の方法について述べ、次に新しいモデルや学習法について論じる。次に、大規模なニューラルネットワーク回路を実現する方法について述べる。まずスケラブルなアーキテクチャの重要性とその構成法を論じ、ついで具体的な実現手段としてウエハスケールインテグレーション技術を用いて100万ニューロンを実現するハードウェアについて述べる。最後に、コンピュータとニューラルシステムを統合したシステムのイメージを与え、アクティブコグニションを一つの応用例として統合システムに向けてのアプローチについて述べる。

## 5.1.2 ニューラルネットワークモデル

### 5.1.2.1 ニューラルネットワークの構造

#### (1) モジュール化

ニューラルネットワークアプリケーションの多くは、現時点では試作レベルにあり、ネットワークの規模も小規模であるが、今後は実用システムの実現に向けてネットワークの大規模化が進むと考えられる。しかし単純に規模を拡大しても、ニューラルネットワークの持つ以下のような欠点が表面化し、所望の性能が得られない。

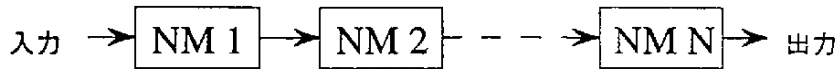
- 学習の収束性が悪くなる
- 学習時間が増大する
- 汎化能力が低下する

現在の技術で大規模ネットワークを構築するには、システム全体をいくつかのレベルの機能に分割し、各機能をそれぞれ独立したニューラルネットワークで実現する、いわゆるモジュール化を導入するのが現実的である。各レベルのニューラルネット・モジュール (NM) は個別に学習させることかでき、規模が小さいので収束も速い。結果的には、大規模ネットワーク一つを学習させるよりも短い時間で学習が完了する。また、明示的な知識をネットワークの構造やデータ表現に組み込むことにより、白紙の状態から学習させたネットワークよりも優れた性能が得られる。NMの結合方法は、逐次モジュール化、並列モジュール化、階層モジュール化の3方式がある(図5.1)。

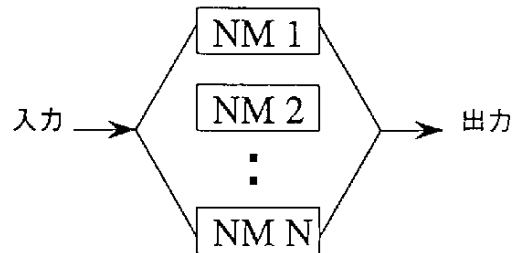
#### 1) 逐次モジュール化

逐次モジュール化は、入力から出力までの間に情報の適当な中間表現を設定し、まず各NMに中間表現  $k$  から  $k+1$  へのマッピングを学習させる。次にサブネットを結合し、必要なら再度

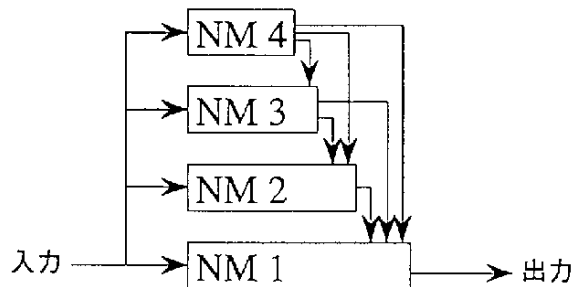




(1) 逐次モジュール化  
Sequential modularization



(2) 並列モジュール化  
Parallel modularization



(3) 階層モジュール化  
Hierarchical modularization

図 5 1 モジュール化の 3 方式

学習を行って全体の整合をとる。各サブネットは出力段に近づくにつれて高次の処理を行う (図 5 2)。逐次モジュール化は明示的な知識やノウハウを組み込みやすく、各ユニットの役割が明確であるという長所があるが、従来のエキスパートシステムと同様に知識獲得の工数がかかり、機械的な学習が難しい。

## 2) 並列モジュール化

並列モジュール化には統合型と選択型の 2 つの方式がある (図 5 3)。統合型は入力信号を全 NM に入力し、その出力を統合して最終的な出力とする。各サブネットが入力パターンの様々な特徴を評価し、その評価結果を用いて多角的な判断をするため、信頼性のある結果が得られる。反面、全 NM に計算を行わせるため、計算量が膨大になるという欠点がある。実用化のためには各 NM の計算を並列に実行する機構が必要になる。選択型は入力信号の性質にしたがって NM を適宜選択し、その出力を最終的な出力とする。全 NM を励起する必要がないので統合型に比べ計算の負荷が軽い。しかし適切な NM の選択に失敗すると以後の処理が正しく行われない等の欠点がある。この欠点に対処するため、ただ 1 つのサブネットを選択するのではな

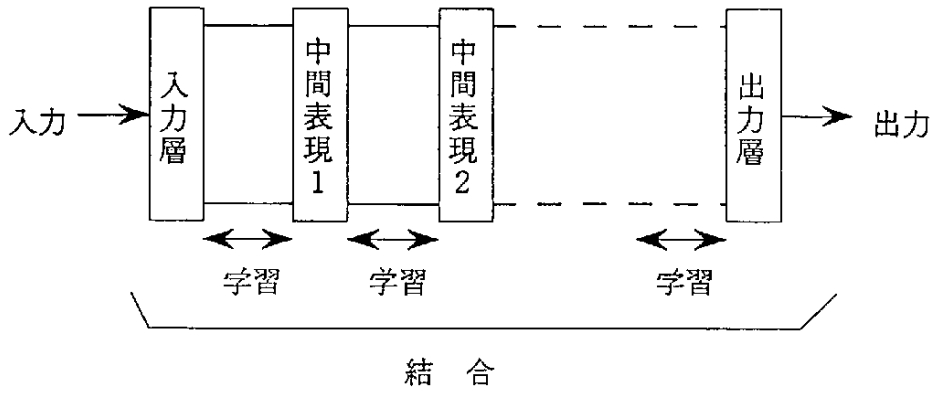


図 52 逐次モジュール化

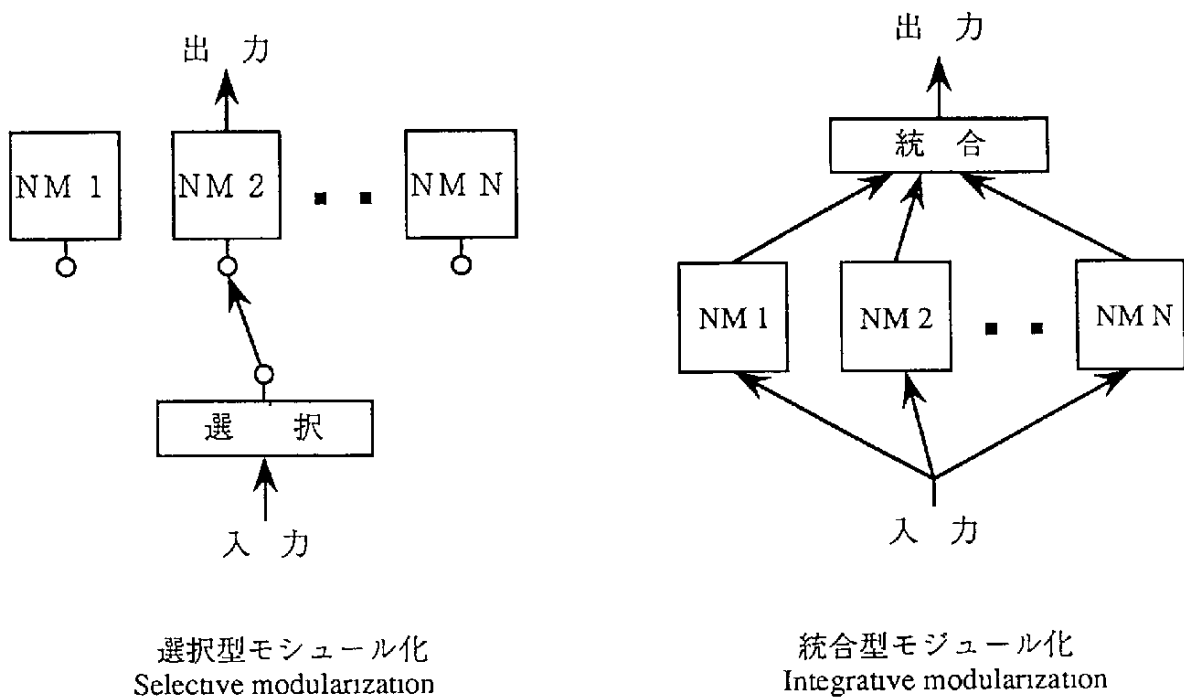


図 53 並列モジュール化

く、複数の NM を選択して結果を比較する方法をとることもある。この場合はむしろ統合型に近い計算アプローチとなる。

並列モジュール化は、パターン認識の分野で、認識対象を拡張するために用いた例 (文字認識において、認識字種を増やす等) が多い。また、画像処理・画像認識では、局所的な部分画像に対するローカルな処理を並列に行い、次に統合化するのが一般的であるが、このような処理にも並列モジュール化は適用できる。

### 3) 階層モジュール化

階層モジュール化は、NM を縦方向に積み上げた構成をとり、各 NM の出力はシナプス結合を通じて、自分より下位の NM 全てに伝達される。このような結合は脊椎における神経系において観察することができる。学習は下の NM から順に行なわれ、上位の NM は下位の NM に対する機能追加モジュールとして働く。現在のところ、階層モジュール化に関する研究は行なわれていないようであるが、生理学的知見との整合性が高いという点で非常に興味深い。また、階層モジュール化の導入により、再学習なしの知識追加等の新たな可能性が開けると考えられる。

## (2) リカレント・システム

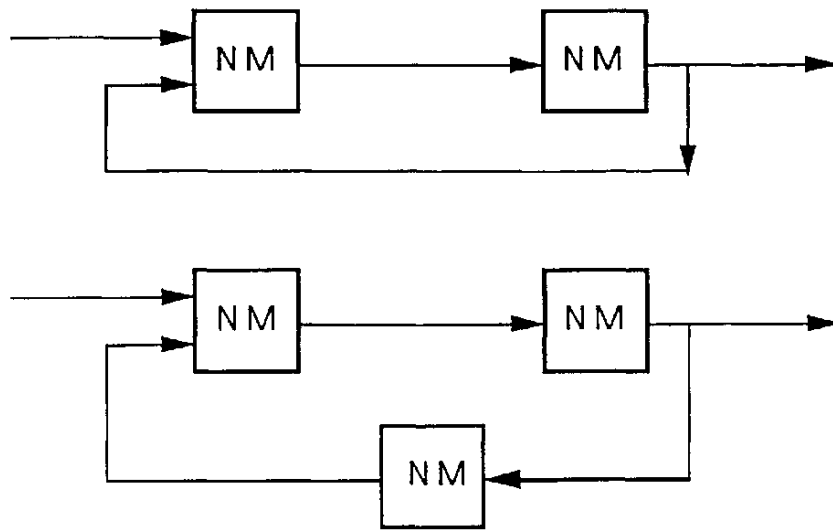
### 1) 構成

ニューラルネットをモジュール (基本単位) として複数のニューラルネット・モジュール (NM) とそれらの結合から成る系構成において、入出力関係 (情報の流れ) や処理の流れにフィードバックがある系、即ち、NM 間に相互作用がある系をここではリカレント・システムと呼ぶこととする (図 5 4)。図 5 5 は並列度、モダリティ、処理の深さの 3 軸で表わしたリカレント・システムのイメージである。並列度の軸は同種データを同一時刻に処理する NM を、モダリティの軸はシステムで扱うデータ種別ごとの NM を、処理の深さは情報や処理の流れに対応する NM を表わしている。リカレント・システムは、NM 間の情報あるいは処理の流れにフィードバックや循環があるのが特徴である。情報の流れや処理にフィードバックを導入することにより、機能的には内部状態を有し、その内部状態に基づく処理や NM の相互作用により、ある機能や情報処理を実現することができる。NM は、記憶機能のないフィードフォワード型のものから記憶機能を有するものやユニット間結合に相互結合やフィードバックを有する、いわゆるリカレント型のものまで各種のニューラルネットで構成されるものとする。

複数のモジュールとそれらの相互関係で構成されるシステムと言う意味では従来システムとの差はないが、モジュールをニューラルネットで構成することによって柔らかな情報処理を実現できる可能性やモジュールの役割やモジュール間の相互関係を学習によって適応的に形成できる可能性が高いことがリカレント・システムの大きな特徴である。また、そのような可能性を追及するのが研究の目指すべきものである。したがって、システムの構成 (NM とそれらの相互関係) によってどのような情報処理、どれくらい柔らかな情報処理が可能となるのか、あるいは逆に、どのような学習手続きによってそのような NM と NM 間の相互関係を形成できるのかが課題となる。

### 2) 学習制御レベル

リカレント・システムで実現される情報処理の柔らかさはシステムを構成する NM の役割と NM 間の相互関係の柔らかさに依存する。システムに要求される柔らかさ、即ち、NM の役割とそれらの相互関係の柔らかさ、さらに学習制御系の構成に応じて、学習制御にもいくつかのレベルがある (表 5 1)。ここで、学習制御系の構成とは、学習制御の有無とその形態を意味し、制御がない場合と、制御有りの場合はシステム全体あるいはある塊ごとに制御主体があり



NM : Neural Net Module

図 54 リカレント・システム

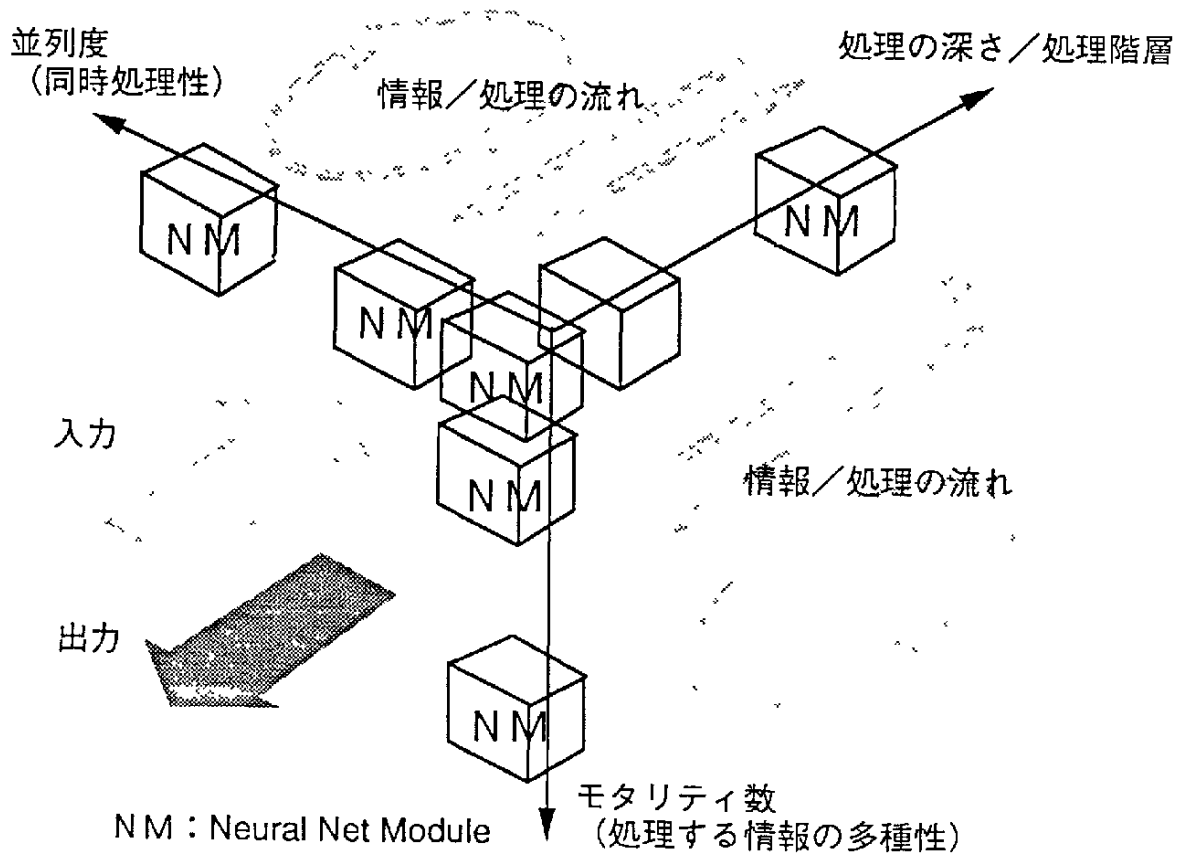


図 55 並列度、モダリティ、処理の深さの3軸で表したリカレント・システム

表 5 1 学習制御のレベル

学習制御系の構成	NMの役割	NM間の結合関係／結合度	学習制御レベル
学習制御なし	固定	固定	0
集中制御	固定	可変	1
	可変	可変	2
分散制御	固定	可変	3
	可変	可変	4

学習制御を集中して行う集中制御の場合と制御主体がなく各 NM が学習制御を行う分散制御の場合とがある。

レベル0はモジュールベースの系構成法の最も単純な場合に相当し、NMの役割も相互関係も固定で、各NMの入出力条件に合わせてNM間結合を構成するので学習制御は不要である。レベル1はNMの役割は固定であるがNM間の結合関係が可変の場合であり、例えば、制御主体がNM間の結合関係や結合度を調整することにより系全体の学習を司るような場合である。次のレベルは集中制御型の学習制御でNMの役割および結合関係とも可変の場合で、NM間の結合関係や結合度の調整に加えてNM内での処理や機能を制御するような学習制御法である。外部からの制御でNMの処理や機能を変化させるためには、コンテキスト情報のための入力を持つニューラルネットや記憶機能を持つユニットへ外部からの書込かできるニューラルネットやユニット間の結合荷重を外部から修飾できるニューラルネットなど、入力と出力のみの2端子だけではなく外部からの制御端子を設けた3端子型のニューラルネットの研究も必要となる。

分散制御型の学習制御では、各NMが他との協調のなかで分散制御を行うわけで、システム全体のパフォーマンスを表わす何らかの評価関数を各NMが共有して自らの役割と他との相互関係を調整するような高度な自律分散の学習制御である。NMの役割が固定／可変の2つの場合が考えられるが、各NMの自律性を保ちつつ相互関係を自己組織的に学習できる学習方式／機構の創出が大きな課題である。

### 5.1.2.2 ニューラルネットワークの学習

#### (1) 教師あり学習と教師なし学習

ニューラルネットワークの学習方法は、教師あり学習と教師なし学習に大別される。教師あり学習とは、ある入力値に対するネットワークの出力と教示データとに隔たりがあった場合に、ネットワークの重み係数を変更する学習法である。教師なし学習とは、入力値に対して、ネットワーク自身があるルールにしたがって自ら重み係数を変更する学習方法である。教師あり学習、特にバックプロパゲーションについては、学習の高速化など多くの改良がなされ、応用事例も多く出ている。これに対して、教師なし学習に関してはあまり研究されていないのが

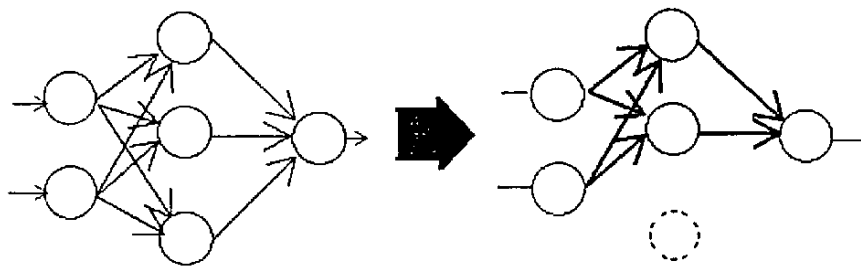


図 56 構造簡素化のイメージ

現状である。しかし、先に述べたリカレント・システムなどでは、モジュール間の関係などをすへて与えることは困難である。教師なし学習を適用すれば、自らの学習則にしたがってモジュール間の関係をも生成してくれる可能性がある。以上のような観点から、今後教師あり学習のみならず、教師なし学習の研究にも注力すべきだと考える。

## (2) 構造学習

### 1) 応用の観点から見た問題点と現状技術

ニューラルネットワークを実際の問題に適用する時に検討すべき項目の一つに、どのような構造を採用すべきかという問題がある。具体的には、中間層の数、各中間層のニューロン数を幾らにすれば、適切な精度で対象問題が取り扱えるニューラルネットワークが実現できるかという問題である。4層のネットワークであれば、任意の精度で近似できるニューラルネットワークが構築できることは、理論的に証明されている。しかし、実際には対象問題の性質によってネットワークの構造が左右され、また、教示データの精度や質によって学習後の性能が左右される。いうまでもなくほとんどの場合、与えられた例や対象問題の性質を解析し、予め構造を決めるのは不可能なことである。そこで、重要になってくるのか、ネットワークの構造も学習の過程で決めていくような学習法である。現在のところ、以下のようなアプローチがある。

- 1 予め十分複雑な構造を用意しておいて、学習の過程で簡素化していく方法（図 56）。
- 2 非常に簡単な構造から学習を始めて、必要に応じて複雑化していく方法（図 57）。

1 の例として、Rumelhart が提案した学習の評価関数にニューロン数からなるペナルティ項を導入する方法がある。これは、できるだけ簡単な構造が得られるようにして、汎化能力を評価しようとするものである。2 の例として Cooper らの RCE (Restricted Coulomb Energy) ネットワークモデルがある。これは、入力層のみからスタートして、中間層のニューロンを作っていく方法である。

### 2) 今後の課題

新情報処理技術のコンセプトである柔らかな情報処理を実現するには、オフラインで学習しその結果を使うといった静的な学習だけではなく、時々刻々状況に適用できるいわゆる動的な学習方法を確立することか不可欠である。これを実現するには、どのように学習を行ったらいいかを処理する仕組み、いわゆるメタ情報処理を実行する仕組みか必要となる（図 58）。このために、汎化能力も含めて、学習状態の評価法を確立することか第一歩だと考える。

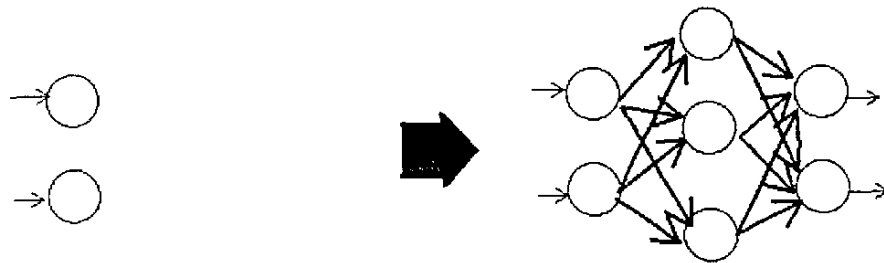


図 57 構造複雑化のイメージ

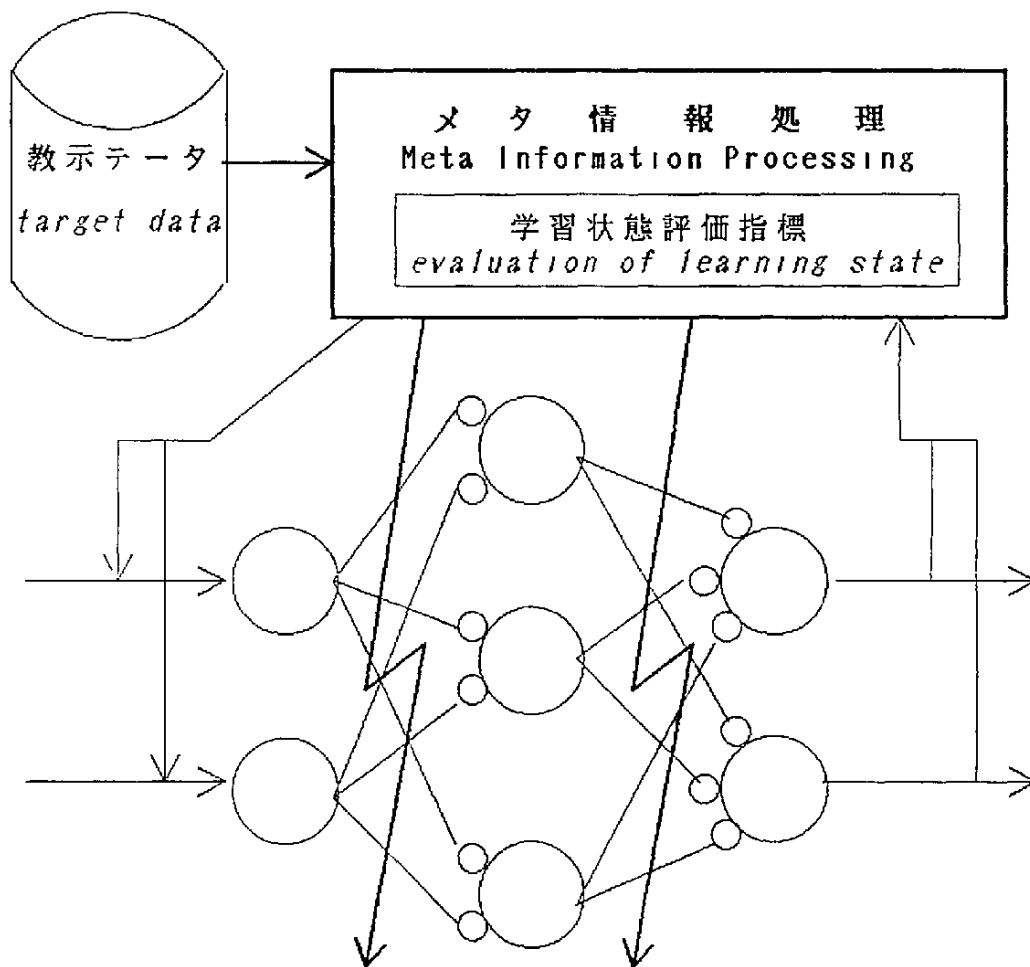


図 58 メタ情報処理

### (3) 進化による学習

学習や自己組織化の研究には生物における発生と進化のアルゴリズムが重要と考えられる。この領域の研究は現在でも十分になされているとは言えず、ただちに大規模ニューラルネットの構築に適用できる実用的アルゴリズムは存在しないが、カオスとジェネティクアルゴリズムに関する研究が自己組織化の研究に大きな示唆を与えているように思える。しいて分類すれば、前者は発生に、後者は進化に関係していると言えよう。

#### 1) カオス

比較的単純な規則に基づく非線形のシステムが、ほとんど予測不可能なほど複雑な振舞いをすることがある、ということが、近年、コンピュータ・シミュレーション技術などの進歩により明らかにされた。そうした現象はカオス（Chaos：混沌）と呼ばれて、現在、主に数理的な観点から精力的に研究されている。

脳の情報処理についても、非線形な特性を持つニューロンの相互作用により、神経回路網がカオス的な振舞いをしている可能性は高く、そうした振舞いを、人間の記憶や、推論の機能と関連づけようという研究も行なわれている。

たとえば、生物は試行錯誤で学んでいるが、この試行錯誤の生成にそれはカオスからの情報発生が寄与しているのではないかといわれている。このように、脳をカオス的なシステムと考えることによって、脳内の情報処理を情報の発生そのものにまでさかのぼって研究することも可能になるかもしれない。

#### 2) ジェネティク・アルゴリズム

ジェネティク・アルゴリズムは生物の進化の過程を模擬することによって、最適解などを探索する、確率的な最適探索手法の一種と言える。従って、この手法をニューラルネットワークに関する最適化の問題に適用しようという発想は自然である。

例えば、バクプロパゲーションの学習パラメータの最適化への適用、パターン情報処理において着目すべき特徴量の選択と生成への適用、ネットワーク構造の最適化への適用、などが試みられ、それぞれ、よい結果も得られつつあるか、全体的に見ると試行的検討の域を出ていない。

親染色体	1 1 1 1 1 1 1	子孫染色体	1 1 0 0 0 1 1
親染色体	0 0 0 0 0 0 0	子孫染色体	0 0 1 1 1 0 0

図 59 染色体のクロスオーバー

ジェネティク・アルゴリズムでは、まず、着目するパラメータを「染色体」に対応するビット列で表現する。幾つかのパラメータによる試行の結果、評価点の高いものか選ばれ、これらのパラメータを親の染色体として子孫の染色体に対応するパラメータを生成する。これを繰り返して行くと、何世代後には先祖の良い所のみを受け継いだ優秀な子孫の染色体（すなわち最適パラメータ）ができることか期待される。

親の染色体から子孫の染色体を生成する方法としては、図 59 のように染色体の一部を切断交換するクロスオーバーや、一部を任意に書き換えるミューテーションなどがあるが、これらの操



作が必ず良い子孫を生み出すという保証はなく、適切な世代交代アルゴリズムの研究が必要である。また、パラメータの染色体への対応づけも確立した手法があるわけではなく、これが不適切であれば良い結果は得られない。これらの点については、今後一層の検討が必要であろう。

### 5.1.3 ニューラルシステム

#### 5.1.3.1 ニューラルシステムアーキテクチャ

##### (1) スケーラブルアーキテクチャ

ニューラルネットワークによる情報処理の最大の特徴は、多数の処理要素が密に情報交換を行ないながら「協調と競合」の原理に基づいて問題を解くことにある。パターン認識、自然言語理解、意味ネットワークによる推論・質問応答、組合せ最適化問題の求解などをニューラルネットワークで実現するときの、基本原理である。これらの問題を実時間で実行可能なシステムを構成するためには、その処理アルゴリズムを明らかにしていくことはもちろんのこと、アルゴリズムを実行するためのニューラルネットワークのハードウェア化が必須の要件である。

実時間処理に必要な真の大規模並列性と、階層型やリカレント型あるいはそれらの混在型など多岐にわたるニューラルネットワークの構造を実現する汎用的なハードウェアを構成するためには、次の二つの実現が不可欠である。

- 1 少なくとも数千ニューロン規模まで完全結合型のニューラルネットワーク
- 2 それらをモジュールとして任意のニューラルネットワーク構造

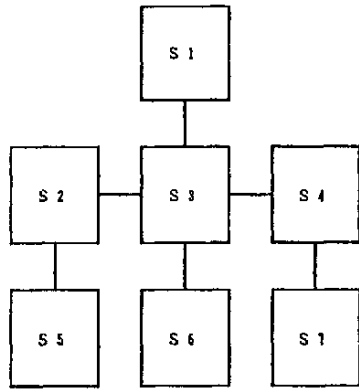
完全結合型であれば階層型やリカレント型など任意の回路構造を実現できる。またそれらをモジュールとしてさらに大規模なリカレント型や、多数の並列モジュールを統合する並列モジュール統合型などのニューラルネットワークを構成することができる。そのためには、ハードウェア的にスケーラブルなアーキテクチャでなければならない。

このような要請を満たすハードウェア方式としては、現在までのところパルス密度方式のデジタルニューラルネットワークが最適と考えられる。その特長は以下の通りである。

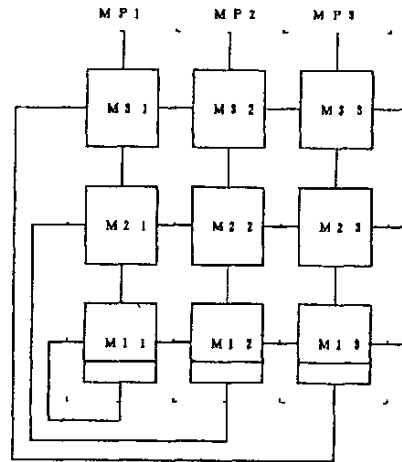
- 1 デジタル非同期回路方式
- 2 実際の神経と同様にパルス密度を信号伝達に使用しているため、ノイズに強く配線量の少ないハードウェア構成が可能
- 3 ニューロチップあるいはモジュールを単に接続してだけで、いくらでも大規模な任意のニューラルネットワーク構造が実現可能
- 4 センサやモータ系など外部環境とコミュニケーションするために必要な機器を直接接続可能
- 5 ニューラルネットワークのダイナミクスが表現可能

システム構成の一例を図5.10に示した。チップレベルでは、チップ内のニューロンを完全結合することも、外部入力を受けるようにもできる。ユニットレベルでは、チップ内のシナプスのみを使用する機能を用いて一つのニューロンのシナプス数を拡張し、ユニット内で完全結合型ニューラルネットワークを構成するか、あるいはサブシステムレベルでのシナプス拡張用ユニットとして使用する。図の例では最下段のチップをニューロンとして使用し、それ以外のチップはシナプス拡張用として使用している。サブシステムレベルでは、最下段のユニットのみニューロ

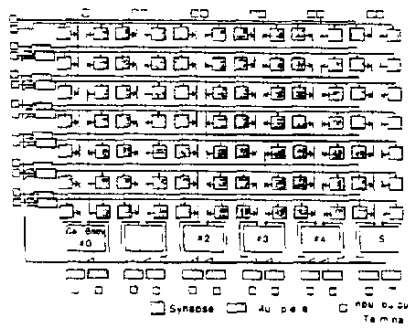
システムレベル



サブシステムレベル



チップレベル



ユニットレベル

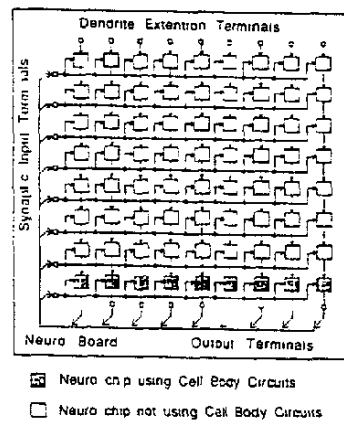


図 5 10 スケーラブルなニューラルネットワークアーキテクチャ

ンとして使用し、その他はシナプス拡張用に使用している。すなわち、ユニットレベルのチップの役割を、サブシステムレベルではユニットが果たしていることになる。システムレベルでは、サブシステムレベル（モジュール）を組み合わせて任意の構造を実現することになる。

このようなニューラルネットワークのアーキテクチャは、超並列システムとも非常に相性がよい。モジュール、あるいはモジュールを複数のブロックに分割し、それらを超並列システムの一つの処理要素（図の例ではサブシステムレベルにMP1などで示されている）で管理することにより、従来のコンピュータとニューラルネットワークとの統合を図ることができる。超並列システムの結合トポロジは4隣接近傍やN-cubeが主体であり、長い路長の結合が必要なニューラルネットワークの応用ではコミュニケーションボトルネックが問題となる。長い路長の結合をニューラルネット側で供給することにより、以下のような特徴を有する統合型アーキテクチャを提供することもできよう。

- 1 各モジュールのニューラルネットワークは、それを管理している処理要素のメモリに見える。
- 2 ニューラルネットワークは、処理要素のメモリ空間にマッピングされる。
- 3 ニューラルネットワークを分割して、マルチタスクの並列実行が可能である。
- 4 どのようなニューラルネットワークも実現可能である。

VLSI技術の動向を見ると、 $10^7$ ゲート/チップ程度のものが近い将来実現可能と思われる。それを用いれば、約1,000ニューロン/チップ、10,000ニューロン/モジュール規模のニューラルネットワークが実現可能である。

## (2) 通信方式

スケーラブルなアーキテクチャであるとはいえ、大規模なニューラルネットワークを構成するためには解決しなければならない技術課題もある。多数のニューロン間の配線・通信方式の問題や、ハードウェアのサイズよりも大きなニューラルネットワークを動作させるための仮想化技術などがそのような技術課題としてあげられる。

配線の問題については、LEDアレイ、光ファイババンドル、フォトダイオードアレイを利用し、周波数多重化、時間多重化などの通信方式を使用すれば、モジュール間の配線は楽になる。光インタコネクション技術の利用は、配線量を減らすのに有効である。とくに、WSIなどをスタックして高密度実装するとき、有効な手法となるであろう。しかしながら、パルス密度方式では、システム全体で同期をとる必要がない、モジュールをただつなぐだけでよい、という特長があるので、高密度コネクタなどにより力づくで配線することも不可能ではない。

仮想化は、ハードウェアのサイズよりも大きなニューラルネットワークを動作させるため、ニューラルネットワークを空間分割し、分割されたサブネットワークをハードウェアマップして時分割実行することによりニューラルネットワーク全体が表現している問題の解を得ようとするものである。したがって、ニューラルネットワークの空間分割手法の確立と、サブネットワークの結合係数や中間結果の高速な保存と入れ替えがその実現にとって必要な技術課題となる。

### 5.1.3.2 ニューラルシステムハードウェア

大規模なニューラルネットワークの実現可能性を探るために、ケーススタディを行なう。100万ニューロンのネットワークを例題として取り上げる。学習機能の高速化が必須と考え、学

習回路を組み込む。今、直ちにこのようなシステムを開発できたとしても、明確な応用イメージを描くことは困難である。かえって、このような大規模なネットワークをどのように構成し、学習させ、組織化していくかという利用技術の面でブレークスルーが必要とされ、そのための基礎研究が行なわれようとしている段階である。そこで、ネットワーク構成とハードウェア（量）との関係を具体的な形で示すことにより、利用技術研究の1つのベースを与え、さらにその留意点を明らかにすること、また、超高速な学習機能を持つニューラルシステムを、利用技術研究の有力なツールとして役立てるという問題意識のもとにケーススタディを行なう。

### (1) 選択したアプローチ

100万ニューロンシステムを実現するためには、様々なアプローチがある。ここで、選択したアプローチについて簡単に述べる。選択に当たっては、5～10年後をめどに、少なくとも研究室で、現状技術の延長線上に見える技術を考えて。また、最適な設計を行なうことよりも、実現可能性を探るということに重点を置いているので、ここでの記述は各アプローチを厳密に比較した結果とはなっていない。

#### 1) 電子回路技術

光技術の適用は検討していない。特に、配線量の爆発を解決するものとして、光技術は将来有力な技術であるが、別に光コンピュータ・テハイスWG から詳細な報告がなされるからである。

#### 2) ティンタル回路

アナログ回路は演算回路を簡単に（少ないハードウェア量で）実現できるので、大規模なネットワークを実現するためには魅力的である。しかし、学習機能をハードウェア化するためには、シナプス荷重値を記憶するためのメモリが必要となり、そのためのハードウェア量が支配的となるので、アナログ回路の利点が薄れる。デジタル回路は耐ノイズ性の点で、アナログ回路に比べ本質的に有利で、大規模なシステムを安定に動作させるのに適している。実際にも、大型コンピュータ、スーパーコンピュータ等で実績のあるデジタル回路を選択した。

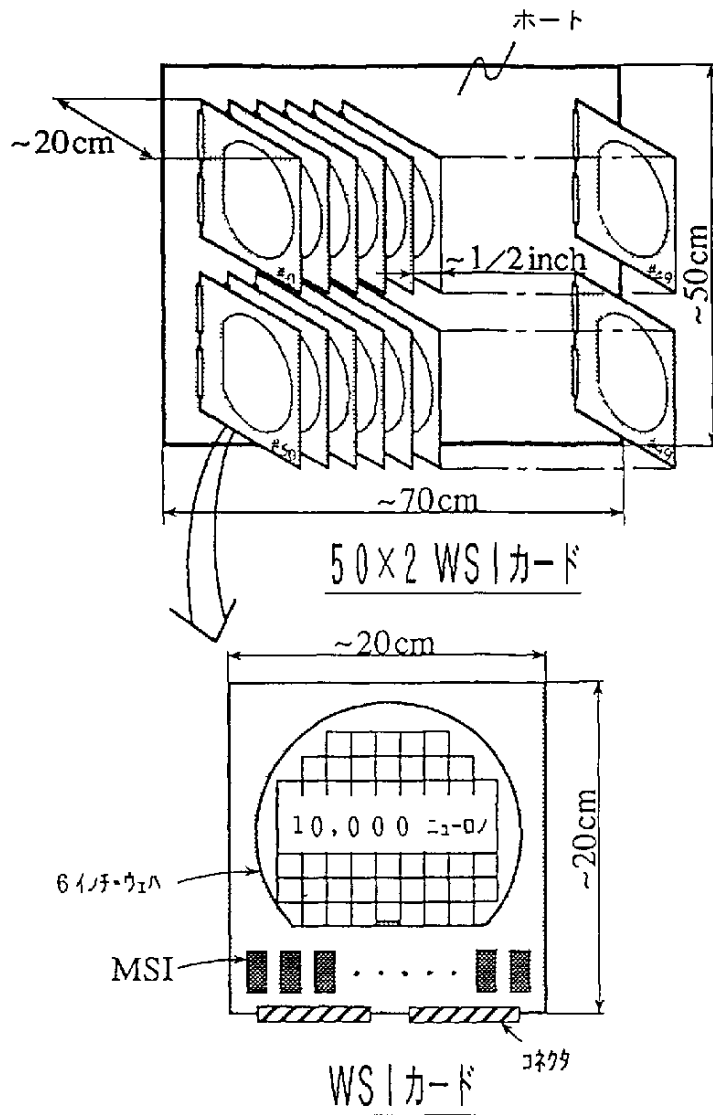
#### 3) WSI技術

ニューラルネットワークにおける超並列超分散情報処理の計算原理を生かすためには、なるべく多くのニューロンをハードウェアで実現し、それらを並列に動作させることが望ましい。そのための有力な技術としてWSI（Wafer Scale Integration）技術がある。WSIは大規模なハードウェアをコンパクトに高信頼度で実現する可能性を秘める技術と考えられてきたが、歩留りの壁に阻まれてきた。この点で、ニューラルネットワークの耐欠陥性はこの問題を解決する根拠を与えると考えられる。大規模ニューラルネットワークとWSI技術は相互に補完し合うものと考え採用した。

### (2) ハードウェアイメージ

ハードウェアイメージの一例を図5.11に示す。半導体技術としては $0.2\mu\text{m}$ のCMOS技術を仮定した。ニューロンは完全デジタル回路で構成し、各ニューロンは時分割のデジタルバスで結合している。学習アルゴリズムとしてはバックプロパゲーション法を想定している。そのための学習回路を各ニューロンに組み込み、並列に動作できるようにしている。

1,000のニューロンを完全結合したものをサブネットワークとし、サブネットワーク間は粗結合させるという大きな仮定をおいている。完全結合させた場合、シナプス荷重値用のメモリはニューロン数の2乗に比例して増え、そのためのハードウェア量が支配的である。総ニュー



- システム
- 100万 ニューロン
  - 2 tera connection updates per second
  - 完全結合 1,000 ニューロン / ネットワーク
  - 疎結合 1,000 ネットワーク / ノード

- テクノロジー
- $2 \times 10^7$  トランジスタ / チップ (A C ~1995)
  - 60 チップ / 6インチ・ウエハ

- ニューロン回路
- 完全デジタル回路
  - 学習回路内蔵 (誤差伝播アルゴリズム)
  - 8ビット インプット / アウトプット
  - 8ビット オフスホ重
  - $1.2 \times 10^5$  トランジスタ / ニューロン

図 5.11: 100万ニューロンシステムのハードウェアイメージ

ロン数を100万に固定しても、サブネットワークのニューロン数を増やすとそれに比例してハードウェア量が増える。ハードウェア化の観点からもネットワークのモジュール化が是非必要と考えられ、1モジュールの規模は、この例では1万ニューロン程度に押さえることが望ましい。この例では、100万ニューロンシステムを100枚のウエハーで70cm×50cm×20cm程度のサイズに構成し、学習速度は1TCUPS (Tera Connection Updates Per Second) を越えることも期待できる。超高速の学習機能を持った100万ニューロン規模のニューラルネットワークハードウェアの実現という課題は実現不可能なものではない。

### (3) 開発課題

前節の結論は、もちろん、机上検討の結果であり、現実のものとしていくためには多くの技術課題が存在する。1万ニューロンを集積したWSIを実現するためには、0.2 $\mu$ m程度の微細デバイス技術はもちろんのこと、フォールトトレランス設計技術の革新が必要である。WSIの実装技術に関しても、ウエハー間の信号伝送技術、電源供給、冷却が大きな技術課題となるであろう。さらに、大規模なシステムに向けてはWSIの3次元スタック実装技術が必要となる。利用技術の進展と同期をとって、これらの技術開発を進めることが必要と考える。

## 5.1.4 超並列システムとの統合

### 5.1.4.1 統合システムアーキテクチャ

#### (1) 統合アーキテクチャの必要性

ニューラルシステムと非ニューラルシステム(汎用の超並列システム)を組み合わせた統合システムは、以下のような理由で必要と考えられる。

#### 1) 誤差対策

しらみつぶし探索を基本とする問題(NPハードな問題)では、実用的な問題を解こうとすると計算量の爆発が生じまっとうな手法ではどうしても解けなくなる。そのような問題の近似解をニューラルシステムで求めることはおおいに意味がある。また、バックプロパゲーションネットワーク等の汎化機能を利用することも、アルゴリズム的に分類が難しい問題には、力を発揮しそうである。ここで、状況を数値解析と比べると以下のようなになる。

- 数値解析

$\Delta t$ や $\Delta x$ を十分に小さくしていけば、必ず正解に近づくことは保証されている。また、どれだけ小さくするべきかという条件も分かっている。しかし、実用的な計算時間内に解を求めるには、 $\Delta t$ や $\Delta x$ を大きくせざるを得ない。そのときに生じる誤差については、あらかじめ予測可能である。

- ニューラルシステム

現在のところ、正解を保証することはできない。したがって、誤りがあることを甘受せざるを得ない。だからといって、誤差について無知でいい訳ではない。ニューラルシステムを実用的に駆使するには、誤差解析の手法の確立が不可欠である。このような誤差を小さくしたり、ある安全範囲に納めるためには、ニューラルシステムの外部から各ニューロンの値を制御することが必要かつ有用になろう。

## 2) フェールセーフないし分散協調技術の確立

生物の脳においても組み合わせ問題を解くことが主要課題であり、かつ上述のように誤りがあり得るものとする。このような誤りがあっても、生物においては、自己保存ないし種の保存が（多分、進化という長い歴史を経て）可能になっている。このためには、例えば次のような仕組みがあることが予想される。

- フェールセーフ機能の組み込み

細部は別にしても、大筋では誤らないようなフェールセーフ機能が組み込まれている。

- 分散・協調機能の組み込み

ひとつの問題をいくつかのより正解の得やすい部分問題に分けて並列に解いたり、またはいくつかの異なる方法で解いて（同じレベルで並列に解いたり、または記号処理などの高次レベルと協調・競合処理する）、照合チェックする分散・協調機能が組み込まれている。

一番単純な例として文字認識を見ると、そこでは記号処理による認識を意味処理による誤り修正で補完しており、両者の協調作業が行われている。このように、ニューラルシステムにおける処理と記号処理とが行ったりきたりして協調作業を行うのに加えて、複数のニューラルシステム間での協調作業も当然ながら考えられる。なお、この協調作業のためには、例えば適当な満足度でもってお互いに協力する等の、新しい協調のメカニズムを考えることも必要になろう。

## 3) 記号処理との協調

ニューラルシステムの学習は、 $n$ 次元空間に分布したデータ間に定義された距離により、補間によってデータのクラスタリングを行うことと位置づけることもできる。こうした観点に立てば、その学習および汎化の能力は、パターン情報のように $n$ 次元空間で連続的にデータが分布しているような対象へは適用が容易であるが、言語（記号）情報のように、意味を単語等の間の距離で表わすことが困難な場合には、むずかしいと思われる。

この問題の解決のためには、理論基盤のところでも述べたように、数量化の理論などを用いて、言語（記号）情報をその意味を考慮しつつパターンの的に表現しなおすという方法も考えられるが、もう一つの方法として、ニューラルシステムの計算パラダイムと、記号処理の計算パラダイムの統合を考えることも必要であろう。

## (2) 統合システムのイメージ

前節の議論から、統合システムアーキテクチャへの要求を次のようにまとめる。

- 複数のニューラルネットワーク間で、分散・協調できること。
- ニューラルネットワークと記号処理間で、分散・協調できること。
- ニューラルネットワークの入出力層のニューロンのみならず、中間層等の隠れた層のニューロンにもアクセスできること。

これを実現する統合システムのイメージを以下に述べる（図5.12）。

- 1 記号処理／協調処理等のためのプロセッサ層とニューラルシステムのためのニューロン層からなる。いずれの層もそれぞれにおいて超並列構成をとる。各層はそれぞれにおいて、独立な超並列システムとしても動作できるように構成する。各層内の接続は、格子、ハイパーキューブなど、適切な相互結合方式を選択できるようにする。

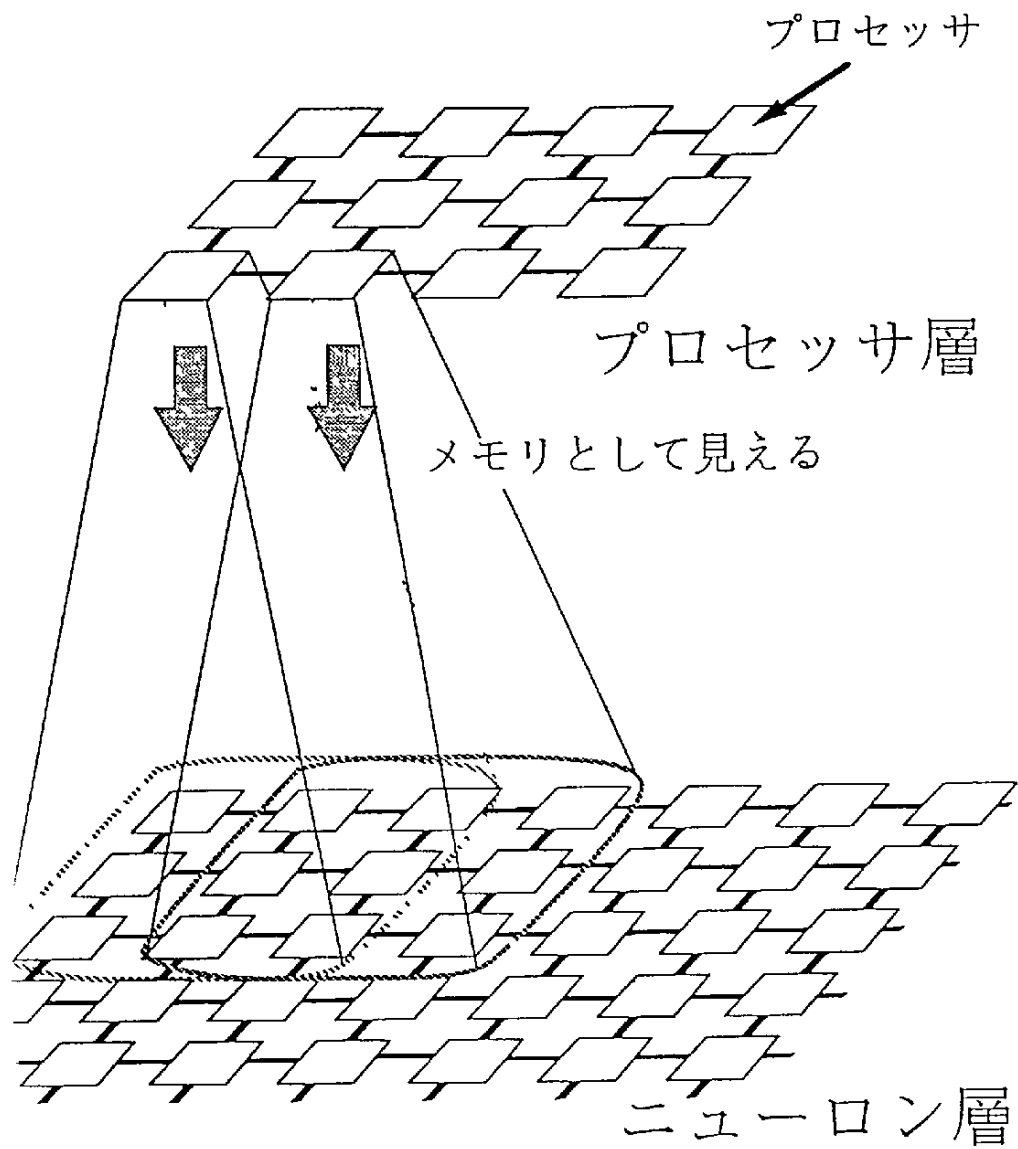


図 5 12 統合システムのイメージ



- 2 プロセッサからニューロンの情報にアクセスするために、それぞれのプロセッサから複数ニューロンをメモリ語として「眺めて」いる。これにより、プロセッサは各ニューロンをメモリのセルのようにアクセス（アドレス）可能となる。超並列方式であることを考えると、それぞれのプロセッサから全ニューロンにアクセス可能とするのは、理想ではあるが現実的ではない。そのため、それぞれのプロセッサはニューロンの部分集合にのみアクセス可能とする。各プロセッサがアクセスするニューロンの部分集合を、プロセッサ間でオーバーラップさせる。
- 3 記号処理とニューラルシステムの分散協調は、プロセッサからニューロンへアクセスすることによって行う。複数ニューラルシステムモジュール間の分散協調は、プロセッサを介して実現する。

なお、開発過程においては、各層はお互いに独立に実現することができる。超並列システムは超並列システムとして、またニューラルシステムはニューラルシステムとして、それぞれを独立に開発してこれを後で接続して統合システムとすることができる。具体的な構成例は図5 13のようであり、複数のニューラルシステムが分散協調して処理を進めるとともに、記号処理部とも分散協調処理する。また、外部環境との協調のために、画像処理 音声処理等の各種の専用プロセッサも用意する。

### (3) 統合システムの応用 (図5 14)

- 高度パターン認識

ニューラルシステムに前処理を、記号処理に高度な意味処理をそれぞれ分担させることにより、例えば、立体視を含むシーン認識、連続音声認識等の高度なパターン認識を実現する。

- 高度A I

高次の知識処理において、組み合わせ探索の高速化にニューラルシステムをバックエンドで利用し、高度な推論過程を記号処理で行う。

- 柔らかなロボット

環境に応じて、人間のように柔軟に対応できる知的なロボットの実現を図る。運動の制御にニューラルシステムを利用し、プランニングを記号処理で行う。

- 柔らかな情報ベース

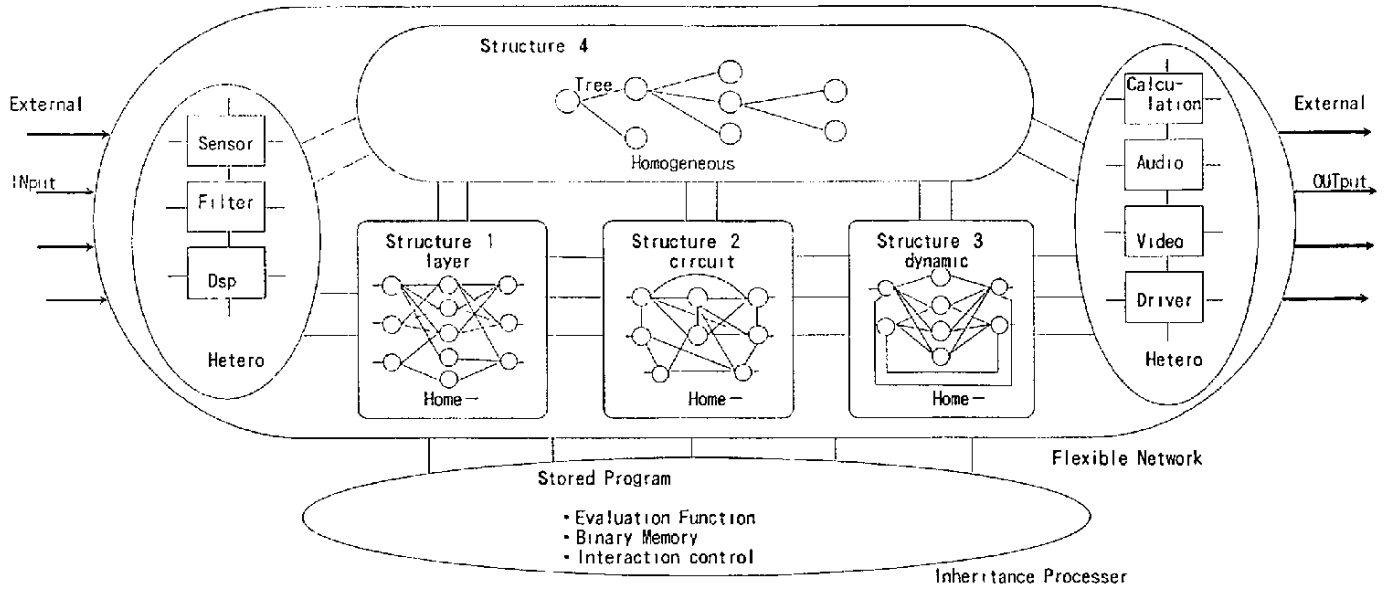
人間と同じように話し言葉はもとより身振り、手振りを含む非言語対話を理解し、希望する情報を教えてくれるデータベースを実現する。あいまいな情報の処理にニューラルシステムを利用し、推論過程に記号処理を用いる。

#### 5.1.4.2 統合システムへのアプローチ — アクティブコグニションを例として

##### (1) 認識と行動の統合システム

自律的なシステムでは、環境の認識とシステムの行動は密接に結び付いている。システムはある目的・目標を持って行動しているが、その目的を遂行するうえで重要となる特徴に選択的に注意を向けて環境を認識する必要がある。図5 15は認識と行動の統合システムの構成例である。環境の中で適応行動するためには、環境のモデル化が必要である。システムはセンサからの情報、また外界に対して行った操作情報（モータコマンド）を使って、この環境モデルを更新

# Massively Parallel-based Organizing System



## Behaviour Example

- Homogeneous to Heterogeneous network by Experience
- Function partially organized by learning
- Memorized by Dynamic network

図 5.13: 統合システムの構成

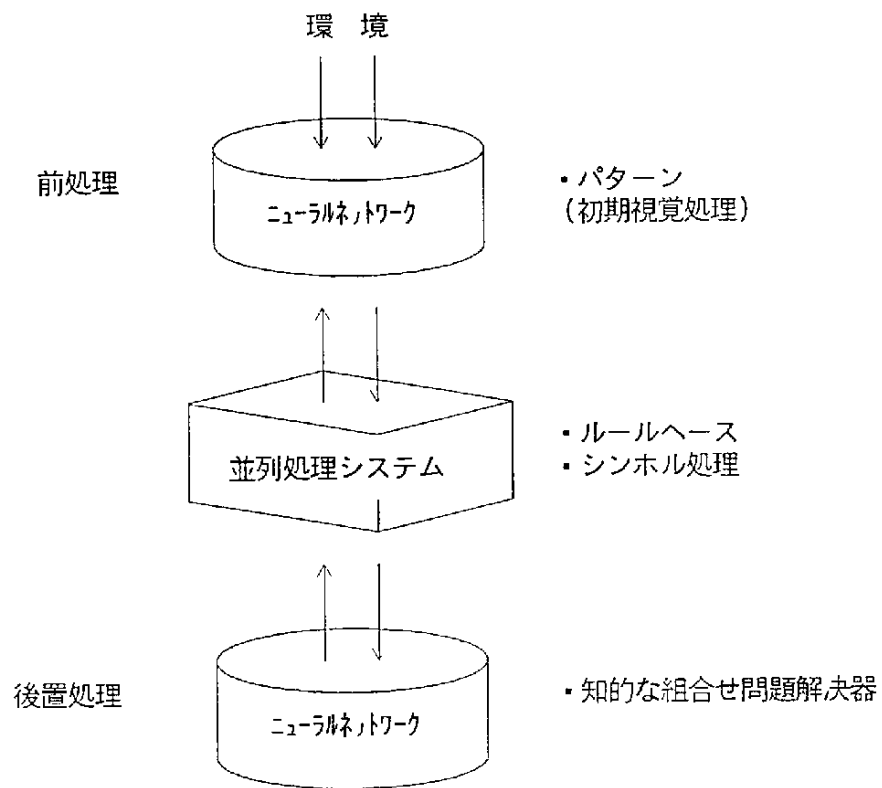


図 5 14 統合システムの応用

する。計画ユニットは、この環境モデルを使って行動を計画しモータコマンドを生成する。また、計画ユニットは環境のモデルに仮想的な操作を行ないその効果を予測することができる。計画に必要な情報が不足している場合はその情報を収集することをサブ目標とし、情報収集のためのモータコマンドを生成する。

認識と行動の統合システムでは、認識ユニット、環境モデル、計画ユニット、制御ユニットがお互いに相互に情報をやりとりしあえるように、リカレントな情報の経路を有するシステムとなる。環境モデルはシステムの動作する環境のダイナミクスをうまくシミュレーションできなければならない。したがって環境モデルのような機能モジュールは、入力のみ依存して出力が決まる関数的な動作だけではなく、内部状態を持ち、過去の履歴にも依存して出力が変わるようなリカレントな構造が必要となる。

認識と行動の統合システムは認識ユニット、計画ユニット、制御ユニット、環境モデル等、多数の機能モジュールから構成される。また各機能モジュール自身も多数のサブ機能モジュールから構成される。最初は図 5 15 のような大まかな機能分化で、後に学習によって必要な機能モジュールが自己組織化されるということが理想的であるが、現在知られている学習アルゴリズムでは不可能である。構造の変化も伴う学習アルゴリズムの開発が必要である。

また、時々刻々と状態を変える実世界の中で、実時間で動作するシステムでは、学習と実行は分離できない。学習時には学習だけ、実行時は学習はせずに実行だけ行なうのではなく、実行時においても学習が進まなければならない。これによりシステムは環境の変化に柔軟に対応できるようになる。このため学習と実行が分離していないインクリメンタルな学習アルゴリズムの研究が必要である。システムの動作を評価する評価系は、単純なシステムであれば、外界の物理量と目標値との誤差等の単純なもので良いが、一般的には評価系自体が複雑な認識系となる。学習アルゴリズムとともにシステムの目標の表現法、評価系の構成法が重要である。

## (2) 機能統合化のレベル

図 5 16 では、システムは数個の機能モジュールから構成されており、機能モジュール間の情報の伝達を 1 本の線で表現しているが、実際には各々の機能モジュールは分離している訳ではない。図 5 16 に複数の個別機能が疎に結合したシステムから各々の機能モジュールが統合された細粒度並列協調システムに至るイメージを示した。現在は機能モジュール (個別機能) が独立に研究されており、1 つのシステムとして統合されていないか、機能モジュールが疎に接続されたシステムしかない。機能モジュール間の情報の伝達経路を太くし 1 つのシステムに統合するための研究が必要である。各機能モジュールはその内部に並列に動作するサブモジュール、サブサブモジュールを持つ。情報の伝達は、機能モジュール間のレベルのみで行なわれるのではなく、サブサブモジュールのレベルにおいても多くの伝達経路を持つネットワークを構成し、情報の抽象度のあらゆるレベルにおいて相互作用できるような、分散オブジェクト、細粒度並列協調システムへ向けた研究が必要である。

機能モジュールによっては、例えば計画モジュールは、ニューラルネットワークで実現するより、従来の AI 手法等で実現した方が容易なものもあり、全ての機能をニューラルシステムと学習のみで実現するのは得策ではない。複数の計算モデルの統合やパターンと記号の統合が必要で、パターン処理を担当するニューラルネットワーク層と従来処理、記号処理を担当するプロセッサ層から構成されるような統合システムの研究が必要である。

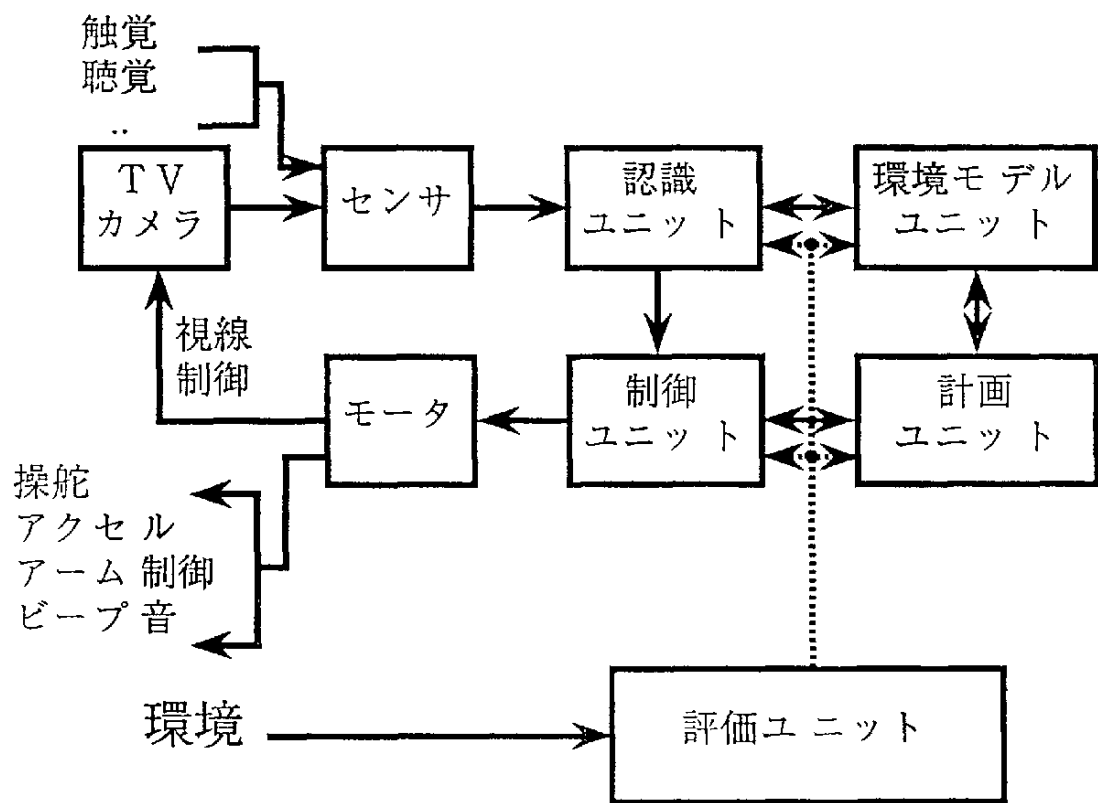


図 5 15 認識と行動の統合システム

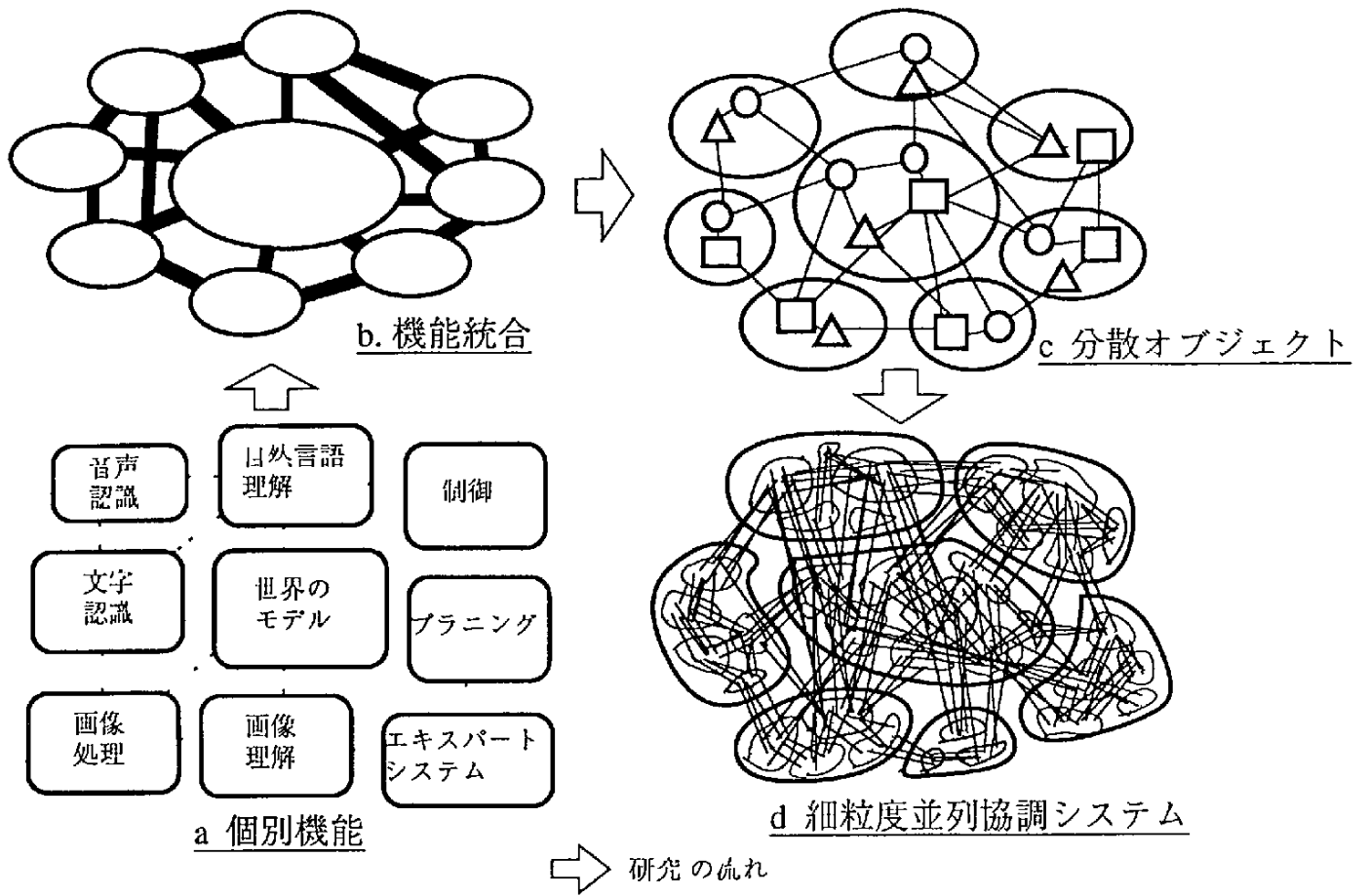


図 5.16 統合システムの機能統合化

## 5.2 超並列システムからの検討

### 5.2.1 基本的考え方と概要

柔らかな情報処理においては、多種多様な情報を総合的かつ柔軟に処理する計算の枠組みが必要であり、同時にこれらを超並列超分散情報处理的に統合するシステムが必要である。ここでは、柔らかな情報処理機能を実現するためのシステム基盤としての超並列システムの位置づけを行う。

柔らかな情報処理の応用領域としては、既に見てきたように画像や音声などの認識・理解、推論・問題解決、情報ベース、ロボット制御、ヒューマンインタフェースとシミュレーションなど種々の場面が考えられる。これらの応用においては、システム全体が多数のモジュールから構成され、モジュール間の相互作用をともなう処理や、モジュール内の分散表現されたデータに対する処理のように各種のレベルで並列分散情報処理が可能である。また、柔らかな情報処理機能を実現する応用においては、一般に膨大な計算量を必要とする。このため、超並列システム上での実現が本質的であり、また自然であると考えられる。

一方、コンピュータアーキテクチャの立場から考察すると、素子速度の限界を打ち破る技術として並列処理技術が注目されている。今後の情報処理技術の進展を支えるシステム基盤として、本格的な超並列システムの研究開発は極めて重要な課題である。

以上の2つの観点を結ぶコンセプトとして、「システムとしての柔らかさ」を提案する。システムとしての柔らかさは、柔らかな情報処理機能を実現するためにシステムが備えるべき要件であると共に、超並列マシンが幅広い分野に適用され、本格的なアーキテクチャ技術として成長するための要件でもある。システムとしての柔らかさには、ハード的側面とソフト的側面がある。ハード的側面としては、システムがロバストであり信頼性が高いことが要求される。特に、超並列システムにおいては、一部に故障が発生する確率は高くなるため、これによりシステム全体が稼働しなくなるといった状況をできる限り抑えることが不可欠である。このため自己診断、自己修復機能を備えたフェイルセーフシステムであることが要求される。一方、ソフト的側面としては、適応性、学習性、可変性、自律性、自己組織化、最適化のような機能を具備することを意味する。このような機能を応用レベルで実現すると共に、システム自体の基本機能として実現することが必要である。すなわち、システムが利用環境に合わせて自律的に自分自身を適応させ、最適な状態を実現する能力を持つ必要がある。現在の並列マシンは、極めて限られた利用環境しか提供しておらず、その結果ユーザに多大の負担を強いている。システムとしての柔らかさを実現することにより、超並列マシンの能力をユーザの少ない負担で最大限に生かすことが可能となる。

本報告書では、システムとしての柔らかさを備えた超並列システムの実現を提案する。検討のアプローチとして、トップダウンとボトムアップの二つをとる。トップダウンアプローチでは、モデル、アーキテクチャ、ソフトウェアの各レベルから、システムとしての柔らかさをパラダイムとして実現するための基本技術について考察する。一方、ボトムアップアプローチでは、超並列システムの実現可能性を検討するという立場から超並列システムアーキテクチャについて考察する。この両者のアプローチを融合することにより、実現可能な柔らかな超並列システムの具体的なイメージを構築し、その研究開発へ向けての方策を示すことを目標とする。トップダウンアプローチに関する具体的な議論は522と523で展開し、ボトムアップアプローチに関しては524で論じる。また、超並列システムの開発に向けての考察を525で論じる。ここではその導入として検討結果の概要を示す。

#### (1) トップダウンアプローチ

柔らかな情報処理機能を超並列システム上で実現するためには、問題の表現や実行の基盤とすべきパラダイムについての考察が重要である。現在のところ、超並列に適したパラダイムとして、ニューロコンピューティング、オブジェクト指向、データ駆動、データ並列、シストリック、確率的情報処理などが提案されている。一般に柔らかな情報処理を実現するシステムは分散的、統合的な情報処理が必要とされ、これらのパラダイムを複数用いて実現される。例えば、画像・音声の高度認識理解システムにおいては、信号レベル、記号レベル、及びこれらを統合したレベルでの情報の表現が必要となり、それぞれのレベルに応じたパラダイムにより記述されるのが適切である。従って、超並列システムとしては、これらの複数のパラダイムを同時に効率よく実現するシステムであること、すなわちマルチパラダイムシステムであることが要求される。マルチパラダイムシステムにおいては、異なるパラダイム間のインタフェースをどう設定するか、またパラダイムをどう統合するかが重要な問題となる。

また、単に複数のパラダイムを組み合わせるだけでなく、システム全体を統一的に取り扱うための理論的な枠組みが必要である。これを実現するために、現在最も有望な手法としてオブジェクト指向をベースとし、それを発展させたモデルが考えられる。すなわち、他のパラダイムを内部構造として取り込むこと、多数のオブジェクト間の相互作用をより柔軟に表現するための制約機能や、環境への適応性を実現するための自己反映機能 (reflection) を導入するなどの機能拡張を行なった記述モデルとして、超並列対象指向モデルを具体化することが重要である。さらに、これをアーキテクチャ的に効率よく実現するための計算モデルとして、対象指向型データ駆動モデルの検討が不可欠である。

一方、アーキテクチャの柔らかさとしては、モデルやパラダイムの柔らかさを効率よく反映するとともに、システムとしての柔らかさ、すなわちロバストであり、かつ適応性、自律性を持つことをアーキテクチャ的に支えることが要求される。超並列アーキテクチャとして特に重要なポイントは相互結合網である。相互結合網の設計は従来は性能やハードウェア規模において議論されてきたが、柔らかなシステムを実現するためには耐故障性や負荷分散等の機能を相互結合網に内蔵することが重要となる。このための効率的なメカニズム、及びその実現法が研究課題となる。

ソフトウェアの柔らかさとしては OS、及び言語処理系の 2 つの面から考える必要がある。OS においては、資源管理や負荷分散、高信頼化管理などシステム全体を柔軟に管理運営する機能が要求される。また、これらを効率よく実行するためのアーキテクチャのサポートも当然必要となるであろう。言語処理系においては超並列対象指向モデルに基づいた言語設計や、見込み計算のような新しい並列処理メカニズムを積極的に取り込んだ処理系の実現が、柔らかさを実現する上で重要な課題である。このように、システムの柔らかさには各種の側面があり、各側面においてそれぞれ克服すべき研究課題があると共に、システム全体として一貫した検討が必要である。

## (2) ボトムアップアプローチ

図 5 17 に並列マシンの歴史的な発展の系統樹を示す。図に示すように、並列マシンの研究開発はすでに 30 年近くの歴史を持つ。この間、種々の方式が提案され、種々の応用を指向した並列マシンが開発されてきた。また、最近では LSI 技術の進歩を受けて要素プロセッサ数が 1 万を超える超並列マシンの開発も行われている。現在までに提案されている並列マシンを処理方式により分類すると、単一命令流複数データ流 (SIMD)、複数命令流複数データ流 (MIMD)、シストリックアレイ、データフローに大別することができる。一方、並列マシンを用途別に、数値処理、信号処理、記号処理、ニューラルシステム、CAD などに分類することができる。このように、並列マシンのアーキテクチャや用途は多様化している。この原因と



して、並列マシンの研究が当面の課題を克服するため主として応用主導型で行われてきたこと、並列処理を有効に行うためには用途を専用化せざるを得なかったことが考えられる。21世紀を目指した超並列システムは、超並列マシンの主流をなすものでなくてはならない。ここでは汎用性のある柔らかな超並列システムを構築するために、アーキテクチャの見地から重要と考えられる今後の課題について議論する。

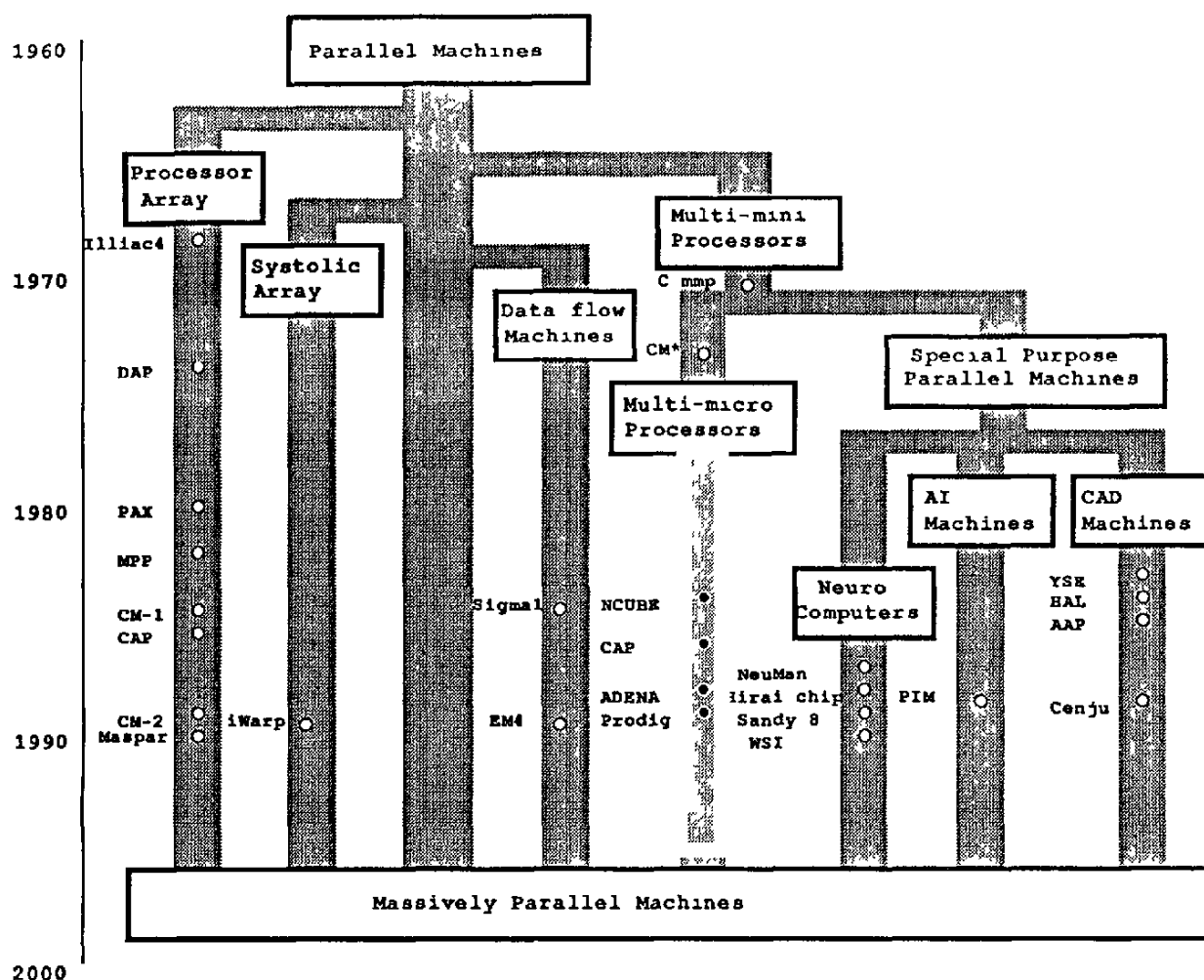


図 5 17 並列マシンの系統図

超並列アーキテクチャにおいては、各種のパラダイムの実現が効率よく行えることが必須となる。そのアプローチとして、アーキテクチャの無色透明化と融合化の二つが考えられる。無色透明化は、応用を意識することなく、並列処理の本質に根ざしてアーキテクチャを設計する立場である。また、融合化とは各パラダイムに適した複数の並列処理方式を融合したアーキテクチャを目指す立場である。その一例として、汎用プロセッサ群とニューラルシステム専用ハードウェアとを共有記憶水準で密結合した方式が考えられる。

いずれのアプローチにおいても、将来のデバイス技術、実装技術の動向を適切に反映することが不可欠である。LSI技術の進歩は今後10年間は着実に期待できる見込みであり、プロセッサの処理速度、メモリ容量、通信速度のバランスを考慮した上で実現可能なシステム規模とアーキテクチャを設定しなければならない。特に、WSIや3次元実装、光インタコネクションなどの新しい技術についてアーキテクチャの観点からの検討が重要である。なお、大規模な超並列マシンでは、消費電力が膨大となるため、低消費電力化、及び冷却方式が深刻な問題とな

ることが予想され、この対処が重要な課題である。これらの検討を踏まえて全体システムのアーキテクチャを設計する際には、システムの保守やハードウェア/ソフトウェアの開発支援環境に対する十分な考慮が必要である。

また、ソフトウェアの観点からは、オペレーティングシステム (OS) や言語によってサポートされるシステムのロバスト性、適応性などの実現がはからねばならない。超並列システムの性能を生かすためには、システムのネットワークトポロジなどの物理的特性を考慮したプログラミングが必要とされる。これを支援するためのプログラミング環境の整備なども重要な課題である。

## 5.2.2 柔らかな計算モデルとそのアーキテクチャ

### 5.2.2.1 マルチパラダイムモデル

将来のコンピュータにおいて、解くべき問題はいかに記述されいかに実行されるべきであろうか。問題記述のためのパラダイムは、対象とする問題にもっとも自然に適合する必要がある。単一のパラダイムですべての問題を網羅的に記述することは、問題と記述の間にギャップを生むことになる。すなわち、問題の記述に無駄な労力が必要になる、不自然な記述によって問題の本質がユーザから見えにくくなる、場合によっては正しい記述が困難になる、などの致命的な欠点をもつ。

例として、単純な四則演算が中心の計算を考えてみよう。論理型の関係記述パラダイム (たとえば *prolog*) で記述した整数の加算は、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \text{add}(0, Y, Y) \\ & \text{add}(s(X), Y, s(Z)) \text{ --add}(X, Y, Z) \end{aligned}$$

この記述は、論理的に完全で正しいにもかかわらず、「足し算」を熟知しているはずのユーザの直感に訴えない。このような計算においては、加法の厳密な定義よりも、FORTRANなどで使われている、一般的で誤解の少ない次のような記述がまさっている。

$$z = x + y,$$

反対に、次例 (三段論法の記述) のような場合には、論理型の関係記述パラダイムが優れているであろう。

$$\text{mortal}(X) \text{ --man}(X)$$
$$\text{man}(\text{socrates})$$

(a) 論理型の関係記述

$$\text{if } (x \text{ man} == \text{true}) x \text{ mortal} = \text{true},$$
$$\text{else } x \text{ mortal} = \text{false},$$
$$\text{man name} = \text{"socrates"},$$

(b) 手続き型の関係記述

上記は一例にすぎないが、より一般に現実の問題を記述する際に、それぞれに最適なパラダイムが存在することを、我々は当然のこととして理解している。すなわち、コンピュータはマルチパラダイムに基づくべきであり、各パラダイムを支援する記述モデルが必要である。記述モデルのレベルは問題に応じて様々であるべきであり、あるものは問題の直接的な記述がもっとも有利であろうし、あるものは問題をあらかじめ定式化しておいて記述したほうが有利であろう。このような記述モデルとしては、ユーザの直感に訴えやすいインタフェースをもつこと、ユーザの不完全情報を自動的にいしインタラクティブに補完する柔軟性をもつこと、計算の対象を正確かつ簡潔に記述できること、などの要件がある。

各パラダイムはそれぞれの得意とする対象の性質をもっとも適切に表現することを主眼として立てられており、物理的な制約を大きく受けている超並列システムとの間にはギャップがある。このギャップを最適に吸収するものとして、言語によるプログラムがある。言語によるプログラムは、ユーザのレベルから見れば、記述の詳細化・厳密化であり、ハードウェアから見れば計算の理想化・抽象化であると言える。システム内には複数の言語があり、それぞれ前記パラダイムに応じて選択される。一つの言語のカバーする範囲には幅があるために、一つの言語で複数のパラダイムを支える場合もあるし、一つのパラダイム専用の言語も存在するであろう。

言語の根拠となるモデルは、言語モデルと呼ばれる。オブジェクト指向言語の基礎となるアクタモデル、並列 FORTRAN などの基礎となる並列手続き型モデル、Id などの基礎となる宣言型モデルなどがある。記述モデルのレベルにばらつきがあったように、言語モデルのレベルにもばらつきがある。手続き型モデルは、ハードウェアと密接な関係を保ちつつ発達した経緯から、他のモデルより低いレベルの言語モデルと考えられるが、先に述べたような四則演算が中心の計算環境においては、きわめて有効なモデルである。逆に関係データベース検索のような応用に対しては、宣言型モデルの有効な場合がある。複数の記述モデルに対応して複数の言語モデルが存在したか、実際の超並列ハードウェアのアーキテクチャが単一（ないし極めて少数）であると想定されることから、単一の計算モデルが、言語モデルとハードウェアの落差を埋めるために必要となる。本プロジェクトにおける超並列システムの計算モデルとして、対象指向型データ駆動モデルの適用を検討すべきであろう。

以上から現実の超並列システムの抽象的システム構成は、図 5 18 のようになると考えられる。

#### 5.2.2.2 対象指向型データ駆動モデル

前項で示したように、言語モデルと超並列アーキテクチャの間には、両者の落差を吸収するための単一の計算モデルが必要である。計算モデルとして適切なものはどのようなものであろうか。チューリング・モデルは一般的で強力な計算モデルであるか、並列システムを記述したり、並列プログラミングの基礎とするには、複数アクティビティの自律協調という視点が陽にあらわれないため適当ではない。アクタモデルは並列分散情報処理事象を論理的に記述するのに強力だが、現実の並列システムを特定したり記述したりするには、一般的すぎるであろう。データフローモデルは関数性の保持される問題の記述とこれを実行するシステムの記述のためには強力であるが、関数性という限定された局面でしか有効性を発揮しない。

計算モデルとしては、アクタモデルなどよりも具体的で、データフローモデルよりも強力で、なおかつ並列マシンのアーキテクチャと言語システムの双方にできるだけ直接的な対応がつくものが望ましい。すなわち、並列マシンからはアーキテクチャに密着したものとして見え、言語システムからは言語モデルと整合性がよいものとして見え、しかも必要かつ十分な一般性を保持した計算モデルが望ましい。特定の応用や特定の言語に特化したものではなく、無

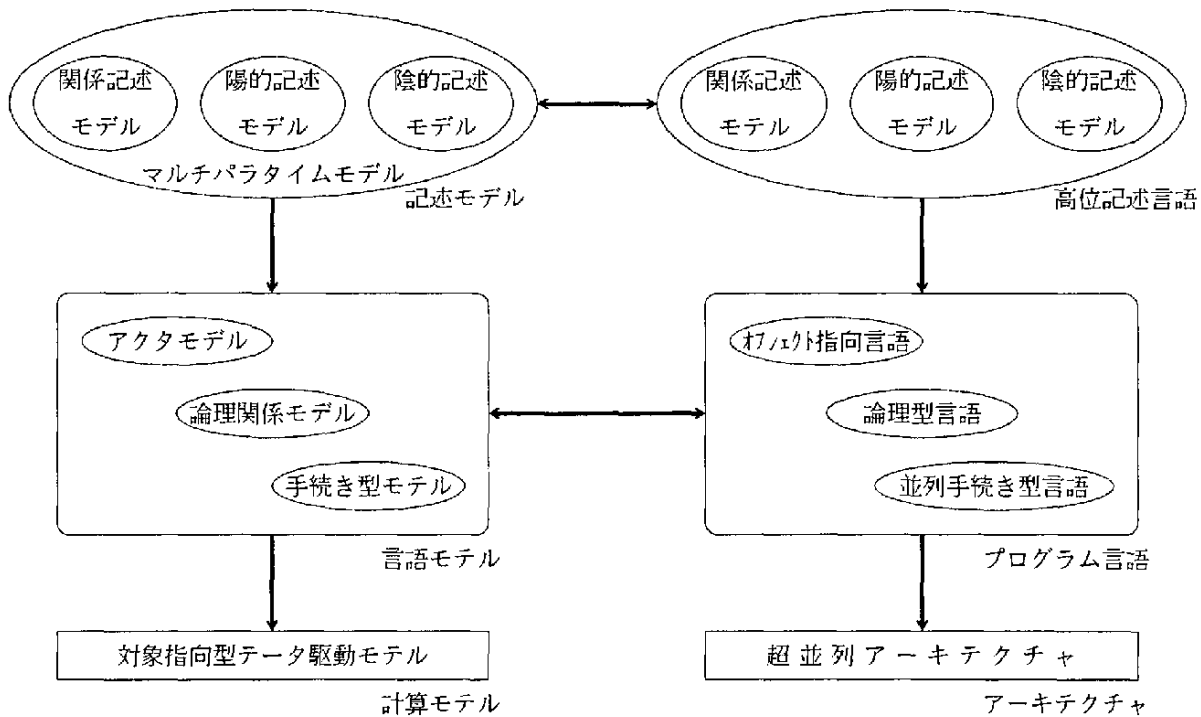


図 5.18 超並列システムの抽象的システム構成

色透明で単純な汎用アーキテクチャをもつ超並列システムの計算メカニズムを想定しなくてはならない。また、言語システムは、最初から特定の一つを想定するのではなく、前節で述べたようにマルチパラダイムを支援するのに有用な種々の言語モデルを想定すべきであろう。計算モデルは、無色透明な計算メカニズムの基盤を与え、かつ複数の言語モデルの基盤を与えるのに必要かつ十分なプリミティブをまとめよく備えたものである。以上の性質をもつモデルとして対象指向型データ駆動モデルの具体化を検討すべきである。

対象指向型データ駆動モデルにおいては、操作対象はオブジェクトであり、オブジェクトはデータ構造と操作からなる。操作はメッセージによって局所的かつデータ駆動的に起動される手続きである。対象指向型データ駆動モデルは単純化されたモデルであると同時に、言語システム、計算メカニズムの双方の構築にあたって実際的で強力な計算モデルであると考えられる。また、対象指向型データ駆動モデルの内部では、アルゴリズム、データ形式、負荷分散などの動的な変更を自律的に行えるような機構が実現され、システムの柔軟性が保証される。

### 5.2.2.3 柔らかな相互結合網

柔らかな計算モデル論と関連して抽象化した相互結合網、および、そこでの結合網の柔らかさについて考察する。並列システムにおいて、相互結合網は常に必要悪であった。プログラムを並列システムで実行するためには要素プロセッサ間の通信を実現する相互結合網は不可欠である。しかしながら、並列システムで実行する際に発生する性能低下は何らかの形で相互結合網と関連している。例えば、並列数の小さな今日の並列システムにおいても、相互結合網における通信遅延、通信の衝突に起因する通信容量の低下、相互結合網の予測不可能な動的振るまいなどは実用的な並列システム構築の主要な障害である。つまり、相互結合網こそが並列システ

ム硬直化の元凶と考えられている。それでは、硬直化している今日の相互結合網と対置する柔らかな相互結合網とはどのようなものであろうか。また、柔らかな相互結合網なしでは、超並列システム構築は不可能であろうか。

相互結合網の柔らかさは、具体的には次の三つの属性として求められる。これらの属性を備えた相互結合網、すなわち柔らかな相互結合網を用いることにより、従来の相互結合網を用いては不可能であった超並列システムの現実的構築が可能となると予測される。

### (1) 物理的インプリメンテーションに関する柔らかさ

超並列システムでは、相互結合網は接続される要素プロセッサの集合体に匹敵する複雑さを持つ。このような環境では、要素（プロセッサおよび相互結合網）は常に誤動作・故障を起こすことを前提にしなければならない。従って、相互結合網は結合網自身の誤動作・故障に対して柔軟に振る舞うと同時に、接続されるプロセッサの誤動作・故障に対しても柔軟に対処して、処理の続行を図れる能力を持つ必要がある。勿論、誤動作・故障に対する柔らかさは、単に相互結合網だけで解決できるものではなく、計算モデルおよび後に述べる保守アーキテクチャと協調して実現される。

### (2) 計算モデルに対する柔らかさ

超並列システムに基づく計算モデルは、直接的にも間接的にも相互結合網とその柔らかさの実現に影響を持つ。例えば、近傍相互作用による問題記述を行う計算モデルでは、近隣処理装置が相互に結合する相互結合網、例えばハイパキューブネットワークが有効である。しかしながら、近隣結合の相互結合網では、大域的な通信を要求する計算モデル（例えば共有記憶モデル）に基づく問題記述がなされている場合には大きな非効率が発生する。逆に、共有メモリモデル実現のためにしばしば用いられるオメガ網で近傍相互作用により記述された問題を実行すると、全プロセッサによる同一近隣方向へのアクセスが多く、衝突が発生させ、著しい性能低下が生じる。

並列システムがマルチパラダイムであるとは、システムが数多くの計算パラダイム、すなわち問題を記述する計算モデルを準最適に解釈実行することである。したかつて、計算モデル上の仮想的計算機を自然に実際の要素処理装置にマッピングできる柔軟な相互結合網が要求される。超並列計算モデルとしての対象指向型データ駆動モデルは、その万能性により、問題記述モデルの持つ相互結合網に対する特性を歪曲することなく変換する無色透明な媒体であると、相互結合網の立場からは規定できる。相互結合網内部での閉塞の減少、スループットの増大、網遅延時間の減少などの点は相互結合網に対して常に求められる項目であり、柔軟性すなわち能力の余裕という古来からの真理を示したものと考えられる。

### (3) 機能的な柔らかさ

柔らかな相互結合網に対するもう一つのアプローチは、結合網が単に情報を伝達するだけでなく、より能動的に実行に介入する、いわゆる機能付加型相互結合網である。並列システムでは、プロセッサは多くの状態を保持し、演算を高速実現することに適した構成をとっているが、多くのプロセッサにまたがる大局的状態に関する処理は多くの相互結合網による通信を伴い、効率的とはいえない。一方、相互結合網では、その大局的結合状況から、大域的情報を収集することに有利な立場にあるが、多くの状態を保持することは適当でない。従って、相互結合網に大域的情報を処理する機能を付加することにより、処理装置における処理形態の柔軟化を図ることが可能となる。

付加する機能としては、要素プロセッサ間の負荷分散機能、大域同期機構、大域的優先度制御機構、階層記憶におけるコピーレンス維持機構、並列度制御機構などが候補である。これらの機能は、すべて論理的には集中して管理することが要求されるが、要素処理装置上のソフトウェアにより実際に集中管理を行った場合にはオーバーヘッドが著しく現実的でないものである。従って、相互結合網に機能を付加することにより、従来の相互結合網では不可能であったシステム全体の柔軟な制御が可能となる。

## 5.2.3 柔らかなソフトウェア

### 5.2.3.1 言語の柔らかさ

#### (1) 超並列対象指向モデルと記述言語

100万以上の要素プロセッサ数よりなる超並列システムのアーキテクチャと親和性がよく、様々な応用プログラムが書き易い一般性のあるプログラム言語の設計は、超並列システムを構築するうえで最も重要な課題の一つである。柔らかな計算モデルとそのアーキテクチャの節で述べられている対象指向型データ駆動モデルと基本的な枠組が極めて近く、高い拡張性をもった現在最も良く研究されている計算モデルは、並列対象指向（並列オブジェクト指向）モデルであろう。しかし、このモデル及びこのモデルに基づいた記述言語は並列オブジェクト数を数千から数万と想定して考えられたものであるため、目的とする超並列システムの規模を考慮すると、種々の拡張や再検討が必要となるであろう。さらに、そうして設計された記述系の処理系の実現、およびそのような記述系によるプログラミングのための支援系の構築も不可欠なものである。また、次に述べる拡張された並列オブジェクトに基づく記述言語のほかに、限定された応用分野のみに使われる専用言語の開発も重要になる。

並列対象指向モデルにおいては、局所的な記憶と独立した計算・処理能力を持つ並列オブジェクトと呼ばれる多数の情報処理モジュールとそれらの間での、並行的なメッセージのやりとりによって計算／情報処理が進行する。並列オブジェクトは、問題領域を構成する各構成要素、例えば、質点、粒子、剛体、空間領域、ニューロン、データ構造、基本演算、関数／手続き、計算機、人間、等の機能やそれらが持つ知識をモデル化し記述したものであり、並列オブジェクト間のメッセージのやりとりは、そのような構成要素の相互作用をモデル化したものである。並列対象指向モデルに基づいた記述言語から出発して、超並列システムを駆使するためのソフトウェアを構成記述する言語を考える場合、次のような点を考慮すべきであろう。

#### 1) 並列オブジェクトのグループ化の記述方式

莫大な数の並列オブジェクトのグループ分けを指定する記述機構は、様々な理由から不可欠である。たとえば、問題領域の存在する構成要素の自然な分割を、素直に並列オブジェクトのグループとして表現記述するための機構、個別の並列オブジェクトを指定するためにグループ名を導入するための機構、計算資源を共有する並列オブジェクトの集まりを指定する機構、などがそれである。また並列オブジェクトのグループ同士の関係の記述なども必要になる。

#### 2) 並列オブジェクト同士の相互作用および同期の方式

メッセージのやりとりを従来の拠点对拠点で結ぶ方式に限らず、より多様な方式に拡張することが重要である。並列オブジェクト同士の同期は、従来はメッセージの伝達によってのみ実現していたが、同期的な通信機能の拡大、並列オブジェクトグループ内でのSIMD的な実行機構の導入、バリア同期方式の導入などの検討も必要であろう。

### 3) 並列オブジェクトの挙動の適応化

並列オブジェクト同士の計算資源の公平性・効率性を高めるためや、協調的動作を支援するために、また並列オブジェクトの耐故障性を高めるために、並列オブジェクトの挙動を動的に変化・進化させ、計算環境に動的に適応させることは、超並列システムの構築上極めて重要である。このために、高水準言語の枠組のなかでプログラムモジュール自身について記述をすることを可能にする、自己反映機能をもつ言語が必要になる。

### 4) 並列オブジェクト同士の制約記述

並列オブジェクト同士の間で成立する関係や制約を宣言的に記述することは、問題領域のモデル化及びそのシミュレーションの記述を簡便にする上で不可欠である。

以上のような言語・記述系で書かれたプログラムを、実際の超並列アーキテクチャの上で効率よく実行されるコードに変換するための処理系実現は、言語・記述系の考案と同等に重要である。良い処理系の実現のためには、並列オブジェクト間の依存関係の解析、データ/メッセージ・フローの解析、並列オブジェクトの型解析、同期情報の抽出、並列オブジェクトの負荷解析、並列オブジェクトのプロセッサへの割り付け方式、等の手法の総合的な開発が前提となる。また、プログラムの効率良い実行の基礎となる実行環境およびプログラム開発のためには開発支援系が必要になることはいうまでもない。特に、プログラムの実行を監視するためのモニタリングやプログラム開発時のデバグのためなどに、視覚化による新しい方式が必要になると思われる。

## (2) 柔らかさ付与の記述法

ソフトウェアの柔らかさを実現するためには、プログラムの構築法が第一義的に重要であるので、まずそれについて考察する。次に、そのようなプログラムの記述をサポートするためには、プログラミング言語の機能として何が必要かについて検討する。超並列システムの目標は、高い計算性能によってより高度で柔軟な機能を実現することにある。超並列システムでは、各要素プロセッサの計算能力が総和としては十二分にある。しかしプロセッサ間の(大域的)通信能力は、計算能力との比で考えると低並列システムよりも劣ることにならざるをえない。このようなシステムでは、何を尺度としてプログラムの性能を考えるべきであろうか。低並列システムでは、しばしば台数効果が、並列処理の有効性の尺度とみなされてきた。しかし、台数効果があがることは、(超)並列プログラムにとって必要条件でも十分条件でもない。そもそも、相対的に劣る通信性能の下で、台数効果を上げることは非常に困難であるし、台数効果を上げるために計算複雑度の劣ったアルゴリズムを採用するのは本末顛倒である。

超並列システムに限らず、システムの性能として第一義的に考慮すべき点は、外界との間の通信の質である(ここで質というのは、通信内容の質や通信路の信頼性のことではなく、スループット(バンド幅)とレスポンスのことである)。システムをブラックボックスとして考える立場からは、超並列性は、この通信の質を向上させるためのものでなければならない。もちろん通信内容の質も重要で、豊富な計算能力はその向上にも役立つが、通信内容と速度(特にレスポンス)とはトレードオフの関係にあるので、両者は一元化して考えることができる。

外界との通信の質を向上させるには、スループットを上げ、レスポンスを改善すればよい。前者の例としては、マルチメディア通信の採用などが考えられ、ここにも非常に大きな計算能力の必要性が見出せる。以下では、レスポンスを改善するための一つの方法として、見込み計算(投機的計算、speculative computation)の概念を使う可能性について検討する。この方法か、柔軟なソフトウェアの構築法に大きく関係すると考えられるからである。

### 1) 見込み計算

見込み計算とは、後で必要となるかも知れない計算（ここでいう計算には、狭義の、つまり演算の意味での計算も、プロセッサ内やプロセッサ間の通信もふくむ）を予測して、あらかじめそれを行うことである。見込みであるから無駄になる危険もあるが、平均的に効率改善に役に立てばよい。従来の逐次型コンピュータでは、低いレベルの処理ではしばしば見込み計算が利用されてきた。たとえばハードウェアレベルでは、命令の先読みや分岐予測がその例である。これは、プロセッサメモリ間の通信オーバーヘッドによる性能低下をできるだけ防ぐ工夫である。オペレーティングシステムのレベルでは、入出力データのバッファリングが見込み計算の例である。これも、高い入出力オーバーヘッドを見かけ上低くするための技術である。

通常のソフトウェアにおいて見込み計算が意識されるようになったのは、並列システムが普及してきた比較的最近のことである。ソフトウェアのレベルにおける見込み計算としては、人工知能分野において研究されている並列限界分枝法、組み合わせ爆発アルゴリズム、並列繰り返し深化法などのアルゴリズムに、その例を見ることができる。これらはいずれも探索問題の並列実行の制御手法であり、問題の性質から見込み計算が本質的に重要であるために技術が発展してきた。しかし、探索問題以外にも見込み計算の利用価値は大きい。上記のバッファリングもその一例である。

最も高レベルの見込み計算は、外界からの要求を見込んで計算を行なうものであろう。たとえば、気のきいた会話的なプログラムを作るには、外界からの入力待ちの時間をうまく利用して、次の入力に対する応答を用意したり、自己の知識ベースを整理したりする技術を開発する必要がある。このような手法の応用範囲は、会話的なプログラムに限られない。同様の手法が(超)並列システムの内部のプロセッサ間通信にも適用できる。つまり、あるプロセッサから来る要求を見込んで他プロセッサが計算を行なうことが考えられる。

## 2) 柔らかさの記述のための言語機能

上に説明したような柔らかさ、特に見込み計算を実現するための言語機能としては、並列計算の制御が重要である。並列プログラミング言語における制御には、プログラムの正しさのための制御と、効率のための制御とがある。前者は、並行処理 (concurrency) における概念であるのに対し、後者は並列処理における概念で、並列計算の物理資源 (時間、空間) へのマッピングを扱うものである。正しさのための制御機能がインプリメンテーションに独立であるのに対し、効率のための制御機能はインプリメンテーションの物理的特性に依存する。したがって、この分離は概念整理の点からも重要である。

効率のための制御、すなわちマッピング機能は、抽象化と汎用性の観点からは、適度に機械独立でなければならない。そこで、言語機能の設計のためにはまず、超並列計算の、ある程度抽象的なモデルを構築しなければならない。このモデルは、計算の手間を評価する枠組を提供するという意味でも重要である。もちろん、高度なアプリケーションから見れば、上にとりあげた言語機能は低レベルのものである。しかし、システムの物理的特性を扱うレベルの言語機能をきちんと設計することは、超並列システムの効率を活かすために欠かすことができない。

### 5.2.3.2 OSの柔らかさ

オペレーティングシステム (OS) の基本目的は、計算機資源をプロセスに有効に割り付けること、ハードウェアの詳細を隠した使いやすいソフトウェア環境を構築することの二つである。機能的な柔らかさを追及する超並列システムでも基本は変わらないが、その実現方式は従来の並列処理と大きく異なる。しかし、ここで注意すべきことは、一つのプロセスを超高速に処理するデータ並列の超並列システムを目指すのか、様々なプロセスが同時に動作するシステ



ム全体のスループット向上を目指すのかによって超並列 OS の課題は大きく異なる。以下では、主に後者を前提に検討を行う。

### (1) 階層的管理モデル

100万台以上の要素プロセッサを独立に動作させ、全体としてある目的を達成するためには完全な集中管理は不可能で、会社や社会組織に相当するような機能分散でかつ階層的な管理構造が必要となる。このような管理構造を実現するためには、現在の OS の延長では実現が難しく、OS の階層化、機能分散化などが必要となる。また、このような超並列管理モデル構築のアプローチとしては、従来の並列対象指向モデルの拡張だけでなく、あいまいさを許容している人間社会の管理システムからの類推的なアプローチも重要になるとみられる。

### (2) 柔らかなネットワーク管理

超並列では共有メモリ方式の集中管理は不可能であり、現在の電話通信網やコンピュータネットワークに相当するようなネットワーク管理機能がシステム内部にも必要になる。すなわち、通常の通信システムが持つ高度なルーティング、フロー制御、アドレッシング、故障回避、ケーパビリティなどの機能が OS のネットワーク管理機能に要求される。また、分散管理でありながらシステム全体のスループットを向上し、カタストロフィ現象を回避するためのネットワーク管理手法が必要であり、このために、学習による適応型の経路選択などの機能が要求される。

### (3) 柔らかな資源管理と負荷分散

プロセス管理の面では、同期のためのオーバヘッドの解消が最大の問題で、これを最小限に抑え、かつデッドロックを回避する機構が必要である。特に、超並列処理のスケジューリングでは、並列処理の粒度とオーバヘッドの関係の他、時間的並列処理と空間的並列処理の関係なども重要な決定要素となる。このように従来の並列処理以上に多くの要因をもとにグローバルにスケジューリングし、かつそのオーバヘッドを最小に抑えなくてはならない。このためには、コンパイラ側に静的なスケジューリングとともに OS の動的なスケジューリングに必要な情報を渡す必要があり、従来以上にコンパイラと密接な関係が必要となる。記憶管理という面では、局所性を活用する管理手法やキャッシュの概念は超並列システムでも重要な高速化手段である。特に、超並列処理で最大の問題となる記憶へのアクセス競合や通信オーバヘッドの解消には、従来の仮想記憶だけでなく、階層を飛び越したり、キメ細かな学習機能を持つ置換アルゴリズムの適用が必要となる。超並列 OS では以上のような複雑な機能が必要になると見られるが、その一方で、ハードウェアの詳細を隠した使いやすいソフトウェア環境を構築することも必要で、そのためには資源の仮想化が重要であり、これも超並列 OS の大きな課題である。

### (4) 柔らかな高信頼化技術

超並列処理では、必ず高い確率で故障が起きるという前提で資源管理を行なう必要がある。このため、従来の高信頼化技術をさらに発展させるアプローチとともに、故障回避のプロセスを通常の処理として扱い、緊急度に合わせた多系統（時間的／空間的）の高信頼化処理が必要である。

### (5) 自律／適応機能

現在の OS でも、状況に合わせた自己チューニングやスケジューリング機能を持つものは多い。超並列システムの場合は、そのためのオーバーヘッドが膨大になり、分散的な自律機能が要求される。このためには、各モジュール毎の統計管理手法や学習機能が有効と見られる。また、これらの目的のために、管理情報を集めたり、OS 自らがシミュレーションして環境をユーザにあわせたりする機能が望まれる。

#### (6) マルチパラダイムのための OS

マルチパラダイムの導入にあたっては、様々なパラダイムを OS がサポートしなくてはならない。このためには、仮想マシンによる複数 OS のサポートが有効な場合が考えられる。すなわち、各パラダイム共通の機能は共通カーネルが制御するが、各パラダイム固有の機能はサーバレベルの機能として実現され、さらに幾つかのパラダイムで共通の部分は幾つかのレベルで仮想 OS 化されうるメカニズムが検討される必要がある。

### 5.2.4 超並列システムの実現

#### 5.2.4.1 5-10 年後のデバイス技術と実装技術

##### (1) VLSI 技術のトレント

Intel 社のレポート (IEEE SPECTRUM、Oct 1989、及び日経データプロ、32 ビットマイクロプロセッサ、1990) をもとに、1995 年および 2000 年におけるコマーシャルレベルでの最も高度な LSI 技術 (以下、LSI1995、LSI2000 と呼ぶ) と超並列システムへの適用形態を検討する。図 5 19 によると LSI1995、LSI2000 の主要諸元は表 5 2 のようになると予測される。

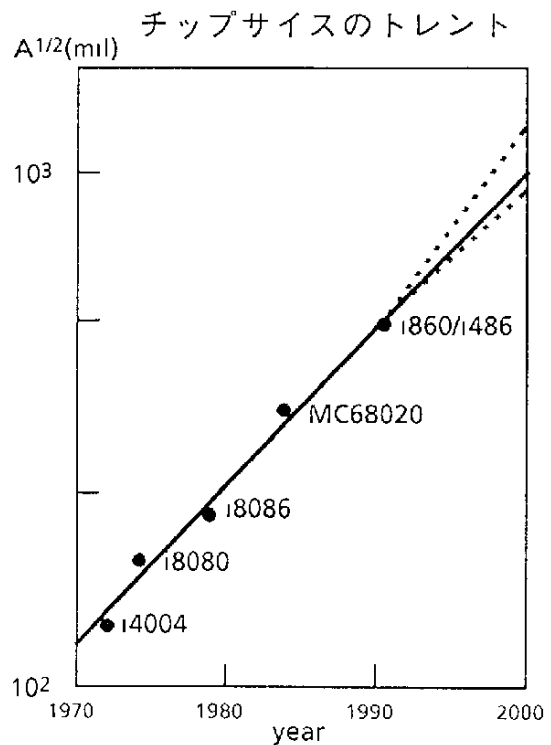
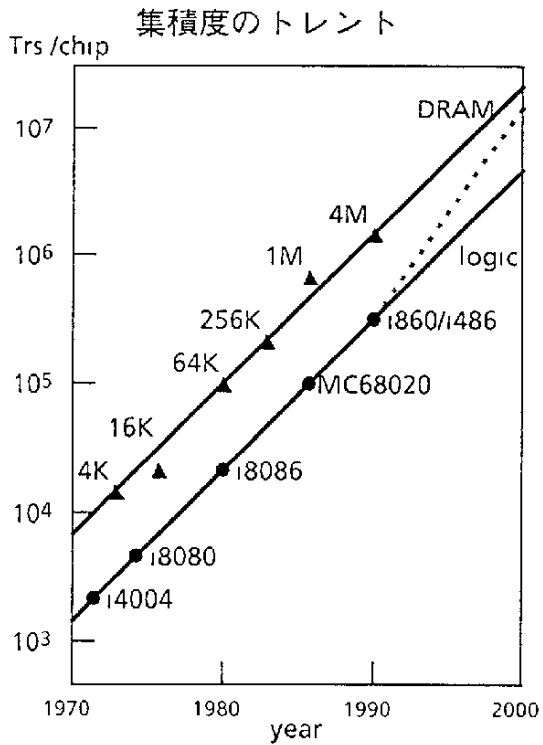
表 5 2 LSI 技術の進展

	チップサイズ	トランジスタ数	クロック	デザインルール
LSI1995	20mm × 20mm	$5 \times 10^6$	100MHz	0.4μCMOS
LSI2000	25mm × 25mm	$2 \times 10^7$	200MHz	0.25μCMOS

超並列システムを構成する要素プロセッサのデータバス幅は 8、16、32 ビットの 3 通りが考えられる。各要素プロセッサが 2k 語 (staticRAM) 程度のメモリと 10k-20k トランジスタ程度のネットワークハードウェアを持つものと想定すると、各プロセッサのハードウェア量は 8 ビットプロセッサで 120k トランジスタ、16 ビットプロセッサで 250k トランジスタ、32 ビットプロセッサで 500k トランジスタ程度となる。デジタル方式のニューロセルは 8 ビットプロセッサと同程度の規模 (信学技報、vol 89、no 312、ICD89 151、1989) と考えられる。1 チップ LSI に含まれる要素プロセッサ数、及び仮に 100 万プロセッサからなる超並列システムを構成した場合に必要なチップ数は表 5 3 のようになる。

##### (2) 消費電力と性能の予測

消費電力は、デバイス特性面では単位演算の実行に必要なエネルギー量に比例する量である power-delay (pd) 積のスケーリング則、実性能面では MIPS 値及び電源電圧と強い関係がある。pd 積は、スケーリング係数を  $s$  とすると概ね  $s$  の -1.5 乗で減少する。また、LSI1995 の電源電圧は 3.3V (速度 2/3、電力 1/2)、LSI2000 では 2.5V (速度 1/2、電力 1/4) と仮定



資料 (1)Geisinger et al ,IEEE SPECTRUM,pp 43-47,Oct,1989  
 (2)日経データプロ,"32ビットマイクロプロセッサ",pp267-274,1990

図 5 19 LSI 技術の進歩

表 5 3 LSI の内部構成と必要なチップ数

	ビット幅	PE 数 / チップ	総トランジスタ数	チップ数
LSI1995	8	40	$4.8 \times 10^6$	25 万
	16	20	$5.0 \times 10^6$	50 万
	32	10	$5.0 \times 10^6$	10.0 万
LSI2000	8	160	$1.9 \times 10^7$	0.6 万
	16	80	$2.0 \times 10^7$	1.3 万
	32	40	$2.0 \times 10^7$	2.5 万

する。1 $\mu$ CMOSによる32ビットCPUの性能-消費電力比は33MIPS/W程度であるため、LSI1995、LSI2000のMIPS消費電力比は各々140MIPS/W、600MIPS/Wと推測される。以上から、32ビットプロセッサを採用した場合のチップの諸元をまとめると表54のようになる。(16、8ビットプロセッサ及びニューロセルの場合にはセル数が各々2、4、4倍になる。)

表54 チップの諸元

	チップサイズ	トランジスタ数	クロック	MIPS(PE数)	Vdd	電力
LSI1995	20mm × 20mm	5 × 10 <sup>6</sup>	67MHz	550 (8)	3.3V	4.0W
LSI2000	25mm × 25mm	2 × 10 <sup>7</sup>	100MHz	4000(32)	2.5V	6.7W

これらの数値は主にスケーリング則に従って導出したが、この規則以外にI/O数、各I/Oが駆動する負荷、論理振幅、設計技術の進歩による速度や電力の最適化等の影響を考慮する必要がある。上記した数値によると、LSI2000を用いた100万プロセッサシステムの性能と消費電力は各々、125TIPS(Tera Instructions Per Second)、210kwとなり、電源供給や冷却技術が大きな課題となることが予想される。また、10億プロセッサシステムで予想される電力消費は210Mwとなり、この点からみる限りその実現可能性は著しく低いと考えられる。

### (3) 実装技術のトレンド

超並列システムに必要とされるチップ数は数千から数十万と予想され、これらの実装には新しい高密度実装方式の想定が不可欠である。主要な候補としてはWSI(Wafer Scale Integration)とベアチップによるMCM(Multi-Chip Module)及びこれらのスタック実装化技術が挙げられる。

- WSI チップの歩留りがある程度高ければ、平面的な実装密度は最も高くでき、動作チップの選択方法も種々の方法が可能である。一方、歩留りが低い場合、実装密度は低下し、動作チップの選択方法は高度かつ困難になる。また、高歩留りを期待するためにはチップサイズを小さくする必要があり、チップ外のネットワーク規模が増大するというトレードオフがある。ウエハーレベルで一定の歩留りが要求されるため、ウエハーの生産コストは高いが、逆に実装コストは小さい。
- MCM 動作チップを選別して実装でき、不良チップのリプレースも比較的容易であるので、ロバスト性、保守性への対応を一番単純な形で実現できる。現状で1000パッド/チップ程度の接続数と、50層/枚程度の配線が可能である。WSIとは逆にチップの生産コストは歩留りによるか実装コストはかなり高い。異種チップの混載(メモリとプロセッサ、プロセッサとネットワークコントローラ等)が容易である。

これらの技術に対して実装量の予測を行う。WSIで使用するウエハーは、1995年で8インチ、2000年で10インチ、MCMの実装基板の大きさは同時期のウエハー表面積の2倍程度であり、またWSIでのチップ歩留りは70%程度、MCMにおける実装密度は基板表面に対して50%程度と仮定する。表55に示したように、100万プロセッサ(32ビット)システムはLSI2000レベルの技術で約500枚の基板によって構成され得る。これは十分実現可能なレベルと考えられる。

表 5.5 予想される実装量

	技術	面積 ( $cm^2$ )	有効面積 ( $cm^2$ )	動作チップ数	動作 PE 数	電力 (W/board)
LSI1995	WSI	320	225	56	450	225
	MCM	630	320	80	640	320
LSI2000	WSI	490	340	55	1800	370
	MCM	980	490	78	2500	530

#### (4) モジュールレベル実装

モジュール内の接続としては、電気的接続と光学的接続、及びマザーボード(カードオンボード)方式とスタック方式の組合せが考えられる。光技術は有力な候補となる可能性があるが、送受光技術、変復調技術、シリコン技術との親和性、実装技術との親和性等の課題解決が必要である。光技術の応用形態としては、光マザーボードモジュール、シリコンと親和性の良い送受光素子やオンチップ光導波路の形成によるチップ間光通信、更に WSI の直接スタックが実現する可能性がある。これらのイメージを図 5.20 に示す。

モジュール化技術、接続技術の他に、ネットワークトポロジと実装上の物理的な構造(チップ、基板、モジュールの各レベル)とのマッチング、実装密度やテクノロジレベルと製造、検査、保守面での容易さとのマッチング、ロバスト性や冗長構成実現方式と実装形態とのマッチング、電源供給や冷却技術、外部との接続方式などについても十分な検討がなされねばならない。

#### 5.2.4.2 相互結合網のトポロジ

100 万から 10 億ものプロセッサ数からなる超並列システムを目指した相互結合網を考える場合、結合のためのハードウェア量が最も重要となる。もちろん、結合網の幾何学的形状(トポロジ)は問題の適合性の面からできるだけ均質、等距離、高スループットのものが望ましいが超並列システムとなると、それらの要求を全て満たす相互結合網の実現は困難と言える。これまで多くの並列マシンで見られる、密結合共有記憶型のシステムはハードウェアの制約から先ず除外され、分散記憶型を前提としたアーキテクチャを考える必要がある。

表 5.6 にこれまで提案されたネットワークについての比較を示した。ハードウェアの面ではプロセッサ台数に対し  $O(n)$  のネットワークが望ましいと言える。この条件を満たすものはバス、メッシュ、CCC 型(超立方体環型)、リング型などが考えられるが、ファンアウト、及び配線の複雑さの制約からメッシュ型が現実的な候補となりうる。ここで、現在の技術で先の超並列システムを実現する場合のハードウェアを見積ると以下の表 5.7 となる。この表からもわかる通り、百万から 10 億プロセッサもの超並列システムを現実的なハード規模で実現するためには複数のプロセッサと接続ネットワークを同一チップ内におさめた高密度な ULSI/WSI 技術が必要となる。また相互結合網を考える場合、その実装が、LSI 内部、基板内、基板間かによっても異なってくる。

超並列マシンを実現するために、プロセッサの集積方法を考えると、1 チップに複数台のプロセッサを格納する必要がある。この場合、単純に境界のプロセッサから信号線を出すと、LSI のピン数の制約が深刻となる。プロセッサ台数を  $m$  とすると、2 次元メッシュで  $4m^{1/2}$ 、3 次元メッシュで  $6m^{2/3}$  となり、特に、チップ内で 3 次元実装は困難となるので、何らかの束線手段や時分割多重方式の採用が必要となる。また、チップ内は 2 次元で、またチップ間は 3 次元や

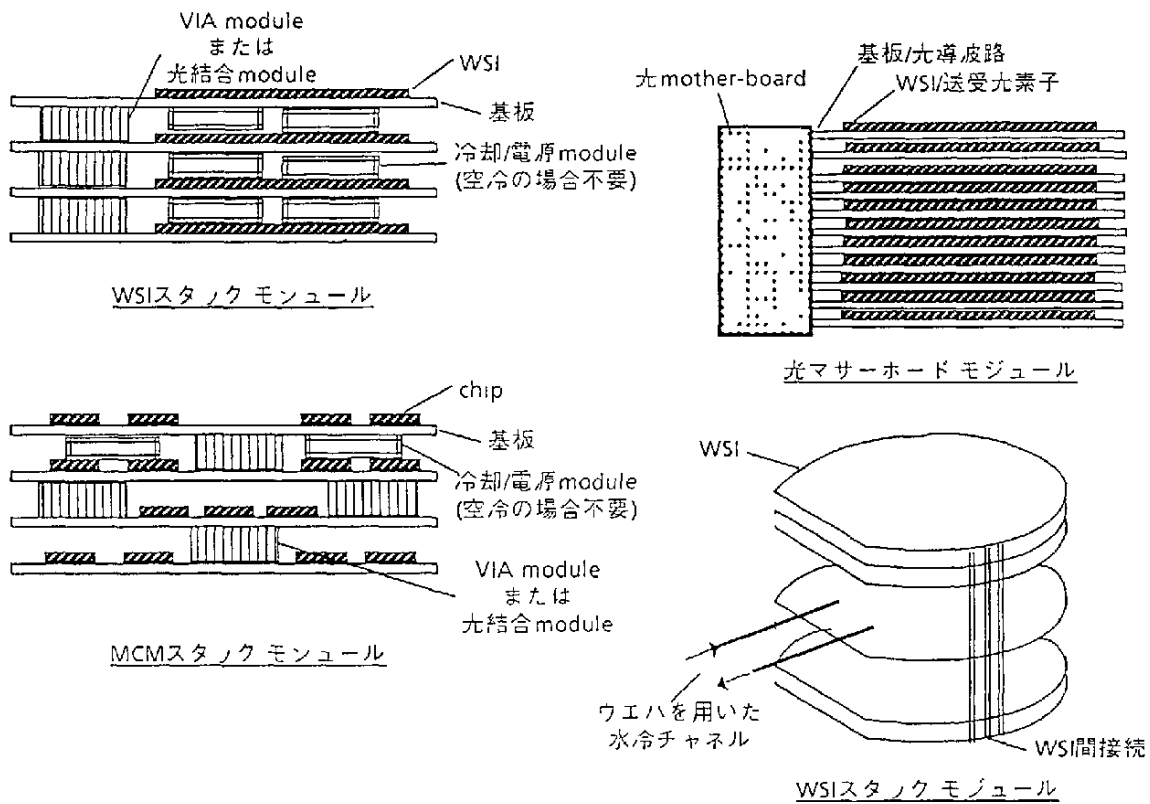


図 5.20: モジュールレベル実装

表 5.6. 相互結合網の比較

名称	ハード量	ファンアウト	通信長	配線の複雑さ
キューブ型	$N \log N$	$\log N$	$\log N$ 以内	×
2次元メッシュ	$N$	4	$N^{1/2}$	○
3次元メッシュ	$N$	6	$N^{1/3}$	○
リング	$N$	2	$N$ 以内	◎
巡回多段	$N$	4	$2 \log N$ 以内	△
クロスバ	$N^2$	$N$	1	××
多段型	$N \log N$	1	$\log N$	×
CCC	$N$	1	$2/3 \log N$ 以内	×

表 57 相互結合網のハードウェア量

	100 万プロセッサ	10 億プロセッサ
相互結合網	接続線数	接続線数
2D メッシュ	1000 × 1000	32000 × 32000
3D メッシュ	100 × 100 × 100	1000 × 1000 × 1000

キューブと言った階層方式の導入も必要となろう。これまでの実装方式をとる場合、LSI、基板のピン数の制約が大きくなり、そこでトポロジーの制約を受ける。この制約を克服するために、光時分割多重やチップ間を直接光で結合する光接続などの技術も期待される。

超並列システムを目指す場合、これまでに見たように接続するためのコストが高く、通信遅延が本質的に存在する。また、故障の確率が無視できなくなるので、フォールトトレラント性の考慮もハードウェア面（代換経路への変更、故障モジュールの退避 / 縮退再構成など）と、計算モデル / ソフト面（障害が存在しても、正しい計算が可能な耐故障計算モデルなど）の双方での考慮が必要となる。

#### 5.2.4.3 実装可能なシステムのイメージ

超並列システムを適当な規模の筐体内に実装することを考えるとき、電力供給や冷却技術のほかに相互結合網の実装技術が重要な技術課題となる。超並列システムの使用形態としては、大規模な論理的相互結合網に接続された大量の仮想プロセッサからなる系を物理的結合網に接続された実プロセッサにマッピングするような形態が予想される。従って物理的結合網には、実装可能性と同時に、種々の論理的相互結合網に適合できる汎用性が要求される。ハードウェア量が比較的少なく、なおかつプロセッサ間の平均距離が比較的短いプロセッサ結合型オメガ網を例にとり実装可能なシステムイメージについて考察する。

##### (1) 要素プロセッサとマルチチップモジュール

要素プロセッサを、浮動小数点演算回路を内蔵した 32 ビットプロセッサ部、相互結合網の基本要素である 2 入力 2 出力のルータ部、プログラムやデータを格納する局所記憶などから構成すると仮定する。2 K 語程度の記憶を搭載することを仮定すると、回路規模はおよそ 60 万トランジスタ程度になると考えられる。

次にチップイメージを考察する。VLSI 製造の制約条件としては、半導体の集積技術と組立て技術が考えられる。半導体の集積技術については先に述べたように、1995 年には 20mm 角に 500 万トランジスタを集積することが可能となろう。これは上記の要素プロセッサであれば 8 個程度が 1 チップ化できる集積度である。組立て技術はピン数の制限に大きな影響を与えるが、パッドに対するボンディングピッチは 80  $\mu$  m、TAB (tape automated bonding) 技術を用いれば端子ピッチは 0.15 ~ 0.2mm となることが予想される。従ってベアチップで 1,000 ピン、TAB で 600 ~ 800 ピン程度の端子の LSI の実装が可能になる。この条件のもとで 1 チップに格納する要素プロセッサの個数を考える。相互結合網のための入出力ポートのビット幅を 32 ビットとした場合、保守回路等のための制御信号や電源ピンを含めて考えると 16 ~ 18 ポートが TAB 技術の許容範囲である。一方、プロセッサ結合型オメガネットワークを意識したチップ構成を考えると、8 プロセッサを 1 チップに集積した場合の入出力ポート数が 18 となり、上記の許容範囲に収まる。以上のように、集積技術と組立て技術を考慮すると 1 チップに

32ビットプロセッサを8個程度集積したマルチチップモジュールの実現は十分に可能であると  
考えられる。この場合のプロセッサイメージとチップイメージを図5.21に示す。

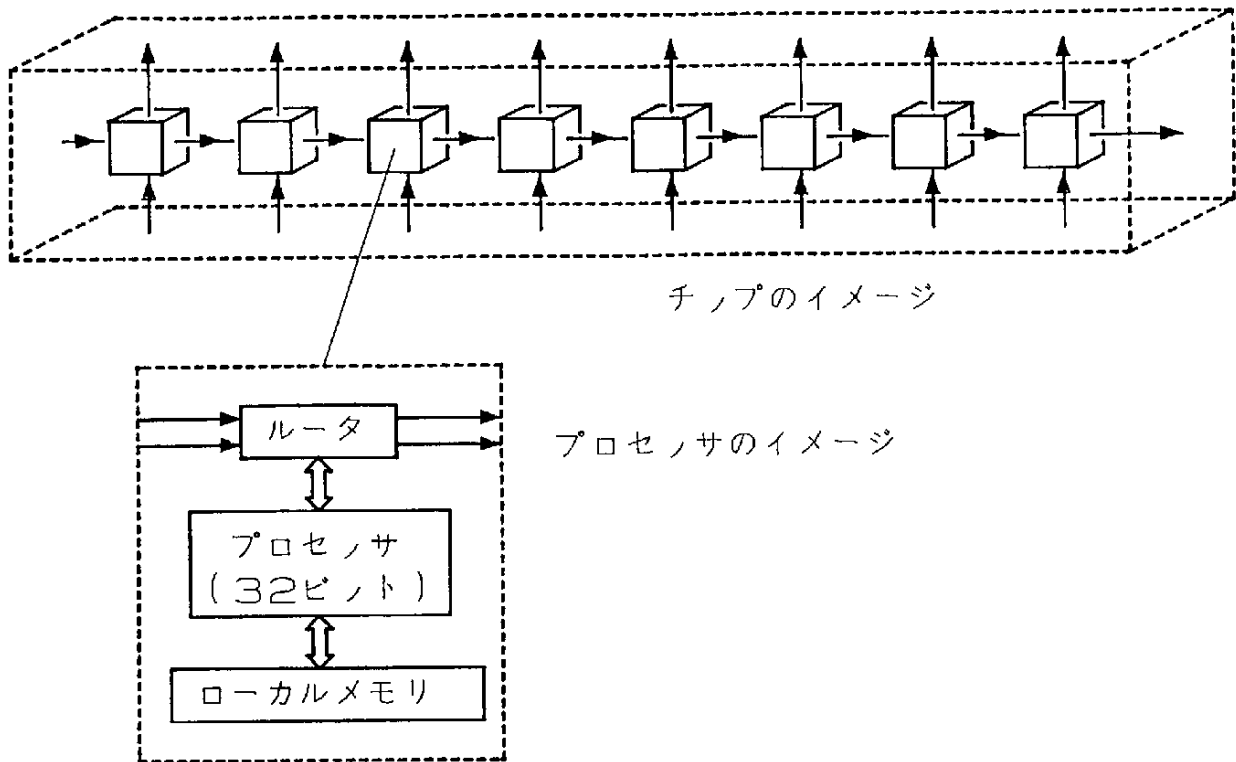


図 5.21 プロセッサイメージとチップイメージ

### (2) 1K プロセッサモジュール

上述のチップを1枚の基板に実装することを考える。8プロセッサを内蔵したチップを128個に、モジュール間接続インタフェース、2次記憶装置とのインタフェース、保守用ハードウェアなどを加え1枚の多層基板に両面実装することで1,024プロセッサのモジュール(1Kプロセッサモジュール)が実現できる。基板サイズは40cm角程度となろう。図5.22に1Kプロセッサモジュールのイメージを示す。図では繁雑さを避けるために、プロセッサとモジュール間接続インタフェースのみ示した。1995年に予想される半導体テクノロジーでは、この1Kプロセッサモジュールの性能は70GIPS(Giga Instruction Per Second)、消費電力は500W程度になることが見込まれる。相互結合網の経路長は、閉塞の無い状態では平均経路長が9.5、最大経路長が14となる。このモジュールの実装に際しては、基板上的高密度配線が課題となることが予想される。

### (3) 百万プロセッサシステム

さらにこの1Kプロセッサモジュール千台を相互に接続すれば百万プロセッサシステムが実現できる。モジュール間結合をモジュール内結合と同じくプロセッサ結合型オメガ網と



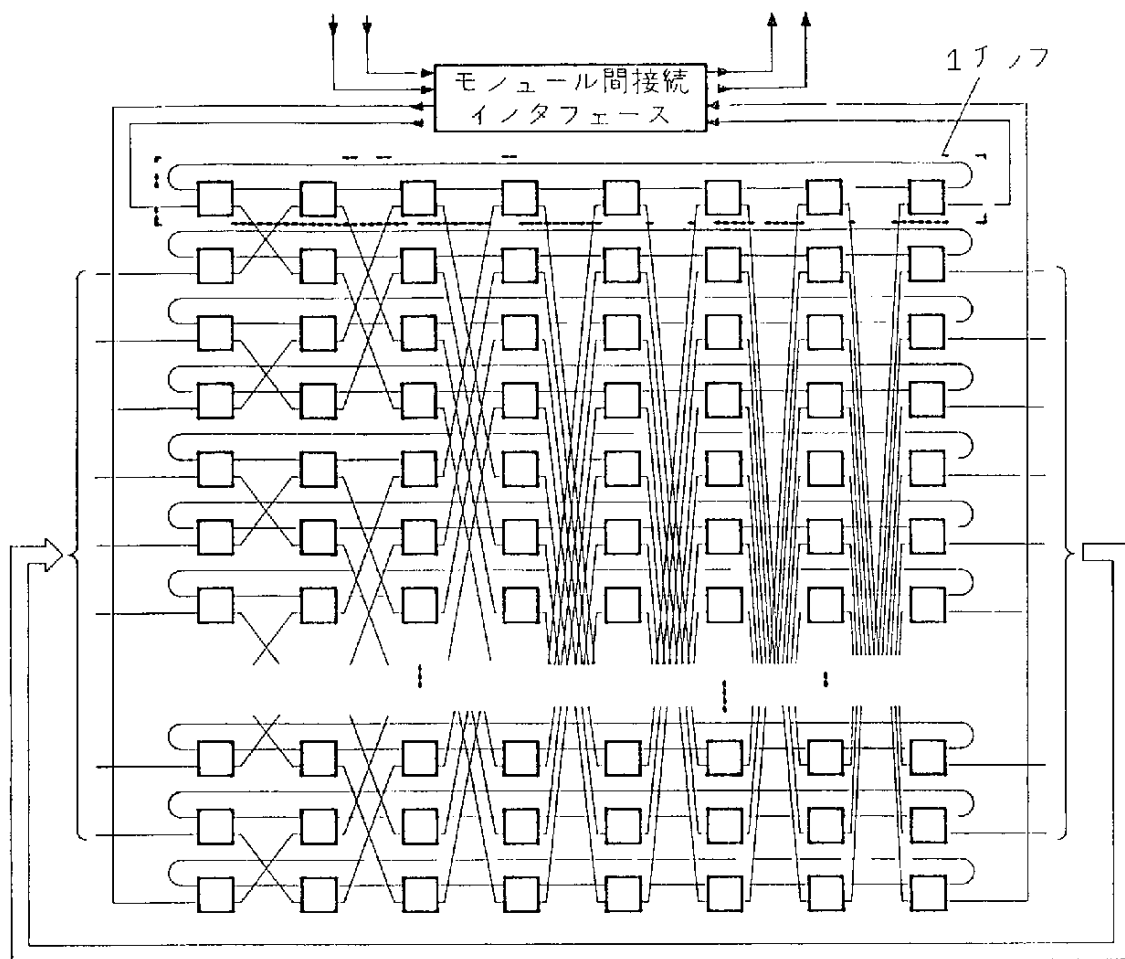


図 5 22 1K プロセッサモジュールのイメージ

した場合のシステムイメージを図5.23に示す。この百万プロセッサシステムの最高性能は125TIPS(Tera Instruction Per Second)、全回路は1m×0.8m×2m程度の筐体8台程度に納めることができる。ただしこの場合、消費電力が210KW程度になることが予想され、電力供給とともに強力な冷却技術の開発が重要な課題となろう。

モジュール間の結合網に関しては上記のオメガ網以外にもハイパキューブやCCC(Cube Connected Circle)などの選択枝も考えられる。しかしいずれの場合でも、モジュール間の通信量が大量になれば結合網に閉塞が生じ、システムの性能が著しく低下することになる。この事態を避けるためには結合網の通信路容量を上げることが必要であり、大容量で高速な通信手段としての光技術に期待が寄せられる。

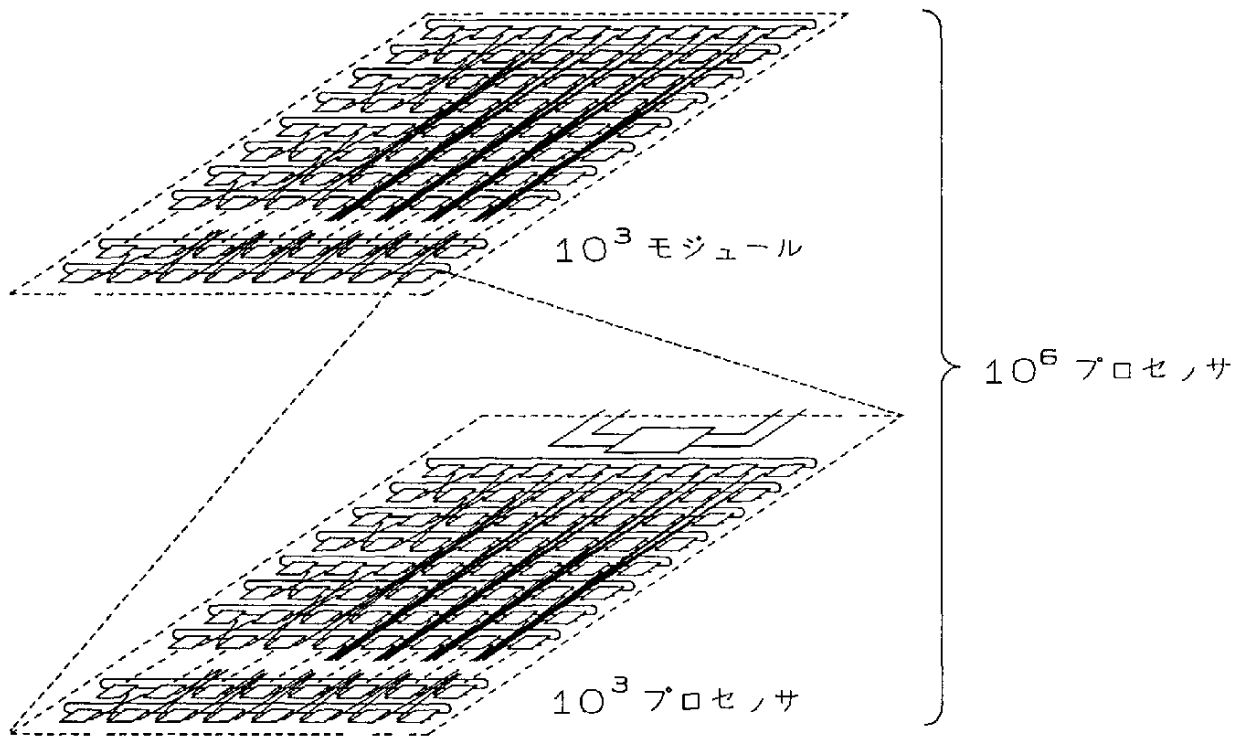


図 5.23 百万プロセッサシステムのイメージ

#### 5.2.4.4 超並列入出力/保守アーキテクチャ

超並列システムにおける計算モデル、アーキテクチャは主にプログラムの論理的実行を規定するものであり、システムと外界の相互作用については規定したものではなかった。このため、超並列システムを現実の世界で用いるためには、外界との相互作用を担当する部分に、論理的执行部分に見合う能力を持たせ、論理的执行部分の能力を妨げないようにする必要がある。システムと外界との相互作用は、境界を厳密にひくことは困難であるが、入出力操作と保

守操作に分類される。システム内でこれらの操作を実現する部分を入出力アーキテクチャおよび保守アーキテクチャと呼ぶ。

### (1) 入出力アーキテクチャ

入出力アーキテクチャは超並列システムと外界、特に二次記憶、入出力センサ・アクチュエータ、ヒューマンインターフェイス機器（グラフィックスを含む）を結合するものである。従来より、入出力に要請される能力は、システムの計算能力に比例することが広く知られていた。しかしながら、入出力における能力とは、単にチャンネルのスループットで代表される転送能力だけでなく、必要な情報が得られるまでの遅延時間等を含めて考える必要がある。従って、超並列システムにおいては、要素プロセッサ数に比例する数の入出力チャンネルとデハイスを接続するだけでは、入出力能力の問題は解決しない。入出力アーキテクチャの持つもう一つの問題は同期問題である。多くの入出力機器においては、情報は最終的には逐次的な関係を持つ直列な形態で扱われる。そこでは情報間の大域的順序関係を保存して処理を続行する必要がある。

上記二つの要請から、入出力アーキテクチャをプログラムを実行するアーキテクチャでそのまま実現することには多くの困難がある。従って、より入出力に特化した独立の入出力アーキテクチャが要請される。超並列システムのための入出力アーキテクチャについては、これまで殆んど検討が行なわれていなかったため不明の点が多いが、少なくとも以下のことが要求される。

#### 1) プロセッサ数と比較して超線形な速度向上

プロセッサ数に比例した入出力転送速度では、入出力動作が常に全入出力装置との間で行われる場合のみ入出力能力と演算処理能力のバランスが逐次計算機の場合と同一になる。しかし、一般にはプロセッサ数より少数の入出力装置が処理に参加する。従って、逐次計算機の場合と同一の入出力能力を与えるためには、プロセッサ数比例を超える入出力速度が要求される。更に、超並列システムでは、プロセッサ1台あたりの入出力アクセス回数に対する入出力転送情報量が減少するため、並列度の増加に見合うアクセス時間の短縮（アクセスに伴うオーバーヘドの減少）が必要である。

#### 2) クラスタ化した入出力管理/同期機構

個々の入出力機器は、多くの場合ディスクヘドの位置決め、表示器の走査速度など物理的動作を含み、入出力速度には必ずから限界がある。従って、入出力機器のクラスタ化した動作は不可欠である。クラスタ化した入出力の管理には、入出力機器の同期管理と共に処理装置間の大域的同期動作が要求される。

### (2) 保守アーキテクチャ

超並列システムでは、前記のようにプログラム実行中においてもプロセッサまたは相互結合網に故障が発生することを前提とする必要がある。このため、処理装置自身を用いて自己診断を行うことでは保守の目的を達成し得ない。更に、相互結合網の診断、状態の記憶を行うためには、プロセッサ数に比例するかそれ以上の複雑さをもった診断処理が必要である。従って、適当な時間内に診断と保守操作を実現するため専用の保守アーキテクチャが必要である。更に、動的な保守動作とプログラム実行中の再構成を実現するために、診断と保守動作に大域的な同期を実現することが必要である。

上記の考察において、入出力アーキテクチャと保守アーキテクチャの類似性を見ることが出来る。これは、外界とインターフェイスするという両アーキテクチャの本質に基づくものと考えられ、これらを統合したアーキテクチャで実現可能であることを示唆する。更に、保守機能

には、大量データの入出力と、グラフィック機能を持ったヒューマンインターフェイスが必要なことも、これら両者の統合を必然化する。結果として、超並列システムは、要素プロセッサ、相互結合網および入出力/保守アーキテクチャで構成される。

#### 5.2 4.5 超並列アーキテクチャ開発支援環境

柔らかな情報処理機能の実現を可能とするシステム基盤としての超並列システムでは、複数のパラダイムが反映可能な柔らかな計算モデルが効率よく実行できることが要求される。このような計算モデルとして先に対象指向型データ駆動モデルが提案されている。しかしこのモデルを効率よく実行するためには、従来のフォンノイマン方式を超える柔らかなプロセッサアーキテクチャと大規模な並列処理を効率よく実行できる柔らかな相互結合網の開発が不可欠である。これらの要求を満たす超並列アーキテクチャを開発するためには、従来の計算機システム開発支援環境とは異なった新たなシステム開発環境が必要となる。超並列アーキテクチャの開発支援環境には以下のような機能が要求される。

##### (1) 相互結合網の開発支援

超並列アーキテクチャにおいては、100万個～10億個にのぼる要素プロセッサを接続する相互結合網は最も重要な技術である。相互結合網には、様々な選択枝が存在する。また機能的には、ロバスト性、動的な負荷分散機能、大域的な同期機能などの「柔らかさ」の一助となる種々の機能が要求される。相互結合網の開発とは、実装技術の制約の中でこれらの要求を最大限に満たす解を見いだすことである。相互結合網を開発するためには、上記の要求項目や制約項目をあらゆる角度から検討することが必要であり、開発支援環境としては構想にのぼった種々の結合網の総合的な機能/性能をシステムレベルでのシミュレーションにより事前に評価できなければならない。しかし超並列システムの相互結合網は極めて大規模であることから、相互結合網全体を事前に妥当な時間内で評価するためには高速な処理機構が必要である。

この開発支援環境を、従来の単一プロセッサからなるシステムに求めるのは処理速度の点に無理があり、スーパーコンピュータでは柔軟性の点で問題がある。もし可能ならば、想定されるいくつかの相互結合網のトポロジを内包した適度な規模の並列マシンが望ましい。

##### (2) 要素プロセッサアーキテクチャの開発支援

超並列システムにおける要素プロセッサはマルチパラダイムを受容する最下層の構成要素であり、データ駆動モデル、対象指向モデル、ニューラルモデルなど各種の計算モデルに対する効率の良い処理系を実現するものでなければならない。このことは要素プロセッサ単体での高機能性を要求するものではなく、複数個の要素プロセッサの総体としての高機能性・柔軟性を要求するものである。従って要素プロセッサのアーキテクチャ開発に際しては、相互結合網を含めたサブシステムとしての機能評価を行うことによって要素プロセッサに必要な基本機能のセトを絞り込むようなアプローチが望ましい。

要素プロセッサのアーキテクチャ開発支援環境としては、上に述べたような開発手法を支援するものでなければならない。すなわち、データ駆動モデルをはじめとする各種の計算モデルが比較的容易に評価でき、なおかつ負荷分散の単位に見合った個数のプロセッサ群としての機能を評価できることが必要である。

##### (3) ソフトウェア開発環境との整合性

超並列システムにおいては、自己組織化、最適化、学習といった柔らかな機能やマルチパラダイムはソフトウェアによって記述されるものであり、アーキテクチャはこれらのソフトウェアを効率良く実行する言わば柔らかな情報処理の基盤を与えるものである。従ってソフトウェアを効率の面から評価するためにはアーキテクチャを仮定することが必要である。またアーキテクチャの前提なしには言語処理系ソフトウェアの開発もまた有り得ない。しかし超並列システムの開発段階においては、これらのソフトウェアを評価するターゲットマシンがまだ存在しない。超並列システムのプロトタイプの開発まではこれらのソフトウェアの評価はアーキテクチャ開発支援環境に委ねざるを得ない。逆に、アーキテクチャの評価のためには、アーキテクチャ開発支援環境のもとで柔らかなソフトウェアを実行させることが必要である。これらのことから、アーキテクチャ開発支援環境とソフトウェア開発環境とは相互利用ができることが望ましく、両者の間には強い親和性が必要である。

このように考えると、開発の初期段階においてアーキテクチャ開発支援環境は極めて重要な役割を果たすものであり、開発目標である超並列システムに少なからざる影響を与えることが予想される。従ってアーキテクチャ開発支援環境としては、目標とする超並列システムが果たすべき機能や特性のサブセットをある程度具備したものが必要である。

#### 5.2.4.6 超並列オペレーティングシステム

先に述べたように、オペレーティングシステム (OS) の基本目的は、計算機資源をプロセスに有効に割り付けることと、ハードウェアの詳細を隠し使いやすいソフトウェア環境を構築することであり、超並列システムでもこの目的は変わらないが、その実現方式は従来の並列処理と超並列処理では大きく異なる。

##### (1) 並列性の制御

並列 OS で最も重要な基本技術は資源の競合を防ぐための相互排除であり、このためにセマフォア、モニタなどの同期制御技術が開発されてきた。これらは、基本的にはアクセス競合が起こっては矛盾を生じる資源 (クリティカルセクション) にロックをかけ、逐次化することにより実現される。また、資源の競合を防ぐ相互排除のメカニズムだけではデッドロックを生じるため、これを防ぐ様々なメカニズムが必要となる。従来の並列処理の制御では、並列度が低かったため、このクリティカルセクションを見つけだし、デッドロックの生じない相互排除メカニズムを実現することが大きな課題であった。

しかし、並列度を上げるためにはクリティカルセクションの粒度を細分化する必要があるが、細分化するほどこれを制御するオーバーヘッドが増加するという相反する問題が生じ並列処理の性能を著しく悪くする。この問題は、超並列 OS では特に重要な課題であり、このためには、制御のオーバーヘッドを最小限に留めるアプローチと、クリティカルセクションを削減するアプローチのトレードオフを探らなくてはならない。

##### (2) 制御オーバーヘッドの削減

超並列処理では、非常に多くのプロセスが同時に走るため、相互排除の高速化には、各プロセスの生成/スライシング処理を軽減し、スライシング時間を高速化することが重要である。このためには、OS がよりきめ細かな高速処理を施すアプローチと OS からこの制御を見えなくするアプローチがある。前者のアプローチの例としては、カーネルのオーバーヘッドを軽減するためスケジューラやプロセス間通信などの最小限の機能だけにとどめて他の機能をサーバ化

したり、マイクロプロセス導入による並列処理の階層化を実現したり、ケーパビリティベースの対象指向の概念を導入するなどのアプローチが必要となる。

また、後者では、並列処理のアプリケーションがOSから見えないようにし、アプリケーションレベルでOSの助けを借りずに並列実行をするアプローチである。OSからは単にひとつのアプリケーションとしか見えず、すべての並列制御がアプリケーション内で実行されるため、OSのオーバーヘッドはほとんどない。この場合は、言語により並列処理を記述する必要があり、強力な並列記述言語やコンパイラが必須であり、並列処理の範囲はアプリケーション単位に限られる。

もちろん、この二つの組み合わせも有効であり、超並列システムではこの組み合わせが必要になると考えられる。この場合、コンパイラによる静的なスケジューリングとOSの動的なスケジューリングを最大限に活用することが必要である。

### (3) クリティカルセクションの削減

超並列処理では、上記の制御オーバーヘッドの削減と共に、そもそものボトルネックとなるクリティカルパスをなくすアプローチも必要となる。このための手段としては、ケーパビリティベースの対象指向の概念を導入してクリティカルセクションを明確化する手法やアクセス権を明確化して相互排除の箇所を少なくする手法がある。以下にこれらの例を述べる。

前者のアプローチでは、従来のOSに見られるような複雑に絡み合ったプログラムからクリティカルセクションを見つけだしてゆくのには比べ、オブジェクト単位にクリティカルセクションを設定できるため、数の上で組み合わせ的に減少することが期待できる。また、クリティカルセクションの設定では、通常、大きなモジュール単位にロックをかけ、制御オーバーヘッドに見合った大きさに徐々に細分化するが、この場合にもこのアプローチが適している。後者のアプローチでは、一般化されているデータアクセスの中から相互排除が必要ないケースをみつける手法をとる。例えば、ほとんどのデータアクセスが参照だけであることが事前に分かっているか、そのことか統計情報から確率的に明白な場合には、データ参照をデータ修飾より優先させる手段をとることにより、データの一意性は保たれ相互排除の必要はなくなる。ただし、この場合には、複数のプロセッサが同時に参照する機能や大域同期機構などが必要となる。

### (4) その他の課題

以上は、比較的現在の並列処理の問題の延長上にあるものだが、その他にも超並列OS固有の多くの課題がある。特に超並列システムは共有記憶方式だけでは実現が不可能であり、メッセージ通信方式の採用は不可欠である。この場合、大規模なメッセージ通信網の高速制御と共に、プロセスの負荷分散、データのマッピング、メッセージによる並列処理制御、静的/動的スケジューリング、など多くの困難な課題がでてくる。これらの課題の困難さは、効率向上のために、処理やデータの局所性を静的/動的、時間的/空間的、かつ、ミクロ的/マクロ的視点から眺めなくてはならないことに起因する。

#### 5 2 4.7 超並列プログラミング環境

超並列プログラミングのためのプログラミング環境としては、「正しい」プログラムを書くという側面の支援については、従来のプログラミング環境と大きく変わるところはないと考えられる。そこで、ここでは、超並列であるが故に重要となってくるであろう点について考察する。なお、ここで考えるのは、超並列性を意識してプログラムを書く人のための環境である。

超並列プログラミングで特に重要となるのは、システムの物理的特性、とりわけプロセッサ内およびプロセッサ間の通信コストの特性を、今まで以上に考慮しなければならないことである。これは、今までよりも、アーキテクチャとアプリケーションとの間のセマンティックギャップが拡大するということである。これは必ずしも悲観すべきことではない。プログラムが指示する計算が物理的にどのような特性をもつかを理解することは、超並列システムの性能を活かすために非常に重要である。超並列システムの意義は、よく考えてプログラムやアルゴリズムを設計する必要性を軽減することにあるのではない。そのような用途にも使えるかも知れないが、優れたプログラムを書き、超並列システムでなければ出せない性能を出すことの方がはるかに重要である。もちろん、超並列プログラミングの経験が蓄積されるにつれて、一般プログラマがあまり細かいことまで考える必要がなくなるのが望ましいことではある。だが少なくとも当面は、そのような蓄積を促進するための支援を考えなければならない。

よいプログラミング環境は、プログラミング言語、プログラミング・パラダイムなどと共に、このようなセマンティックギャップを橋渡しするために不可欠である。超並列システムのためのプログラミング環境としては、上の考察からわかるように、負荷のバランスや通信の特性等をモニタしたり解析したりする機能が最も重要になると考えられる。これらを効率よく実現するには、ハードウェア的支援が必要となるので、超並列システムのハードウェアの設計段階から、機能についてよく考えなければならない。

この種のパフォーマンス・モニタリングやパフォーマンス・デバッキングの仕事は、従来はオペレーティングシステム開発者のようなシステムプログラマの仕事であった。しかし、超並列システムを効率よく動かすためには、より一般のプログラマもこの種の作業を行わなければならないであろう。そこで、提供する環境は、気の利いたものにしなければならない。また、並列実行方式、つまり「効率のための制御」に関するノウハウを、ライブラリの形で蓄積してゆくことも必要である。これも、プログラミング環境が提供すべき重要な機能のひとつであろう。

## 5.2.5 超並列システムの開発に向けて

### 5.2.5.1 コール、サブコールの設定

超並列システムの開発計画を検討するに際して、考慮しなければならないことは次の2点である。

- 1) 最終システムとしてどのような規模のマシンを開発するのか
- 2) 開発ステップはどうするのか (1回で最終システムを開発するのか、プロトタイプを作るのか、プロトタイプを作るとすればその規模は、等)

まず、これまでのコンピュータ関連プロジェクトでの開発ステップを見てみる。平成元年度に終了したスーパーコンピュータプロジェクト、および平成3年度に終了予定の第5世代コンピュータプロジェクトにおける最終システムの開発ステップは図5.24に示す通りである。スーパーコンピュータプロジェクトは実質8年間のプロジェクトであり、前半でアーキテクチャを検討、後半で4台の高速演算処理装置を主体とする最終システムを開発している。その間、プロトタイプは開発していない。一方、第5世代コンピュータプロジェクトは10年の開発期間で、前期3年間で逐次推論マシンPSIを、中期4年間の開発ではPSIを並列化したMultiPSIの開発を主体としている。そして最終目標である並列推論マシンは256～512プロセッサ規模のサブシステムからなる分散システムとして、中期から後期にかけて開発を進めている。

本報告書では最終システムは $10^6 \sim 10^9$ の要素プロセッサを結合した超並列システムを想定している（ただし、 $10^9$ レベルのシステムは消費電力や実装規模の点からみて実現に困難が予想される）。この規模は現在実現されているシステムと対比すると、 $10^3 \sim 10^6$ 倍であり、このような規模を机上検討のみで一気の開発することは多大の危険性をはらむと予想される。したがって、プロトタイプシステムの開発は必須である。プロトタイプシステムの位置づけは、アーキテクチャ、ハードウェアから見たシステムの実現の実証と最終システムへ向けてのソフトウェアの開発環境である。そこで用いる開発技術は、現在のシステム技術と最終システムで要求されるシステム技術の中間に設定する必要がある。また、それを実現するための半導体テクノロジーの進展を睨む必要もある。

プロトタイプシステム PS と最終システム FS の開発イメージとスケジュールの一案を表 5.8 と図 5.25 に示す。PS は次世代ないし次々世代の半導体テクノロジーを利用し、 $10^4 \sim 10^6$ のプロセッサから構成される。この数は現状技術の $10^2 \sim 10^3$ 倍である。実装方式は現在と同じ個別実装が中心となろう。開発時期は（10年を仮定）プロジェクト開始後、6年後を想定している。FS は PS の1世代先の半導体テクノロジーを利用し、 $10^6 \sim 10^9$ のプロセッサを有する。これは PS の $10^2 \sim 10^3$ 倍の規模である。このような規模では実装方式は WSI ないしモジュール実装の採用が必須となろう。

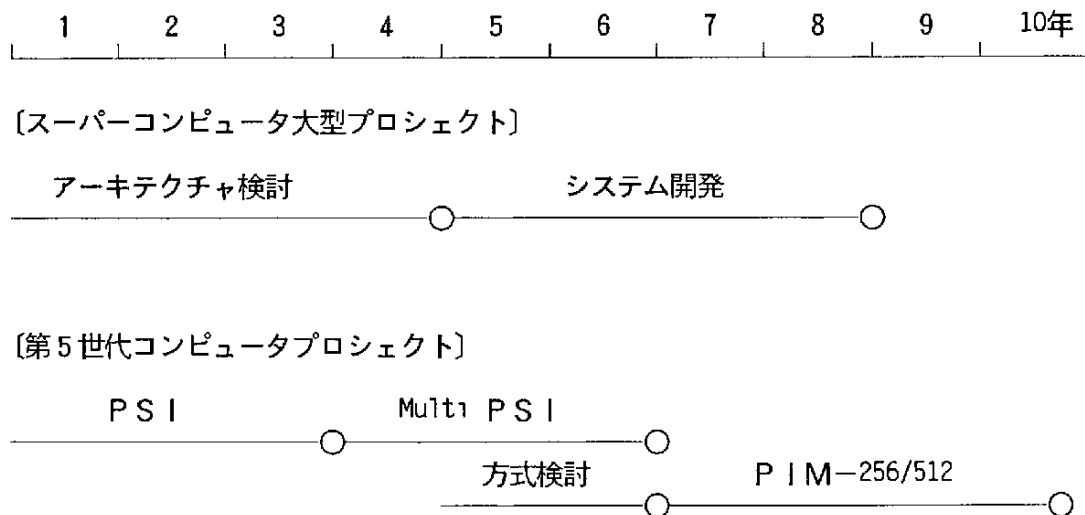


図 5.24 これまでのプロジェクトの開発経過

### 5.2.5.2 ソフトウェア開発環境としてのテストベント

超並列システムの研究開発の初期段階では利用可能なマシンが存在しないため、アーキテクチャや新アプリケーション開拓の基礎検討に際して、何らかの形でソフトウェア開発環境を整える必要がある。また、プロトタイプマシン用のソフトウェアの開発にもソフトウェア開発環境の整備が必須である。これらの開発環境に利用されるマシンがテストベントとして利用され得るために備えていなければならない条件として、次の点が考えられる。

- 1) 最終システムとマシンアーキテクチャの距離がそれほど遠くないこと



表 5.8 プロトタイプシステムと最終システムのイメージ案

項目	PS (Prototype System)	FS (Final System)
システム名称	統合プロセッサプロトタイプ	統合プロセッサ実証機
開発目的	ソフトウェア開発、システム検証用	実用向け
テクノロジー	0.5 ~ 0.3 $\mu\text{m}$	0.3 ~ 0.2 $\mu\text{m}$
プロセッサ数	$10^4 \sim 10^6$	$10^6 \sim 10^9$

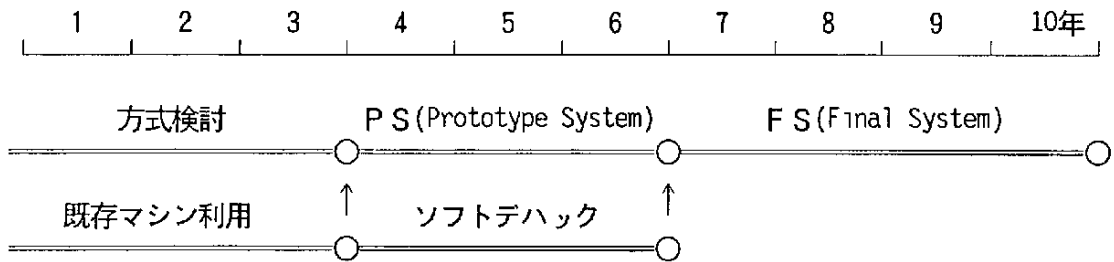


図 5.25 超並列システムの開発スケジュール案

現在、最終的なシステムイメージの詳細が明確になっているわけではないが、概略は超並列システムとニューラルシステムを疎結合あるいは密結合させた統合型を目指している。したがって、このようなシステムのソフトウェアの開発が、規模の大小は別として実現できる必要がある。かつ、マシンのアーキテクチャは最終システムのアーキテクチャに相当の影響を及ぼすと思われるので、できる限り汎用型であって、特定のアプリケーションに専用の色彩が薄いことが望ましい。

- 2) 多数の研究者が利用できるマシンであること。したがって高価格ではなく、海外でもできる限り調達可能であること。

本研究開発には、国内のみならず海外の研究者が何カ所かに集中して研究に従事するとともに、多数の各研究拠点が分散形式で参画することが想定される。したがって、利用するマシンは各研究機関にそれぞれ設置できるように適正な価格であり、海外でもできる限り調達可能であることが望ましい。また、利用時における保守は必須であり、この点からは市販されているシステムを利用の方が簡便である。

- 3) 現在利用されているシステム環境との整合性がとれていること。

現在利用されているシステム環境は、ワークステーションを中心とした分散システム環境が中心となっている。今後構築するシステムはこのようなシステム環境と調和して稼動するシステムである必要がある。したがって、UNIX 環境、分散コンピューティングシステム環境、標準的なユーザインタフェースなどが備わっていることが望ましい。また、これらを備えたシステムであれば、各研究機関がそれぞれの研究テーマに適合した特長あるマシンを導入し、相互を高速ネットワークで接続して利用しあう形態が可能となる。

これらの条件を勘案し、超並列システム研究用テストベッドとして考えられるマシンを以下に検討する。

### (1) スーパーコンピュータ利用

スーパーコンピュータの利用により、各種のアーキテクチャ上で大規模な並列処理のシミュレーションの構築が可能である。また、最終システムのアプリケーションの候補の一つとしてあげられている数値シミュレーションのテスト用には必須であろう。さらに、スーパーコンピュータの利用環境はワークステーションを中心とする分散システム環境になりつつあり、利用環境の点からもとくに問題はない。しかし、高性能のスーパーコンピュータは高価であり、多数の研究者が同時に利用できる環境を構築しにくいという問題がある。ネットワークシステムの中に1～数システムを設置し、必要に応じてネットワーク経由で利用するのがよいと思われる。

### (2) ワークステーションおよびその分散処理利用

ここ数年のワークステーションの進展を考えると今後も高性能化はますます進展し、ここ2～3年で100MIPS以上の処理性能を有するワークステーションが登場すると予想される。しかしながら大規模な並列処理をワークステーション上で実現するにはこの程度ではパワー不足である。また、複数のワークステーションによる分散処理により総合的な性能向上が実現できたとしても、それは並列処理でなく分散処理であるので、本来の並列処理のテスト用に利用することは困難である。したがって、ワークステーションのみでテストベッドを構築することは現実的ではない。ただこれまでのように研究者の一人一人が、小規模処理や大規模システムとのインタフェースのマシンとして利用することはいうまでもない。

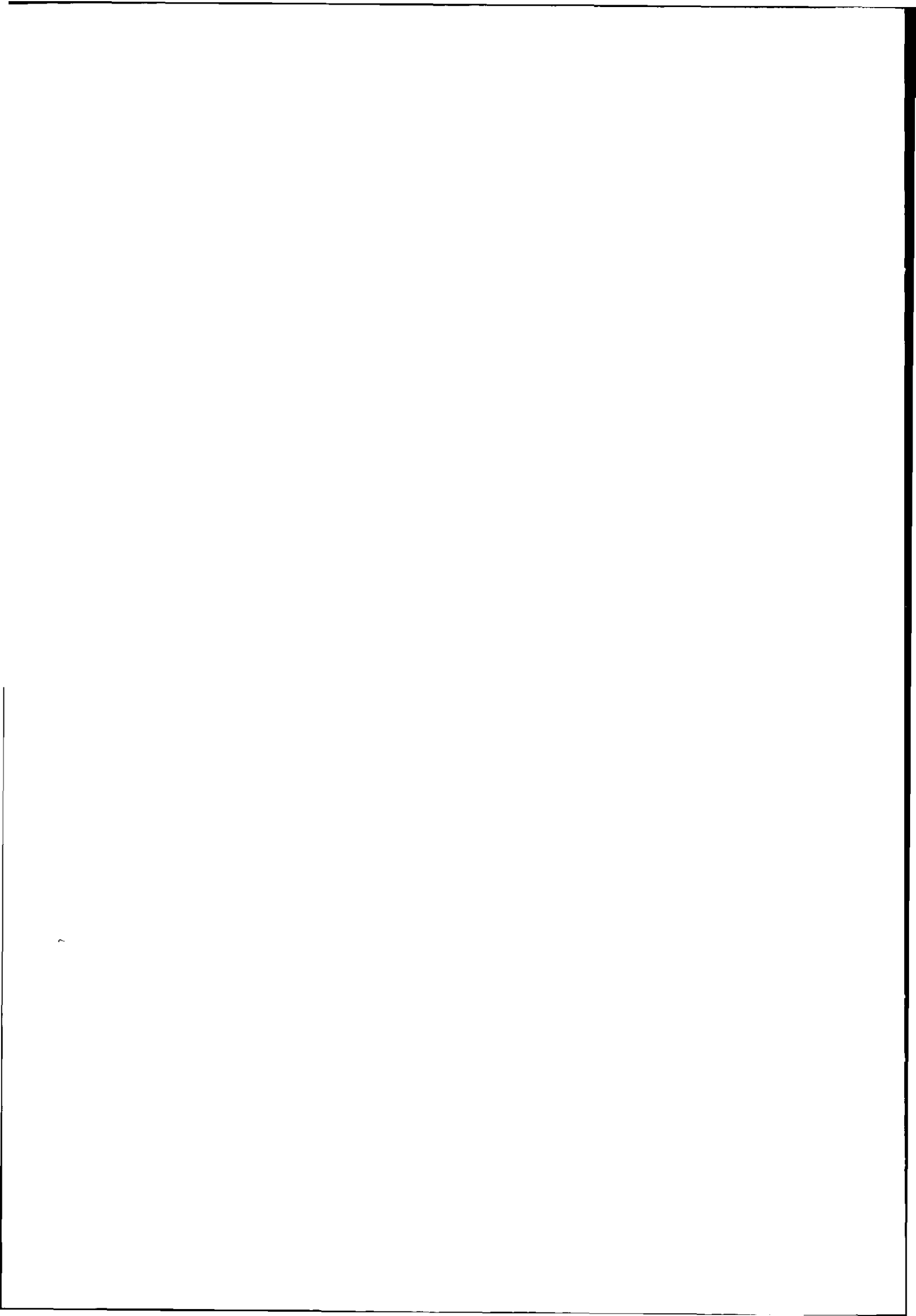
### (3) 並列コンピュータ

並列コンピュータは国内外で現在盛んに研究開発が進められており、また、商用化されている並列マシンも相当数存在する。商用化されたマシンでは、米国のベンチャ企業の製品が多い。各種の超並列処理を研究対象として並列コンピュータを利用するためには、並列コンピュータは少なくとも128プロセッサ以上を有するマシンであること、かつ、特定のアプリケーション専用でないことが必要である。このような視点から商用並列マシンとこれまでの試作のマシンも含めて選択の対象となり得るマシンをリストアップすると、現状では十数システムが存在する。この中には、要素プロセッサ数が数百～数万（ただし、理論的な上限と実際に利用可能な上限を区別して考える必要がある）、並列方式としてMIMD、SIMD、データフローなど、さらに相互結合網方式としてハイパキューブ、クロスバー、格子、トーラスなど、さまざまなマシンがある。

上記に述べたマシンが備えるべき条件からみると、1)の条件からは、並列方式はMIMDかデータフローが望ましいであろう。SIMDはアプリケーションを限定する恐れがある。結合網についてもアプリケーションとの関連が強いので、最終システムでの結合網トポロジを見通してテストベッドのマシンを選択する必要がある。2)の条件は現状ではなかなか困難である。プロセッサ数を最大構成にしようとするとう価格は数億円以上となり、とても安価とはいえない。ただし、プロセッサ数によって価格は大幅に変化するので、利用形態に応じてシステム構成と価格を適合させることが可能である。3)の条件については、現状のシステムでもワークステーション環境との融合については十分配慮されており、とくに問題はない。ただし、並列処理を引き出すようなソフトウェアは用意されていないのが普通であり、これらは自ら開発する必要がある。

以上、テストベッドとして利用可能なマシンについて検討したが、まとめると、各研究者には高性能ワークステーション、各分散研究機関に中～大規模の並列コンピュータを配置し、また、集中研究機関には大規模の並列コンピュータを複数台設置して、それらを高速ネットワーク

で接続したシステムがよいと思われる。各マシンはどこにあるのかをできる限り意識しないで利用できるシステムを構築することが望ましい。どのタイプの並列コンピュータを選択するかについては、先に述べたように最終システムのアーキテクチャに影響すると考えられるので、今後さらに慎重な検討が必要である。商用システムの中から採用するか、これまでの試作開発システムを商用化してそれを採用するか、初期の段階で早期に決定する必要がある。いずれにせよ、幅広く超並列処理の可能性と実現方式が探索できるようなシステムを選択する配慮が望まれる。



— 禁 無 斷 轉 載 —

平成 3 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 (3432) 5405 (代表)

印刷所 山陽株式会社  
東京都港区虎ノ門 1 丁目 9 番 5 号  
TEL (3591) 0240 (代表)

02-R 007





