

基盤情報通信研究連絡委員会

知能工学専門委員会報告

知能工学研究開発のビジョンと戦略

平成17年6月23日

日本学術会議

基盤情報通信研究連絡委員会知能工学専門委員会

この報告は、第 19 期日本学術会議基盤情報通信研究連絡委員会知能工学専門委員会の審議結果を取りまとめ発表するものである。

委員会等構成員リスト

第 19 期基盤情報通信研究連絡委員会知能工学専門委員会

委員長	石塚 満	(東京大学情報理工学系研究科教授)
幹事	新田 克己	(東京工業大学大学院総合理工学研究科教授)
委員	中島 秀之	(公立はこだて未来大学学長)
委員	西田 豊明	(京都大学情報学研究科教授)
委員	浅田 稔	(大阪大学工学系研究科教授)

会議開催記録

第 1 回研究連絡委員会及び第 1 回専門委員会	平成 15 年 10 月 22 日
第 2 回専門委員会	平成 16 年 6 月 15 日
第 3 回専門委員会	平成 16 年 9 月 22 日
第 4 回専門委員会	平成 16 年 11 月 15 日
基盤情報通信連絡委員会合同シンポジウム	平成 17 年 4 月 6 日

以下の方には資料提供、審議参加により協力を得た。

内田 俊一	((財)日本情報処理開発協会(JIPDEC))
國藤 進	(北陸先端科学技術大学院大学教授)
橋田 浩一	(産業技術総合研究所・情報技術部門副部門長)

また、ソフトウェア専門委員会(武市正人委員長、尾内理紀夫幹事)には、合同委員会での共同討議を通じて協力を得た。

要 旨

1．報告の名称

知能工学研究開発のビジョンと戦略

2．報告の内容

(1) 作成の背景

情報技術（IT）は 21 世紀の社会と産業の基盤となる重要分野の一つであり、このことは我が国の総合科学技術会議でも認識され、第 2 期（平成 13～15 年度）の科学技術基本計画において重点 4 分野の一つとして設定されてきた。このように我が国ではここ数年、この分野の研究開発を推進し、国際的な競争力を向上させるため、各種の新施策が採られてきている。情報技術で世界をリードしてきており、また、現在もリードしているのは米国であり、ゲームや組込みソフト等の一部を除き、我が国は特に基幹であるソフトウェア分野での優位性が低いと認識されている。新施策等により優位性の向上を期待したいところであるが、他国でも努力が始まっており、必ずしも楽観できる状態ではない。

米国では、情報技術分野における優位性を確保する重要性を早くから認識し、戦略的な施策が採られてきた。これに比べると我が国の対応は、戦略性の点で不十分な状態であり、特に中長期ビジョンを含めた大局的な戦略に関する議論が不十分であり、十分に定まっていまいと言えよう。米国の科学技術の研究開発には、軍事に関する部分もかなり含まれており、我が国は状況、条件が異なる部分があるものの、科学技術力の優位性は、総合力として発揮されることになるので、条件が異なる部分は他の方策で優位性を得るようにする必要がある。

人工知能あるいは知能情報処理は人間や社会の知能機能を参照し、情報科学技術のフロンティアを拓く役割を果たす研究分野であるが、情報処理・ネットワーク基盤と情報環境の進展により、それらの知能化、高度化を実現する技術として社会的、情報産業的にも影響が大になり、重要性が高まっている。

本報告では、このような知能工学の観点を中心にして、米国の IT 関連科学技術政策を参照し、我が国のこの分野の研究開発に関する中長期ビジョンと戦略についての見解を提示する。

(2) 現状及び問題点

情報技術（IT）は科学技術基本計画において重点 4 分野の一つに設定され、各種の施策や予算処置が採られてきている。それ以前の国の研究開発費の使い方の

具体的目標が希薄だったことの反省として、短期的目標を掲げて集中を図るのは一定の進歩である。しかし、この分野で世界をリードしている米国の IT 関連科学技術政策・戦略と比べると、目標の設定に際して、専門家を含めた議論が不十分であること、10～30 年先を展望して必要とされる基盤技術創造に対する配慮、中長期にわたる戦略性が不足している。中長期を展望し、我が国が情報技術 (IT) 分野で国際的に尊重され、力を発揮する位置を得るためには、上記の点を考慮する必要がある。

(3) 見解の内容

21 世紀の社会と産業の基盤として重要分野である情報技術 (IT)、特に、現在必ずしも国際的に優位ではないソフトウェア分野、知能工学分野を強化し、技術貿易時代に重要となるオリジナルで国際的に評価される技術を創出、育成する研究開発戦略として、以下の点への配慮を必要とする。

1) 今後の産業政策、研究開発投資におけるソフトウェアの重要性の認識

国の従来 of 産業政策、研究開発投資は、主に「もの」づくりの強化、高度化に重点が置かれてきたが、今後の「もの」づくりは、「もの」+「ソフトウェア」(より具体的には「もの」+「組み込みプロセッサ」+「ソフトウェア」)の形態が中心となり、ソフトウェアが「もの」の機能を高度化し発展させるキー要素となる。「もの」づくりで世界をリードする場合にも高度化したソフトウェア技術が必須となり、独自のソフトウェア技術なしにはものづくり自体も空洞化してしまう。研究者・技術者の能力に依存する割合が高いソフトウェア領域の研究開発においては、予算や雇用制度の仕組みの変革、リーダーシップの取れる目利きのできる専門家と国際的に通用するトップレベルの IT 技術者・研究者の人材育成などが重要である。

2) 中長期的ビジョンの下での国の IT 関連研究開発計画、長期を展望した基礎的な IT 中核技術の先行的創出・育成策

4, 5 年といった短期的な目標と並行して、10～30 年の中長期を展望し、基礎となる中核技術の創出、育成を図る必要がある。その目標設定のために、専門家の英知を結集した議論が必要である。基礎的な IT 中核技術の先行的開拓に関し、大学の役割強化も必要である。

本報告では、我が国のこのような研究開発政策の中長期目標設定のたたき台となる、知能工学の今後の展望と重要な視点に関する専門委員会での議論の内容を提示する。

目 次

第1章 序言	1
第2章 日米比較の観点からの IT 関連科学技術研究開発の中長期戦略	2
2.1 はじめに	2
2.2 米国の IT 関連科学技術の長期的戦略	2
2.3 IT 先端技術研究開発の資金及び人材面の構造	6
2.4 我が国の課題	8
第3章 知能工学研究のこれまでと今後のビジョン	9
3.1 知能工学技術の研究の歴史	9
3.2 知能工学技術の現状	11
3.3 知能工学技術のロードマップ	14
3.4 知能工学における文理融合の重要性	18
3.5 第3章のむすび	20
第4章 日本語に根ざした知能情報処理と知的情報基盤としてのセマンティックコンピューティング	21
4.1 はじめに	21
4.2 構成的情報学の必要性	22
4.3 日本語の視点の有用性	22
4.4 知識循環社会	24
4.5 意味構造とオントロジー	26
4.6 セマンティックオーサリング	26
4.7 第4章のむすび	32
第5章 今後の知能ロボット技術の目標としての認知発達ロボティクス	34
5.1 はじめに	34
5.2 認知発達ロボティクスとは？	34
5.3 認知発達ロボティクス設計論	36
5.4 第5章のむすび	36
第6章 知能工学研究開発の方向性のまとめと提言	38

第1章 序言

情報技術（IT）は、21世紀の社会と産業の基盤となる重要分野の一つであり、このことは我が国の総合科学技術会議でも認識され、第2期（平成13～15年度）の科学技術基本計画において重点4分野の一つとして設定されてきた。このように我が国ではここ数年、この分野の研究開発を推進し、国際的な競争力を向上させるため、各種の新施策が採られてきている。情報技術で世界をリードしてきており、また現在もリードしているのは米国であり、ゲームや組込みソフト等の一部を除き、我が国は特に基幹であるソフトウェア分野での優位性が低いと認識されている。新施策等により優位性の向上を期待したいのであるが、他国でも努力が始まっており、必ずしも楽観できる状態ではない。

人工知能あるいは知能情報処理は、人間や社会の知能機能を参照し、情報科学技術のフロンティアを拓く役割を果たす研究分野であるが、情報処理・ネットワーク基盤と情報環境の進展により、それらの知能化、高度化を実現する技術として社会的、情報産業的にも影響が大になり、重要性が高まっている。

本報告では、このような知能情報工学の観点を中心にして、まず米国のIT関連科学技術政策について見ることを通じて、我が国の政策には目標の設定に関して専門家を含めた議論が不足しており、10～30年先を展望した必要とされる基盤技術創造に対する配慮、中長期に渡る戦略性が不足していることを指摘する。

次いで、このような議論へ向けてのたたき台として、知能工学分野の展開を振り返り今後のビジョンを提示する。そして、今後の重要な視点の例として、1)社会基盤としてのセマンティックコンピューティング、2)認知発達ロボティクス、についての見解を述べる。1)は、情報流通、共有、創造の重要なインフラストラクチャに成長したWWW(Web)の次世代基盤にも関連する課題であり、英語を第一言語としない国にとっては自動翻訳の実用化を含んだ戦略的に重要な分野である。2)は、我が国が国際的にも優位な位置にあるロボット技術についての次世代技術に関するものである。もちろんこれら以外にも重要課題は存在するのであるが、今というタイミングを考えるとときにこれらの課題が緊急性を有していると考えて提示するものである。

第2章 日米比較の観点からの IT 関連科学技術研究開発の中長期戦略

2.1 はじめに

情報技術で世界をリードしてきており、また現在もリードしているのは米国である。我が国は、ゲームや組込みソフト等の一部を除き、特に基幹であるソフトウェア分野での優位性が低いと認識されている。

米国では、情報技術分野での優位性を確保する重要性を早くから認識し、戦略的な施策が採られてきた。これに比べると我が国の対応は、戦略性の点で不十分な状態であり、特に、中長期ビジョンを含めた大局的な戦略に関する議論が不十分であり、十分に定まっていないうえ。米国の科学技術の研究開発には、軍事に関する部分もかなり含まれており、我が国は、状況、条件が異なる部分があるものの、科学技術力の優位性は、総合力として発揮されることになるので、条件が異なる部分は他の方策で優位性を得るようにする必要がある。

ここでは、知能情報工学の観点を中心にして、米国の IT 関連科学技術政策について見ることを通じて、我が国の課題について考える。

2.2 米国の IT 関連科学技術の長期的戦略

1970 年代後半から 1980 年代にかけて低下した国際的技術競争力の向上を狙いとして、米国では 1980 年代に科学技術研究開発の次の戦略的政策が採られた。

プロパラント政策を中心とする法・制度の整備

- ・ 新たな特許分野（バイオメディカル特許，アルゴリズム特許，モデル特許）

「How To make」から「What to make」に範囲を拡大。

先行者有利の仕組みを作り出す。

ハードの製造（もの作り，EMS(Electronics Manufacturing Service)）

は高コスト社会では困難に。

- ・ 研究者への IPR(Intellectual Property Rights)取得のインセンティブ付与とその技術移転促進

1980 年の Steven-Wydlar 法（国予算プロジェクトの成果の企業への技術移転義務付け）や Bayh-Dole 法（国予算研究の IPR の大学等への付与）

長期研究開発分野への国の支援強化

国：長期的，基礎的分野 将来の産業の技術シーズ。

企業での国のプロジェクト成果の利用促進。

以下に具体的プログラムについて記すが、これらの長期的視野の戦略的研究投資により、米国は現在、技術貿易で一人勝ちの状態になっている。

(1) PITAC (President Information Tech. Advisory Committee) 報告

21世紀の国のビジョン、技術開発目標を示す(最終報告1999年2月)。IT関連製品生産高はGDPの1/3になっているが、IT産業の発展は過去20~30年間の国の基礎研究投資の成果(技術シーズ)を基にしたもので、過去の遺産を食い潰しつつある。一方、現状の国の投資は、長期的な研究開発より即効性のある短期的活動を優先し、将来に向けての技術シーズの積み増しが不十分と指摘した。

具体的には、2000~2004年度の5年間に\$4.7B(5,000億円)の追加支出により、長期的ハイリスクの研究を支援し、本来のIT産業のための技術シーズを蓄積することを提言。PITAC報告を受けてNSTC(国家科学技術会議)と担当省庁は、IT²(ITスクエア)と呼ばれる野心的な計画をまとめた。

(2) IT²構想(2000年)

21世紀の情報技術：米国の将来に対する大胆な投資であり、約60%は大学ベースの研究支援となり、先進IT技術者育成にも貢献している。

IT²の結果としての潜在ブレークスルーの具体例としては、以下のような項目が挙げられた。

- 1) 自然言語での対話を理解するコンピュータ
リアルタイムで正確に多言語翻訳 翻訳電話
- 2) インターネット上を動き回るインテリジェントエージェント
巨大なデータの海から必要な情報を収集、要約してくれる(知的処理、人工知能(AI))
- 3) 全世界の研究者がアクセスできるスーパーコンピュータ
シミュレーションによるコンピュータ試験管での科学的・工学的発見
- 4) 何千万のコンピュータだけでなく何億の機器を接続できるネットワーク(ユビキタス・コンピューティング)
- 5) 量子コンピュータのような根本的に異なる技術によるコンピュータ
(百年後(?)の夢のコンピュータ)
- 6) 高信頼、保守容易な複雑なソフトウェアを開発したり、通信、電力、金融市場等のインフラのコア要素をより高信頼化したりする新しい

手法

IT 構想を実現する上での 3 本柱として、以下の項目が挙げられた。

a) 基礎情報技術研究

- ソフトウェア工学, エンドユーザプログラミング, コンポーネントウェア
- マン・マシン・インタラクション, 情報管理, 自然言語会話, 音声認識
- スケーラブルな情報インフラ(超分散システム, ネットワーク, OS, 応用)
- ハイエンドコンピューティング(超並列システム, OS, 応用)

b) 科学・工学・国家のための先進コンピューティング

- 先進コンピュータインフラ(テラレベルコンピュータの提供)
- 先進の科学, 工学計算(気候変動, 遺伝子, 燃焼, 材料, 宇宙)
- イネープリングテクノロジー(アルゴリズム, ライブラリー, 可視化, 戦略)

c) 情報革命の論理的・経済的・社会的影響の研究, 情報技術者の育成

この IT² 構想はそれまでの計画をまとめた IT R&D 計画や, その延長である

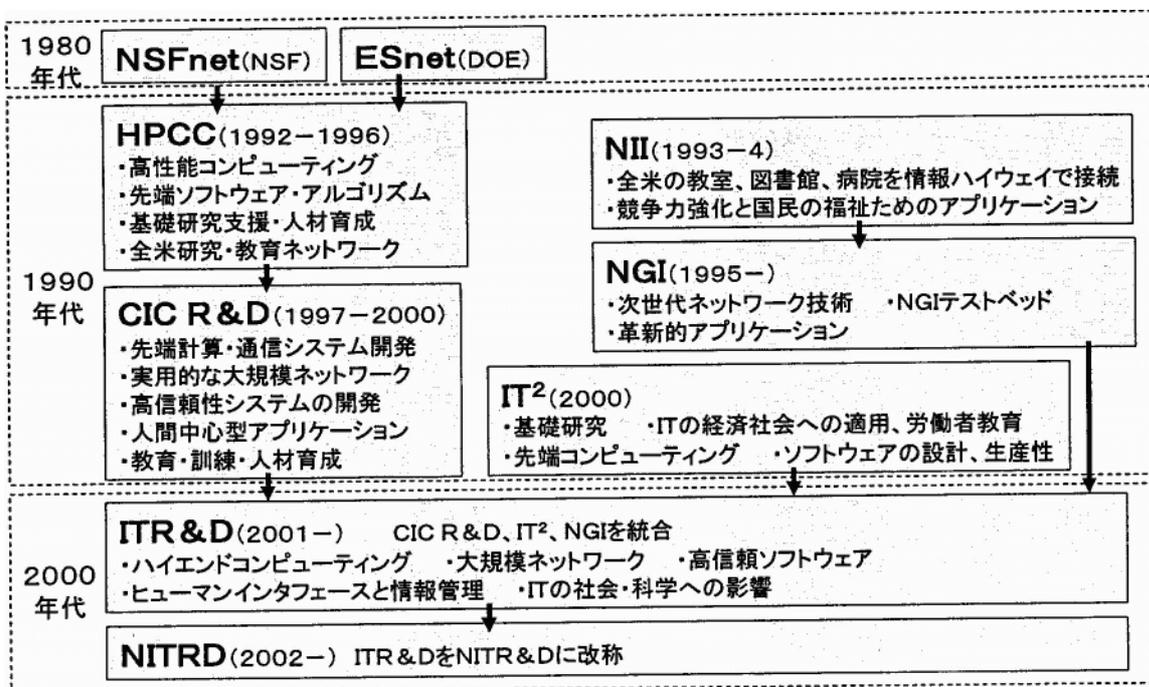


図 2-1 米国の IT 関連研究投資の年代に沿った概要

NITRD(Networking and IT R&D)計画においてもよく継承されている。

図 2-1 は、以上に述べた米国の IT 関連研究投資の概要を年代に沿って示している。日本の国の研究投資はスプリング方式の性格が見られるのに対し、米国では成果を挙げたプロジェクトを次に続け、強化していくといった面が強い。(例えば、電子図書館研究成果を電子政府につなげている等。日本の電子政府は、既存機能を電子版へ置き換えた保守的システムとなる傾向が大きく、実証システム開発段階はなく、新技術開発のチャンスは少ない。)

最近の米国 IT 分野の国の研究投資は、図 2-2 の分類で行われている。プラットフォーム、コンテンツ、インタフェースの中核要素技術を主なターゲットに置いており、また並列・分散アーキテクチャに土台を置く新しいソフトウェア工学の確立を狙っている。SDP(Software Design & Productivity)と Grid が新課題として追加されている。

図 2-3 は、概念が創出され、それが 10 億ドルビジネスに育つ経過において、技術が大学、企業、市場を行き来して成長する経緯を TSS(Time Sharing System)、グラフィックス、インターネット、RDB(Relational Database 関係データベース)、WWW、音声認識などの代表例について示したものである。これは 30 年スパンを要する成長であり、基礎技術はこのような時間レンジを展望して育成する必要があることを示唆している。

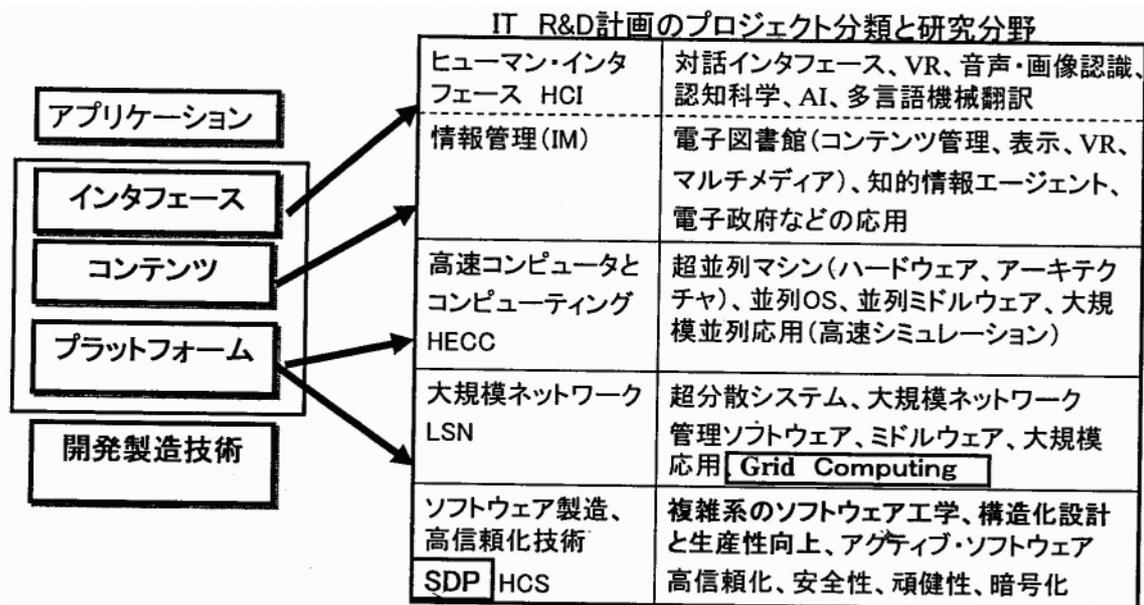


図 2-2 最近の米国 IT 分野の国の研究投資の分類

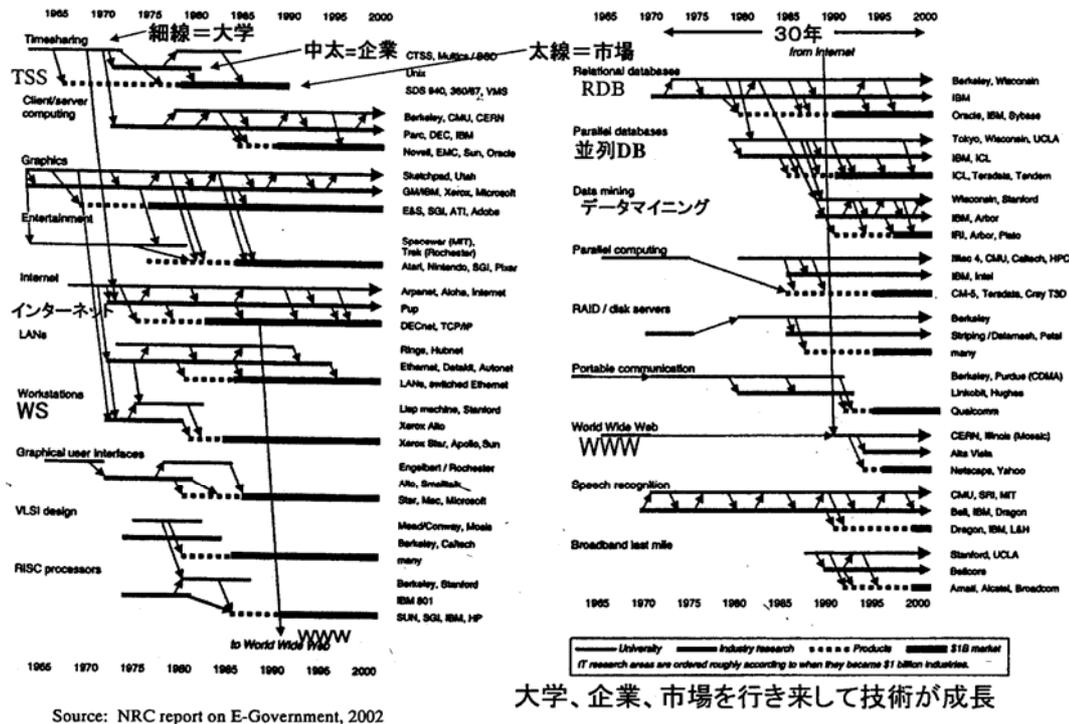


図 2-3 概念創出から 10 億ドルビジネスに育つ経過の例

(出典 : NRC report on E-Government (2002) , 以下 Web に図あり

<http://www.nap.edu/books/0309084016/html/90.html>

<http://www.nap.edu/books/0309084016/html/91.html>)

2.3 IT 先端技術研究開発の資金及び人材面の構造

日米の研究開発投資 (IT 以外も含む) のうち , 競争的資金の比較は表 2- 1 のとおりである。政府から企業への研究開発資金提供は , 米国は日本の 5 倍以上 , 政府から大学への研究開発資金は , 米国は日本の 10 倍以上になっている。(日本の道路関係投資額は , 1999 年で約 18 兆円と米国の約 6.6 兆円の約 3 倍が投じられている。)

表 2- 1 競争的資金の日米比較

	企業	国研等	大学	合計
米国	22,103	17,362	26,388	65,853
日本	4,218	14,545 (*)	2,773	21,536

単位 : 米国 MS , 日本 億円

(*) 非営利研究機関 , 特殊法人分 6738 億円を含む

(米国出典 : AAA Report XXV: Research and Development FY2001)

(日本出典 : H12 科学技術研究調査)

日本は、固定費（人件費，スペース代）が多くを占め，研究分野や技術の変化への迅速な対応が困難という点もある。ハードウェア偏重でソフトウェア分野への投資が少ない点も挙げられる。米国は，固定費（インフラ整備），競争的資金の双方が充実し，流動性も高い。

表 2-2 は日米の情報分野の研究者数を示している。米国は海外からの留学生も多数受け入れることによって，情報分野の研究者の量，質ともに世界で群を抜いている。このような豊富な IT 研究者層を背景とし，2.2 に述べたような政府の長期的視点も含めた研究開発戦略，及び先取的システム開発に取り組むベンチャ企業群を重要な要素とする流動的でダイナミックな産業構造の下で，IT 分野，特にソフトウェア分野で世界をリードし，一人勝ちとも言える状況になっている。今後の社会においては「もの」や生活・仕事空間の機能を高度化し発展させるソフトウェアの比重は高まるので，その強化は産業政策としても非常に重要である。ソフトウェア分野ではインドや中国が開発力を高めてくる環境の中で，国際的優位性を確保するためには，他で作られた基盤上の応用的ソフトウェア開発だけでは不十分であり，幾つかの領域で国際的に通用する先行的な基盤（プラットフォーム）を構築に貢献し，技術的及び産業的リーダーシップを取ることが不可欠である。それには先行的な新技術基盤の国際標準や国際的に通用するデファクト標準作りに，現在の何倍かの規模で取り組んでいく必要があり，背景として創造性ある豊富な研究者層の存在が不可欠である。

表 2-2 日米の情報分野の研究者数比較

		米国	日本	米国 / 日本
大学研究者数		27,000 人	2,600 人	10 倍
国研研究者数		30,000 人	1,000 人	30 倍
学位取得者数	修士	21,000 人	2,500 人	8 倍
	博士	2,500 人	350 人	7 倍

IT 分野の研究者層の増強，強化には，ソフトウェア分野の産業構造や大学教育の課題もあるが，国の科学技術政策の果たす役割も大きい。我が国は情報技術分野で，1980 年代には「第 5 世代コンピュータ・プロジェクト」，1990 年代には「リアルワールド・コンピューティング・プロジェクト」という先行的な大型研究プロジェクト（いずれも通産省による）が存在し，世界をリードする意気込みの大型研究が遂行され，研究者も育成された。その後，中小規模研究プロジェクトは多数あるものの，2002

年度以降は情報分野で未来指向の基盤構築を狙いとするこの主の戦略的大規模研究プロジェクトが途絶えていることが、企業研究所や国の研究機関から国際的影響力の大きい先行的技術創造力・発信力を低下させてきている懸念がある。議論により我が国なりの新たな中長期戦略を設定し、その下で先行的情報基盤創造の大規模研究プロジェクトを実施することが情報分野で我が国の地位を確保する上で必要とされ、それはまた国際的に通用する創造力を有する研究者育成、増強のためにも重要である。

2.4 我が国の課題

以上、米国の IT 関連研究開発政策を参照すると、我が国の課題は次のような事項が指摘できる。

1) 国の産業政策、研究開発投資における「もの」づくり中心からソフトウェア、IPR 重視への認識

国の従来 of 産業政策、研究開発投資は主に「もの」づくりの強化、高度化に重点が置かれてきたが、今後の「もの」づくりは、「もの」+「ソフトウェア」(より具体的には「もの」+「組み込みプロセッサ」+「ソフトウェア」)の形態が中心となり、ソフトウェアが「もの」の機能を高度化し発展させるキー要素となる。「もの」づくりで世界をリードする場合にも高度化したソフトウェア技術が必須となり、独自のソフトウェア技術なしにはものづくり自体も空洞化してしまう。この認識のもとで、研究者・技術者の能力に依存する割合が高いソフトウェア領域の研究開発推進に適合するように研究予算や雇用制度の仕組みを変革する必要がある。

2) 中長期的、基礎的な IT 中核技術の先行的研究開発と人材育成

我が国が IT 分野でオリジナルな技術を持ち、国際的な地位を獲得し技術貿易の時代を生き抜いていくために、専門家を含む十分な議論に基づき中長期目標と戦略を設定し、基盤的でオリジナルな IT 中核技術を創出していく必要がある。(競争原理の導入による)研究者の増員とリーダーシップの取れる目利きのできる専門家の育成、及び人の流動性を増し、新分野への取組を増すような仕組み作りを必要とする。基礎的な IT 中核技術の先行的開発とその牽引を支える国際的に通用する創造的人材の育成が重要である。

第3章 知能工学研究のこれまでと今後のビジョン

知能工学分野は、人工知能を軸に、ヒューマンインタフェース技術、ロボティクス技術、ネットワークコンピューティング技術が加わって複合的に発展した研究領域である。現在の知能工学技術は、基礎技術と方法論の確立、実用化のサイクルを終えて、一定の成熟期を迎えたと言える。今後の10年間は、隣接分野・応用分野と結びついた、複合技術の研究開発において、真価を発揮することが期待される。一方、知能工学技術のコアの部分はその究極の目標からみればいまだに未熟なものである。複合・応用技術開発と並行して、数年～10年かけて知能工学技術の基本部門の技術的な底上げをしなければ、次の開花につながらないだろう。ここでは、知能工学の研究の歴史を振り返り、今後を展望する。

3.1 知能工学技術の研究の歴史

知能工学技術の基軸となる人工知能の研究は、1956年に開催されたダートマス会議から本格化した。1970年代までに基本的なアイデアが出揃い、1980年代に成果の実用化の時代を迎えた。1990年代以降は、技術の深化と応用技術の広がりが進み、他分野との本格的な融合が始まった。

古典的な人工知能技術は、コンピュータを数値計算機としてではなく、記号処理機械としての性格を与えることにより、処理能力の限られた初期のコンピュータを有効に駆動して、探索・問題解決・学習を行うものであった。コンピュータ内部の記号処理系と外界を接続するためには、文法理論に基づく自然言語処理、古典的パターン認識理論を発展させた音声・画像認識システム、(ロボット等の)プランニング技術などが用いられた。

古典的な人工知能技術の成功した部門は次の6つである(図3-1)。

(1) 大規模な問題空間探索技術

この技術は、所与の問題を抽象化することによって構成される問題空間を知的に探索するアルゴリズムの設計と解析に関わるものである。1950年代から研究され、ゴールまでの情報を評価関数として用いる効率的探索手法であるA*アルゴリズム、ゲーム木探索におけるカットなど重要な成果が得られた。この技術の有効性は、1997年のチェスプログラムDeep Blueが世界チャンピオンKasparovに勝利したことに象徴される。

(2) エキスパートシステム

エキスパートシステムは、知識表現言語を使って明示的に記述された知識を記号的にシミュレートすることによって、人間の専門家レベルの問題解決を行うシステムで

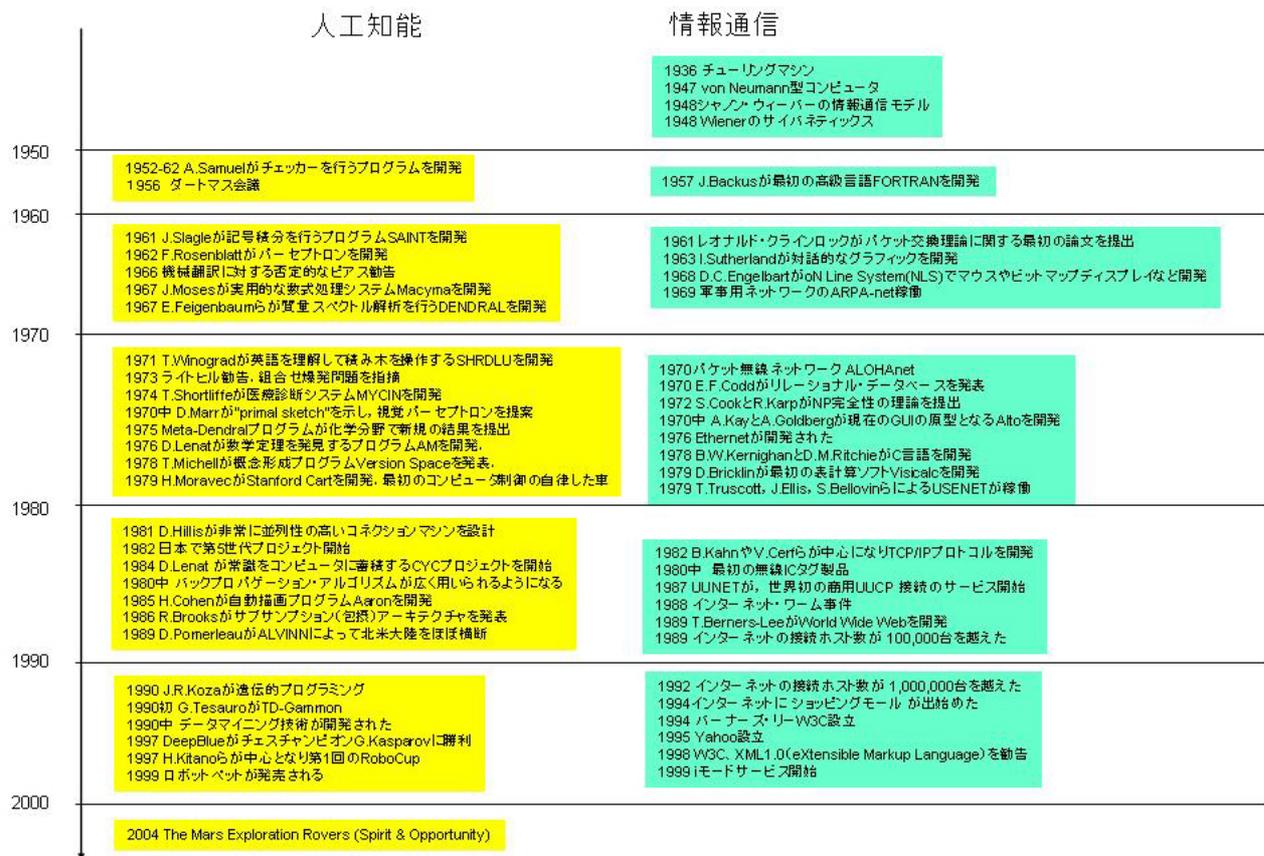


図 3-1. 人工知能研究の歴史 (人工知能学会作成のものを拡張)

ある。1960年代後半～70年代前半にプロトタイプが作られ、医療診断、スペクトル解析などでその有効性が実証された。1980年代以降にシステムとして実用化・普及した。この過程で、知識獲得のボトルネック(隘路)の問題、すなわち、人間のもつ幅広く、暗黙的な知識をコンピュータに移転することの本質的な困難さも明確になった。

(3) 言語・音声・画像処理技術

初期の言語処理技術は、理論言語学の手法をアルゴリズム化して、自然言語の構文・意味処理を行うものであった。その後、大規模な言語データや辞書に基づく統計的言語処理手法が主流になるとともに、形態素解析や構文解析などの言語処理用の基本ツールが無償配布され、自然言語処理用辞書も整備され、実用レベルに達した。

音声・画像処理は古典的なパターン認識理論のアルゴリズム化から出発した。動的プログラミング、ベクトル量子化とHMM(隠れマルコフモデル)、種々のニューラルネット学習アルゴリズム、SVM(Support Vector Machine)などが追加され、現在では、言語・音声・画像認識のためのソフトがコンポーネント化され、安価ないしは無料で配布されるに至っている。これらの技術は、まだ認識率やチューニングコストの点で

課題が残っているが、使用条件に一定の配慮をすることによって、十分実用のレベルに達している。

(4) プランニング技術

この技術は、未知の環境に置かれたロボットが所期の目標を達成するために、その環境に関して前もって与えられた知識と、行動によって得られる観測データに基づいて、行動計画をたてて、自律的に行動できるようにするためのものである。日本では、研究者人口はさほど増えなかったが、アメリカでは宇宙・軍事方面からの要請によって重点的に研究された。象徴的な成功例は、NASA・ジェット推進研究所(JPL)が開発し、2004年1月3日午後11時35分(米国東部時間)に火星地表面に着陸した火星探査車 Mars Exploration Rover「Spirit」(及び、遅れて着陸した Opportunity)である。

(5) データマイニング技術

データマイニング技術は、エキスパートシステムの知識獲得のボトルネック解決のために研究開発された機械学習技術に端を発する。顧客情報や遺伝子情報、医療データなど、大規模に蓄積されたデータから何らかの知識、規則性を発見して有効に活用したいというニーズと、機械学習やニューラルネットワーク、ラフ集合など、人工知能やソフトコンピューティングなどに関連するシーズとなる研究・技術の進展が結びついたものである。実用化・製品化され、ビジネスや大量のデータを抱える科学技術の領域で有効性が実証された。

(6) 人工アーティスト

「人工アーティスト」とは、作曲や描画など人間の芸術活動の人工知能モデルを作ってそれをシミュレーションすることによって芸術作品を創作するシステムを指す。Harold Cohen の AARON(「人工知能画家」)や David Cope の Experiments in Musical Intelligence(自動作曲プログラム)などが著名な事例である。

3.2 知能工学技術の現状

現在の知能工学技術は、基礎技術と方法論の確立、実用化のサイクルを終えて、一定の成熟期を迎えたと言える。今後の10年間は、隣接分野・応用分野と結びついた、複合技術の研究開発において、真価を発揮することが期待される。一方、知能工学技術は未熟である。複合・応用技術開発と並行して、数年~10年かけて知能工学技術の基本部門の技術的な底上げをしなければ、次の開花につながらないだろう。

現在、知能工学技術の複合化が最も顕著に進行している領域として、情報循環と知識創造、知能ロボティクス、芸術とエンタテインメントの3つをあげることができる(図3-2)。

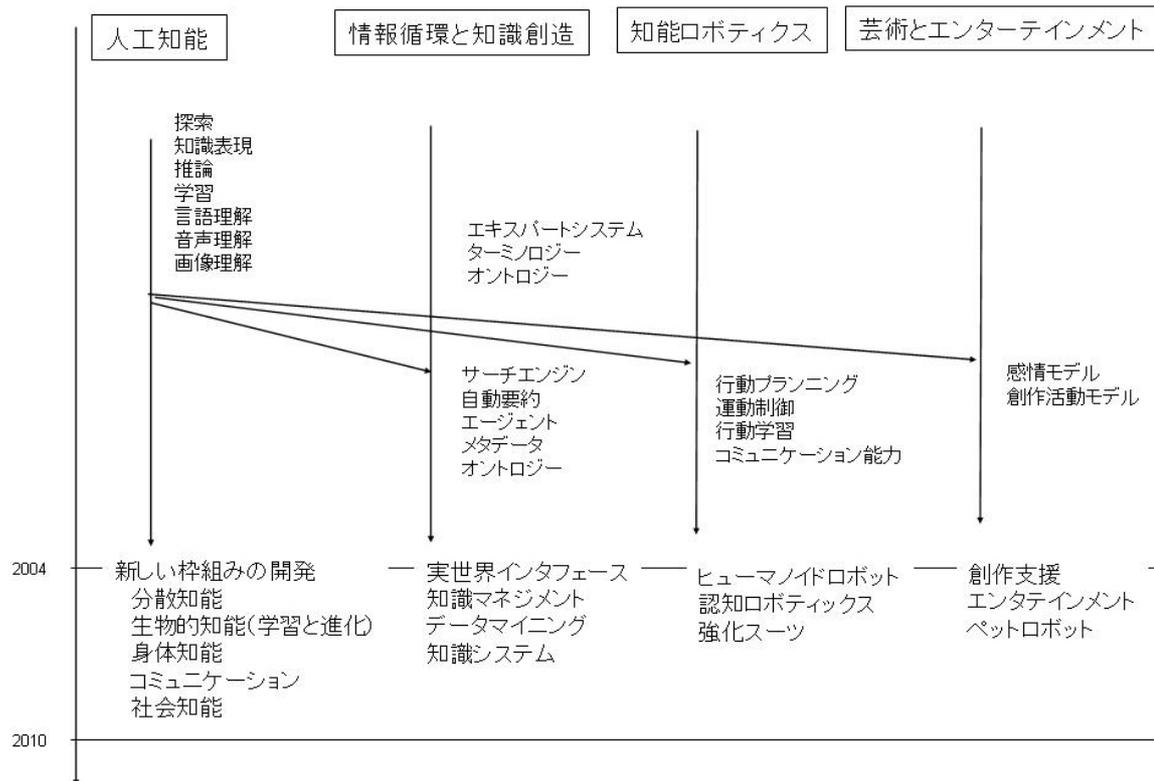


図 3-2. 現在の智能工学分野の動向

(1) 情報循環と知識創造

{インターネット, モバイル, ユビキタス}コンピューティングのインフラストラクチャを使って, 人間の日常生活において発生する多種多様なデジタル情報を収集・集積し, 智能工学技術によって新たな個人的価値, 企業価値を創出するプロセスを実現することをめざした取組である。従来の智能工学研究では, 知識獲得のボトルネックに対して有効な解決の手段を見出せないままであったが, 1990年代のインターネットとWWWの急速な発展によって利用可能になった膨大なデジタルデータを統計的手法の導入によって活用する手段が開発されて, 知識獲得ボトルネックの一部は解消されつつある。また, 膨大なデジタルデータの出現は, 言語・音声・画像処理研究者に, 内容検索・自動アノテーション・コンテンツ生成支援など多くの応用研究の課題をもたらした, 研究者の参画を促進した。一方, {インターネット, モバイル, ユビキタス}コンピューティングの方も, それによってもたらされる膨大な情報を活用して付加価値をつける必要があり, 智能工学技術の実用化を加速するニーズとなった。

(2) 知能ロボティクス

ロボティクスと人工知能研究は, 従来から隣接関係にあったが, それぞれの技術の未熟さから近年になるまで本格的な結びつきは起きていなかった。しかし, 2000年

前後にそれぞれの技術が一定の成熟期に近づき，両者の融合が進んだ。従来のロボット研究者が人間とロボットのインタラクションの研究に取り組むようになった一方で，高機能・高性能の研究用ヒューマノイドロボットが数百万円台で入手可能になって，知能工学研究者がロボット研究に取り組むようになった。

(3) 芸術とエンタテインメント

この領域は，いわゆる「論文を書きにくい領域」として，これまで知能工学の研究者からは敬遠されがちであったが，我が国では，従来の研究で醸成された感性情報処理の土壌，ゲームクリエイターという職種への若者の憧れ，日本はゲーム王国であるという自負，コンテンツ創造への関心の高まりなどから，研究開発が活発化している。我が国の研究者が中心になって 2002 年 5 月に幕張で開催した Entertainment Computing の国際ワークショップは，2003 年から ICEC(International Conference on Entertainment Computing) として，conference に昇格した。教育分野までも含んだコンテンツ市場の広がりとともに急速な発展が期待される。

(4) 限界

今日の知能工学技術は，手法及び方法論においてまだ未熟であり，克服すべきいくつか重要な課題が残されている。現在の水準を大きく超えて発展するためには，長期にわたる基礎研究が必要である。

第一の限界は，大量のデジタルデータが知能工学の限界を緩和したとは言え，まだ，現在の人工知能技術は，知識獲得のボトルネックを解決したわけではないことである。マニュアルのように明示的に記述された知識は一定のコストをかければ，知能工学技術，特にエキスパートシステムの手法を用いて，コンピュータによって実行可能にすることができるが，明示的に記述されていない知識の獲得については，まだ手探りの状態である。人間のように自律的に学習を行い，進化するシステムを実現するレベルには程遠い。

第二の限界は，知能そのものについての理解が十分に進んでいないことである。従来手法は，知能を問題空間における解の探索能力，パターン認識能力，運動制御能力に帰着できる領域では一定の有効性をもつ。しかし，人間の知能は単に問題解決能力だけから生まれるものではない。むしろ，知能のより重要な側面は，与えられた状況で新たな問題を発見し，意味を創造する能力である。この能力の根底にあるのは，行為者の価値観である。価値観は，文化と歴史に依存して暗黙的な側面が強いばかりでなく，経験によって動的に形成されていくものである。つまり，人間の知能は固定的なものではなく，自らの産出した思考に基づいて自己を維持し，発展する自己産出的なものである。これを，生命・社会・経済・文化・倫理・歴史側面まで視野に入れた上で定式化することはきわめて難しい。知能工学技術が発展するためには，並行した

知能のモデルと評価尺度の開発が不可欠であるが、この問題に関する研究が遅れている。

初期の知能工学研究は、素朴に人間のような高度の情報処理能力を持つコンピュータの実現を目指したボトムアップ的な取組が行われたが、そうしたアプローチは今日の社会情勢にはそぐわない。より明確に定義された研究目標と、精緻なロードマップを作成する時期に来ている。

3.3 知能工学技術のロードマップ

これからの知能工学技術で取り組むべき課題として、拡張された人間、スーパーインテリジェンス、人間社会を媒介する人工物、創造的行動を創発する人工物の4つを提案する。

(1) 拡張された人間

拡張された人間は、知能工学技術と知能ロボティクス技術をさらに融合させて、人間生活を物理的及び精神的に充実させる「認知的パワースーツ」を構築するものである(図 3-3)。この「認知的パワースーツ」は、人間の意思に基づいて、人間の肉体的機能を増強するとともに、情報ネットワークを通して獲得された情報を集約した個人行動の支援、及び、個人の行動から得た経験を蓄積して、個人及び集団の知識創造・自己実現に資するものである。倫理的な問題がクリアされれば、「認知的パワースーツ」の一部は人間の体内に埋め込まれてもよいであろう。

この技術が実現すると、健常者、障害者、高齢者の活動範囲が飛躍的に向上するだろう。例えば、

- 高齢者や障害者が登山をしたり、海中散歩したりする。
- 子供がさまざまなところに出かけて自己学習する。
- 8割は事前に防止できるといわれている子供の事故を現場で防止できる。
- 危険度が高く、知識と技能を要する仕事を行う。
- 経験者(熟達者)の身体知や能力を次の世代に伝える。

などが可能になる。これによって、社会における生産性と自己実現度が顕著に向上することが期待される。

知能処理技術と知能ロボティクス技術をさらに融合させて、人間生活を物理的および精神的に充実させる「パワースーツ」を構築する。

- 高齢者や障害者が登山をしたり、海中散歩する。
- 子供がさまざまなところに出かけて自己学習する。
- 8割は事前に防止できたとする子供の事故を防止できる。
- 危険度が高く、知識と技能を要する仕事を行う。

必要となる主なブレークスルー
•人間と人工物の意思疎通
•安全性の保証



図 3-3 認知的パワースーツ

この技術は、数年でパイロットモデルが構築され、2010 年を超えればコストダウンによって実用化の域に達することができるであろう。

この技術を実現するために求められる主たるブレークスルーは、人間と「認知的パワースーツ」の意思疎通と、安全性の保証である。知能技術は、人間の知覚・思考能力の増強に使われることになる。

現在開発されつつある「パワースーツ」は、人間の肉体面を直接的に制御するものであり、人間の意のままに操れることを理想としている。これに対して「認知的パワースーツ」は、人間の錯誤や悪意に基づくパワーの拡張をしないことを条件にした、後述の「人間社会を媒介する人工物」の側面を内包するものである。錯誤や悪意を規定すること自体大変困難であるが、倫理・社会面での知能工学の探求は、今後の知能工学研究において必ず視野に入れるべき課題であることを強く注記しておかねばならない。

(2) スーパーインテリジェンス

データマイニングや知識マネジメント技術を高度化することにより、世界のデジタル情報を結集して、人類の抱えている難問を解決できるようにする。また、国民の誰もが、安全で安心できるクリーンな情報を享受できるようにする。さらに、企業内の社員の意見や国民の意見をリアルタイムに集約して、意思決定に反映することができるようにする。ただし、この技術は社会の構成員が有している知識を結集して難問の解決を図るものであり、人類の誰もが解けない難問が解決できることを含意するものではない(図 3-4)。

データマイニングや知識マネジメント技術を高度化することにより、世界のデジタル情報を結集して、人類の抱えている難問を解決できるようにする。

- ・社会の構成員の意見の集約を必要とする問題解決の促進。
- ・品質保証された情報を提供する一安心できるクリーンな情報源
- ・テロなどの社会の脅威となる事態の予防

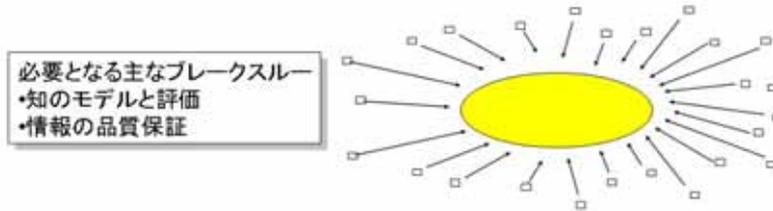


図 3-4 スーパーインテリジェンス

この技術が実現されると、

- 社会の意思決定のような大多数の意見の集約を必要とする問題解決の促進。
- 品質保証された情報を提供することによって社会に一定のレベルの安全と安心が保障される。
- テロなどの社会的脅威となる事態が予防される。

などの効果が期待される。

この技術を実現するために求められる主たるブレイクスルーは、情報の品質保証である。これは、玉石混交したデータ集合の法則性を見出すのではなく、玉だけを取り出すチャンス発見の技術が必要である。そのためには、一定規模の高品質知識体系を構築しなければならないだろう。

(3) 人間社会を媒介する人工物

人工物や生活環境に社会的な知能を持つチップを埋め込んで、協調行動させることにより社会の秩序と安全を保障する。この技術は、21 世紀において人間の生活を取り巻くようになる人工物に人間同士の協調的な行動や公平な交渉を可能にする機能を埋め込むことによって、人工物によって拡張される能力の乱用を防止する(図 3-5)。

この技術が実現されると、

- 製造者と消費者の意図の交換を可能にする電化製品（消費者は高度な機能を引き出せ、製造者は消費者のニーズを知る）
- 歩行者や他の自動車に気を配り、マナーがよく、安全な半自律走行自動車。
- 人の行動に合わせて形状を変える建物
- 非常時に人間の行動を誘導する乗り物
- 環境における違法行為を監視し、抑止する人工物

人工物に社会的な知能を持つチップを埋め込んで、協調行動させることにより社会の秩序と安全を保障する。

- 知のマーケット
- 製造者と消費者の意図の交換を可能にする電化製品
(消費者は高度な機能を引き出し、製造者は消費者のニーズを知る)
- 歩行者や他の自動車に気を配り、マナーがよく、安全な自動車
- 人の行動に合わせて形状を変える建物
- 非常時に人間の行動を誘導する乗り物。
- 法律が遵守されることが保障された人工物

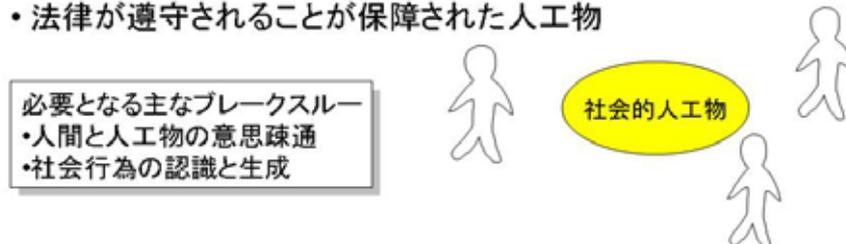


図 3-5 人間社会を媒介する人工物

など、人工物は単に利便性をもたらすだけでなく、社会をより安全で安心できるものに変えるための主要な手段になるだろう。

この技術を実現するために求められる主たるブレイクスルーは、人間と人工物の意思疎通を確立する技術と、人間と人工物の社会的行為を認識し、社会的な行動を生成する技術である。

(4) 創造的行動を創発する人工物

伝統芸能を始めとする幅広い範囲で、自律的に創造活動を創発する人工物を研究開発する(図 3-6)。これは、芸術家をコンピュータに置き換えることを意図したものではなく、むしろ伝統芸能の保存と伝承、新たな芸術の創出などを志向したものである。

この技術が実現されると、

- 伝統舞踊の継承
- 古代の生活の再現
- 人工アーティストとの競演
- 教育コンテンツのエンタテインメント化

など、生活に潤いを与え、豊かにする効果が期待される。

この技術を実現するために求められる主たるブレイクスルーは、感性・芸術的知能の解明とその評価尺度の開発である。

伝統芸能をはじめとする幅広い範囲で、自律的に創造活動を創発する。

- 伝統舞踊の継承。
- 古代の生活の再現。
- ロボットを交えた新しい舞踊作品。
- 教育コンテンツのエンタテインメント化



図 3-6 創造的活動を創発する人工物

3.4 知能工学における文理融合の重要性

上に示唆したように、知能工学は人間社会の精神的な側面まで深く浸透するものであり、20 世紀において展開された従来の文理融合とは異なるタイプの新しい文理融合が必要である。

(1) これまでの文理融合

ここ数十年にわたって展開されてきた従来の文理融合は、文系の学問の理系化であったといえることができる。例えば、従来盛んであった話題の一つに計算言語学があった。言語現象を記述的に調査する言語学が、数理的なモデルに基づく理論言語学に「進化」し、それが更にコンピュータによる統計処理を中心とした計量言語学や言語モデルのコンピュータシミュレーションを中心にした計算言語学に進歩したとされてきた。人工知能も、哲学の一つの流れが 20 世紀になって論理学から数理論理学に発展し、それをコンピュータによるシミュレーション可能な思考モデルに発展させたのが人工知能のルーツの一つであると言われた。このような文系の学問の理系化は経済学、教育学、心理学をはじめとして至るところで行なわれていた一世を風靡する潮流であると多くの人々が感じていた。

(2) 文系学問の理系化の飽和

ところが、ここ十年ほどの研究の流れを眺めてみると、このような文系学問の理系化の流れがあちこちで飽和してきたと感じられるようになってきた。

人工知能では、人間の知能の理解と人工システム化をめざしていたはずであるが、還元主義的なアプローチを取って問題をより単純な問題に還元することを繰り返す

た結果、もとの問題に興味をもつ研究者はほとんどいなくなり、多くの人が中間的に作り出され、細分化された小問題を分析的に解くことだけに興味を持つようになってしまった。換言すると、問題を分析的に解くことが研究の主流になり、全体を見渡して総合するアプローチはマイナーになってしまった。それは、知能システムデザインについて全体を俯瞰することの価値を下げたこと、他の分野に有用なビジョンやコンセプトを提言できなくなりつつある。

(3) 総合の欠如が引き起こす理系の苦悩

上に述べた人工知能の苦悩は、理系化した文系だけではなく、工学全般にも観察されるものであり、人間社会との密接な関わりが求められている現代の課題である。例えば、情報通信テクノロジーの場合は、アイデアをどう実現すればいいかというところは現在かなりよく分かるようになってきている。情報通信テクノロジーの黎明期は、コンピュータの高速化と大容量化、ソフトウェアの抽象化、コンピュータネットワークの高機能・高性能化など、誰が考えても明らかな目標やニーズはいくつもあり、いかにそれを実現するかが課題であった。インターネットにしても、通常の電話線を使った接続でよければ誰でもインターネットに接続できるようになったが、1970年代はそもそも誰にでもアクセスできる世界規模のコンピュータネットワークなどなかったのである。また、コンピュータを作ったり、その上でソフトウェア開発したりすることができる人は僅かしかいなかった。

情報通信基盤の構築が一段落した今、テクノロジーは一通り普及し、現在ではこれから何をつくらなければいけないか、それについて何を考えなければならないかという点については、従来の理系的発想だけで行ってきた人たちから重要なアイデアがなくなってきた。

人工知能でも、機械翻訳やパターン認識など、実現可能な問題と実現困難な問題の境界はだんだん明確になり、次の大きなブレークスルーをもたらす大きなビジョンが求められている。人工知能は、情報通信テクノロジーに付加価値を与える原動力になる技術として関心が高まっているにも関わらず、人間の思考や知能、あるいはその背後にある意味や社会の問題について根源的に問い直すことが行なわれなくなってきた。テクノロジーで実現可能な側面だけに視野を限定し、他を安易に切り捨ててしまったり、テクノロジーの意義を考え直したりしなくなってきた。

(4) 新しい文理融合 = 理系の文系化

最近の情報通信テクノロジーの中に一つの興味深い潮流を見ることができる。それは、人工ペットのように人間社会における人工システムの新しい位置づけを模索するものや、コミュニティ支援のように、情報通信テクノロジーの上に新しい意味の創出を目指して、双方向性のある（インタラクティブな）参加型の研究を進める方法論の

構築を進めるものである。今後こうした流れを大きくすることが望まれる。

知能工学においても問題解決能力の高度化を追求した従来のアプローチから，社会を形成したり，社会のなかで生活し，貢献するための知を実現したりするために，倫理・社会・芸術を融合した学術研究を展開し，基盤技術との融合を図らなければならないだろう。

3.5 第3章のむすび

知能工学技術の発展過程を概括し，大規模な解空間探索技術，エキスパートシステム，言語・音声・画像認識技術，プランニング技術，データマイニング技術，人工アーティストの6つが成功部門であることを指摘した。次に，知識処理分野における現在の動向が技術の複合化であることを指摘し，急速に発展しつつある領域として，情報循環と知識創造，知能ロボティクス，芸術とエンタテインメントをあげた。最後に，今後の有望な課題として，拡張された人間，スーパーインテリジェンス，人間社会を媒介する人工物，創造的行動を創発する人工物の4つを提案した。

第4章 日本語に根ざした知能情報技術と知的情報基盤としての セマンティックコンピューティング

4.1 はじめに

情報という概念は物質，エネルギーと並ぶ三世界観の一つである。情報処理には今後の新しい社会を構築する大きな可能性を秘めており，知能工学はその最も重要な一分野である。情報処理においては物理やエネルギーのような自然法則に支配される部分は少なく，むしろ数学のように人間の想像力次第で様々な新しいシステムが構築可能である。その際に必要となるのが分析的方法論に並ぶ構成的方法論である。それを考える上で日本語の視点が重要であることを述べる。

また，情報技術の発展により，インターネットで大量の知識を享受できる時代になった。知識を消費するのではなく，知識を蓄積し，皆で使える知識循環型社会を目指す必要がある。このためには，作成者と利用者が一致しているような知識ベースを構築することが必要であろう。従来の知識ベースは，作成者と利用者が区別されていることが多く，知識循環に要する経路が長かった。ここで言う知識循環とは，利用者が共有データベースから知識を取得するのみならず，そのデータベースに知識を提供することにより，利用者(=作成者)のコミュニティにおいて知識を流通させ拡大再生産することである。事業者や仲介者(政府や自治体や NPO など)のみならず一般の消費者・生活者を含む不特定多数の利用者が参画するような知識循環を促進することにより，経済，政治，文化，教育など，さまざまな側面にわたって社会の活性を高めることができるだろう。

そのような知識循環社会に向けて，知識の利用を情報技術で支援することが肝要である。そのための大きな枠組みとしてセマンティックコンピューティングを提示する。これには日本がイニシャティブをとるべきである様々な理由がある。

- ・ 英語が世界公用語として定着しつつある今，日本語利用が不利とならないような仕組みを考える必要がある。
- ・ 日本語にはセマンティックコンピューティングのための良い性質があるため，日本語をベースとして考えるほうが良い。
- ・ 情報処理システムの新しい使い方を考える上で日本的観点が重要である。
- ・ 次世代 WWW 基盤，及び知識循環・創造(第3章も参照)の観点から重要な技術となる。

4.2 構成的情報学の必要性

科学とは、対象を分析し、それを理解するための方法論である。特に自然現象を対象とする自然科学がその中心となり、対象を分析し、仮説を形成し、実験によってそれを検証するというループを回す。そのように考えたとき、計算機科学(computer science)という言い方は面白い。これは決して、計算機を対象とし、それを記述するための学問ではないし、計算機を道具として行う科学でもない(後者は計算科学と呼ばれている)。計算機を用いた情報処理を科学的方法論で遂行しようという決意表明であろう。

ところが、例えば数学は先に述べた意味での科学ではない。数学の世界は自然界に存在する(そう主張する人たちがいることは知っているが)のではなく、人間の頭脳の創造物である。創造物という言い方が強すぎれば、頭脳の働きなくして数学を語ることは無意味と言っても良い。非ユークリッド幾何に見られる公理的手法がその好例であろう。現実世界は、ユークリッド幾何の成立する世界であるが、それとは異なる世界を公理だけから構築することができる。それと同じ意味で情報を対象とする学問も科学ではない。情報は、人間(あるいは生物や機械でもよい)が読み取って操作することによりその意義が生じる。人間の扱うものという意味で、数学に近いものである。したがって、「数学」にならって「情報学」と呼ぶのが良いと考えられる。「情報学」は日本では様々な意味で使われているが、ここでは、「情報」を研究対象として扱う学問体系と定義する。計算機を使った研究がその中心に位置するが、それに限定はされない。

自然科学では、自然現象を分析することが目的となるが、情報学においては、情報を操作し、新たな情報を構築することが目的となる。したがって、情報学の方法論は構成的である。しかしながら、構成的学問体系というのは20世紀まではあまり認識されてこなかった。20世紀は物理学全盛の時代であったとすることができよう。これから構成的学問体系の手法を構築していく必要がある。第3章でも述べたように、総合的視点、文理融合の方法論が重要である。その際に日本語の視点が大変有用であることを次節で述べる。

4.3 日本語の視点の有用性

構成的学問体系を考える上で日本語における視点の概念が重要だと考えている。日本語と英語の視点の差に関しては、例えば金谷[4-1]が注目している。彼は、

- ・英語は神の視点
- ・日本語は虫の視点

から、それぞれ情景を記述していると主張している。金谷がその著書[4-1]において

NHK 教育テレビ「シリーズ日本語」で池上嘉彦が紹介した実験について触れている。川端康成の「雪国」は

(1) 国境の長いトンネルを抜けると雪国であった。

という文で始まるが、これを川端の翻訳を多く手掛けている翻訳家 E.G. Seidensticker が英訳した文は以下のとおりである。

(2) The train came out of the long tunnel into the snow country.

これらを読んだ人達に情景を絵にさせると、日本語(1)の場合は、汽車に乗っている乗客の視点から描いた絵になるのに対し、英語(2)の場合は、汽車の外から見た、汽車がトンネルから出てくる絵になるそうである。

上記は一例であるが、この差は言語のあらゆる側面に反映されている。視点による言語表現の違いは、"go"/"come"と「行く」/「来る」の使い方の差などにも端的に見られる。

(3) I am coming.

という表現は日本人には奇異に響くだろう。これは、話し手の視点から見たときに come (来る) を使うことが奇異なのであるが、神の視点から見れば、対象となる相手に向かって come という表現は何ら問題がない。

神(あるいはシステムを記述しようとしている理論家)の視点は、分析的自然科学には都合が良いものであるが、システムを構築しようとする立場からは少々不都合がある。効率の良いシステムを構築するには、状況依存性の利用が不可欠である。例えば、情報検索において状況を利用することによって検索効率が格段に向上する。インターネットでレストラン情報を検索することを考えてみよう。全国のレストランのデータがあったとして、そこから地域や料理タイプ、値段などによって検索対象を絞り込んでいくわけであるが、検索者の状況がシステムに理解できていれば、最初から適切な地域に絞りこんでくれることができる。全日本から関東更に東京へと絞り込む必要がない。ただし、この状況の利用はそう単純でもない。検索者の現在位置が分かればよいというわけではないからである。例えば、羽田空港で函館行きの便を待っている人が検索したら、品川のレストランではなく、函館のレストランを表示して欲しい。

日本語の視点に戻る。金谷が言うように、状況は神の視点からは使いにくい。状況に埋め込まれた虫の視点でこそ状況が使える。そして、先の例のように文が登場人物の視点から語られるだけではなく、日本語の構造そのものが状況依存性を表現しやすいものになっている。格助詞の利用により、状況からは明らかでない要素のみを明示すれば良いのが日本語の文法である。英語の場合は、語順により格を示す文法構造であるため、ある要素を除いてしまうことができない。特に、主語は必須である。そのため、形式主語の it などが登場するわけである。(1)では「汽車」が陽に示されてい

ないのに対し，(2)では主語として現れている点に注目する必要がある。汽車に乗っている虫の視点からは汽車を明示する必要がないが，上空から俯瞰する神の視点からは汽車を明示しないことには記述が始まらない。

4.4 知識循環社会

今後の社会設計として，「ユビキタス情報社会」がキーワードとなっている。ユビキタス情報サービスとは，あらゆる状況において「今すぐ，ここで，私に」有用な情報やサービスを提供することであるが，それには膨大かつ詳細なコンテンツが必要になる。それも，例えば「3丁目のそば屋の親子丼は肉がパサパサじゃなくて卵が半熟でおいしい」というように具体的で地域に根ざしたコンテンツが重要であり，そのようなコンテンツを大量に作成し，保守・拡張し続けるには，一般の利用者による知識の提供が必須であろう。そのコンテンツは，従来のような，出版社やマスメディアが一方的に発信してきたものとは異なり，図 4-1 に示すような知識循環型となる。

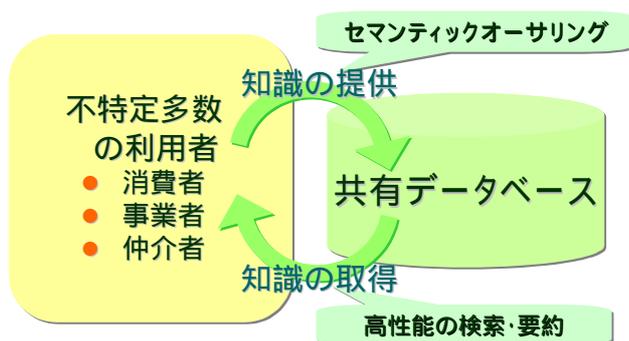


図 4-1 知識循環

知識循環型データベースを構築するには，最初のうちは少数の専門家による集中的な関与が必要であり，大きな初期投資を要することが多いだろう。しかし，その後の改良・拡張については不特定多数の利用者のコミュニティにおける知識循環に多くを委ねるほうが効率が良いと思われる。もちろん，コミュニティにおける相互評価と，自動処理による評価，及び専門家による評価を実際に比較検討することにより，各々の得失を明らかにする必要はある。だが，少数の専門家が最大限に働いて他の多数の利用者がそれを補うというよりも，なるべく多くの作業を多数の一般利用者に委ねて専門家はもっと高度な業務に専念するほうが効率が高いのではないか。共有データベースの内容が通常的生活情報である場合など，専門家と他の利用者との間の能力の差が小さい場合にはその傾向が顕著だろう。

4.5 意味構造とオントロジー

知識循環は、図 4-1 に示すように、利用者によるデータベースからの知識の取得、及びデータベースへの知識の提供からなる。これによって、取得した知識に基づく知識の再生産が更なる再生産をもたらすことが期待される。大規模な知識循環を可能にするには、不特定多数の利用者が、この知識の取得と提供とを高い効率で行なえる必要がある。それにはデータベースが意味的に構造化されている必要があり、また意味的な構造化によって知識の提供も効率が高まる。

図 4-2 は、命題内容(いわゆる 5W1H)を含む文章の意味構造を示す。この構造は、「意味構造」が「明示」の対象であり、「コンピュータ」が「処理」の道具であり、上の文で言われていることの例が下の文の内容である、等を表わす。文書等の情報コンテンツに含まれるこのような情報のほとんどについては、少なくとも現状では、それを体系化するオントロジーが存在しない。

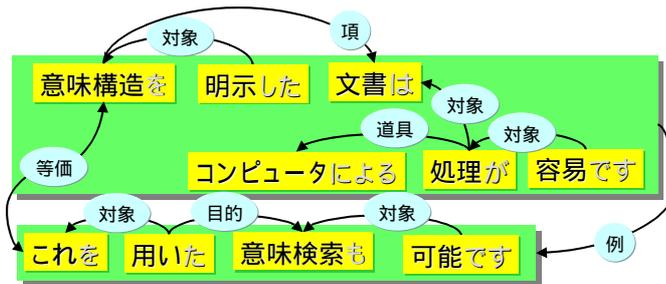


図 4-2 言語コンテンツの意味構造

意味構造をコンピュータが正確に把握できれば、検索、要約、翻訳などの情報サービスの精度が飛躍的に向上し、知識の取得が高い効率で行える。また、その意味構造が何らかのオントロジーに基づくものであれば情報サービスの品質はさらに高い。

例えば、文書の検索においては、オントロジーを用いず、精度が 60~70%程度の自動的な意味構造化を用いた場合ですら、意味構造を用いない場合と比較して、インタラクティブな検索の効率が 2 倍以上に向上することが分かっている。意味構造の精度が 100%近くになれば、この効率向上はさらに著しくなるだろう。オントロジーに基づく意味構造化がなされていれば、検索はもっと容易かつ効率的になり、場合によっては正解率も再現率も 100%に達する。同じ意味を持つ(同じ対象を指す)語句や文や映像が互いに明示的にリンクされていれば、検索の多くは単なるリンク辿りとなり、現状で検索にかかっているコストを大幅に削減できるはずである。ホワイトカラ

一の労働時間の大半が広い意味での検索に費やされていると考えられるが、これを低減させるだけで知的生産性を倍増させられる可能性もある。

さらに、前述の逆接関係などの修辞関係や共参照関係が明示されていれば、さまざまな観点ごとに一貫性のある要約が自動生成でき、利用者は自分の興味や予備知識に応じて効率的に知識を取得することができる。同じく、正確な意味構造を用いることにより、(流麗な自動翻訳はさしあたり無理だが)意味が正確に分かるような自動翻訳は現在の技術で十分に可能である。

4.6 セマンティックオーサリング

セマンティックオーサリングとは、意味構造に基づくコンテンツ作成である。意味構造化されたコンテンツの作成には通常の記事作成等よりも手間がかかるように思われるだろうが、実際にはその逆である。セマンティックオーサリングは、従来の記事作成よりも簡単な作業であり、しかも場合によってはより品質の高いコンテンツを作成することができる。セマンティックオーサリングには、オーサリングの具体的なテーマ(分野)に関するオントロジーに基づくものとそうでないものがある。

オントロジーに基づくセマンティックオーサリングは、オントロジーによってオーサリングを支援する技術である。例えば、介護に関するオントロジーがあれば、図4-3のようなオーサリング支援ができる。この例は、要介護者の家族が要介護者の日常生活に関する記録を残す作業において、(1)から(6)に至る手順に従ってオーサリングが行なわれる様子を示す。このような支援技術により、キーボードを使いこなせない情報弱者でもタッチパネル等(音声入力を併用してもよい)によって簡単に具体的な情報を詳細に入力することができる。

これまで、説明書、論文、契約書、仕様書、明細書などの文書が社会的なコミュニケーションにしばしば用いられてきた。しかし、図4-4に示すように、文章には主に二つの難点がある。第一に、人間が伝えたい内容を文章化する際に多くの情報が失われる。それゆえ、誤解が生じて内容が正しく伝わらないことが多い。また、失われた情報を復元するには多様な知識が必要だが、コンピュータはそのような知識を持たないので文章を正確に理解することができない。そのような不正確な理解に基づく検索、要約、翻訳等の精度も低い。第二に、提示の順序が定まった一次元の形にある。人間が伝えたい内容はもともとそのような順序を持たないので、文章作成の際には順序付けの余分な手間がかかる。良い文章を書くのが難しいのは、文章のこのような難点による。

そこで、そうした問題のない知的コンテンツをセマンティックオーサリングすることを考える。図 4-5 に示すように、このセマンティックオーサリングにおいては、従来の文章作成と違い、人間の伝えたい内容の論理構造等を素直に明示することができ、しかも順序付けの作業もないので簡単である。その結果できる粗粒度の知的コンテンツは、人間の伝えたい内容を文章よりも明示的に表現しているため、著者自身にも他人にも分かりやすく、誤解の恐れが小さい。またコンピュータにも高い精度で解析できるので、検索、要約、翻訳等の精度も高い。

粗粒度の知的コンテンツとは、例えば、図 4-6 に示すようなグラフ型のコンテンツである。グラフのノードは、文や句などの短いテキスト(図表や動画等のコンテンツでもよい)を含む。ノードの間を結ぶリンクは、「原因」や「対照」を含む修辞関係(文間の関係)等のラベルを持ち、ノード間の関係を示す。ノードの内部にノード(図の「頭痛」など)がある場合もある。破線は共参照関係を示す。このように、テキストが細切れになっており、また、共参照関係を示すために一部の語句の境界が明示されていれば、図 4-7 のように意味ネットワークの粒度での細かい意味構造を自動処理によって高い精度で求めることができ、それに基づいて検索、要約、翻訳、言い換えなどのサービスを高い品質で提供することが可能になる。

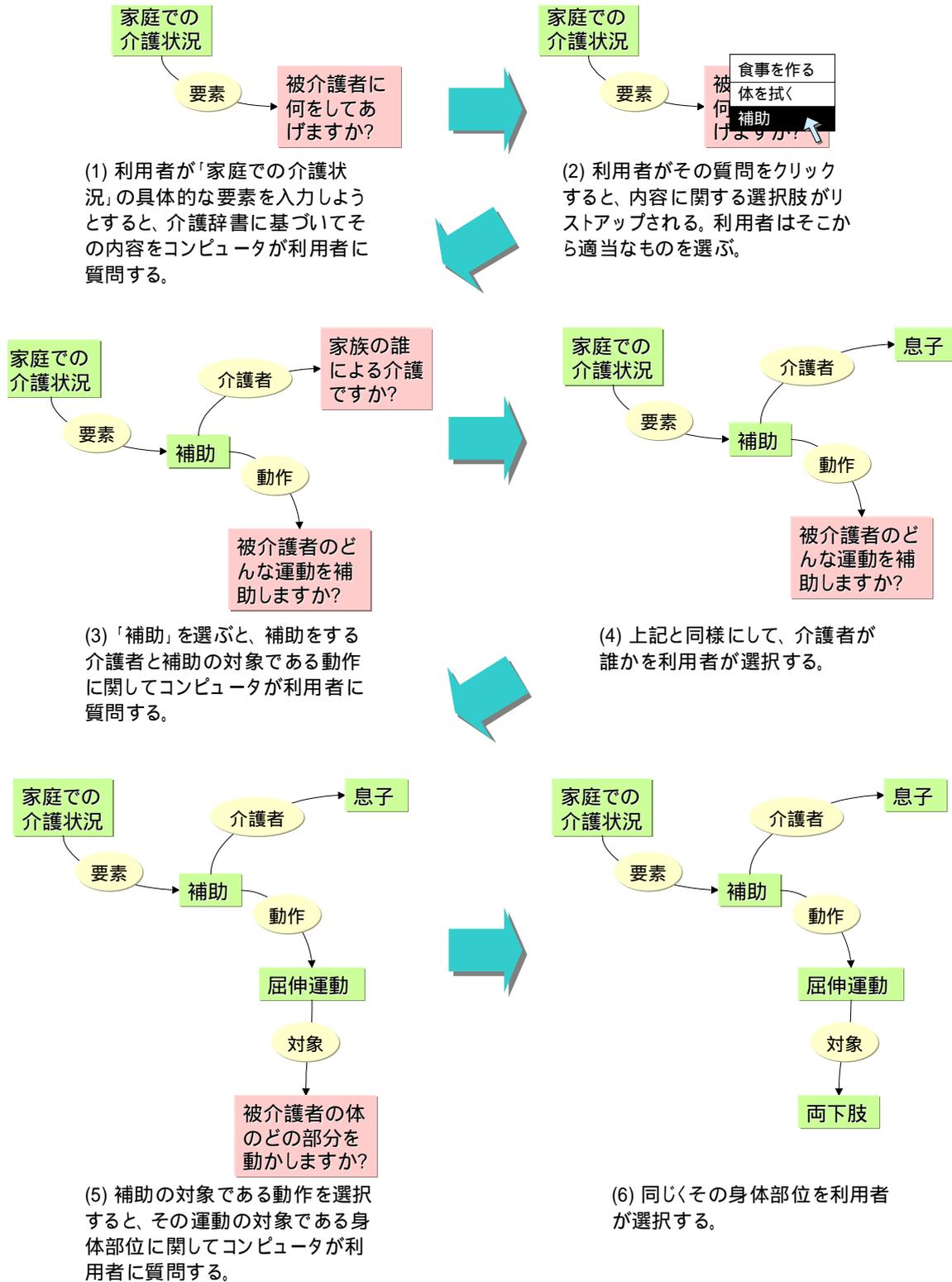


図 4-3 オントロジーに基づくセマンティックオーサリング

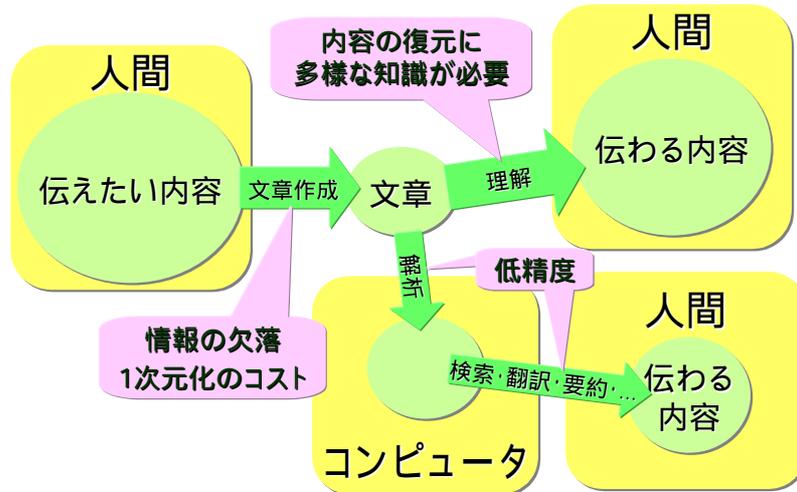


図 4-4 文書に基づく情報伝達

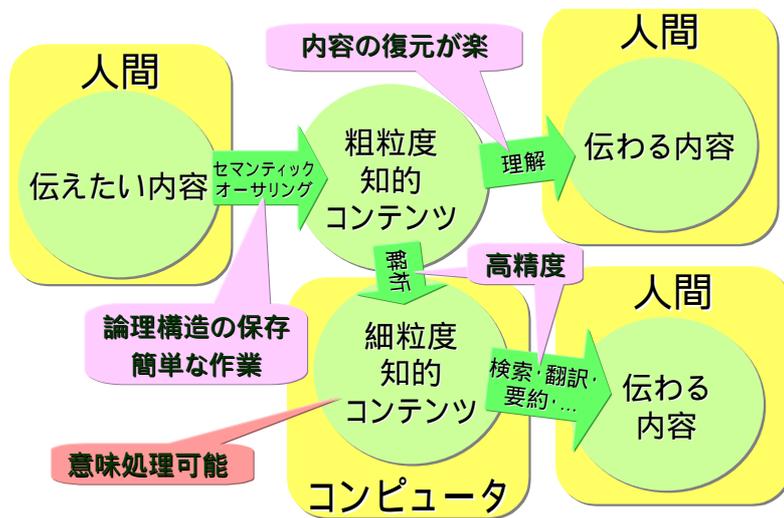


図 4-5 知的コンテンツに基づく情報伝達

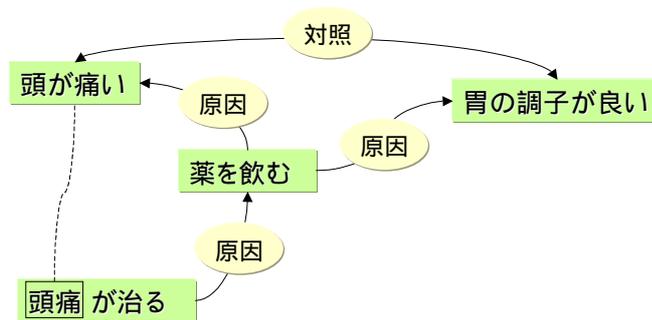


図 4-6 粗粒度の知的コンテンツ(1)

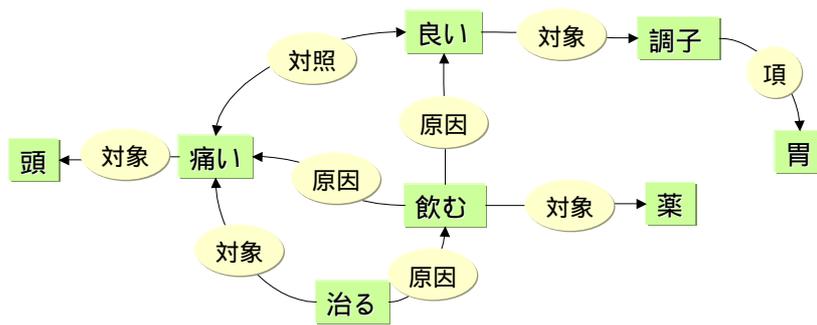


図 4-7 細粒度の知的コンテンツ

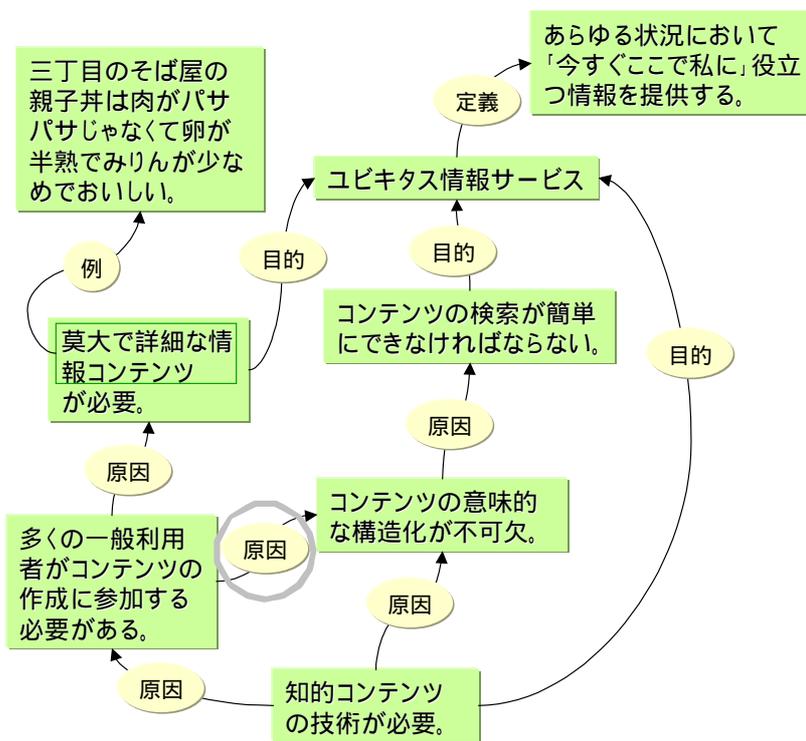


図 4-8 粗粒度の知的コンテンツ(2)

このセマンティックオーサリングでは、図 4-6 と図 4-8 に示すような発想支援ツール(idea processor)のインターフェースを用いる。このようなインターフェースは、文書の論理的な構成を視覚的に明示して扱うことにより、人間による理解とそれに基づく発想とを促進することがよく知られている。オーサリングのコストは、第一にコンテンツの内容そのものを考える際に生じるが、発想支援インターフェースはそのコストを大幅に軽減して発想を支援する。発想支援ツールを用いてグラフ型のコンテンツをまず作っておいてから、それに基づいて文章を作成した場合の方が、いきなり文章を書い

た場合よりも品質の高い文章ができることが明らかになっている。ここで文章の品質が良いとは、第一に重要な論点の見落としが少ない(視野が広がる)こと、第二に推論の連鎖が長い(考えが深まる)ことである。

しかし、これまでのところ、発想支援ツールはワードプロセッサ等に比べて著しく普及が限られていた。それは、グラフ型のコンテンツを作ってもそれに基づいて文章を作成するには更にはかなりの人手をかける必要があり、従来の文章作成よりも手間がかかるように思われるからであろう(実際には、ある程度複雑な内容の文章であれば全体としての手間は却って小さくなるのだが)。

この問題を解決するには次のようにすればよい。

- リンクの種類(「目的」や「原因」などの2項関係)を標準化することにより、文章で表現できることをすべてグラフ型コンテンツで表現可能とする(もちろん、さしあたり文章化の必要がなければ、その標準に含まれない種類のリンクを用いてもよい)。
- それにより、図 4-8 のようなグラフから図 4-9 のような文章を自動的に生成できるようにする。

ユビキタス情報サービスとは、あらゆる状況において「今すぐここで私に」役立つ情報を提供することである。

そのためには、たとえば「三丁目のそば屋の親子丼は肉がパサパサじゃなくて卵が半熟でみりんが少なめでおいしい。」のような、莫大で詳細な情報コンテンツが必要である。

また、ユビキタス情報サービスのためにはコンテンツの検索が簡単にできなければならないが、それにはコンテンツの意味的な構造化が不可欠である。

ゆえに、多くの一般利用者がコンテンツの作成に参加する必要がある。

したがって、ユビキタス情報サービスの実現には知的コンテンツの技術が必要である。

図 4-9 図 4-8 のコンテンツから自動生成された文章

両図を見比べれば分かるように、この文章生成は、グラフのノードを線状に並べ、「原因」などの関係を「したがって」などの接続詞や「ので」などの接続助詞で表わして文の間をつなぐという、比較的単純なテキスト処理であり、既存の技術で実現できる。これにより、グラフ型のコンテンツを楽に文章化することができ、従来の発想支援ツールの上記の難点が解消される。

このセマンティックオーサリングに基づく文章作成は、従来の文章作成よりも楽な作業である。図 4-8 において丸で囲んだ「原因」のリンクがない状態では、例えば図 4-10 のような文章が生成される。ここで利用者がこの「原因」の關係に気付いたとしよう。これは図 4-10 においては手書き曲線で示されるべき關係である。従来のワープロ等を使って、または手書きで文章を書いている場合、この「原因」の關係を反映するように図 4-10 の文章を改訂するのはかなり厄介な作業である。しかし、自動文章生成の機能があれば、この「原因」の關係を付加しても図 4-9 のような文章を一瞬で作ることができる。オーサリングの第二のコストは、表現したい内容を文章として線状化する際に生ずるが、この機能はそのコストを劇的に軽減する。

以上のように、このセマンティックオーサリングの技術を使えば、人手による意味構造化の手間を考慮してもなお、ワープロ等を使った場合よりも良い文章が簡単に作れる。したがって、既存の文書作成ツールに代わってこの技術を普及させることが可能だろう。そうなれば、意味的に構造化された言語コンテンツが日々大量に生産されることになる。

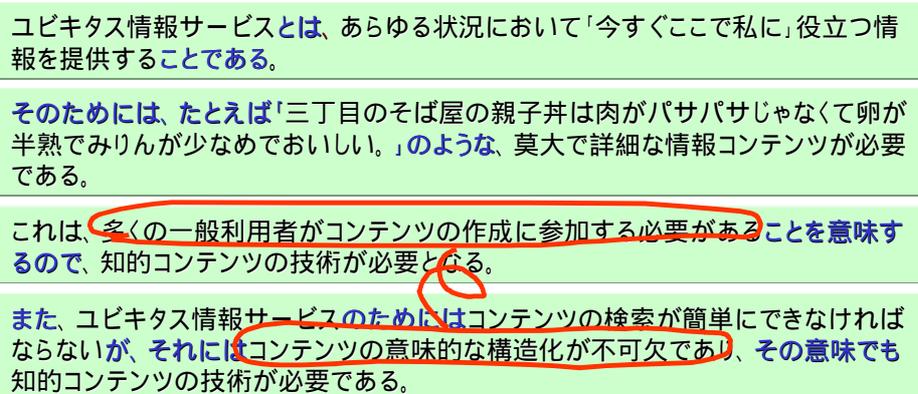


図 4-10 図 4-8 のコンテンツの一部に対応する文章(曲線は説明のための注釈)

4.7 第4章のむすび

情報という概念は物質、エネルギーと並ぶ三世界観の一つである。情報処理には今後の新しい社会を構築する大きな可能性を秘めており、知能工学はその最も重要な一分野である。情報処理においては、物理やエネルギーのような自然法則に支配される部分は少なく、むしろ数学のように人間の想像力次第で様々な新しいシステムが構築

可能である。その際に必要となるのが分析的方法論に並ぶ構成的方法論である。それを考える上で日本語の視点の重要性を述べた。

今後のユビキタス情報社会においてはコンテンツが重要となってくる。特に、知的生産物は自然言語で記述されることが多いため、ここでも日本語の適切な処理が鍵となる。

セマンティックコンピューティングは、社会全般における知的生産の様式を革新する可能性を持つ。さまざまな政治的・社会的課題にまつわる意見や知識に関する意味構造化されたデータベースを社会全体で共有しつつ構築し保守・拡張する共同作業を通じて、政策立案や合意形成を効率的に(つまり、事実と民意を正しく反映するように)行なう可能性も射程に入る。環境や感染症やテロリズムなど、年々複雑化し専門的な知識を必要とする課題を考えると、これまでの代議制民主主義よりもはるかに効率的に知識を共有し論点を吟味し再生産するための、このような知的情報インフラと、それに基づく知識循環型社会の構築が求められており、今後の日本の情報処理研究開発戦略において必須となるテーマと考えられる。

このセマンティックコンピューティング技術は、次世代 WWW 基盤としても重要であり、日本語に対する成果を各国語へ普遍させ、国際的貢献を果たすことができる新技術である。

第4章の参考文献

[4-1] 金谷武洋：英語にも主語はなかった，講談社選書メチエ（2004）

第5章 今後の知能ロボット技術の目標としての認知発達ロボティクス

5.1 はじめに

現状の知能情報技術の限界の一つは、シンボル操作の意味を現実世界の事象に關係付ける（グラウンドさせる）根拠をシステムに持たせることが困難な点にある。この課題を打破する一つの手法として、また日本が得意とするロボット技術を生かして、日本独自の新しい知能情報技術の創出を目指す「認知発達ロボティクス」についての見解を示す。

特にここでは、知能化技術の一つとして学習を取り上げ、人の学習過程を構成的に理解するには、その背景にある環境、タスク、相互作用のレベルに言及せざるを得ないことを述べる。特に、動物の行動学習レベルからヒト知能の特性であるシンボル学習に至る過程を見直すことにより、知覚・運動系のマッピングを内包しない限り、真のシンボル足りえず、このことが、擬似シンボルに閉じた操作の限界ではないかと考えられる。

以下では、最初に、認知発達ロボティクスの目的や手法の概要を示す。そして、上で述べた主張の二点（学習の捉え方及び擬似シンボル操作の限界）について議論する。次に、認知発達ロボティクスの設計論の中で、学習機能は、エージェントに埋め込まれた能力であるが、環境との相互作用の設計との関係が重要であることを示す。

5.2 認知発達ロボティクスとは？

認知発達ロボティクス[5-1]とは、従来、設計者が明示的にロボットの行動を規定してきたことに対し、環境との相互作用からロボットが自ら行動を学習し、それらを発達させていく過程に内包される抽象化、シンボル化を実現するためのロボット設計論である。認知ロボティクスの焦点は、自律エージェントが環境との相互作用を通して、世界をどのように表現し行動を獲得していくかといった、ロボットの認知発達過程にある。特に、環境因子として他のエージェントの行動が自分の行動をどのように規定していくかという過程の中に、ロボットが「自我」を見出していく道筋が解釈できるのではないかという期待がある。このように、環境との相互作用をベースとして、その時間的发展に焦点をあて、環境の設計問題を主に扱う研究分野が認知発達ロボティクスである。その基本的な考え方は、問題自体に対する理解の過程をロボット自身が、環境との相互作用を通じて経験することにより、様々な状況に対応可能なメカニズムを構成論的アプローチによって構築することである。

このような研究アプローチは、明らかに認知科学、発達心理、神経科学と深くかわり、それらの分野からの多くのヒントが必要である。しかし、その最も大きな差異

は、ロボットを用いるという点である。認知発達ロボティクスでは、人間のように高度な認知機能を備えたシステムの認知プロセスの原理を、ロボットを用いた仮説と検証の繰り返しによって実現する「構成論的アプローチ」によって探求する。すなわち、認知発達ロボティクスは認知科学と対比するなら、認知発達プロセスの原理を探るといって探求すべき問題は同じであっても、ロボットを基にした構成論的アプローチをとることから、認知科学を包括した、いわば認知工学を目指すものであると考える。

この意味を踏まえ、身体性の意味をいまいちど考えてみよう。身体性の本質は、物理的実体として限られた処理能力の範囲で、エージェントの多様な感覚情報と多自由度の運動能力の密な統合（[A]不可分性）に基づき、タスクや環境の複雑さに適応するために学習（[B]相互作用可能性）及びその経時的発展を可能（[C]発達可能性）にすることである。この意味では、時間的发展、すなわち発達の結果が、知的行動であることを期待するが、保証はない。つまり、内部構造をいくら作り込んでも、よい方向に変化（発達）すべき環境が与えられない限り、知能が発現するとはいえない。この意味で、外部環境の設計は重要である。このことは、上記の三点が、陽にはロボットの内部構造に関する要件を述べているように見えながら、同時に提示されるべき外部環境の条件を陰に示していることに注意しなければいけない。特に、知的行動をヒトのレベルまで求めるなら、ヒト以外の動物にも可能な連合学習から、人特有のシンボル生成／利用の記号学習、すなわち言語獲得に至る過程（言語創発）が、ロボットの内部構造と外部環境の多様かつ制約的相互作用の中に見いだされなければならない。

Deacon[5-2]が引用しているアメリカの哲学者 Pierce のレファレンス形式を参考にシンボルの意味を考える。すなわち、アイコン、インデックス、シンボルの階層構造である。この構造では、上位は下位を内包する形で定義され、シンボルがそれ自身では存在しえない。これを自律的学習エージェントがシンボル操作する過程に適用すると、アイコンやインデックスが、感覚・運動系の連合学習の帰結として得られるのに対し、シンボル学習は、それを内包した上での異なる学習形態として位置付けられる。そのため、シンボルは、下位の感覚運動系の連合学習を踏まえた抽象化過程を内包することでシンボル足りえる。また逆に、上位からの具象化過程も含まれ双方向の処理過程が自在になされることで、シンボルがグラウンドする可能性が見出される。すなわち、事象の理解のレベルを自らの経験事象（よって自身の感覚・運動系のマッピングを内包）に照らし合わせ、異なるコンテキストで再現なり、再利用できるための事象の構造化が可能になれば、未経験の状況や事象に適応できる可能性がある。適応できたとき、「シンボルのセマンティクスが創出された」ことに対応する。

この観点から、古典的人工知能のセンスでのシンボル操作は、シンボルに閉じてい

ると言う意味で、ここでいうセマンティクスを創出できない。このことが、シンボルグラウンディング問題を生じさせていると考えられる。フレーム問題もシンボルに閉じている時点で問題が無限後退する。フレーム問題の完全な解などありえないが、感覚・運動系の連合学習を内包することで、部分的な解決の可能性がありうる。セマンティクス創出は、身体性の最も際だった特徴の一つである。

5.3 認知発達ロボティクス設計論

認知発達ロボティクスの設計論は、内部構造と外部環境に分けて議論できるものではなく、両者が密にカップリングすることで初めて「発達」が可能になるが、便宜上、以下のように分けて考える。

内部構造設計：内部構造は、環境との相互作用をロボット内部に効率よく表現するためのメカニズムである。内部構造の基になるモジュールのレベルを、神経パルスの単位から機能分割された知覚や運動部までのどれに対応させるかで、外界との相互作用の結果、得られる情報の質もかなり異なるが、ロボット内部で新たに情報を生み出している点では共通である。機能分割されたモジュール単位での学習機構、すなわち、知覚から運動へのマッピングである強化学習などは、その代表例であろう。さらに、学習結果の時間的发展を可能にするメタ(高次)な機構も考慮されなければならない。

外部環境設計：ロボットの設計論は、内部構造に重きが置かれ、発現される行動が、相互作用する外的環境に強く影響されるにも関わらず、外部環境の設計に関しては、これまで明示的に議論されてこなかった。内部構造を設計されたロボットが学習・適応し、発達していくためには、それが可能な環境を設計する必要がある。ここでは、便宜的に環境設計のポイントとして、

- 1) 実環境/コンピュータシミュレーションなどの実験環境の空間的配置やその時間的变化、いわゆる学習スケジューリング。非明示的介入
- 2) 他者観測や教示者からの教示などによる他者の明示的介入を設ける。

5.4 第5章のむすび

本章では、認知発達ロボティクスの観点から、学習の課題を鳥瞰し、タスク、環境、相互作用のレベルからの議論の必要性、特に身体に根ざした感覚・運動系の連合の必要性を説いた。さらに、エージェントが自ら経験を生み出し、能動的な学習データの創出ならびに学習構造を変化させるような内部構造並びに環境構造として設計することで、知的エージェントの設計並びにヒトの学習・発達構造の理解につながらないかと考えている。國吉も解説[5-3]の中で表相主義(古典的人工知能や従来ロボティク

ス設計論に相当か?)と創発実体主義(認知発達ロボティクスの実体)の相互の関係を説明し、基盤が脆弱ながらも、後者の今後の進展に期待している。

サルの運動前野に発見されたミラーニューロンは、様々な意味で示唆に富む。他者の行為と自身の行為の同一性の同定は、基本的な理解の本質が、自らの身体で再現できる点にあるという考えだ[5-4]。子供が大人の会話を理解できるのは、自らが理解可能な言葉を発見し、つなげることから始まるように、ロボットの場合も少しずつ、自らの行動レパートリーなり、認識パターンを増やすことで、行為や事象が理解でき、それらを汎化することで理解が深まる。

第5章の参考文献

- [5-1] Minoru Asada, Karl F. MacDorman, Hiroshi Ishiguro and Yasuo Kuniyoshi: Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots, *Robotics and Autonomous System*, Vol.37, pp.185-193, 2001
- [5-2] Terrence W. Deacon: *The Symbolic Species: The co-evolution of language and the brain*, W. W. Norton & Company, New York, London, 1998
- [5-3] 國吉康夫: ロボットの知能 - 創発実体主義の挑戦 - , *計測と制御*, Vol.42, No.6, pp.497-503, 2003
- [5-4] G. Rizzolatti and M. A. Arbib: Language within our grasp, *Trends Neuroscience*, Vol.21, pp.188-194, 1998

第6章 知能工学研究開発の方向性のまとめと提言

21世紀の社会と産業の基盤として重要分野である情報技術(IT),特に我が国が現在必ずしも国際的に優位ではないソフトウェア分野,知能工学分野を強化し,技術貿易時代に重要となるオリジナルで国際的に評価される技術を創出,育成する研究開発戦略として,以下の点への配慮を必要とする。

1) 今後の産業政策,研究開発投資におけるソフトウェア技術の重要性の認識

国の従来の産業政策,研究開発投資は主に「もの」づくりの強化,高度化に重点が置かれてきたが,今後の「もの」づくりは,「もの」+「ソフトウェア」(より具体的には「もの」+「組み込みプロセッサ」+「ソフトウェア」)の形態が中心となり,ソフトウェアが「もの」の機能を高度化し発展させるキー要素となる。「もの」づくりで世界をリードする場合にも高度化したソフトウェア技術が必須となり,独自のソフトウェア技術なしにはものづくり自体も空洞化してしまう。研究者・技術者の能力に依存する割合が高いソフトウェア領域の研究開発においては,予算や雇用制度の仕組みの変革,リーダーシップの取れる目利きのできる専門家と国際的に通用するトップレベルのIT技術者・研究者の人材育成などが必要である。

2) 中長期的ビジョンの下での国のIT関連研究開発計画,長期を展望した基礎的なIT中核技術の先行的創出・育成策

4,5年といった短期的な目標と並行して,10~30年の中長期を展望して,基礎となる中核技術の創出,育成を図る必要がある。その目標設定のために,専門家の英知を結集した議論が重要である。基礎的なIT中核技術の先行的開拓に関し,大学の役割強化も重要である。

本報告では,我が国のこのような研究開発政策の中長期目標と戦略設定のたたき台となる,知能工学の今後の展望と重要な視点に関する専門委員会での以下のような議論の内容を提示した。

まず第2章では,ITは我が国の最近の科学技術基本計画重点4分野の一つに設定され,この分野の研究開発推進が図られているものの,IT分野で世界をリードしている米国におけるこれまでのIT関連科学技術政策を見ることを通じて,我が国がIT分野で国際的優位性を得るために不足している政策上の観点を指摘した。次いで,第3章では知能工学分野の中長期目標を設定する上で必要となる,この分野のこれまで

の展開と今後のビジョンについて、我々の見解を提示した。そして、我が国が国際的独自性を発揮できる重要な領域の例として、第4章で日本語に根ざした知能情報処理と知的情報基盤としてのセマンティックコンピューティング、第5章で認知発達ロボティクスを取り上げ、我々の見解を提示した。