

TM-0941

制約と認知のモジュラリティ

橋田 浩一

July, 1990

© 1990, ICOT

ICOT

Mita Kokusai Bldg. 21F
4-28 Mita 1-Chome
Minato-ku Tokyo 108 Japan

(03)3456-3191~5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

制約と認知のモジュラリティ*

橋田 浩一

新世代コンピュータ技術開発機構 (ICOT) 第3研究室
〒108 東京都港区三田 1-4-28 三田国際ビルディング 21 階
Tel: 03-456-3069, E-mail: hasida@icot.or.jp

概要

認知の情報処理においては、どの情報がさしあたって参照可能であるかを前以て限定できないので、様々な文脈における情報の流れは、全体として非モジュール的な構造を持つ。このことから、認知過程のモジュール的なモデルを構成するには、情報の流れを捨象した制約のレベルでの記述が必要となる。また、処理が部分的にしか行なわれないため、その制約は単一の形式的体系によっては記述できず、多層の理論が必要となる。認知システム全体は、多様な情報の流れの経路ができるように複数の制約のモジュールを組合せることによって構成される。

1 はじめに

認知科学において、制約 (constraint) という用語は、以下の2つの性質を持つような規則、という意味で使われている。

- (あ) 可能性の範囲を制限する。
- (い) 厳密でなく蓋然的である。

本稿は、情報処理モデルの観点から制約について論ずる。その観点から、以下では制約を次の2つの性質を持つ「プログラム」として捉える。

- (ア) 情報の多様な流れを許容する。
 - (イ) 単一の形式的体系としては実際上記述できない。
- (ア) と (イ) はそれぞれ (あ) と (い) に対応する。

可能性を排除するという「制約」の日常用語としての意味が (あ) にはあるが、(ア) ではこの側面が捨象されている。つまり、以下で述べる制約とは、必ずしも可能性を排除するものではなく、可能性の全体 (たとえば、文法的な発話の集合) を構成し、様々な可能性に優先度 (たとえば、文の許容度) を付与するものである。(ア) は、(あ) では明白に表現されていない別の側面を抽出したものであり、制約とは手続きと対立するものだということを意味する。即ち、手続きが情報の流れを明示する (従って、限定する) プログラムであるのに対し、制約は情報の流れを明示しないプログラムである。ただし、情報の流れを明示しないということは、情報の流れを全く規定しないということではない。上記の可能性の優先度は、第1義的には処理の優先度であり、いわゆる手続きとは、以下で論ずる制約の近似である。つまり制約は、情報の流れを必要に応じて規定するプログラムであり、手続きを真に含む一般的なプログラムのクラスを構成する。従って、以下で考える制約は、宣言的 / 明示的知識と手続き的 / 暗黙的知識の両方を含む¹。一方 (イ) は、たとえば記号論理のような数学的に厳密な理論によって制約を形式的に記述し尽くすことは、理

*本稿は、岩波書店『科学』vol. 10, no. 7, 1990 に所収の「認知科学における制約概念」を増補・改訂したものであり、日本認知科学会「学習と対話」研究会第9回研究会 (於 京大会館、1990年7月9日) で発表された。

¹Winograd も指摘するように、宣言的 / 明示的ということと手続き的 / 暗黙的ということは必ずしも対立する概念ではない [15]。

論上は可能でも実際には不可能だということであり、これはいわゆる客観主義的形而上学の否定である。(イ)のような直観は、多くの認知科学 / 人工知能研究者の共有する所であろう。

このようにわれわれは、認知過程における情報処理を定式化するための普遍的な道具として制約を捉える。以下ではまず、認知の情報処理モデルにおける「プログラム」が(ア)のような性質を持つべきことを示す。次に、(イ)が満たされるべきことを述べ、その上で、認知の情報処理モデルが全体としていかなる構造を持つべきかについて論ずる。その際、モデルの持つべきモジュラリティ(modularity)に注目する。われわれは、認知の情報処理システムは複数の制約のモジュールから構成されると考えるが、それらのモジュールがChomskyの言うように生得的(innate)であるという主張にはコミットしない。われわれの主張は、それらのモジュールが、手続きのモジュールではなくて制約のモジュールであり、多様な情報の流れを許容するような形で相互に結合されている、ということである。

こうした問題を考える上での手掛りとして、情報の部分性(partiality of information) [4] という概念を用いる。認知主体の行為の決定に関与し得る情報の範囲を限定することはできない。しかも、認知主体の情報処理能力は厳しく限定されており、自らの生存や行為に関与する情報を完全に処理することは実際問題として不可能である。即ち、認知主体は情報の部分性に直面することになる。

一見したところ、情報の部分性には次のような2つの側面があるように思われる。第1は、情報が部分的にしか与えられていないということであり、これを記述の部分性と呼ぼう。第2は、与えられた情報が部分的にしか処理されないということであり、これを処理の部分性と呼ぶ。たとえば、明日の天気がわからないとか、ものを知らなくて恥をかくとかいうのは記述の部分性のゆえである。一方、将棋のルールを知っていても必勝手順がわかるわけではない、とか、ある数学の公理系の公理を全て知っていても、ある命題を与えられたときに、それがその体系における定理かどうか実際にわかるとは限らないとかいうのは処理の部分性のためと言える。また、信念が誤っていたり、情報処理の過程で間違いを犯したりするのも、それぞれ記述の部分性および処理の部分性の一環である。ただし、後述するように、記述の部分性と処理の部分性とを明確に区別することは実際には不可能である。ものを知らないのは知る努力を怠ったせいかも知れないし、または勉強する暇がなかったせいかも知れない。

情報の部分性というのは自明の理である。しかし、自明の理から導かれる結論が全て自明とは限らない、ということもまた自明の理(つまり処理の部分性)である。実際、特に処理の部分性は科学理論において正しく考慮されていないことが多い。たとえば、エントロピーに基づくいわゆる情報量という概念は、処理の部分性を反映していない。以下において明らかにするように、認知科学の領域における複雑性は、情報の部分性に由来する所が大きく、認知科学における説明原理、即ち人工知能における設計原理は、情報の部分性に対処し得るものでなくてはならない。

2 情報の流れ

機械には人間と同様の知能が持てない、という認知科学(または人工知能)不可能論の多くは、人間の尊厳や神の摂理に対する冒瀆という思考停止に基づくものである。考慮するに値する不可能論は全て、人間の情報処理の複雑性を指摘し、そのような複雑なシステムを人工物として設計することの不可能性を主張する。たとえばFodor [3] は、人間の認知システムのうちの中央系(central system)における情報処理は、等方的(isotropic)かつクワイン的(Quincian)であると言う。ここで中央系とは、さまざまな入力系からの情報を統合し、一般的な推論によって信念の生成・確定などの操作を行なうシステムである。等方的であるとは、あらゆる知識が信念の確定に関与し得るということであり、クワイン的であるとは、あらゆる知識が信念の確信度に関与し得るということである。Fodorは、そのような包括的な性質を持つ情報処理過程を科学理論によって解明することは不可能であると説く。

確かに、認知科学における複雑性は、多くの科学や工学がこれまで相手にしてきた複雑性とは別種のものであるように思われる。たとえばHakenは、複雑なシステムをcomplicated sys-

tem と complex system の2種に分類している [13]。前者はたとえば自動車とか宇宙船のようなシステムである。このようなシステムに関しては、エンジンとかサスペンションとかいった各要素の性質から、システム全体の性質を因果的に理解することができる。これに対し、complex system においては、そのような因果的説明が適用できない。人間の情報処理システムは complex systems のひとつであり、そのことが認知科学や人工知能の研究におけるさまざまな困難の原因であるように思われる。

上述の Fodor の議論は、人間の情報処理の中のある重要な部分は包括的でモジュラリティを欠くというものであるが、これより遥かに楽観的な議論もある。たとえば Simon [14] によれば、現実中存在する複雑なシステムは階層的であり、ほとんど分解可能 (nearly decomposable) である。これは、生物の進化においても人工物の設計においても、そのようなシステムの方がはるかに効率的に形成されるからである。つまり、ほとんど分解可能でないならば、そのシステムは中間的な段階を経ずに一挙に作られなければならない、形成過程における安定性が悪い。この議論を認知科学に適用すると、要するに、認知システムはモジュラリティを持つということになる。Simon のこの議論は、Fodor による認知科学の不可能性に関する議論と矛盾するように思われる。どちらが正しいのだろうか？

実は両者はいずれも大枠において正しい、ということが、情報の部分性に基づいて理解できる。即ち、単一の情報処理システムが、ある記述のレベルにおいてはモジュール的であり、別の記述のレベルにおいてはモジュール的でない、ということがあり得る。

モジュラリティを持つ記述のレベルとしては、ある種の制約のレベルを考えることができる。たとえば、自然言語の文法は何らかの制約として記述できるだろう。その制約とは、どのような文や談話の構造が適切なものであるかを規定するものである。どのような手順で文を発話または解釈すべきかということは、そこでは捨象されている。制約のシステム全体は、統語論的な制約 (たとえば、「名詞句と動詞とがこの順序に接続すると文になる」という制約) とか常識に属する制約 (たとえば、「鳥は飛ぶ」) などの部分からなると思われる。

そして、もしこれらの部分が各々モジュールをなし、制約のシステムが全体としてモジュール的であったとしても、情報の部分性によって、その制約に基づく情報処理は非常に複雑な、非モジュール的なものとなり得る。これは、関係する情報のうちのどの部分が参照可能であり、どの部分が参照可能でないかという分布のパターンの多様性のゆえである。情報は、情報に満ちた所から情報が欠けた所へと流れる。情報の流れとは、情報の表現のある部分の情報を参照することによって他の部分の状態が変化することである。たとえば、 $X+Y=Z$ という制約があつて、 $X=1$ という情報と $Z=3$ という情報が参照可能であるとき、 $Y=2$ を推論することができるが、この場合には、 X や Z から Y へと情報が流れることになる。従って、情報の参照可能性の分布の多様性に依じて、可能な情報の流れも多様なものとなる²。たとえば、 $X+Y=Z$ という制約を処理する際に X と Y の値が参照可能であることがわかっていれば、そこでは X および Y から Z の方向への情報の流れしか生じないことがわかる。しかし、 X 、 Y 、 Z のどの値が参照可能であるかが場合によって異なるときは、情報の分布のパターンは全部で $8(=2^3)$ 通りであり、各々のパターンに従って (全く流れない場合も含めて) 情報の流れのパターンが変わる。

認知科学の領域においては、このような情報の流れはしばしば非モジュール的である。計算機科学において従来用いられて来たプログラミング法は、手続き型プログラミング、つまりプログラム中に制約と情報の流れとを同時に記述する方式であつた。ところが、これによって認知の情報処理モデルを設計しようとする、限定された文脈でしか動作しないシステムになるか、またはプログラムが複雑化して破綻してしまう、ということが経験的に知られているが、これは情報の流れの非モジュール性によるものである。つまり、求める情報の流れが非モジュール的であるため、それを手続き型のプログラムで実現しようとした場合、プログラムが非モジュール的で管理不可能なものになってしまうのである。

²ここで、情報の流れが多様であるとか包括的であるというのは、任意の文脈において莫大な量の処理、特に記号処理が行なわれるということではない。通常は生じないような情報の流れが、適当な文脈を与えることによって生じる、ということがしばしば起こり、こうして、可能な情報の流れが全体として多様になる、ということである。いかなる文脈においても実際に生ずる処理の量は限定される。限定されないのは処理の及び得る範囲である。

手続き的プログラミングによって扱える問題は、図1のような構造を持つ。ここでは、問題

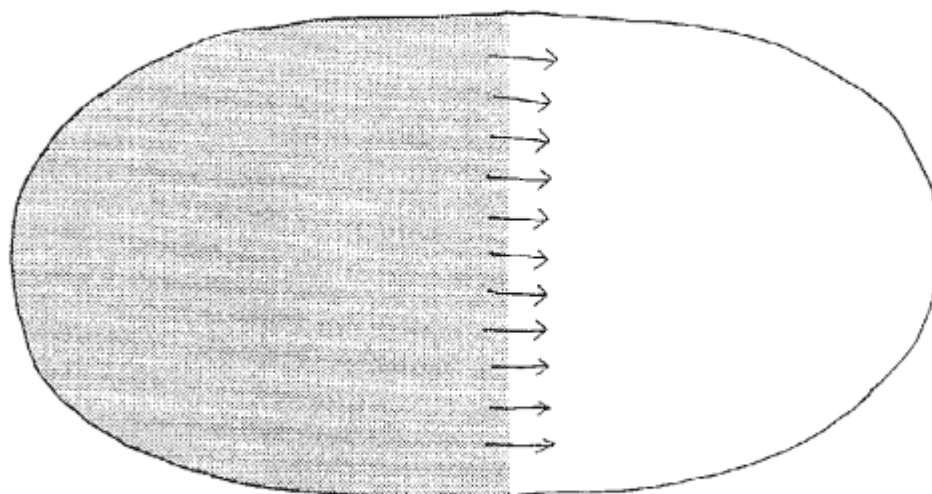


図1: 伝統的な問題の構造

に關与する情報の範囲が限定されている。その中で、網掛けを施した部分が参照可能な情報が分布している領域であり、白い部分が情報の欠けた領域である。一般に情報は、情報に満ちた所から情報を欠く所へと矢印に沿って流れるが、この情報の流れのパターンは、前以て限定しておくことができる。つまり、手続きによって実際上記述することができる。計算機による情報処理技術がこれまで成功を納めてきたのは、主としてこうした種類の問題に關してであった。

これに対し、認知主体が直面する問題は、図2のような構造を持つ問題である。ここでは、

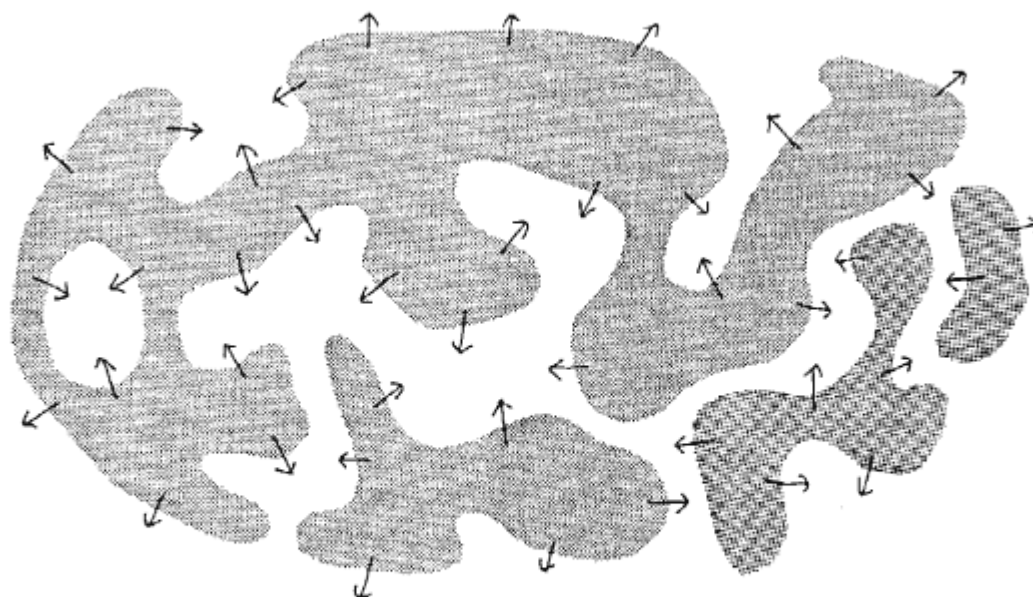


図2: 認知科学における問題の構造

問題に關与する情報の範囲が限定されておらず、しかも、参照可能な情報の分布も予めわかって

はいないため、情報の流れのパターンを前以て限定しておくことができない。しかも、情報は不確実性を含むものであり、情報の分布が信頼度によって重み付けされているために、文脈の多様性、従って情報の流れのパターンの多様性は、非常に莫大なものとなる。このように、情報の部分性によって、多様で包括的な情報の流れ、という意味における複雑性が生ずる。これが、情報の流れを捨象しないレベルにおいて認知システムを因果的に理解することを実際上不可能にしているひとつの要因である。この複雑性に対処するために、情報の流れを捨象した、より抽象的なレベルにおける設計原理、つまり制約という考え方が必要となる。

以下では、その制約の形式化について検討した後、制約のモジュールからなる認知の情報処理システム全体のアーキテクチャについて述べる。

3 形式性

原理的には、いかなる現象も形式的に、つまり数学的に厳密な仕方で記述可能と考えられる。しかし無論、実際に形式的に記述可能かどうかというのは別の問題である。完全に形式的な記述が原理上存在したとしても、それが科学的説明において、または工学的設計において用をなさない可能性がある。このような理論と実際のずれもまた、情報の部分性、特に処理の部分性に起因する。

科学理論および工学的設計は、ある適切な抽象化のレベルにおいて構成される。たとえば建築設計は、量子力学のレベルではなく、材料力学などのもっと抽象的³なレベルで行なわれる。計算機のプログラミングにおいても、扱うべき問題が複雑になるほど、機械語のレベルより抽象的な高級言語による記述が必要になる。

抽象化によって詳細を捨象すると、記述は不正確なものとなる。たとえば、計算機のプログラミングのレベルでは、ハードウェアの性質の多くは捨象されているから、このレベルに留まっていたのではハードウェアのエラーなどに一般には対処できない。しかし、たとえばハードウェアのエラーが非常にまれである、というような意味において、捨象された詳細の効果が無視できる場合には、抽象的なレベルにおける記述は実用的に十分精度のよい近似となる。

このように、経験科学および工学においては、現存する全ての形式的理論は、何らかの記述のレベルにおける近似である。そして、このような形式化が成功するためには、十分簡潔な形式的理論によって記述でき、しかもその記述が十分よい近似になっているような抽象化のレベルが存在しなければならない。これまでに科学技術が成功を納めてきたのは、そのようなレベルがたまたま存在するような分野においてであった。しかし、そうであるかどうかは全く経験的事実の問題であり、解明すべき各々の分野においてそのようなレベルが都合よく存在するとは限らない。

実際、認知科学においてはそのような単一の記述のレベルがなく、このことが、認知科学の理論構成を複雑化する1つの要因になっていると考えられる。たとえば、神経回路網のレベルでの現象を十分よい精度で記述する形式的理論は、原理的には存在し得だろう。しかしその理論は、人がいかにして言語を使用するのかなどということの説明にはならない。これは、その理論が言語の理論としては詳細過ぎ、モジュラリティを欠くからである。同じ理由により、その理論は人間と同様に言語を使用するような情報処理システムの設計原理にもなり得ない。適切な説明原理および設計原理を求めるには、もっと抽象的なレベルにおける記述が必要である。そこで、言語の文法や常識などの記号的な「知識」のレベルに関する理論を考えることになる。前節での議論から、そのような理論は、こうした知識を制約として、即ち処理手順を明示しない形で記述するものでなくてはならない。

しかし、その理論が単一の形式的体系であるとする、それは単独では十分精度のよい近似にならない。これは処理の部分性による。つまり、制約に関する処理が完全には行なわれないためである。数学の公理やゲームの規則のように、明らかに完全には処理できないような知識はいくらでもある。また、言語に関する知識も部分的にしか処理できない。たとえば、「私はあの明

³何を捨象するかによって、抽象化にも様々な次元がある。物理学や経済学におけるマクロなレベルとミクロなレベルとの関係も一種の抽象化である。

日例の君を振った女と結婚する男を殴った」⁴とか The chocolate cakes are coated with tastes sweet⁵とかいう文を直ちに理解できる人は少ない。さらに、不確実な情報が含まれる場合には、複雑な処理を行なうと不確実性が増幅されるので、積極的に部分的な処理を行なう方が現実的である。人間が大量の記号処理を計算機のように正確に行なえないのは、むしろその方が生きて行く上で間違いが少ないからだろう。

ところが、単一の形式的体系によって記述されるのは、処理が完全になされたとしたらどうなるか、ということであり、部分的な処理のために矛盾が看過されたり可能性が見過ごされたりした場合にどうなるかということは、捨象されてしまっている。しかも、言語や常識などの処理は組合せ的な演算であるから、誤りを含み得る部分的な処理の効果は無視できるほど小さくはない。従って、精度のよい近似を得るためには単一の記述のレベルだけでは不十分であり、少なくとも、そのレベルにおける制約の不完全な処理に関する理論が必要となる。そこでは、制約全体は矛盾などを含む非形式的なものとなるため、システム全体の動きは制約のみによってではなく、部分的な処理の理論によって初めて規定されることになる⁶。この理論構成の複雑さは、処理の部分性による。

非単調論理、確率論理、ファジー論理などは、それぞれ単一の形式的体系であり、単独で認知の情報処理モデルを記述することは実際問題として不可能である。さらにまずいことに、これらの論理は記述の部分性のみを扱っているが、記述の部分性と処理の部分性を区別することは実際にはできない。ある情報が得られていないとき、それが記述の部分性によるのか処理の部分性によるのかを一般には識別できない。この識別のためには完全な処理を行なわねばならないが、それは不可能なのである。つまり、部分性は本質的に1つであり、その一部だけを扱う理論は、不必要に理論を複雑化するのみである。確率論やそれに基づく情報理論、あるいはファジー論理や非単調論理などは、完全な処理を前提として記述の部分性を扱おうとする試みであるため、認知の情報処理モデルにおいてはほとんど役に立たない。われわれが選択すべきは、形式主義的形而上学ではなく、実際の工学的(つまり認知科学的⁷)アプローチである。

現実的なアプローチのひとつとして、たとえば、通常の1階述語論理によって記述された記号的制約の上にポテンシャル・エネルギーを定義し、制約変換としての情報処理[7]をこのエネルギーを最小化するように制御する[6]、という方法が考えられる。ここで、ポテンシャル・エネルギーは制約の表現の大きさなどを反映しており、制約に対してメタなレベルの記述となっている⁸。

4 認知のアーキテクチャ

認知の情報処理モデルは(ア)および(イ)のような制約によって定式化すべきであることを、以上において述べた。本節では、認知システム全体がこのような制約のモジュール群からいかにして構成されるべきか(これは、各々の制約のモジュールがその部分モジュールたちをどのように組合せて構成されるべきかということと同じ話である)を論ずる。認知システム全体もまた一

⁴命題内容を保存しつつこの文の語順を入れ変えると、「君を振った例の女と明日結婚するあの男を私は殴った」となる。

⁵この cakes are coated with は関係節である。

⁶社会も一種の認知主体であり、社会システムは単一の形式的体系では記述できない。特に、科学も社会システムの一部であり、個人の信念の体系と同様、科学理論の体系もまた、互いに矛盾する複数の部分理論からなる[9]。たとえば物理学ですら、相対論と量子論という互いに矛盾する部分理論を含んでいる。物理理論の働き(利用方法など)はその理論のみによって決まるのではなく、そうした矛盾を許容するようなメタレベルの選用法による所が大きい。

⁷認知主体の営みは従来の意味での科学というよりは工学であるから、認知科学や人工知能は、工学に関する科学と言える。従って、工学的な設計原理と認知科学的な説明原理はしばしば一致する。

⁸十分な近似を得るためには、この2つのレベルだけでなく、コネクショニスト・モデルのような記述のレベルも必要となるかも知れない。コネクショニスト・モデルも一種の制約を表現していると考えられる。(ただし、記述のレベルが低過ぎて、単独で言語などの認知現象をモデル化することは実際問題として不可能と思われる。)さらに、もし量子論的效果まで考慮に入れなければならないとすれば[11]、さらにレベルが増え、理論は全体として非常に複雑なものになるだろう。

種の制約であるから、制約のモジュールの間の関係もまた、制約の性質(ア)および(イ)を満たすと考えられる。

制約のモジュール間の関係のトポロジーにより深く関係するのは性質(ア)、つまり「情報の多様な流れを許容する」という条件である。認知システムが得る情報はノイズや不確実性を含むから、より信頼の置ける情報を優先的に用いるような処理の流れが可能でなければならない。従って、情報の流れが常に一定の経路を通るのではなく、得られた情報に応じて様々な経路を通ることができるようになっていくことが重要である。特に、不確実な情報を用いた多段階の情報処理によって不確実性をさらに増すよりも、より確実な情報だけを用いた単純な処理の方が有用な結果を生むことが多いから、たとえば、信頼できる情報がほんのわずかしかなければならないような状況に効率的に対処するには、非常に短い経路を通る処理が可能でなければならない。この意味において、様々な制約のモジュールは、階層(hierarchy)ではなくヘラルキー(heterarchy)をなすように関係付けられるべきである。つまり、制約のどのモジュールも他のモジュールによる処理結果に一方的に従属するのではなく、複数のモジュールが互いに相補的である⁹ことが望ましい。

特に多様で可逆な情報の伝播を含む自然言語のような領域においてこの議論を適用すると、言語処理過程は、統語的制約や意味的制約などのモジュール群による並列処理として定式化される。情報伝播の仕方を明示する(即ち限定する)手続きによって、言語処理過程における複雑な情報の流れを直接設計することは、実際上不可能である。

手続き型プログラムによって言語処理のモデルを記述する場合、形態的制約(動詞の活用や助辞の接続に関する制約)、統語的制約(語句の順列等に関する制約)、意味的制約などの制約のモジュール構造をプログラムに反映させようとすると、そのシステムは図3のような構造を持つこ

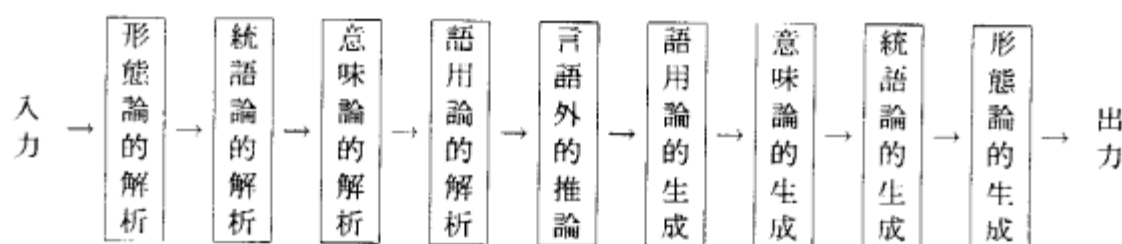


図3: 手続きによる自然言語処理

とになる。ここではまず、形態解析において、語の綴りから辞書を引き、語間の接続や動詞の活用などの知識に基いた解析を行なう。次に統語解析において、文中のどの部分が主語でありどの部分がそれに対応する述語であるか等を同定する。最後に意味解析において意味的な知識を用いたチェックを行なう。たとえば、統語解析の段階では「食べる人」の「人」が「食べる」の主語だという解釈と目的語だという解釈の両方が得られるが、意味解析において主語であるという方の解釈が選ばれる。文の生成も同様に順序立てて行なわれる。

しかし、人間が言語を理解する際にはこのような手順に従っているわけではない。たとえば、少々発音がおかしかったり字が間違っていたりしても、それまでの意味的な文脈を用いて、その間違いに気付くことすらなく正しく理解するということがしばしばあるが、これは形態的制約に関する処理において意味的な情報が関与している、あるいは、形態的情報が不確実な場合はそれを無視して他の種類の情報を用いることができる、ということである。図3のようなアーキテクチャは、人間のこのような能力を説明することができない。即ち、図中の矢印に沿った手続きの系列の上に情報の流れが限定されてしまうため、上記の要請を満たさない。逆に、情報の多様な流れを手続きによって実現しようとする、制約のモジュール構造がプログラムの構造に反映されなくなり、システム全体のモジュール性が失われてしまう。

これに対し、制約に基づく自然言語処理システムは、図4のような構造を持つ。ここでは、

⁹手続きとは、(処理の順序が限定されているという意味において) 階層的な内部構造を持つ情報の表現であり、制約とは、極度にヘラルキー的な内部構造を持つ情報の表現である。



図 4: 制約による自然言語処理

図 3 の場合に比べて、異なる制約のモジュールの間での情報の流れが限定されておらず、ヘテラルキー的な構造が形作られている。また、図 3 の場合には文の理解と生成、および別種の制約ごとに異なる手続きが必要であったが、図 4 においては、様々な制約が単一の制約処理系によって処理される。

一方、同じ議論を移動ロボットの設計に適用すると、Brooks [1, 2] の議論の主要部分が得られる。さらには、行為を通して環境に適合するというアプローチ全体が、知能の情報処理に関する上記のような一般的要請に帰着される。

まず、伝統的な移動ロボットの構成は図 5 のようなものであった。このアーキテクチャは、

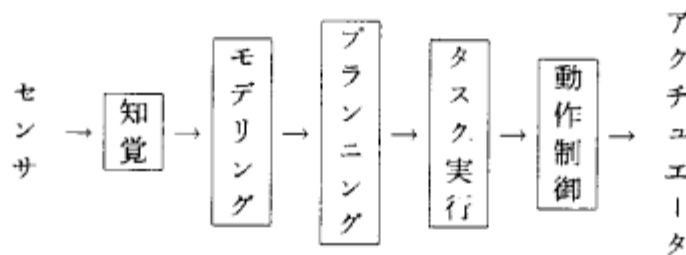


図 5: 直列型ロボット

図 3 と全く同様、情報伝播のパターンを過度に限定し、先の原理を満たさない。その結果、ロボットは確信度の高い情報を素早く用いることができず、極めて効率が悪く、また脆弱なものとなる。

これに対し Brooks が提唱しているのは、図 6 のような並列型アーキテクチャであり、これもヘテラルキー型の構成の一種である。ここでは、図 4 と同じく、各モジュールが環境に直結していること (Brooks の言う「行為に基づく分割 (decomposition based on behaviors)」) によって、上記の要請を満足するような情報伝播の制御が可能となっている。これにより、自然言語処理の場合と同様、不確実な情報を逐一処理するのではなく、より確信度の高い情報だけを用いることができる。ただし、図 6 の下の方の各モジュールは、その内部での情報の流れがかなり限定されており、また、モジュール間の情報伝達もわずかである。これに対し、上の方のモジュールについては、自然言語の場合と同様、各々の内部での情報の流れもモジュール間の情報の流れもあまり限定されていないと考えられる。

以上のように、移動ロボットに関する最近の研究から得られた知見は、情報の部分性に対処するための一般的な要請に帰着する。さらに、行為を通して AI システムを環境に埋め込むというアプローチもまた、この原理から導かれることに注意されたい。つまり、認知主体がその環境に適応して生きて行くべきものである以上、最も確実な情報はしばしば環境そのもののものの中にあるから、それを参照するには環境に働きかける行為によることが望ましく、また、可能な限りシステム内部での情報処理を避け、環境において統合された情報を直接用いる方がよいわけである。

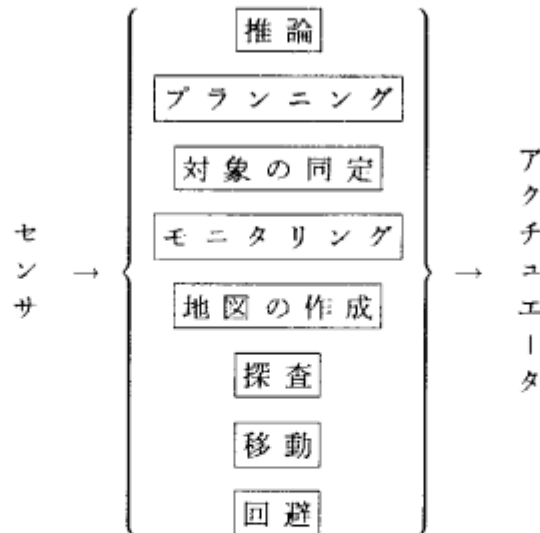


図 6: 並列型ロボット

無論、環境の中に直接表現されていない抽象的な情報を扱う場合には、表象の操作が必要となる。因みに、いわゆるアノードダンス [12] の構成的内容は、上のようなヘテラルキー型のアーキテクチャに帰着されると考えられる。

5 おわりに

第2節で述べたように、認知科学の理論がモジュラリティを持つには制約のレベルにおける記述が必要である。Marr [8] は、知能の理論を構成する3つの記述のレベルとして、計算理論、アルゴリズム、およびハードウェアのレベルを挙げており、Marrの3つのレベルのうち、計算理論のレベルがここで言う制約のレベルにほぼ対応するが、本稿で特に明らかにしたのは、処理の手順を捨象するという意味での抽象化の重要性である。複雑さに対処するために、認知科学の理論はモジュラリティを持たねばならない。しかし、たとえばMarrやChomskyらによって批判されて来たように、認知科学はこれまで、一般には適切な理論のモジュールを持たなかったと考えられる¹⁰。そして、適切なモジュールを構成するためには、制約パラダイムが必須である。

たとえば人工知能における自然言語処理技術は、この20年間、処理速度などに関する改善はいくつかあったものの、本質的にはほとんど進歩していないと言っても過言ではない。この停滞の第1の原因は、従来の手続き的パラダイムでは機能に関する加法性が成立しない、という点にある。つまり、手続きパラダイムでは、システムにAという機能とBという機能を持たせても、AとBとを組合せて構成されるはずの機能が自動的に実現されないことが多い。たとえば、受動態を処理する機能があり、関係節を処理する機能があったとしても、受動態を含む関係節を処理できるとは限らない。それらの機能は実は特定の文脈でしか働かないようになっており、組合せて働くことは保証されないのである。いくつかの機能の組合せ方によって構成される機能は山ほどあるから、それらを実現するには膨大なプログラミングが必要となり、これを真面目にやろうとするとシステムの設計が破綻する。

この難点の原因は、手続きパラダイムでは知識を過度に特殊な形で、つまり処理手順を明示しながら記述する、という点にある。適切な処理手順は文脈に依存するから処理手順を指定するには文脈を指定しなければならず、しかも文脈を網羅することは不可能であるから、こうして実現される機能は適用範囲の狭いものとならざるを得ない。処理手順を手続き的に指定せざるを得なくなるようなモジュール分割は、認知科学における理論構成として不適切である。たとえば自

¹⁰Chomsky や Marr は、変型文法理論が認知システムにおける適切なモジュールをなすと考えている [8]。しかし本稿の観点から見れば、変型文法は、適切な制約のモジュールとなるには抽象化の程度が不十分である。

然言語の場合、構文解析、文生成、意味的推論などは、それぞれ、より基本的な複数のモジュールの機能の組合せとして生ずる複合的な現象であり、科学的説明ないしは工学的設計における適切な理論のモジュールではない。統語的制約、意味的制約などの制約のモジュール、これらの制約全てに適用される一般的な処理手順のモジュールなどが、より基本的なモジュールであり、説明・設計原理として適切な理論のモジュールと考えるべきである。

情報の流れのレベルにおいて知能システムを説明したり設計したりすることは實際上不可能であるから、情報の流れを抽象したレベルに着目しよう、というのが制約パラダイムである。つまり、制約を用いても、システムの動きを因果的に理解できないことに変わりはない。また、3節で論じたように、制約の処理は部分的にしか行なわれないから、制約のレベルだけでシステムの性質を精度よく規定することはできない。結局、情報の部分性によって、動的な記述のレベルでも静的な記述のレベルでも、システムの働きを完全に形式的に理解することは不可能である。にもかかわらず、制約を用いれば、そのようなシステムを設計することは可能と思われる。制約パラダイムの本質は、モジュール的な構造を持つシステムにおいて非モジュール的な複雑な情報処理を実現するという点にある。

参考文献

- [1] Brooks, R. (1986) 'A Robust Layered Control System For A Mobile Robot,' *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23.
- [2] Brooks, R. (1988) *Intelligence without Representation*, MIT AI Lab. technical report. (邦訳: 柴田 正良 (1990) 「表象なしの知能」, 現代思想, vol. 18-3, pp. 85-105.)
- [3] Fodor, J. (1983) *The Modularity of Mind: An Essay on Faculty Psychology*, MIT Press. (邦訳: 伊藤・信原 (1985) 精神のモジュール形式: 人工知能と心の哲学, 産業図書)
- [4] 橋田 浩一 (1988) 「AI とは何でないか: 情報の部分性について」, *bit*, Vol. 20, No. 8.
- [5] 橋田 浩一 (1989) 「制約と言語」, *コンピュータ・ソフトウェア*, vol. 6, no. 4, pp. 16-29.
- [6] 橋田 浩一 (1990) 「エネルギー最小化法による記号的推論の制御」, 認知科学会第7回大会.
- [7] Hasida, K. (1990) 'Sentence Processing as Constraint Transformation,' *Proceedings of ECAI'90*, Stockholm. (An extended version in *Proceedings of LPC'90*, Tokyo.)
- [8] Marr, D. (1982) *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, W. H. Freeman and Company. (邦訳: 乾・安藤 (1987) ビジョン: 視覚の計算理論と脳内表現, 産業図書)
- [9] De May, M. (1982) *The Cognitive Paradigm — Cognitive Science, a Newly Explored Approach to the Study of Cognition Applied in an Analysis of Science and Scientific Knowledge*, Reidel. (邦訳: 村上 陽一郎 他 (1990) 認知科学とパラダイム論, 産業図書.)
- [10] 大澤 真幸 (1990) 「知性の条件とロボットのジレンマ — フレーム問題再考」, 現代思想, vol. 18-3, pp. 140-159.)
- [11] Penrose, R. (1989) *The Emperor's New Mind — Concerning Computers, Minds, and The Laws of Physics*, Oxford University Press.
- [12] 佐伯 胖, 佐々木 正人 編 (1990) アクティブ・マインド 人間は動きのなかで考える, 東京大学出版会.
- [13] 清水 博 (1988) 「バイオホロニクスの論理」, 現代思想, Vol. 16-1.
- [14] Simon, H. (1981) *The Sciences of the Artificial (2nd Edition)*, MIT Press. (邦訳: 稲葉 元吉・吉原 英樹 (1969) システムの科学, ダイヤモンド社, パーソナルメディア)
- [15] Winograd, T. (1975) 'Frame Representations and the Declarative/Procedural Controversy,' in Bobrow, D.G. and Collins, A. (eds.) *Representation and Understanding*, Academic Press.