

認知発達ラボ

(Cognitive Development Lab.)

研究項目：認知発達のダイナミックスの研究
研究期間：平成9年度～13年度

1. 研究の背景

社会のあらゆる領域において、すさまじいスピードの情報化が進められつつある現在、我々は過去に例を見ない大量の情報に、日々、アクセスしながら暮している。近年のインターネットの普及は、従来のマスメディアに代わって、よりいっそう大量の情報を生み出しつづけている。しかしながら、我々が、それらの大量の情報を理解し、意思決定するために用いている認知メカニズムは、物理的、生理的に制約された身体に基づくものであり、原始時代とさして変わらない。我々が情報を理解するために利用できる情報処理資源は有限である。無制限の大量情報を与えられた場合、人間の認知機構は処理不能になり、その結果ヒューマンエラーによる事故を引き起こす。また、こうした大量の情報からの意思決定がもたらす精神的ストレスと、その経済的損失は計り知れない。我々は、この大量の情報アクセスを人間に心地よい物にするための技術を開発する必要がある。

2つのアプローチが考えられる。一つは人間に変わって情報を取捨選択する知的エージェントシステムを実現することであり、もう一つは、人間の情報処理のもつ制約を理解し、認知的制約に沿った情報提示技術を開発することである。本研究では、後者の技術開発に向けて、人間の認知機構のモデル化の研究を行っている。すなわち、人工知能研究におけるような無制限の計算機パワーに基づいたモデル化ではなく、身体性や記憶容量など有限の資源が情報処理にどのような影響を与えているか、またそれらの資源をいかに巧みに利用しているかという立場からモデル化をすすめている。具体的には、人間の持つ物理的・身体的制約と脳のワーキングメモリにおける記憶容量という2つの制約に焦点を当て、空間認知能力、推論能力等が、発達的变化にどのように変化していくか、実験や計算機シミュレーションを用いて研究している。

以下では、我々がこれまでに行った身体的制約と空間認知の関係に関する研究について紹介する。続いて、記憶容量の制約と認知の関係に関する研究について簡単に紹介する。

2. 身体的制約と空間認知

我々は、図1に示すような現実の移動ロボットを想定して空間認知のモデルを構築する事で、物理的・身体的制約をモデルに組み入れるというアプローチをとっている。まず、我々のアプローチのねらいについて述べる。

2.1 認知科学におけるロボットの利用

図1からわかるように、現在利用可能な移動ロボットは、人間とはまったく異なる物理的・身体的特徴を持つ。しかしながら、こうした相違にもかかわらず、ロボットを



図1 移動ロボット

用いる事によって、認知科学研究に対して多くの示唆を与える事ができる。重要な点は適切な説明レベルを選択することである(開, 幸島, 1998)。

例えば、C.N.R.S.のFranceschiniのグループは、ハエの神経生理学的データに基づいたビジョンシステムを持つ移動ロボットを設計し、そのロボットの行動機構上の問題から逆にハエの神経生理学的現象を発見することに成功した(Franceschini, Pichon, & Blanes, 1992)。昆虫の視覚-運動系は、近年神経機構レベルでそのメカニズムを解明するための方法が確立されつつあるが、移動ロボットを用いることで新たな問題を見出し、妥当な仮説の生成を行い、最後には実証的に検証することに成功したFranceschiniらの功績は大きい。

人間や哺乳動物の空間認知に関する神経レベルの研究は現在精力的に行われているものの、昆虫のそれと比較すると未だメカニズムの解明にはほど遠い段階である。しかし、もっと抽象的なレベル-認知レベルにおいても、Franceschiniらと同様に移動ロボットを利用することで新たな問題の発見・定式化と仮説の生成・検証ができるのではないだろうか。以下では、移動ロボットを認知レベルで利用するという観点の有効性を示すために行った、我々の研究の具体的内容について述べる。なお、本研究は、科学技術振興事業団の個人研究推進事業(さきがけ研究21)の研究課題「認知発達モデルとしてのロボット学習機構の研究」として選択された。

2.2 空間行動の発達の变化

図2は乳児の空間探索行動に関する実験を示したものである。人形を中央のコップBに入れたあとで、乳児がテーブルのまわりを回ると、人形の相対的な位置は中央から右側へと変化する。しかし、1歳前後の乳児で

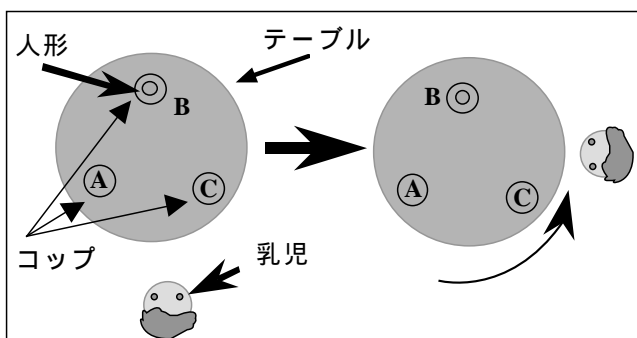


図2 乳児の空間探索実験

は、自分と3つコップの位置関係が変わったにもかかわらず、最初の場合と同様に中央のコップAから人形を探そうとする。こうした行動は自己中心的空間行動と呼ばれ、18ヵ月～24ヵ月頃まで観察される(Bower, 1979)。

さて、このような自己中心的行動からそうではない客観的行動への変化はどのようにして起こるのであるか。多くの先行研究では乳児の能動的移動経験の重要性が示唆されている。例えば、「ハイハイ」の出来る子や歩行器を使って移動経験のある子どもは、そうでない同じ月齢の子どもに比べて空間認知課題に優れていることが示されている(Kermoian & Campos, 1988)。しかしながら、こうした先行研究からは能動的な移動経験が空間に関する認知発達の重要な要因であることは示唆できても、「何がどのように変化したのか」という疑問に対する明確な解答を導き出すにはいたっていない。

そこで、我々は、この疑問に対して：

1. 移動によって得られる情報は何で、それがどう空間認知発達を促進するのか？
2. 身体的成長と空間認知の発達にはどのような関係があるのか

の2つの問題を設定し、空間認知発達を移動ロボット上の学習機構として定式化することによってアプローチした。

2.3 ロボット学習としての定式化-メンタルトラッキング-

空間行動の発達の变化を説明するために、本研究では、説明モデルとしてメンタルトラッキングと呼ぶ概念を導入する。メンタルトラッキングとは、ビジュアルトラッキング(移動しながら対象を追視する行動)を心的にシミュレートする能力を指す。移動にともなって身体と対象の空間的關係を更新することが可能であれば、乳児は図2のような空間探索課題において正反応を示すことが可能である。また、メンタルトラッキングを獲得する上で能動的移動が本質的であれば、移動経験の有無と自己中心的行動から客観的行動への変化との関連性を示すことができる。本研究では、Jordan & Rumelhart(1992)によって提案されている順逆モデリングを適用して、メンタルトラッキング機構を実現した。ビジュアルトラッキングのための順モデル・逆モデルがそれまでの経験から適切に獲得され

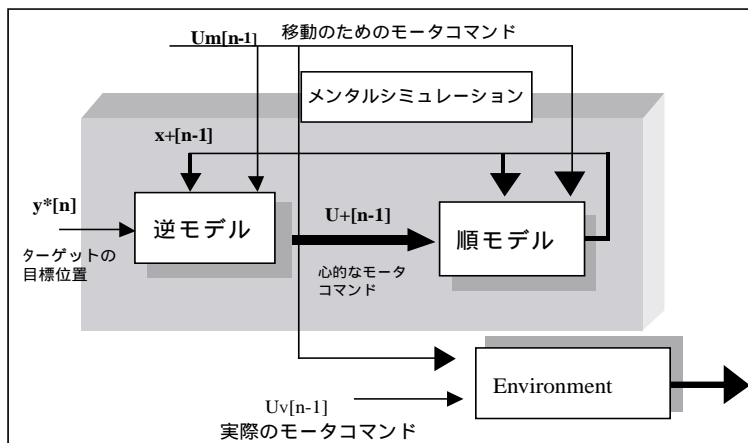


図3 メンタルトラッキング時の入出力関係

ていれば、実際のカメラ画像がなくても、順モデルから出力された対象の位置を逆モデルへの疑似入力として順次適用することによってターゲットを心的に追視することができるということである。

図3はビジュアルトラッキングが学習された後、メンタルにトラックを行う場合の入出力関係を表したものである。

2.4 シミュレーション実験：身体的成長と空間認知の関係

上述したビジュアル(メンタル)トラッキングの学習を、神経回路網モデルによって実現し、これに基づいて計算機シミュレーション実験を行った。

この研究における中心的問いの1つは、身体的な成長と空間認知発達の関係について理解することであった。そこでシミュレーション実験では、身体の成長にともなう自由度の変化に注目した。具体的にはロボットの行動を、子どもの身体成長にともなう運動能力の変化に関連づけて、以下の3つの段階(Stage-1, Stage-2, Stage-3)に分けた。まず、Stage-1ではロボットは頭部(カメラ)のみ回転運動を行うことができ、Stage-2では頭部と胴体の回転運動を行うことができる。Stage-3ではこれらの運動に加えて平行移動が可能となる。

空間探索課題における結果：

図2と同様の空間探索課題を用いて、シミュレーション実験を行った。ここでは、図2を模擬した仮想的環境において、「乳児」の代わりに「ロボット」が移動し、ターゲットが隠された時とは別の場所からターゲット

表1 探索課題における正答率

運動能力	Stage-1	Stage-2	Stage-3
正答率 (%)	35	35	82

トを推定/選択する(ロボットは移動途中でこれを参照することができない)。Stage-1, Stage-2, Stage-3のそれぞれでは、空間探索課題のテストが行われる前に、ビジュアルトラッキングの学習が行われた。

表1は、各段階のロボットがターゲットを正しく選択した割合を示したものである。表1に示した通り、Stage-3でのみ、ターゲットがほぼ正しく選択されている。つまり、平行移動ができないStage-1, Stage-2では空間探索課題を行うのが困難であったが、平行移動にともなうビジュアルトラッキングを経験したStage-3では課題をうまく達成することが可能であった。Stage-3のロボットは、空間内の1つの対象に注視しながら自己移動できる子どもに対応しており、実際の子どもにおいても、こうした経験がメンタルトラッキングのための内部モデル(図3の順モデルと逆モデル)を獲得する上で重要であることを示唆する。

本研究で行ったロボットを用いた定式化およびシミュレーション実験を通して空間認知と身体的制約に関して、

- ・環境からの直接的な入力(刺激)がなくても、入力を心的にシミュレートできる能力が空間認知の発達にとって重要である。
- ・移動経験によって得られる情報は、対象の追視を学習するための誤差情報で、移動にともなう身

体と対象との空間的關係を心的に更新する能力を促進する。

といった仮説を得ることができた。

3. ワーキングメモリの制約と認知

身体的制約だけでなく、脳の情報処理に関する制約として、ワーキングメモリの容量に焦点を当てた研究も行っている (Phillips, et al., 1998; Halford, et al., 1998)。心理学的実験とその解析の結果から記憶容量に関する新しい理論として、関係計算量理論 (Relational complexity theory) を提唱している。人間の短期記憶の容量が、どんな種類の情報でも、およそ7項目しか保持できないことを示した、Miller(1956)の論文は、記憶研究の古典として非常に有名である。Miller以来、これまでの研究で提唱された理論では、記憶容量はタスクに含まれる要素数によって計測されるべきものとされてきた。しかしながら、我々は、この理論において、記憶容量は記憶要素間の関係の個数によって計測されるべきであることを主張している。この理論は、これまで行われてきた多くの実験の解析結果と一致し、ワーキングメモリに関する非常に強力な理論として認知されてきている。我々は、心理実験から導き出されたこの理論を提唱するだけでなく、神経回路網モデルも実現している。

4. 成果と波及効果

我々の研究は基礎的なものであり、その成果が商品として市場に送り出され、経済効果に直接結びつくというようなものではない。しかしながら、その潜在的経済価値は無視できない。たとえば、現在の多くの家電製品は工業デザイナーの直観に基づいて設計されており、我々が明らかにしたような人間の認知の制約に対する配慮に欠けている。GPSによるカーナビゲーションシステムは、さまざまな空間表示形態を採用し、その有効性を主張しているが、その多くは、実際には何の科学的根拠も無いものである。我々の研究は、そうした空間表示形態に関して、より適切な設計指針を提供できる可能性がある。こうしたデザイン上の新しい方式は、特許等による経済効果も期待できる。また、より効果的に情報にアクセスできる事により、事

故や見落としなどがもたらす経済的損失を減らすことも可能になるであろう。

5. 今後の展開

今後も、以上述べてきたような人間固有の制約とその発達の変化に焦点をあてて、その認知機構を探る研究を展開していきたい。

身体的制約に関しては、これまでの研究から、人の発達の変化の情報処理的意味付けを与えうる、示唆的な結果が得られており、より詳細な研究を進めていきたい。すなわち、メンタルトラッキングのモデルにおいて、我々は、徐々に自由度を増す場合と、学習初期から多くの自由度をもって学習する場合を比較し、前者の学習が容易になることを示唆する結果を得た。この結果は、自律移動ロボットにおける学習や他の機械学習システムの設計原理として、発達的なアプローチの有効性を示唆する。実際、ロボットアームを用いた実験では、学習初期から多自由度(例えば、膨大な数の関節や筋肉)をもっているよりも、少ない自由度から徐々に自由度を増やすほうがロバストであるという結果も得ている(幸島、開、1998)。こうした身体的制約と認知発達の関係が、脳情報処理の解明に対しても重要な示唆を与えることを期待している。

また脳神経情報領域との関連では、これまで我々の研究に欠けていた脳生理学的側面からの知見を積極的に活用することを予定している。例えば、ワーキングメモリの容量の制約に関して、より脳生理学的な観点から研究を進めていくことで、新しい研究の展開をはかる予定である。fMRIなどを用いて得られた脳内活動のイメージと、我々の関係計算量理論を結び付けることで、ワーキングメモリに関する新しい発見が得られることを期待している。

参考文献

- 1) Bower, T. (1979). Human Development. W. H. Freeman and Company.
- 2) Franceschini, N., Pichon, M., & Blanes, C. (1992). "From Insect vision to robot vision". Phil. Trans. R. Soc. Lond., B(337), 283-294
- 3) Halford, G. S., Wilson, W. H., and Phillips, S. (1998).

- "Processing capacity defined by relational complexity: Implications for comparative, developmental, and cognitive psychology". Behavioral and Brain Sciences, 21(6), 803-831
- 4) 開 一夫, 幸島明男 (1998) 空間認知発達への構成的アプローチ: 認知科学におけるロボットの利用可能性, 認知科学, Vol.5, No.3:59-68 .
 - 5) Hiraki, K. , Sashima, A. &, Phillips, S.(1998) "From Egocentric to Allocentric: A Computational Model of Spatial Development", Adaptive Behavior, 6(3/4):69 - 79 .
 - 6) Jordan, M. & Rumelhart, D.(1992). " Forward Models: Supervised learning with a distal teacher". Cognitive Science, 16,307-354
 - 7) Kermoian, R. & Campos, J. (1988). "Locomotor experience: A facilitator of spatial cognitive development". Child Development, 59,908-917
 - 8) Miller, G. A. (1956). "The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity to process information". Psychological Review, 63,81-97
 - 9) Phillips, S., Halford, G. S., and Wilson, W. H. (1998). "What changes in children's drawing procedures? Relational complexity as a constraint on representational redescription". Cognitive Studies, 5(2), 33-42.
 - 10) 幸島 明男, 開 一夫 (1998) " 発達のアプローチによるロボット学習 ," 日本認知科学会第18回大会論文集 .

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数7名)

職員(5名) Steven Phillips* , 仁木和久, 錦見美貴子, 幸島明男 , 和泉 潔(情報科学部)

職員以外(2名) 開 一夫 (東京大学) , 鈴木宏昭(青山学院大学)

* ラボリーダー 執筆者