展 望

ロボット研究の今後の課題

Future Research Issues in Robotics

長 田 正* 九州大学工学部

Tadashi Nagata* Faculty of Engineering, Kyushu University

1. は じ め に

産業用ロボット及び研究の対象としてのロボットが米国で登場したのは1960年代の初頭であろう。それから少し遅れて日本でも実用と研究の両面からロボット時代が本格的にスタートした。もちろん、我が国でも1960年代の初めに人工の手に関する先駆的研究が既に始まっていることは忘れてはならない。ちなみに、「計測と制御」vol. 7, no. 12 (1968年)には、はやくもロボット特集が組まれている。

爾来30有余年、確かにロボットの技術はめざましい進歩をとげ、今日、我が国は世界第1位のロボット王国となり、世界のロボット稼働台数の約6割が日本に設置されているのが現状だそうである[1]。しかし、めざましく発展したロボット技術の多くは計算機技術とエレクトロニクス技術の進歩に負っているようにも思えるし、基礎研究の成果が仲々実用化に結びつかないもどかしさを感じる。また、技術上、研究上の本質的かつ画期的な革新、発展はどこにあったのか、近い将来の展望はと問われると、思わず首をかしげたくなるのは、かなりの人が抱く感懐ではなかろうか。特に、日本から発信したオリジナルな成果が少ないように思えるのもこのような感じを持つ原因の1つかもしれない。

それはともかく、本稿では、日頃感じていることを個別の研究テーマとは違った視点からまとめて誌編集委員会からの依頼に応えたいと思う。しかし、直接研究にかかわっているのはロボティクス分野のごく限られた一部であるため、関連の薄い分野はかなりひずんで見えているし、しかも、視力の衰えも手伝って遠くの方は少々かすんでいるので、見当違いの議論になるのではないかと危惧を抱いている。会員諸兄のご賢察とご寛容をお願いしたい。

2. ロボットとは何か

今までに刊行された本誌上の記事にざっと目を通してみ

原稿受付 1993年11月12日

キーワード: Machine Intelligence, Symbol Manipulation, Task Understanding, Real-time Vision, Group Intelligence

*〒812 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1

*Fukuoka-shi

ても、ロボットに対する考え方が実に多様であることが分かる。たとえば、研究開発の姿勢にしても、直接何かの役に立つロボットの開発から、個人的に面白くてたまらないロボットの追求まで、実にさまざまなように思われる[2]。どのようなロボットを何の目的で研究するのかがはっきりしないと、解決すべき課題の考えようもない。ここでは、ロボットを人間にとって制御可能な合目的かつ自律的な機械と考えることにしよう。つまり、ある目的のために人間が自由に使いこなすことができ、かつ、それ自身、その目的を達成するためにある程度自律的に振る舞うことのできる機械としてのロボットを対象として話をすすめることにしたい。また、このような機械は、人間に似た機能と知能を備えていることが望ましいと思われるし、特に、“知的な振舞い”という言葉で代表されるように、機械の知能化がこのような立場でのロボット研究の大きな柱であると考えことにに対し異論は少ないように思われる。

人間が有する知能の解明のためや人工生命体の研究対象としてのロボットもありうるし、機構学的興味の対象としてのロボットの研究も考えられ、いずれも、ここで対象としているロボットと密接に関係があるという考えもあり得るが、ここでは、あえて取り上げないことにする。

ロボットが、ティーチング・プレイバック、センサオリエンティド、知能オリエンティドとその技術基盤を移してきたということは、人間が作り上げてきた、したがって、人間にとって都合の良い現在の環境をあまり変えることなくロボットを取り込みたいという願望の現われに外ならない。この場合、ロボットが直接関係を持つ環境は、自動化工場のように構造化されたものかもしれないし、自然環境に近いものかもしれない。いずれにしても、人間がいままで直接かかわっていた部分を受け持つという意味で、ロボットは一種の人間代替機械と考えることができるであろう。

もし、ロボットを現在の環境にそのまま適応させることが得策でなければ、ロボットにとって都合の良い環境を用意し、我々がそれに馴染むしか仕方がないであろう[3]。しかしここでは、現実の環境をあまり変えることなく、人間と共存し得る形でのロボットを念頭において話を進めることにする。

3. 記号の世界と数値の世界

本稿で考えているようなロボットを開発するためには、人間に近い知能や技能をロボットに持たせる必要が生じてくる。当然、現時点で利用可能な知能や技能を前提とすると、マン・ロボットインターフェースの部分にしわ寄せをする形でロボットを使う人間側が苦勞するか、ロボットの利用目的とその範囲を限定するか、あるいは、ロボットの能力に合わせてある程度環境を作り変えるしか手はないであろう。恐らく、ロボット研究の目的は、これらの現状を緩和するため、あるいは、将来への更なる飛躍を目指して、知能と技能のレベルの向上を図ることにあると思われる。

人間、環境、ロボットの関係は図1のように表される。同図(b)の場合、ある意図を持ってロボットに対して人間と、ロボットを除くすべてを広義の環境と考えている。同図で環境から人間へ向かう点線は、人間が環境に働きかけることによって得られる利得であり、人間から環境へ向かう点線は、人間とロボットにとって都合のいいように環境を整備することを意味している。

ロボットが人間の意図に従ってある程度自律的に振舞う機械であるためには、ロボットは人間の意図を理解できる機械でなければならないし、環境に働きかけることにその意義があるのだから、そのための方策を創成する能力がなければならない。また、具体的にその方策を実行するためには、自分自身や周囲の環境を理解するための知覚の機能と環境に働きかけるための行動の機能を備えていなければいけないことは言うまでもない。

人間の意図を理解したり、方策を立てたり、知覚したり、行動する機能は、一括して、広い意味での知能とよんでもよいであろう。なお、ここでいう知能が、人間の知的な振舞いを考察し、それを一定の制約の下で成立する普遍的な原理として確立し、人工的に実現することだとすれば、ロボットは、複雑かつ不確かな実環境の中で実時間で行動する知能機械だと考えることができる。

知能を直接司る人間の思考のモデルは、論理を用い非連続で非数値（記号）の世界を形成している。一方、人間の

操作のモデルは、専ら、物理（力学）法則に従う連続な数値の世界で構成される。すなわち、マン・ロボットインターフェースに関しては、自然言語処理、音声認識、図形認識、タスクレベルロボット言語等々、基本的には記号レベルで処理が行われる。人間の意図を理解した上で、具体的な操作・制御の方策を導く各種のタスクプランニングに関しては、作業手順の自動生成のレベルから具体的なタスクの実行のレベルになるに従って、その処理の対象と手法が記号の世界から数値の世界へと移ってくる。しかし、その間は必ずしもスムーズに繋がっているわけではない。

例えば、ロボット言語の中で利用する人間にとって最も好ましいといわれているタスクレベル言語が仲々実用化できないのは、現実の作業に必要な物理的制約や数値的拘束を記号レベルでは旨く表現できないことにその原因の1つがある。このことは、意識として捉えられる人間の思考活動を主として取り扱ってきた（人工知能の主領域でもある）記号処理の諸技法が、無意識下にある運動機能に内在する知能に関してはほとんど無力だということを意味している。また一方、ロボットの行動が環境に及ぼす影響を記号を用いて完全に記述することは困難であるという問題も残っている。

現実には、記号の世界と数値の世界を結ぶため、作業の実行に伴う物理的・数値的諸制約を満足させるように、スキルあるいはタスク理解という形で作業をパターン化し、パッケージ化する努力が試みられている[4]。なお、ここでいうスキルやタスク理解とは、操作対象物同士の複雑な結合関係をスムーズに実現するための手段と考えられ、それを実現するには、一般的な作業モデル、ダイナミックシミュレータ及び作業実現のための具体的なアルゴリズムの開発が必要である。また、前述した、運動機能に内在する知能を機械システムのインテリジェンスとして顕在化させようとする主張もある[5]。ロボットによる作業は、環境との相互作用によってはじめて実現されるものであり、そのためには、ロボットと作業対象物、ロボットと環境及び対象物と環境に関する精密なモデル化を行う必要がある。このような研究の進め方は、従来の物理学（力学）をロボットを操作・制御するための力学として整理し直し、利用しやすい形に整備することに通じるように思われる。このことは、自然言語処理研究の初期の時代に、計算機処理に適した形に文法を整理し直す作業が行われていたことと事情が似ている。

問題は、このような手法で複雑な作業の数値モデルが構築可能か、及び、この手法を深めていくことで記号レベルの世界に結びつけることが可能かということにある。ところで、スキルやタスク理解を実現するために解決すべき課題とは、例えば、次のようなことであろう。

(1) どのような複雑な作業も、それらの組合せによって実現できるという意味での限られた数の作業パターンは何で

図1 人間、ロボット、環境の相互関係

あるか。(2)それらの基本作業パターンの数値モデルを一般的な形式で記述できるか。及び(3)与えられた作業を実現するための基本作業パターンの組合せに関する方策を容易に導くことができるか。

なお、ここでいう基本作業パターンの一般的な形式とは、マニピュレータの形式、操作対象物の大きさ、形状、作業状況の変化などに依存しない、あるいは、内部パラメータの操作などでそれらに十分対応できるような形式という意味である。すなわち、具体的な作業に適用する際、計測すべき物理量は何で、それらの値に基づいて基本作業パターンのどの部分をどのようにモディファイしたらよいかが可能であるような形で作業パターンのモデルが作られていなければならない。

視覚に関しても、記述、認識、理解は主として記号処理に基づいて行われるし、ノイズ処理、特徴抽出、領域化などは専ら数値処理の領域である。また、最近では能動的視覚、定性視覚、作業指向型視覚に関心が集まっている[6]が、これらの研究は、物体認識や環境認識に注視制御を積極的に取り入れること、及び、目的、対象、環境に応じて選択的に効率良く特徴を抽出し、利用しようということを目指している。これらの手法は、特に目新しいとも思われないが、計算機能力、三次元情報獲得能力の向上により応用の可能性が現実味を帯びてきたことが注目を集めるきっかけとなっているように思われる。しかし、どの部分のどのような情報をどの程度の精度で取得することが作業を遂行する上で必須なのかといった、作業に関する知識と密接に関係がある記号処理の領域に属する研究はどちらかというが遅れ気味である。

一方、記号の世界でも、非単調論理、常識推論など、その枠組を拡げる努力は行われているし、定性推論やエキスパートシステムにおける浅い知識と深い知識¹の議論などは、物理的、数値の世界に少しでも近づこうとする試みのように思われる。それにしても、人間における巧緻で適応力に富んだ運動制御の仕組みは一体何に基づいているのだろうか。また、一見別の仕組みで働いているように見える思考と運動とを結合し、融合しているものの本質は何であるのか。もし、それらが学習と進化の結果だとすると、われわれはそれから具体的に何を学びとることができ、どのようにロボットの運動制御に反映させることができるのであろうか。

ロボットで記号の世界と数値の世界を結び付ける手段に関して、人間はイメージの世界で両者をうまく結び付けて

いるという仮説に基づく、グラフやネットといった手法も十分その候補の1つになり得るように思われる。また、ファジイは、言葉という記号の世界を数値の世界に変換する手法だと捉えることもできるし、ニューラルネットもこの両者を結ぶ架橋の一つと考えることも可能であろう[7]。人工知能研究の新しいパラダイムとして、サブサンプリングアーキテクチャ[8]が提唱されているが、記号の世界と数値の世界を結ぶ研究を進めるという立場からみても、ロボットはその格好の題材のように思われる。

4. 静的世界と動的世界

プランニング、計測・認識、運動制御という機能からロボットを考える場合、プランニングと認識はどちらかというとき静的な環境を前提として問題が処理され、計測と制御は動的な対象に関してその方法論が進められることが多かった。例えば、「目標を達成するための動作系列を生成する問題」として捉えられていた古典的な人工知能のプランニングは、ロボットの最上位のタスクプランニングと位置付けられている。そこでは、プランを構築する時間とそれを実行する時間は分離されており、しかも、プランナに与えられる情報は完全だとの仮定の下にプランニングが行われている。しかし現実には、ロボットを取り巻く環境はかならずしも静的なものではなく、絶えず変化すると考える方がむしろ自然である。すなわち、ロボットは動的な環境で自律的に振る舞う知能機械であるというのがロボットに対する正しい認識だと思われる。動的世界を対象とする場合、再プランニングやプランの回復を行う必要が必ず生じてくる。つまり、プランの構築と実行とを分離することができず、両者が並行的に進行することになり、極めて複雑な状況が出現する。これに対処するため、実世界の状況変化に応じてあらかじめ用意されたプランを適切に選択していくリアクティブプランニング[9]が提唱されている。移動ロボットやマニピュレータの障害物との衝突回避を目的としたモーションプランニングに関しても、従来の静的環境からほかのロボットを移動障害物と見なす動的環境へと研究が移りつつあり、動的環境の記述法や動的障害物回避のためのプランニングアルゴリズムの確立が待たれている。

しかし、現実のロボットにこのような動的なプランニングを適用するには様々な困難があるように思われる。先ず、状況の変化を知るために、実時間で働く環境認識・計測システムが必要である。また、選択すべき基本的なプランをできるだけ一般的な形で類型化し、それらが選択されるための基準を明確にしておかなければならない。

本来、知覚は実時間で処理されるべきものであるが、特に視覚については、処理すべきデータ量の多さと処理過程の複雑さからどうしても時間がかかる傾向にある。しかし最近では、実時間処理を目標とし、実シーンを追跡可能な

¹ 専門家と呼ばれる人は、仕事に密着した経験則やルールと呼ばれる知識と対象システムの全体構造や機器の構造、および物理や化学に裏付けられた一般的な科学・工学的知識を持って仕事をしている。前者を「浅い知識」、後者を「深い知識」という。専門家はこの両者を組み合わせて判断を行っている。深い知識を用意し、そこから浅い知識を作ることができれば、実用性の高いエキスパートシステムが作れるはずだと考えられている。

ロボットビジョンシステムが開発されている[10]. 今後、マイクロエレクトロニクスの進歩に伴い、三次元情報の取得と高次のイメージ処理とを一体化した小型で実時間処理可能な高レベルの視覚システムの開発が期待される. 計測の高速化から認識の高速化というのがロボット側のビジョンシステムに対して抱く期待であり夢であろう.

一方、マニピュレーションやロコモーションにおける制御の問題は、言うまでもなく動的な世界を対象にしており、ロボットのための力学を整備し、物体の操作・制御の体系的な理論を構築すべき段階にあることは前章で述べた. しかし現実には、単純な作業を対象にした基礎的な研究が行われている段階で、一般的な組立作業のように、対象物同士や対象物と環境との複雑な関係を制御するといったレベルでは、まだ、幾何学や静力学を利用する準静的世界での理論構築が主流のように思われる[4]. しかし実際には、衝突など動的な要素が作業の遂行に大きな影響を及ぼすことも当然考えられるので、マニピュレータの動的制御レベルでの作業計画に関する研究の進展が望まれる.

本章では、ロボットに関する研究の対象が、静的なものから動的なものへと移ってきていることを述べた. しかし、ここで用いた静的、動的という言葉の意味も、計測や制御のレベルで用いられるものと、プランニングや認識でのそれとはかなり違っている. 前者では、例えば、微分方程式で記述される物理モデルを取り扱いの対象としているのに対し、後者では、動的時間によって変化するという意味で用いられており、特に高レベルのプランニングの場合には、高々、述語変数に時間が導入されているといった程度のことではしかない. 両者を統一的に論じるには、前章でも触れた、記号の世界と数値の世界の融合が必要であろう.

5. 個 と 群

どのような対象にも属性がある. 要素の集合でシステムができあがると考えると、要素の持つ属性とそれらの組み合わせ方によってシステムの属性が決まる. システムがある環境に置かれ、特定の目的が与えられるとその属性に応じた機能が発揮される. さまざまな環境において種々の目的に応じた機能が発揮できるような属性を備えたシステムは汎用システムと言われる. 単機能しか発揮し得ないサブシステムを集めると、一般に、ある特殊な環境と目的に応じうるシステムが出来上がる.

従来の産業用ロボットは教示・記憶・再成のサブシステムと駆動サブシステムより成るある程度の一般性を発揮しうる属性を持った自動機械である. ただし、固定された環境において作業目的を達成するような機能を発揮するようにその属性が限定されている. 知能ロボットは、思考サブシステム知覚サブシステム、駆動サブシステム....等できるだけ多くのサブシステムを有機的に結合することによって行動の可能性を高めたロボット（自動機械）と考えるこ

ともできる. 一方、機能を高める努力を重ねたとしても、ロボット単体ではその能力に限界があるのも事実である. 複雑で多様な作業に対応するためには、ロボット単体の機能の向上を無理して図るより、ある程度の機能を持つロボットを数多く揃える方が得な場合がある. 高級な個より単純な個よりなる群という発想である. ところで、複数のロボットが集まって効率良く作業を進めるためには、互いに協力することが必要である. すなわち、協調のメカニズムが個々のロボット、あるいは、全体を統合管理する中枢部に埋め込まれていなければならない. 1つの物体を2台のマニピュレータによって操作する、謂ゆる双腕マニピュレータの協調制御[11]に関しては、把持、移動といった比較的簡単な作業を対象として種々の研究が進められており、今後は、複雑な操作作業への拡張が期待される. 一方、同一作業場に各々が独立の作業を行う複数のロボットが存在する場合には、前章でも述べたように、動的環境における衝突回避問題として、移動ロボットやマニピュレータについて研究が進められている.

双腕マニピュレータの協調制御の場合には、2台のマニピュレータを統合管理するための1台のプロセッサによる集中制御方式が一般的であり、複数ロボット間の衝突回避に関しては個々のロボットに自律と協調のメカニズムを持たせる自律分散協調制御の考え方が少しづつ取り上げられるようになってきた.

一般に、単体では単機能しか発揮し得ない機械でも、数多く集めると組合せ論的に機能の可能性が増える. 複数のセンサを用いることにより単一のセンサでは得られない情報を得ようとするセンサフュージョンなどはその好例である. しかし、数がふえてくると全体をうまく制御することが困難となる. すなわち、システム全体の機能を十分発揮させるためにあまりに精緻な管理・制御を行おうとすると、ロバスト性が犠牲となり、システム全体の信頼性を維持することが困難となる. また、システムを構成する要素である個の数を変化させることが困難となり、システムの柔軟性が失われる.

すなわち、システムの構成要素が一個でも故障すると全体の機能は著しく低下し、もし、中枢の管理・制御部に異常をきたすと、システム全体がダウンしたり致命的損害を受けたりする. システムの作り方、システムの管理・制御方策に関し、新しいシステム論として自律・分散・協調というパラダイムを考えようという動きがある[12], [13]. 全体の管理を集中で行うか、あるいは、各個に自律性を持たせ個同士が互いに協調し合いながら全体として調和のとれた群としてのシステムを構成するかは、個の属性や群としての役割によっても異なる.

ロボットシステムの場合も、全く同じことが考えられる. たとえば、ある物体を多数のロボットで次々に受け渡ししながら目的の場所に運ぶ作業を考えてみよう. この場

合、各ロボットの動きを管理する中枢としてのコントローラは必ずしも必要ではない。各ロボットが隣接する相手とのみ通信を行うことによって、作業は簡単にかつ信頼度高く実現できる。

ロボット単体あるいは比較的小数のロボットが集まって作業を行い、でき上がった中間製品を次のロボットあるいはロボット集団に渡して順次工程を進める場合も、工程間の情報の受け渡しでベルトコンベア方式に替わる柔軟性に富んだ作業プロセスを構成することが可能なように思われる。重量物を持ち運ぶ、組立作業を分担するといった種類の作業の場合にも、自律・協調の考えは十分威力を発揮するのではないだろうか。

ロボットが自律した行動をとるためには、それなりの知能が必要である。自律的に振る舞う知能ロボットが集まって全体としての調和を維持するため、あるいは、まとまった作業をするためには、ロボット同士の協調が不可欠である。ロボット同士が協調するためには、互いに情報を交換するための通信の機能が必要である。通信のコストを下げ、全体の実時間性を保つためには、通信する相手と交換すべき情報の量をできるだけ少なくすべきであろう。一方、情報、特に人工知能の分野でも、複数の自律する処理主体（エージェント）が互いに協調して広域の目的を達成する仕組みの研究として、分散人工知能や分散協調問題解決[14]が最近脚光を浴びている。これらは、個の知能に対し、個の集まりである群全体の知能を問題とするという点で、ここでいう知能を有するロボット群とは多くの共通点を持っている。知能を有するロボットが集まって作る群知能ロボットシステムに関しては、その研究は始まったばかりであり[15], [16], いろいろな立場からのアプローチが望まれる。

6. お わ り に

対比できる2つの概念にロボット研究の各分野を投影することで、限られた幾つかの研究課題についての私見を述べた。なお、マクロ化とマイクロ化という対比も当然考えられるし、特に、ロボットのマクロ化は今後の大きな流れだと思われるが、ここでは触れなかった。

一般に、研究テーマに関しては、要素指向とシステム指向がある期間において繰り返される傾向にある。一方、研究の方法論として、シーズ指向とニーズ指向がある。基礎指向と応用指向といってもよい。これらのどちらがモチベーションになり、かつ、イニシアティブをとるかは別として、2つの間を揺れる傾向があるのは前述の要素指向、システム指向と似ている。前者と後者をそれぞれ複合度と方法論の軸とすると、両軸と直交するもう1つの軸に

沿って螺旋状に技術は高まっていく。研究環境の整備、他分野からの技術移入が技術のポテンシャルが高まるのを助ける。技術が成熟するに従って、スパイラルは高く、繰り返し周期は短く、かつ、その断面は限りなく小さくなる。この技術発展スパイラル論は、ロボットの場合にもそのまま当てはまる。

現在、ロボット技術はこの螺旋のどの辺りまで昇っているのだろうか。

参 考 文 献

- [1] 米本：“産業用ロボットの今後の技術動向”，日本ロボット学会誌，vol. 11, no. 1, pp. 7-13, 1993.
- [2] 梅谷：“ロボットの研究者は現代のからくり師か？”，日本ロボット学会誌，vol. 11, no. 1, pp. 2-6, 1993.
- [3] 「第2回ロボットシンポジウム」ディベート：“ロボット工学の目指すべき方向は？”，日本ロボット学会誌，vol. 11, no. 5, pp. 663-671, 1993.
- [4] 特集：“組立作業計画”，日本ロボット学会誌，vol. 11, no. 2, 1993.
- [5] 有本：“機械システムのインテリジェンス”，計測と制御，vol. 29, no. 3, pp. 201-205, 1990.
- [6] 浅田：“人間と機械の協調環境学”，北野編，グランドチャレンジ，pp. 100-114, 共立出版，1993.
- [7] K. M. Passino, M. A. Sarori and P. J. Antsaklis: “Neural computing for numeric to symbolic conversion in control systems,” IEEE Control System Magazine, vol. 9, no. 3, pp. 44-52, 1989.
- [8] R. A. Brooks: “Intelligence without representation,” Artificial Intelligence 47, pp. 139-159, 1991.
- [9] 石田：“知識表現と動的世界—最近のプランニングの研究から”，人工知能学会誌，vol. 5, no. 2, pp. 146-153, 1990.
- [10] 立川，稲葉，井上：“高速相関演算機能を持つビジョンシステム（第1報～第5報）”，日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集，pp. 839-844, pp. 199-202, 1991.
- [11] 小管：“複数台マニピュレータによる協調制御”，日本ロボット学会誌，vol. 10, no. 4, pp. 439-443, 1992.
- [12] 特集：“自律分散システム”，計測と制御，vol. 29, no. 10, 1990.
- [13] 特集：“自律分散システムの新たな展開”，計測と制御，vol. 32, no. 10, 1993.
- [14] 特集：“分散人工知能”，人工知能学会誌，vol. 5, no. 4, 1990.
- [15] 特集：“マルチエージェントロボットシステム”，日本ロボット学会誌，vol. 10, no. 4, 1992.
- [16] 特集：“群知能ロボット”，計測と制御，vol. 31, no. 11, 1990.

長田 正 (Tadashi Nagata)

1932年10月15日生。1956年九州大学工学部電気工学科卒業。1959年九州大学大学院工学研究科博士課程中退。同年工業技術院電気試験所（現電子技術総合研究所）入所。1970年同所情報制御研究室室長。1980年九州大学工学部教授。ロボットビジョン，ロボットタスクプランニング，自律分散協調システムなどの研究に従事。（日本ロボット学会正会員）