ロボットセンサ技術への期待

長谷川 健 介*

1. は し が き

産業用ロボットが出現したのち、これにロボットセンサを付け加えてその機能を向上させようとする試みは必然的なことであった。

それまで繰り返しロボットといわれた産業用ロボットは、作業プログラムとデータによって規定された運動を再現することによって作業が実行される自動制御機械であるということができ、MC 工作機械の延長上に位置づけられていた。

しかしながら、その役割は NC 工作機械とまったく違って、対象物に対する手作業を中心としたものであった。

したがって、これに生体に近い機能を与えロボットの能力をもっと高めたいという要望が出てくるのはごく自然のことで、そのためにはまずロボットのためのセンサの開発とその応用技術が必要であった。

また一方、計算機の発達とともに、問題解決の仕組みを中心とした人工知能の研究が 1960 年の初期から本格化してきたが、環境情報の取得とその理解がより高度の人工知能の実現に不可欠であるということから移動ロボットと視覚を中心とする研究が始まり、さらに組立作業を対象とする知能ロボットの研究に進んで行った。そこで視覚以外の感覚の必要性が認識されるようになった。

つまり、簡単なハンドリング作業から出発した産業用ロボットにおいても、人工知能から出発したロボットにおいても、結局はロボットに感覚が不可欠なものということが共通の認識となった。そこで、ロボットの感覚及び感覚器に関する技術、いわゆるロボットセンサ技術はロボットの進化に直接結びついた非常に重要なロボットの基礎技術として位置づけられるに至ったのである。

このようなロボットセンサ技術をこれからのロボットの本格的な知能化という観点から眺め、今後の発展への期待を込めながら考察してみたい。

2. ロボットにおけるセンシングと制御の結合

ロボットは動物に類似した知的機械といわれている。

人間をモデルにして考えると、きびしい環境のもとで、生存をかけた競争を通して今日まで進化してきたということができる。つまり人間が生きていく場合、単に「生きる」ではなく、いかに賢く、うまく生きるかということが進化につながり、知能が形成されてきたものと考えられる。生存するため、外敵・障害を避け、獲物を探し、そして獲物を獲得するという行為のなかで、センシングと制御が知識を媒介として高度なフィードバックループによって結合しているとみることができる。

以上のことをロボットシステムに当てはめてみよう。

ロボットのセンシングを機能的に人間のそれと同じように捉えると図 1(a) のように表すことができる。すなわち、外界にある対象について特定のものが選ばれ、これに関する情報を含む入力刺激はロボットセンサ中の入力変換器を通してエネルギー信号変換されて信号群に変えられる。これに抽象、合成を代表とする信号・情報操作を加えて感覚・知覚さらに認識を経て表象として対象の復元が行われ、知識の形で記憶される。この処理の流れをここではセンシングパスということにしよう。

これに対してロボットの制御を人間の運動制御に近い形で表現すると図 1(b) のように表すことができる。

すなわち記憶から選ばれた作業目標は知識からの情報を付加されながら単位タスク、単位動作、ジョイント駆動に順次分解され、具象化されて行き外界（実世界）において末端効果器を動かして作業目標を実現する。このような処理の流れをここではコントロールパスということにする。

これらセンシングパスとコントロールパスとを比較してみるとあきらかに双対性を持つということができる。

現時点での実用的なロボットにおける制御とセンシングの結合の形態は図 2 に示すようにそれぞれのパスの途中で結合して探索ループを持たせ、(a) センシングのための制御か、(b) 運動制御のためのセンシングかの

原稿受付 1991 年 11 月 18 日

Expectation of Robot Sensor Technology

* 桐蔭学園横浜大学工学部

2通りとなっているが、さらにこれらを統合する形(c)がいわゆるマシンインテリジェンス¹⁾となる。これは始めの2つの形態を上位のシステムで結合し、さらに目的に併せて探索ループを適応的に起動できるような自律システムである。

現在、産業面では、このようなシステムが柔軟に組めるようになっているわけではない。センシングパスにおいては、例えばコンピュータビジョンのように視覚は高いレベルにまで至っており実用化されたものも少なくない。これはその需要が大きいことと、他のセンサと異なり視覚単独で利用できることから来ている。その意味では聴覚についても高いレベルの音声認識の研究が進んでおり近い将来、実用化が促進されるものと思われる。

一方、ロボットの制御に直接に関係する触覚、圧覚、力覚などのセンサは上述のものに比較すると開発と実用化は遙かに遅れている。すなわち、これらのセンサはロボットの作業と連動して用いられるものであるが、それに対してロボットのコントロールパスの完成度が低いと同時に、センシングパスとコントロールパスとを容易に融合させることができる標準的な産業用ロボットの開発が遅れている。最近、産業用ロボットへの視覚及び力覚センサの導入が進みつつあるが、それはほとんどの場合、タスクプログラム（作業手順を記述したプログラム）での利用が普通であり、制御プログラム（ユーザには開放されていない運動制御に関するプログラム）レベルでの柔軟性のある運動制御の実現は研究段階であるか、あるいは専用機としてのものであり、解決すべき今後の問

題として残されている。

3. 感覚情報処理系からみたセンシングパスの機能

さきに述べたように、完成した知的システムとして生体の機能をモデルにすることは工学上、重要な接近法の一つである。ところで、生体機能については体験的によく知られているわけであるが、技術的分野において統一的にまた正確に定義、分類されているわけではない。そのことがセンサに関する議論を進める上で曖昧さが残ることが多い。以下の議論でこのことを避ける意味で感覚情報処理に関するいくつかの用語（例えば広辞苑²⁾参照）を明確にしておこう。

感覚器官：感覚刺激を受容するのに適した機能を有する器官で、触覚、圧覚、温度覚などの体性感覚系、視覚、聴覚などの特殊感覚系に対応する感覚器官がある。ロボットセンサにおいては刺激入力の変換器に相当する。

知覚：感覚器官（ロボットではロボットセンサ）を通して外界の対象の性質、形態、関係などを意識する作用、及びその作用によって得られる表象。

表象：意識に現れる外界対象の像。知覚によるものを知

(a) センシングパス

(b) コントロールパス

図1 ロボットの内界と外界間の情報の流れ

(a) センシングのための探索

(b) 制御のための探索

(c) 自律システム

図2 センシングパスとコントロールパスの結合

図3 センシングパスのブロック線図

覚表象，記憶により再生される場合を記憶表象，想像によるものを想像表象と呼んでいる。

感覚：知覚の一部で，記憶や推論などの要素を除き感覚器官に直接関係あるものをいう。

認識：知覚から知的作用により知識を得ること。あるいは知り得た知識をいうことがある。

さて，以上の用語と概念をもとにして工学的な意味でのセンシングパスを少し詳細に表現したものを図3に示す。図において

- ①入力変換（刺激エネルギー→信号変換）
- ②信号前処理（増幅，ノイズ除去，波形形成など）
- ③信号操作（信号変換，データ圧縮，平均操作，時間・空間フィルタリングなど）

④構造化操作（データの構造化（例：線，面の形成））
までの段階が感覚操作機能であり，その結果として感覚情報が得られる。生体においては，この段階では知識が利用されることなく，感覚器官固有の機能に対応して入力刺激から感覚情報を得る，としている。またこの情報自体は定量的であり「意味」を持たない。

次の知覚操作機能においてはさらに推論や知識を利用して情報の構造化を完結させ，さらに対象の特徴を抽出する論理的（定性的）処理が加わる。ここでの情報の構造化を感覚処理機能での構造化より上位に置くことにする。

知覚操作によって得られた知覚表象は認識操作機能によって対象の表象として組立てられ知識として記憶される。

以上のセンシングパスにおいて，知識が利用されない前半（感覚操作機能）と後半では大きな差がある。この

前半を周辺系，後半を中央系と云うことがある^{3),4)}。

周辺系は異なるタイプの入力刺激の処理のために固有の特殊化された形態をもち，中央系に関係なく感覚情報を絶えず構造化して中央系での利用に備える。したがってその処理は入力刺激に対して反射的である。一方，中央系は取り込んだ感覚情報を知識を用いながら知的な合成処理を行うが，ハードウェア的には特殊化はなく一様であるとしている。このような機能的な捉え方は説得力があるが，これを工学的，技術的に取り込むときハードウェア面での制約に必ずしも拘束されない。例えば，さきに述べた周辺系での各種の構造化操作をソフトウェアによってモジュール化したロジカルセンサ⁵⁾や仮想センサ⁶⁾があるが，これらは既存のセンサ固有の処理よりもむしろ異種のセンサ情報を構造的に合成して新しい情報を生成するものであり，さらに中央系での知識を利用した構造化に容易に拡張できる。したがってこのような「ソフトウェアセンサ」は周辺系と中央系にまたがって位置づけされる。

5. ロボットセンシングとセンサフュージョン

さきに述べたようにロボットセンシング系は抽象，合成を逐次行いながら物理的な信号を，構造化された定量的情報や，論理的な意味を持つ定性的な情報を生成する役割をもつ。センシングパスでは，感覚操作，知覚操作，認識操作の各段階で，複数の信号や情報を合わせることでより新しい効果，情報を生み，それらがさらに上位の段階で新しい情報を生むようになる，という仕組みになっている。このような仕組みに関する概念をセンサフュ

ージョンあるいはセンサ統・融合と呼んでいる。結局ははじめに述べたように情報の抽象と合成ではあるが得られる効果に互いに異なるものがあり、これらが実世界の把握と理解およびこれに対する意志決定に不可欠であるとしてセンサフュージョンに関する研究が現在急速に進められている。本学会においても「ロボットのセンサ統合・融合システム研究専門委員会」が設置されており、また昨年、特集⁷⁾が組まれている。そのほか、世界的に数々の特集や報告書など^{8),9)}が発表されている。

さて、さきに述べた種々のセンサの合成による効果について上記の研究専門委員会では現在、センサ関連の研究者を対象としたアンケート調査を行いその分類を試みている。また石川は複合、統合、融合、連合に分類している¹⁰⁾が用語としての分類は適切なものと思われる。

以下、その簡単な意味付けを上記文献にしたがって挙げる。

- ①複合 (multisensor) : 複数のセンサ情報を並列的、相補的に組み合わせた出力を得る過程
- ②統合 (integration) : それぞれのセンサからの情報に演算処理 f を施してまとまった情報を得る過程
- ③融合 (fusion) : センサ情報間あるいはセンサ情報と内部モデルとの間で相互の関係が新たな知覚表象を与える過程
- ④連合 (association) : センサ情報間の関係を理解する過程。認識、予測、学習、記憶などが主要な目的

さて、さきにセンシングパスについて論じたことを基礎にいくつか私見を述べてみたい。なお、これまで筆者がいう「センサ情報の合成」を一応、「センサフュージョン」とよぶことにする。

まず、つぎのような仮説をしてみる。

(1) センサフュージョンは、センシングパスの周辺系と中央系とでは情報処理の性質を異にする。

このことは一般に認知されているものと思う。

(2) 「融合」による出力情報からそれに利用された入力情報を分解・再現できない。「融ける」という現象にはこのことが含まれている。

(3) 「統合」による出力情報からそれに利用された入力情報を完全に分解・再現できる。なぜならば、これは階層を前提にしているからである。

(4) 「複合」による出力情報からそれに利用された入力情報を部分的に分解・再現できる。加算的、相補的であり、これにより階層は生じない。

(5) 「連合」による出力情報からそれに利用された入力情報を完全に分解・再現できる。これにより論理の世界での「意味」をもつ情報(特徴、知識、概念など)の「関係」による合成が行われる。

表 1 センシングパス内での各種センサフュージョン

		複合	融合	統合	連合
感覚	前処理				
	信号操作	和演算	積演算 平均演算		
処理	構造化(定量) : 知識参照なし		距離、線 面、ベクトル、特徴量	距離 位置	
	構造化(定量)		距離、重心 線、面、 ベクトル	位置 距離	
知覚処理	定性化		特徴(色、 形態)	連結性、 後、	
	構造化(定性)			組立構造	属性の付加、 環境内の関係
認識処理	理解		特徴 (安定感、 風合い)	局所的 知識	大域的 知識

このような仮説的な概念は必ずしも完全なものではないかも知れないが概念間の相互の区別は明確になると考えられる。ただしこれ以外の範疇が除外される可能性が残っているが、それはここでは目をつぶることにする。したがって上記のそれぞれのセンサフュージョンがセンシングパスの上でどのレベルで可能であるかを見ればよい。

これを表にしたものが表 1 である。表中、空白の部分は該当する処理が現在、見当たらないもので未知の部分である。

さて、これらセンサフュージョンの過程は視覚のように並列的なものがあるが、ロボットが動くことによって積極的にセンシングをおこなうアクティブセンシングがあり、図 3 に示した探索ループによってこれが形成される。この探索ループが周辺系(感覚処理レベル)に限定される場合、反射的な挙動に基づく探索でフィードバック制御ループが形成されることが多い。この場合は因果関係の分離が困難で感覚信号は「融合」されるものと考えられる。しかしながら中央系を含む探索ループとなると離散事象制御ループが形成され論理的な情報生成となり因果関係が一方的であるのでセンサ情報の「統合」となる場合が多い。このように探索ループを伴うセンサフュージョンも明確にされることが必要であろう。

5. む す び

以上、ロボットセンサそのものに付いての新しい話題は本特集の解説にゆずることにして、ここではこれらセンサを受け入れるシステム環境についての考察と今後の展開の方向、および問題点について述べた。21 世紀に

向けて、間違いなく、ロボットは工場を出ていき、建設、保守、福祉など、至るところで働く時代へと進むものと思われるが、その知能化へのロボットセンサ技術の役割の重要さを強調したい。

参 考 文 献

- 1) 有本；機械システムのインテリジェンス，計測と制御，Vol. 26-3, pp. 201-205, 1990
- 2) 広辞苑（第二版），岩波書店（1969）
- 3) J. A. Fodor : The Modularity of Mind, MIT Press (1983)（伊藤，信原訳；精神のモジュール形式，産業図書）
- 4) 辻井；知識の表現と利用，昭晃堂，1989
- 5) C. Hansen, et. al. ; Logical Sensor Specification, Proc. of The 3rd Inter. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls, pp. 321-326 (1983)
- 6) 小宮，長谷川；センサ融合システムの構築に関する基礎的研究，SICE '89, JS65-5 (1989)
- 7) 特集「センサ情報の統合」，日本ロボット学会，Vol. 8-6, pp. 81-135 (1990)
- 8) J. M. Brady, et. al. : Special Issue on Sensor Data Fusion, Int. J. Robotics Res., Vol. 7-6, pp. 2-116 (1988)
- 9) N. Ghani ; Sensor Integration in ESPRIT", Proc. IFAC Symposium on Robot Control, pp. 323-328 (1988)
- 10) 石川；センサフュージョンの課題，日本ロボット学会，Vol. 8-6, pp. 95-102 (1990)

長谷川健介 (Kensuke HASEGAWA)

昭和30年東京工業大学理工学研究科大学院修士課程終了，同年東京工業大学理工学部電気工学科助手，昭和36年同学部制御工学科助教授，昭和48年同大学工学部制御工学科教授を経て，平成3年4月より桐蔭学園横浜大学工学部制御システム工学科教授。昭和48年より49年までドイツカールスルーエ工科大学 客員教授。専門分野としてロボット工学，離散事象システム論。電気学会，計測自動制御学会，システム制御情報学会などの会員。

（日本ロボット学会正会員）