サブサンプションアーキテクチャを用いた ロボットの制御

吉 田 典 晃*

1. は じ め に

自律知能ロボットは、センサ信号を解析して環境を記号で記述した後、与えられた作業目標と環境の記号記述から作業計画すなわち行動シーケンスを作成し、その作業指令に従って行動する。しかし現実の世界ではセンサの観測、それを記号で表現する認識の難しさ、そして逆に記号で記述された作業指令を実世界でロボットが遂行する難しさが存在する。併せて多くの対象は、個々に種々の性質を持っているため、システムがその中から与えられた仕事に必要な情報を選んで、計画を作り実行する必要がある。すなわちエラーの発生しやすく信頼性の確保が困難な環境下でロボットの行動を制御するには、作業対象物や環境に含まれる公差や不確かさを扱うために冗長性、信頼性の高い効果的な方策が必要とされる。またロボットが行動中に所望の動作を実現不可能な場合の復旧動作を実現することが望まれる。すなわちロボット制御システムにはプロセスの状態を実時間で監視し、その状態変化に従い制御動作を修正する機能が盛り込まれなければならない。

サブサンプションアーキテクチャは、複雑で変化しやすいタスクを扱うためには適したアプローチである。サブサンプションアーキテクチャは、自律知能移動ロボットを扱う手法として Brooks によって開発されたものである¹⁾。近年、サブサンプションアーキテクチャを利用した様々な応用研究が自律移動自動車、知能玩具、組立作業などの分野で進められている。本稿ではサブサンプションアーキテクチャにより構成された制御システムを移動ロボット、組立作業ロボットを制御対象として説明する。

2. サブサンプションアーキテクチャを用いた制御システム

2.1 システム構成

知能ロボットに対する典型的なアーキテクチャは、概略以下のような処理形態を持つ。まずセンサ系が環境を認識する (Perception)。続いて認識結果から内部に外界の物体、事象のモデルを何等かの形で作る (Modelling)。次にモデルに応じた行動計画を発生し (Planning)、更に計画を実行すべきタスク群に分解し実行する (Task Execution)。そして分解した動作群を順次駆動系 (Actuators) へ伝達する。センサ系が環境認識を行うために、「センサ融合 (Sensor Fusion)」という処理が始めに行われるのが特徴である。従来の知能ロボットのほとんどがこのような処理形態を持っている。制御システムを構成する一般的な方法は問題を制御システム内部処理機能単位に扱う分割にて行われる。一般的な知能ロボット制御技術者は、問題を図1に示すように垂直方向に分割している。

全体の分割は、センシングにより環境から入ってロボットを通り行動によって環境に戻って行くという情

知覚 (センシング)
モデル化 (センサからのデータのモデル表現への変換)
計画 (プランニング)
タスクの実行
運動制御 (モーターコントロール)

図1 機能モジュール構成による移動ロボット制御システム¹⁾

原稿受付 1993年8月10日

Robot Motion Control Using Subsumption Architecture

* 松下電器産業株式会社

報の流れを構成する。実際のロボット制御システムには冗長性、拡張性が要求される。

(1) 冗長性

ロボットに用いられるセンサ（例えばエンコーダ、力センサ、TV カメラ等）は、ノイズの多く含まれる環境下で情報を収集するため、多くの誤差を含み矛盾する読み取りを与えることが多い。これらの情報を利用してロボットを制御するとセンサ情報が有効か無効かを判断する手段が存在しないため、ロボットは誤動作することがある。

(2) 拡張性

特定の部分に変更を加える場合には、それが機能の拡張であろうと改善であろうと隣接する部分が変化しないように留意するか、若しくは必要な機能の自動的変更が可能ないように設計しておくなくてはならない。

Brooksによれば、知能ロボット全体の動作は「それぞれ自分の認識と判断で勝手に動こうとする独立な多数の要素行動間の競合・協調」の結果として表現できる。認識能力とそれに直接結合した専門の行動能力のペア、すなわち「認識+行動」のペアをエージェントと呼ぶ。センサ融合や外界のモデルを通して知的な存在に全体を統合する知能の中枢を見い出そうとするより、多数の独立なエージェントの集合体として見た方が適切であるという分散処理思想である。知能ロボットの中では、各瞬間に個々のエージェントがそれぞれ自分が認識した結果に対応した、場合によっては相容れない競合する行動をとろうとする。このためサブサンプリングアーキテクチャでは、入力側に外界を中央集権的に認識するためのセンサ融合がない代わりに、出力側にその最終的な行動（表面で観察される行動）を定めるための、独立な要素行動群間の競合・協調を得るための「行動融合(Action Fusion)」処理が必要になる。

サブサンプリングアーキテクチャでは、問題を独立なエージェントの集合体として水平方向に分割する。解法に用いる内部構造で問題を分割せずにロボット制御システムのタスクの外から見た望ましさを基に問題の分割を行う。

2.2 制御の層構造

能力レベルにおいて重要なことは各レベルに対応する制御システム階層が構築可能であり新しい階層の付加により全能力の向上が容易なことである。

まずレベル0の能力を有する、完全なロボット制御システムを構築する。レベル0の制御システムのデバッグを行い、その後はシステム変更を行わない。次に

図2 サブサンプリングアーキテクチャによる制御の層構造¹⁾

別の制御層を構築し、これをレベル1の制御システムと呼ぶ。レベル1の制御システムは、レベル0のシステムのデータを吟味することができる。更にレベル0の内部インターフェイスにデータを埋め込んで通常のデータフローを制御することもできる。この層はレベル0の層の機能を利用してレベル1の能力を達成する。一方レベル0の層は、時折データ路に干渉してくる上位層にはまったく気付かずに動作し続ける。同じ過程を繰り返して図2に示すような高次の能力を達成する。このような方式を用いると、開発の初期段階で動作可能なロボット制御システムを手に入れたことになる。つまりレベル1の層を作ると同時にシステムは動作する。付加的な層は後で加えればよく、以前に動作していたシステムを変更する必要がない。

サブサンプリングアーキテクチャを用いることによりロボットの制御システムは、階層構造をなすとともに、各階層は同時に個々のゴールを目指して動作し、各階層の出力結果の融合としてシステムの挙動が決定されるためシステムの冗長性が増大する。また個々の事象は独立に定義されるためプロセスに対する機能の拡張、変更が容易に実行でき、結果としてロボット行動の切り替えや調整に必要なリードタイムを最小にすることができる。

3. 移動ロボット制御システム

Brooksは、移動ロボット制御システムにおいて各階層をロボットの能力レベルとして図3のように定義している。

各能力レベルは、より下位の能力レベルを部分集合として含む。能力レベルは、有効な行動を規定するので高次の能力レベルはその行動への付加的な制約を課すことになる。本構成により各階層は同時に独自にセンサの情報を利用するため信頼できるセンサのみを知

0. 物体との接触を回避する(物体が動いていても静止していても)。
1. 物体を避けながら無目的に動き回る(逍遙)。
2. 前方の意味のある物体を観察して、世界を探索する。
3. 環境の地図を作り、ある場所から別の場所に行く道筋を計画する。
4. 静的環境内の変化き気付く。

図 3 タスクの達成のための行動に基づいた移動ロボット制御システム¹⁾

図 4 レベル 0 と 1 の移動ロボット制御システムにレベル 2 を加えたシステム¹⁾

覚処理の中心として扱うことが可能となる。その上各階層で複数のセンサ情報を融合して処理を行い、センサ情報の有効性を吟味できシステムとしての冗長性が増加することとなる。サブサンプリングアーキテクチャにより構成された移動ロボットを図 4 に示す。制御システムは、拡張した有限状態マシンにより実行さ

図 5 機能モジュール構成による組立作業ロボット制御システム⁷⁾

れ、異なるタスク層の間の競合解消には禁止(Inhibition)と抑制(Suppression)のメカニズムを用いる。またシステム全体はマルチエージェントによる非集中型システムとして扱われる。

4. 組立作業ロボット制御システム

4.1 問題の記述

組立作業ロボット制御システムは一般的に図 5 に示されるように構成されている^{3),4)} [Manson, McCarraher and Asada]。

環境からエンドエフェクタに加わる力情報を基に組立作業ロボットは、コンプライアンス制御を実現する。本稿では、Whitney⁵⁾によって提案されたダンピング制御を利用し組立作業制御システムの構築を行う。ダンピング制御は作業座標系におけるロボット先端のエンドエフェクタの速度 V とエンドエフェクタに加わる力 f の関係を制御することによって、ロボットと環境との干渉を制御しようとするもので、力と速度の関係は、

$$V = Af$$

と表すことができる。ここで A は、アドミッタンス行列である。また論理分岐の方法として Paul and Shimano⁶⁾によって使用された次の方法を利用する。

If f is [], THEN move at V ELSE [].

上述のような記述方法を用い、力情報によりプロセス状態を識別し制御動作を決定する。本稿では、作業対象物の幾何形状と環境の接触状態及び作業者の組立作業実演から必要とされる情報を抽出する。

0. 軌跡の追従
1. 障害の回避
2. あらかじめプログラムされた次のステップへの遷移
3. 接触状態の認識
4. 接触状態ネットワークによる経路計画
5. 物体の確認
6. スーパーバイザー

図 6 タスクの達成のための行動に基づいた組立作業制御システム⁷⁾

図 7 レベル 0 の組立作業ロボット制御システム⁸⁾

4.2 組立作業ロボット制御システムの実例

サブサンプションアーキテクチャにより構成される組立作業ロボット制御システムの構造を図 6 に示す。各能力レベルの内部構成を以下に示す。

(1) レベル 0

制御の最下層は、ロボットがエンコーダ信号に基づく軌跡を追従することを目的とする。3 自由度の動作をここではフォワード、スライド、ターンモジュールで表現する。アセンブルモジュールは、動作すべき速度のベクトルを受け取りランモジュールにコマンドを

図 8 レベル 0 の組立作業制御システムにレベル 1 を加えたシステム

図 9 レベル 0 と 1 の組立作業ロボット制御システムにレベル 2 を加えたシステム

送信する。このレベルでは、基本的にサーボ制御を利用している (図 7)。

(2) レベル 1

レベル 1 は、ほかの障害物と接触することを避けることを目的とする。ランモジュールは、アボイドオブスタクルモジュールからの停止信号により停止する。フォースモジュールは、力センサより力情報を受信し必要な軸に対する力情報を制御システムに送信する (図 8)。

(3) レベル 2

レベル 2 は、組立作業を実現するためあらかじめプログラムされた一連のプロセスをシステムに与える。プロシードモジュールは、アセンブルモジュールに対し次に実行すべき手続きを与える。すべての手続きは、作業対象物の幾何形状と環境の接触状態による図

図 13 エンドエフェクタと環境のつまり状態を復旧動作中の力とロボット軌跡⁷⁾

は 2 cm/sec である。

今後は、動作中の組立作業システムに対して視覚情報を有効に利用する方法等が考えられる。

5. ま と め

本稿では、サブサンプリングアーキテクチャを利用

したロボットの制御システムについて、代表的な適用事例としての移動ロボット制御システムと組立作業制御システムを取り上げ説明した。

サブサンプリングアーキテクチャをロボット制御システムに用いることによりロボット動作中に起こる規定外の現象に対する復旧動作とともに幅広く変化しやすい環境に対し冗長性、拡張性を備えた有効な制御システムを構成することができる。サブサンプリングアーキテクチャは、行動型アプローチ (Behavior Based Approach) と呼ばれ、知能ロボットを構築する際に構造、処理方式上の新たな可能性を提示している。しかしサブサンプリングアーキテクチャにより構成されたシステムはどこまで複雑なタスクを実行できるのか、また複雑な仕事に対してタスクに分割が互いに独立で不干渉にできるのかなど、実用化に向けては乗り越えなければならない課題は多くある。しかし、サブサンプリングアーキテクチャを用いた具体的な応用研究が進む中で今後の展開が期待される。

参 考 文 献

- 1) R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot," IEEE Journal of Robotics and Automation vol. RA-2-1, pp. 14-23 (1986)
- 2) 白井, 井上, "知能ロボット研究の展望—モデルベース・ロボティクス—", 日本ロボット学会誌, Vol. 5-6, pp. 462-469 (1987)
- 3) B. McCarragher and H. Asada, "Qualitative Template Matching Using Dynamic Process Model for State Transition Recognition of Robot Assembly," ASME Winter Annual Meeting (1991)
- 4) M. T. Manson, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-11-6, pp. 418-432 (1981)
- 5) D. E. Whitney, "Force Feed Back Control of Manipulator Fine Motions," ASME, J. Dyn. Syst., Meas., Contr., Vol. 98-2, pp. 91-97 (1977)
- 6) R. P. Paul and B. Shimano, "Compliance and Control," Proc. of Joint Automatic Control Conference, pp. 694-699 (1976)
- 7) 吉田, 浅田, "サブサンプリングアーキテクチャを用いた組立作業システムの制御", 第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 347-350 (1992)
- 8) 辻, "知的ロボティクスの幾つかの問題", 日本ロボット学会誌, Vol. 9-1, pp. 79-84 (1991)

吉田典晃 (Noriaki YOSHIDA)

1959 年 4 月 19 日生。1984 年, 名古屋工業大学工学研究科修士課程修了。同年松下電器産業(株)に入社。同社精機事業部にて回路形成設備の研究・開発に従事。1991 年～1992 年米国マサチューセッツ工科大学客員研究員。(日本ロボット学会正会員)