発現行動型アーキテクチャによるアームロボットの制御

中 内 靖* 西 田 洋一郎* 森 泰 親*

The Control of Arm Robot by Using Emergent Behavior Based Architecture

Yasushi Nakauchi*, Youichiro Nishida* and Yasuchika Mori*

In order to utilize robots in the service fields, such as in offices and in hospitals, the robots should equip the functions for coexisting with human. In this paper, we propose EBBA (Emergent Behavior Based Architecture) for that purpose. EBBA is constructed by behavior modules. And each module can act concurrently by referring inputs from sensors, its object states and its internal states. And the emergent behavior of the system is defined by a certain set of the object states. Therefore, a planner (one of the behavior modules) can control the emergent behavior of the system by referring and by changing the other modules' object states and internal states. We have implemented a robot hand system by using EBBA. We also shows that the system can perform tasks efficiently by selecting emergent behaviors as the experimental results.

Key Words: Arm Robots, Behavior-based AI, Adaptive Behavior, Obstacle Avoidance, Tactile Skills

1. は じ め に

ロボットはこれまで主に産業分野で実用化され、その高い利用価値が認められてきた。また近年、自律移動ロボットを産業用に限らず、例えば医療における看護ロボットや床清掃ロボットなど、より広い分野で利用したいという要求が高まってきている。病院での看護や、清掃、オフィスでのメールの配送などのサービスを行うロボットは、人間の存在する環境で、人間や他のロボットと共同で作業を行うことがある。このような協調作業を行うロボットは、人間と作業環境を共有するため、その作業を行う環境に様々な変化がある。そのためロボットは、あらかじめ障害物の位置等を知ることはできない。このように、人間との協調を考えた汎用サービスロボットは、様々な障害物を回避しつつ、作業を続けられなくてはならない。したがって人間共存型ロボットには、環境に存在する障害物を確実に検知できることが要求される。また人間共存型ロボットは、このような様々な環境に適応しながら、目的とする動作を実行できなければならない。ロボットをこのような状況に適応させるためには、与えられたタスクを遂行できるまで、考えうる複数通りの手段を講じさせるなど、システムが失敗に陥らないような処理構造にしなければならない。

そこで本研究では、人間共存型ロボットに必要な環境への適応能力について検討し、その機能を実現するロボットの

制御方法として発現行動型アーキテクチャ (EBBA: Emergent Behavior Based Architecture) を提案する。我々の研究室では現在、人間共存型ロボットを目指して、双腕型自律移動ロボット WM (Work Mate) [2] を開発中である (Fig. 1 参照)。WM は 2 輪駆動型の移動ロボットベースの上に、表面全面に接触センサが取り付けられた 6 軸型アームロボット 2 台と 3 自由度のステレオビジョン・ヘッドシステムが搭載された構成となっている。我々は WM をオフィスなどの整備されていない環境において利用することを考えており、例えば人がコーヒーを入れるように命令すると、必要なコーヒーの缶やコップなどをビジョンにより探索し、入れたコーヒーを命令した人間のオフィスまで運ばせるアプリケーションを考えている。このような環境で WM が、コップを取ろうと腕を伸ばすと、周囲の人間または他の缶に腕が当たることが予想される。人間に対しては安全であり、また他の障害物に関しては回避するなどして、与えられたタスクを自律的に遂行できる必要がある。

上記に述べた動作を WM を用いて実現するためにはまず、WM の個々の構成要素が人間との共存環境において適応して動作できるように作成し、その後に統合化を図る必要があると考える。そこで本研究では、WM のアーム部に EBBA を適用し、接触センサの情報のみを利用して、環境に適応したアームロボットを開発する。また実験により、EBBA の有効性を検証する。

2. 人間共存型ロボット

人間と共存するロボットには、環境ならびに人間の知覚、人

原稿受付 1996 年 4 月 22 日

*防衛大学校

*National Defense Academy

Fig. 1 The out look of WM (Work Mate)

間の精神的態度（信念、意思、感情など）の理解、これらの知覚、理解をもとにした問題解決能力、言語、ジェスチャ、行動などによる内部状態の表出能力などが必要と考えられる[1]。これらの能力を実現すべく、様々な研究がなされているが、精神的な態度の理解などの高度なインタラクションを図る以前に、ロボットは機械システムとして、以下に述べる基本的な機能を満足している必要があると考えられる。

まず人間共存型ロボットの利用環境では、人間とロボットが互いの作業環境を共有するため、人間とロボットが物理的に衝突する恐れがある。そのため、ロボットは差し出した腕が人間と接触した場合には腕を引くなどして、人間に危害を及ぼさないようにする必要がある。また、人間がロボットの作業環境に間接的に影響する場合が考えられる。例えば、ロボットの作業空間のなかに、人間によって障害物を置かれたり、それまで存在していた物を取り除かれたりする場合がある。また、人間の腕や体が直接障害物となる場合も考えられる。一般に障害物は、机の上のコップや計算機など、空間を占有し続ける静的な障害物と、人間や他のロボットのように一時的に占有する動的なものの2種類に分けられる。人間共存型ロボットの利用環境が動的であるのは、このような障害物が多く存在するからである。したがって、人間共存型ロボットはこのような障害物（静的、動的）を回避して動作できなくてはならない。さらに、人間と共存して動作するには、与えられたタスクを遂行できずに、機能が停止してしまうようなことでは使いものにならない。あるタスクを遂行するために必要な手法を複数用意してシステムに冗長性をもたせ、フォールトトレラントなシステムにするだけでなく、与えられたタスクを遂行できるまで、考える複数通りの手法を用いて再試行するなどし、システムとしては動作不能状態に陥ることのないようにしなければならない。以上に述べた、人間共存型ロボットの具備すべき基本的な要件は Table 1 のようにまとめられる。

これらの要件のうち b) ならびに c) は一般のロボットにも当てはまるが、これらの要件を満足しているシステムは現状で

Table 1 Basic functions for human coexistent robots

a)	人に危害を加えないこと
b)	障害物（静的、動的）に対応できること
c)	システムがフェイル（失敗）しないこと

は見当たらない。一般のロボットの使用環境では運転者が監視しているため、これらの要件が満足されていなくても、人間ならびに障害物が入り込まないように柵を張りめぐらせたり、運転者が障害物を除去したり、再起動によりフェイルリカバリするなどし、運用されているのが現状である。ところが人間共存型ロボットでは、整備されていない環境において人間の監視なしに動作し続けることこそが重要であると考えられる。そこで本研究では、これら三つの基本的な要件を満足するシステムの構築を目的とする。

D. Vischer は、人間と共存するロボットの一例として、食器を仕分けるロボットを開発した[3]。このシステムでは、CCD カメラを用いて周囲の環境の情報を入力しており、ロボットの作業環境内に人間が入ってくると、ロボットの動作速度を遅くする。またロボットの暴走を防止するために、加速度検知器を用いてロボットの位置決めを監視しており、異常時にはただちに非常停止するようになっている。しかしこのシステムでは、最終的には人間がロボットを避けなければならない、人間とロボットの作業空間は排他的なものとなっている。人間とロボットが共存するためには、お互いが作業を行う空間を共有し、お互いが避け合える必要がある。

ロボットにコップを掴ませるとき、コップ本体を避けて、コップ両端にロボットの指が掛かるように位置決めする必要がある。このときコップ本体は静的な障害物と見なすことができる。S.A. Stansfield [4] らはロボットにコップを把持させるために、CCD カメラから得られた画像情報を用いて、ロボットにコップを把持するためにふさわしい指の形をあらかじめ形成させた後に、コップに接触しないようにコップの両端に指を挿入するシステムを開発している。しかしながら、画像処理のコストが高いため、画像情報の質をコップを認識できる必要最低限に落としている。ここで、コップ以外の障害物や人間が作業環境に存在した場合、それらを画像処理によって回避することはできない。

一方、P.K. Allen [5] らは二次元平面上を移動する対象物を CCD カメラで捉えて観察し、その動作を予測しながら対象物を把持するシステムを開発している。移動物体の動作を予測するために、画像のオプティカルフローの計算には専用のパイプライン計算機を用いている。しかしながら、このシステムを用いて動的な障害物回避を行わせるためには、任意の背景のなかを三次元的に移動する対象物の動作を抽出し、移動先を予測しなくてはならない。また、動的障害物と腕との接触を避けるためには両方ともが動いているため、画像によって障害物のみを抽出することは非常に困難である。

このように、静的ならびに動的な障害物を認識するためには、画像処理を用いているのでは計算量が大きいため、確実に回避することは困難である。さらに現状では任意の位置にある任意の数の静的または動的な障害物の位置ならびに移動方向を計測

することも非常に困難である[†]。一方、接触センサを用いた場合、環境を確実に検知することは可能であるが、接触してはじめて障害物回避を行うことになってしまう。そのため、これらを併用し接触センサを用いることにより、障害物に接触はするものの、確実に障害物を回避できるシステムを構築し、そのうえで非接触センサを用いた回避システムを構築することが望ましいと考えられる。そこで本研究ではまず、接触センサを利用することにより、静的ならびに動的障害物を確実に検知し、これらを回避できるシステムを構築することとする。

センサベースの行動モジュールを組み合わせてシステムを構築する設計手法として、サブサンクション・アーキテクチャ (SSA: Subsumption Architecture) [6] [7] が提案されている。SSA はセンサベースの行動モジュールを階層構造にすることにより、システムに冗長性を持たせ、様々な状況においてフェイルしにくいシステム構成となっている。

我々はこれまでに、SSA を用いて動的環境に適応できるロボットハンドシステムを構築してきた [8] [9]。これらのシステムでは障害物を接触センサにより検知し、上方または下方から障害物を回避できるように、回避の方向ごとに行動モジュールを用意してシステムに冗長性を持たせた。そして、プランナが状況に応じて適当な行動モジュールを選択することにより様々な状況に適応していた。ところが、障害物回避の方法には、このほかにも障害物を迂回しながら回避する場合や押し退けながら回避する場合が考えられる。SSA を用いてこのような回避行動を実現しようとする、用意しなくてはならない行動モジュールの数が膨大なものになってしまう。

そこで本研究では行動モジュールの数の爆発を抑えるとともに、冗長な行動を保持することのできるアーキテクチャとして EBBA を提案する。以下に EBBA について説明する。

3. EBBA (発現行動型アーキテクチャ)

3.1 発現行動

Table 2 に示すように二つの行動モジュール A と B を考える。行動モジュール A はロボットハンドに障害物が接触すると起動され、反射行動的に腕を少し移動する。一方、行動モジュール B は行動モジュール A に引き続いて起動され、障害物を回り込むように腕を大きく移動する。両モジュールとも、パラメータとして移動する方向を持っており、パラメータにより移動方向が決定される。

例えば腕をある方向に移動させているときに腕が障害物に接触すると、まず行動モジュール A が起動され、いったん停止し、来た経路の方向に少し進む。さらに、行動モジュール B で接触した方向に対して 90 度偏向した方向に少し進むと、障害物を迂回しながら回避する行動となる。ここで、行動モジュール A、B のパラメータを少し変更すると、行動モジュール A で、接触したら停止し、進行方向に少し進み、行動モジュール B で接触した方向に少し進ませることができる。この行動は障害物を押し退けながら回避する行動になる。

このように各行動モジュールで利用されるパラメータを少し変更するだけで、行動モジュールの組み合わせとして発現する行動 (EB: Emergent Behavior)^{††}が変化する。そしてプラン

Table 2 Emergent behaviors caused by the different interaction with environments

行動モジュール	目的行動 1	目的行動 2
A	障害物に接触したら停止し、来た経路の方向に少し進む。	障害物に接触したら停止し、進行方向に少し進む。
B	障害物と接触した方向に対して 90 度偏向した方向に少し進む。	障害物と接触した方向に少し進む。
発現する行動	障害物回避行動	障害物排除行動

Table 3 Fundamental functions of EBBA

i)	センサベースの処理構造を持つこと
ii)	動作を小さな行動モジュールの組み合わせで表現できること
iii)	目的を達成するための手段を複数通り持つことができること
iv)	プランナが行動モジュールを制御できること

ナが単位行動モジュールをパラメータを書き換えることにより、システム全体として発現する行動を制御できると考えられる。このような構造にすることにより、プランナはパスプランニングを行うだけでなく、一つのサブプラン実行中に障害物回避を行わなくてはならない場合、下位の行動モジュールの実行状態をモニタし、障害物回避のために発現する行動を切り替えることができる。

我々は、Table 1 に示した要件を満足するために、以下の方針に従って EBBA を設計した。まず、a) 人に危害を加えないためには、センサからの入力情報を利用した確実な障害物および人間の感知を図る必要がある。このためシステムは、i) センサ情報を用いたセンサベースの処理構造を持つ必要がある。また、b) 障害物 (静的、動的) に対応するためには、動的に変化する環境に機敏に対応できるリアルタイム性をもった構造が必要である。そこで、ii) 様々な動作を並行実行可能な小さな行動モジュールとして実現する。そして、c) システムがフェイル (失敗) しないためには、iii) 与えられたタスクを遂行するために、考える幾通りもの手段を持つ必要がある。さらに、iv) これら複数の手段を状況に応じながら切り替えることにより、タスク達成を目指した行動 (以下、目的行動とよぶ) を行えるプランナの機能が必要である。以上に述べた、EBBA の特徴を Table 3 にまとめる。

3.2 EBBA の構成

EBBA は、Fig. 2 に示すように、センサからの入力に加え、いくつかの内部状態 (Internal States) ならびに一つの目的状

[†] 近接センサ (超音波センサならびにフォトセンサなど) の利用も考えられるが、画像処理と同様に、任意の形状の障害物や任意の大きさの障害物を検知することは困難であると考えられる。

^{††} Emergent (創発) とは一般に、環境および多数の行動モジュール (エージェント) の相互作用により、新たな機能や性質が実現される過程のことを意味する。上記の例ならびに EBBA では、複数の行動モジュールの組み合わせ (相互作用) により、新たに意味をもった行動が生成はされるが、これらの組み合わせはあらかじめ用意されているものを選択するという手法をとっているため、広義の Emergent Behavior と見なすことができる。

Fig. 2 A behavior module of EBBA

Fig. 3 System control architecture based on EBBA

態 (Object States) をメモリとして持つ、並行実行可能な行動モジュールから構成される。各行動モジュールはその行動として、アクチュエータの駆動ならびに他の行動モジュールの内部状態および目的状態の操作を行うことができる。このような構造にすることにより、必要な目的行動を実現できるとともに、これをプランナ等が容易に制御できるようになる。内部状態は、他の行動モジュールから参照可能なメモリで、書き換えは自分で行う。目的状態は、ほかからも書き込み可能なメモリで、自分でも書き換えることができる。

Fig. 3 に、EBBA における一般的な制御システムの構成を示す。EBBA を利用したシステム設計ではまず、低レベルの行動モジュールとして、エンコーダを入力とするモータの駆動ルーチン、接触センサからの入力により起動される反射的行動群、CCD カメラから得られた画像を用いた各種画像処理ルーチンなどが用意される。さらに、センサ入力から直接は起動されないが、上述した行動モジュール群の内部状態を参照することによって起動される行動モジュールとして、反射行動を行った後に起動される行動モジュール群、ならびに画像処理などで得られた抽象化された情報をもとに起動される行動モジュール群などが用意される。そして、これら行動モジュールを制御するプランナが用意される。

EBBA ではプランナも行動モジュールの一つとして実現される。プランナは、一般の単位行動モジュールのセンサ入力にあたる部分が、支配下の単位行動モジュールの内部状態ならびに

目的状態に接続されているだけである。プランナはこの内部状態と目的状態をモニタすることにより、下位モジュールの行動を監視することができる。またプランナは、下位モジュールの内部状態ならびに目的状態を書き換えることにより、所望の目的行動を実現する。

このように、外界とインタラクションを行う下位モジュールの状態を基準に、支配下の単位行動モジュールの行動を制御するため、プランナも間接的にセンサベースに処理を行っていることになる。また、EBBA ではプランナを制御するさらに上位のメタプランナを構築することも可能である。プランナ自身も Fig. 2 に示す構造となっており、内部状態ならびに目的状態を持っている。したがって、メタプランナは支配下のプランナの内部状態と目的状態を自分のセンサ入力に接続すればよい。このように EBBA ではロボットの腕、脚、眼それぞれにプランナを設け、それらを統合するメタプランナを構築するなど、より複雑なシステムの構成にも柔軟に対応できる構造となっている。

Fig. 2 で示した単位行動モジュールはセンサ入力に対して行動を起こす点で SSA と似ているが、EBBA では目的状態を明示的に持ち、これらを書き換えることによって発現する行動を制御可能としている。EBBA では、これを単位行動モジュールとしてシステムを組み、最終的に必要な行動目的表現を決定する。この組み合わせ方は単純である。どの行動モジュールの内部状態を参照したいか、どの行動モジュールの目的状態を書き換えたいかを定めるだけである。また、これらが競合する可能性がある場合は、優先順位を付けることができる。そうすることで、優先順位の高い行動を発現させることができる。

4. システム構成

4.1 EBBA に基づくシステム構成

本研究では、障害物を避けて対象物を把持することのできるアームロボットシステムを、EBBA に基づいて構築する。Fig. 4 に EBBA による層構造をもった本研究の制御システムを示す。また、各行動モジュールが取り得る目的状態の一覧を Table 4 に示す。Fig. 4 の矢印は内部状態ならびに目的状態の読み出し/書き込み線である。また、s と書かれた丸への矢印は優先順位付きの信号線を表しており、矢印付きで入る信号が他の入力信号を抑制 (subsume) することを示している。

図中、下位レベルには、システムがエラーを起こさないように最低限達成されなければならない行動を配置する。また上位レベルには、最終的な目的を達成するために必要な、より高度な行動を配置し、下位のレベルを参照しながら動作させる。各行動モジュールは、各 level として表現されている。以下に各 level の行動について説明する。

level 0 [Move] では、サーボセンサからの情報をもとに、アーム各関節の曲げ角を制御する。ここでは、目的状態として直線移動または関節移動などの動作のパターンを持つ。

level 1 [Range Check] では、ロボットの各関節が可動範囲内であることを確認する。各関節の曲げ角をエンコーダから入力し、その状態を監視する。目的状態は可動範囲内の確認である。

level 2 [Reflective Avoidance] では、接触センサからの入力

Fig. 4 Control system of arm robot based on EBBA

Table 4 Object states of each behavior module

level	行動モジュール	目的状態
0	Move	直線移動 関節移動 ハンド姿勢保持移動 ハンド姿勢変更
1	Range Check	可動範囲内確認
2	Reflective Avoidance	接触停止引き返し移動 接触停止引き続き移動 接触停止
3	Obstacles Avoidance	障害物迂回移動 障害物接近移動
4	Approaching	目的位置 アプローチ方向
5	Grasping	ハンド開 ハンド閉
6	Hand Planner	目的位置 ハンド状態

をもとに障害物に接触した場合に衝突を回避する。目的状態は接触停止後の動作を規定し、動作しない状態も取り得る。また、level 0 の目的状態を書き換えることにより、衝突回避時のロボットの移動モードを変更する。

level 3 [Obstacles Avoidance] では、接触センサとアームのポジション情報ならびに目的状態をもとに、障害物接触後に迂回または接近する。またアーム動作時に、level 0 の目的状態を書き換えることにより、移動モードを変更する。

level 4 [Approaching] では、センサは接触センサとアームのポジションの情報をもとに、目的位置に接近する方向を制御する。目的状態はアプローチ方向またはサブゴールである。アプローチの方向が設定されると、その方向に向かうように level 0 の目的状態を書き換える。

level 5 [Grasping] では、目的状態ならびに接触センサの情報をもとに、ハンドを開閉する。

level 6 [Hand Planner] では、所望のタスクを達成するために、サブゴールからなるプランを生成する。そして、下位モジュールの目的状態を書き換えることによりシステム全体として発現する行動を制御しながらサブゴールを一つずつ達成する。目的状態は目的位置（与えられたタスク）であり、センサ入力としてハンド先端のポジションならびに支配下の行動モジュールの内部状態を用いる。また、内部状態として支配下のすべての行動モジュールの目的状態が接続されている。

4.2 接触情報を用いたロボットの発現行動

人間が腕を伸ばして物をとろうとして肘などが障害物に接触したとき、一般に Table 5 に示す 3 種類の方法をとると考えられる。そこで本研究では Fig. 4 に示した EBBA の構成を利用し、これら 3 種類の障害物回避を実現する。

3 種類の発現行動はそれぞれ、level 2 ならびに level 3 の目的状態を Table 6 に示すように変更することにより実現される。完全回避発現行動では障害物に接触すると、まず level 2 によりいったん動作を停止し、少し引き返す。さらに level 3 によりアプローチする方向を変更し、障害物を回り込みながら目的位置にハンド先端を移動させる。

巻き付き回避発現行動では障害物に接触すると、まず level 2 により、障害物に接触した状態で停止する。ここで、level 0 が関節移動であることから、接触した部分より先に位置する関節のみを利用して目的位置へとハンド先端が移動する。このように、障害物に接触した部分をそのままに、巻き付くように目的位置へ腕を伸ばす。

押し退け回避発現行動では障害物に接触すると、まず level 2 により障害物に接触するといったん停止し、さらに少し押し接触した位置まで戻る動作を行う。この動作後に接触センサが反応しない場合、障害物を押せたことが分かる。押せたと判断した場合、level 2 が level 3 の目的状態を障害物接近移動に書き換えることにより、ハンドは障害物の存在する方向へ移動する。このように一連の行動が実行されることにより全体として、障害物を押し退けながら目的位置にハンドを位置させる行動が発

Table 5 The methods for obstacles avoidance

回避モード (発現行動)	回避方法
完全回避	接触状態を解除して目的位置へ向かう
巻き付き回避	接触した障害物に巻き付いて目的位置へ向かう
押し退け回避	接触した障害物を押し退けて目的位置に向かう

Table 6 The variation of emergent behavior by the set of object states

回避モード (発現行動)	目的状態		
	level 0	level 2	level 3
完全回避	直線移動	接触停止引き返し移動	障害物迂回移動
巻き付き回避	関節移動	接触停止	障害物迂回移動
押し退け回避	直線移動	接触停止引き続き移動	障害物接近移動

現する。

プランナはこれらの発現行動を制御するために、各レベルの目的状態を書き換えるだけでよい。例えば、完全回避を行ってなかなか目的位置に近付けない状態を、プランナは下位モジュールの内部状態をモニタすることにより検知することができる。このような場合、プランナが発現行動を切り替えることにより、効率よくタスクを実行することが可能である。また、単純な発現行動の繰り返しでは、リミットサイクルに陥る場合も考えられる。プランナはハンド先端の移動の履歴を保持することによりこれを検知し、アプローチの方向を大きく変更することにより回避することも可能である。

本研究では、プランナは指定された位置に順次ハンド先端を位置決めするように、Approaching 行動モジュールに位置情報を指定するとともに、初期状態では回避モードを完全回避モードにし、障害物接触時に同じ回避モードが3回繰り返すごとに、それまでの回避行動の履歴をもとに他の回避モードを選択して切り替える、単純なものとして設計した。

5. システムの実装

Fig. 5 に本システムのハードウェア構成を示す。双腕型ロボットの腕として、6軸型ロボットアーム三菱電機製 RV-E2 を2台利用した。ハンドにはハメック製エアード駆動型ハンド（オープン/クローズ2チャンネル）を用いた。またロボットアームの表面には接触センサとして、ウレタンスポンジを使って接触面積を広げたマイクロスイッチを1台あたり32個取り付け付けた。

ホストコンピュータには、AVME-130MPU モジュールにリアルタイム OS VxWorks を搭載して用いた。また、インタフェースに AVME-350 シリアル回線増設ボードと AVME-342 パラレル回線増設ボードを使用した。さらに、ソフトウェア開発用に SPARC Classic を利用した。

EBBA の各行動モジュールは C 言語の関数として記述され、行動の追加に際しては新たに関数を付け加えることにより、行動モジュールの層構造を実現した。これらの関数は並行実行される VxWorks のタスクとして実装した。さらに VxWorks のリアルタイムスケジューリング機能を利用することにより、センサ情報のサンプリングタイムが一定時間内になるようにし、

Fig. 5 Hardware structure of robot hand system

障害物との接触を確実に検知できるようにした。

6. 実験

本システムの有効性を示すために、以下に示す5種類の状況を設定し、実験を行った。実験1〜3ではTable 6に示した3種類の発現行動の有効性を確かめるために、プランナが終始同一の発現行動を設定するようにして実験を行った。実験5では人に危害を加えないことを確かめるために、完全回避発現行動のみが選択されるようにして実験を行った。またすべての実験において、ハンド先端の初期位置、サブゴール、目的位置はそれぞれ、アームロボットの可動範囲内の三次元空間上の任意の点を指定した。なお、障害物に関する位置、大きさなどの情報はロボットにはあらかじめ与えられていない。

実験1: 完全回避発現行動

完全回避発現行動の有効性を確かめるために、静的障害物としてテーブルの上にペットボトルを置き、ロボットから見て障害物の向こう側に目的位置を設定して実験を行った。この実験結果を**Fig. 6**に示す。実線は、ロボットハンド手先の軌跡であり、破線はロボットハンドの軌跡をZ=-1,000平面に投影した影である。なお、ロボットの肩の位置が原点となっている。

ロボットハンドは、まず1) 初期位置Aから目的位置Bへ直線的に向かった。ここで、2) 移動途中で障害物と接触し、その接触を解除するように動作した。その後、3) 接触のあった障害物を回避するように動作し、続いて、4) その位置から目的位置Bに再度向かった。以降、障害物との接触が検知されるたびにこの動作を繰り返し(5, 6, 7) 目的地に到達した。この実験では、2度同じ障害物に接触している。接触情報のみから障害物の形状や位置を正確に特定するのは困難であるが、このように繰り返し避けることで、うまく障害物を回避できることが確認できた。

実験2: 巻き付き回避行動

巻き付き回避発現行動の有効性を確かめるために、ロボット前方にペットボトルを置き、ロボットから見て障害物の奥側に目的位置を設定して実験を行った。この実験結果を**Fig. 7**に示す。

ロボットハンドは、まず1) 初期位置Aから目的位置Bに向かって直線的に移動した。次に、2) で障害物とアームのショルダ位置に接触を検知したため、ショルダより手元の関節を固定

Fig. 6 Experimental results of completely avoiding EB

Fig. 8 Obstacle avoidance by using push and avoiding EB

Fig. 7 Obstacle avoidance by using round and avoiding EB

Fig. 9 Transportation of a cup by selecting multiple EBs

し、ショルダより先方にある関節のみを用いてハンド先端を目的位置に向かわせた。その後、動かすことのできる関節を曲げて (3, 4) 目的位置 B に到達した。

この発現行動は接触のあった関節より手元の関節を固定して目的位置に向かうため、自由度が極端に低下する。そのため、接触のあった場所や状況によっては、目的位置に到達できないことがある。しかしながら、本実験のように障害物のすぐ後ろに目的位置があるような場合には、非常に有効な回避行動である。

実験 3: 押し退け回避発現行動

押し退け回避発現行動の有効性を確かめるために、ペットボトルを 2 本を置き、ロボットから見て障害物の向こう側に目的位置を設定して実験を行った。この実験結果を Fig. 8 に示す。

ロボットハンドは、まず 1) 初期位置 A から目的位置 B へ直線的に向かった。ここで、2) 移動途中に障害物を検知したため、いったん停止しさらに少し押し込むことにより、障害物を押せるかどうかを確認した。続いて、3) ロボットはアームを左右に振り障害物を押した。その後、4) 接触が検知された位置に戻り、目的位置 B に再度向かった。以降、障害物との接触が検知されるたびにこの動作を繰り返し (5, 6, 7) 目的位置に B に到達した。

実験 4: コップの運搬作業

プランナが障害物回避のための発現行動を切り替えることにより、効率よく目的を達成できることを検証するために、障害物のある環境でコップを運搬させる作業を行わせた。C 地点にコップを置き、これを把持して目的位置 B まで運搬して置くタ

スクをプランナに与えた。静的障害物としてペットボトル 2 本をサブゴール C と目的位置 B の間に置いた。この実験結果を Fig. 9 に示す。

ロボットはまず、まず 1) 初期位置 A からサブゴール C に向かい、C 地点でコップを把持した。続いて、2) 目的位置 B に向かったが、3) ペットボトルに接触したため、完全回避行動が発現し、回避できる方向を捜した。4) で y 軸負の方向に障害物を回避しようとした。しかしながら、さらに 4) もう 1 本のペットボトルに接触したため、5) 回避の方向を変更し、上方に回避した。ところが、上方に避けてもすぐには回避することはできなかった。この状況を監視していたプランナが、完全回避発現行動から押し退け回避発現行動に切り替え、6) ペットボトルを左右に押し退けて目的位置 B に到達した。

本実験により、最初に設定した発現行動がうまく事態を解決できていないときに、プランナが発現行動を切り替えることにより、効率よく目的を達成できることが確認できた。

実験 5: 人間とのインタラクション

人間に危害を加えないことを確かめるために、移動中のアームの前方に人間の腕を差し出して停止させた。その結果、ペットボトルの場合と同様に、人間の腕をそれ以上押さないように、完全回避行動により迂回できることが確認された。また、人間の手を使って、動作中のアームロボットを押し続けた。その結果、手を避けるようにアームをもと来た方向に下げることが確認された。そして、さらに押し続けたところ、アームの稼働範囲を超えたところで動作が停止することが確認された。

7. 考 察

以下に、Table 1 に掲げた要件について、実験結果に基づいて考察を行う。

実験5により、EBBAに基づいて設計されたアームロボットシステムが人間の腕を静的障害物として避け、さらに押し続けた場合でもそれを避け続け、人に危害を加えないよう行動できることが確認できた。この行動のためには、単に接触した場合に衝突を回避する Reflective Avoidance 行動モジュールが利用されており、接触状態が継続する間、この行動モジュールが繰り返し起動し続けている。本研究ではEBBAを用いたことにより、SSAに比べて用意する行動の数が少なくなっている[†]。本システムでは各行動モジュールは単一CPU上の並行タスクとして実装されている。そのため、本機能のようにサンプリング時間を短くしたタスクを実装するためには、全体の行動モジュールの数を少なくして実装できるEBBAが優位であると考えられる。

また本システムでは、人がアームを押し続けると、アームが腕を引き下げたにもかかわらず接触した状態が継続することから、プランナは動的な障害物が自分に向かって来ていると判断し、発現行動を完全回避発現行動にしたまま避け続けることができた。しかしながら、人の腕を静止させた場合、接触した物体がペットボトルであるのか人であるのかを判断することはできない。このような場合、実験4のように押し退け回避発現行動に切り替えるのことは不適切である。本研究で用いた接触センサのみでは、接触した対象が人であるのか物体であるのかを判断することは不可能であるため、今後、ビジョンシステムを併用するなどして、人間に対しては押し退け回避を選択しないようにするなどの工夫が必要である。

さらに本システムでは、ハンド先端部の動作速度を10[cm/sec]の低速に設定し、ウレタンスポンジで覆った接触センサを全面に配置している。そのため、人間の腕を接触センサにより検知してから避けても危害を加えることはないと考えられる。しかしながら、ロボットに人間と同様の動作速度を要求すると、接触したと同時に危害を及ぼすことも考えられる。そのため動作速度を高速化するためには、ビジョンシステムを併用して人間が近付いた場合のみ速度を変更できるような工夫[10]が必要であると考えられる。動作速度の動的変更に関しては、Move 行動モジュールの速度パラメータを変更することにより対応可能である。

次に、静的ならびに動的障害物への対応について議論する。静的障害物に関しては実験1～3により、3種類の回避方法それぞれにおいて、障害物を回避しながら目的を達成できることが確認できた。また、動的な障害物に関しては、実験1～3の障害物の存在がシステムにはあらかじめ与えられていないことから、突如障害物が置かれた場合にも対応できていると考えられ

る。さらに、移動する障害物に関しては、それが遠ざかる方向に移動している場合には、接触状態が回避されるため、回避行動がアクティベートされなくなり、Approaching 行動により目的位置にハンド先端を接近させることが確認されている。一方、ハンドに向かって移動する場合には実験5により、接触状態を回避するまで避け続けられることが確認された。

本システムはEBBAに基づいて設計したため、3種類の障害物回避行動は三つの行動モジュールの目的状態の組み合わせとして実現されている。これらの回避行動の設計では、個々の行動モジュールがとりうる排他的な行動をそれぞれ目的状態として設計し、目的状態の組み合わせのうち、意味のある回避行動を選択することにより設計を行った。EBBAではこのように、ロボットが内在的に保持する機能(行動)をもとにして、意味のある発現行動を選択的に設計する枠組を与えていると考えることができる。障害物回避のための行動の設計では、システムに内在する機能を最大限に引き出して、様々な行動パターンを生成する必要があり、EBBAで提供している設計手法はこの設計を容易なものにしていると考えられる。本システムでは接触センサのみを利用した障害物回避発現行動を設計したが、他のセンサを利用した場合でも、EBBAに基づく設計手法は有効であると考えられる。

最後に、システムがフェイルしないことに関して議論する。本実験と同様のことを一般のアームロボットを用いて行った場合、ロボットは障害物に接触するとサーボエラーを引き起こし、動作不能状態になるところである。本研究ではアーム全面に接触センサを配したことにより、接触状態を確実に検知して、フェイルすることなく障害物回避が行えることが確認された。さらに実験4により、プランナが3種類の回避行動を切り替えながら、与えられたタスクを遂行できることが確認された。

システムがフェイルしないためには、上記のように複数通りの手段を効率よく切り替えられる必要がある。本システムではEBBAを用いたことにより、プランナは下位モジュールの動作状態をそれらのモジュールの内部状態をセンサ入力として容易に把握でき、それらの情報から発現させる行動を単純な判断機構を用いて決定し、下位モジュールの目的状態を書き換えるだけで回避行動を切り替えることが可能となっている。このようにEBBAでは行動モジュールの状態の把握と制御を容易に行うことのできる枠組を提供できていると考えられる。

上記の議論で述べたように、EBBAを用いた設計では、システムが内在的に保持する機能をボトムアップに行動モジュールとして積み上げ、内部状態ならびに目的状態を設定することにより行動モジュールの状態と制御を抽象化(abstraction)し、これらを再利用することにより様々な発現行動を設計するという観点からとらえると、オブジェクト指向的な設計方法[11]を提供していると考えられる。特に、人間共存型ロボットの設計においてはリアクティブ性が重要であり、場合によっては致命的な結果をもたらす可能性がある。そのため、行動モジュールの再利用による計算リソースの節約を可能とするEBBAの設計手法は、有効であると考えられる。

またEBBAに基づく制御システムは、プランナにより分割されたタスクを下位モジュールに指令するトップダウン的な制御

[†]本システムではTable 6に示した3種類の障害物回避方法を実装しているが、これらの行動はlevel 0, 2, 3の三つの行動モジュール組み合わせにより実現されている。SSAを用いた場合、level 0の目的状態に相当する行動モジュールを二つ、同様にlevel 2に三つ、level 3に二つの合計七つの行動モジュールを用意する必要がある。

と、下位のリアクティブな行動モジュール群によるボトムアップ的な制御の両方を合わせ持った構造となっている。これらのインタフェースは、内部状態ならびに目的状態の参照によって行われており、それぞれのモジュールは非同期的に動作可能である。障害物回避などのリアクティブ性を要する行動は下位モジュール群により常時維持したまま、プランナは、与えられたタスクを遂行することが可能となっている。

EBBA では行動モジュールのパラメータを変更することにより、システムの動作モードを動的に切り替える手法をとっているが、これまでに類似のシステムがいくつか提案されている。P. Maes [12] は、各行動モジュールが発火するための閾値を設け、これらのパラメータを書き換えることによりシステム全体が適応的にアクションを選択できるシステムを提案している。また J. Connell [13] は、ロボットをサーボレベル、SSA レベル、記号処理レベルの 3 層からなるシステムとして SSS (Servo, Subsumption, Symbolic) アーキテクチャを提案している。しかしながら、記号処理レベルから SSA レベルに対する制御では行動モジュールの ON/OFF を行っているのみである。また、これらのシステムでは本研究のように、行動モジュールのパラメータの書き換えによる発現行動の選択は行われていない。

8. 結 論

本研究では、人間共存型ロボットが具備すべき基本的な要件ならびに機能についてまとめ、その機能を実現するための手法として EBBA を提案した。また、障害物を確実に検知することのできる接触センサを用いて、双腕型自律ロボットの制御システムを構築した。実験により、接触センサのみを利用したシステムとして、上記の要件を満足することが確認された。

我々は現在、EBBA を利用して CCD カメラを用いた視覚システム、ならびに移動ロボットベースのナビゲーションシステム [2] を構築中である。本システムと視覚システムを統合する

ことにより、障害物接触時には確実に回避できる上で、さらに視覚システムにより障害物を検知した場合には、接触以前にそれらを回避できるように、システムを発展させる計画である。

参 考 文 献

- [1] 中内：“機械の知能と人間の知能—知能ロボットとヒューマンインタフェース研究者の視点から—”，日本機械学会第 74 期総会講演会，vol.5, pp.620-621, 1997.
- [2] Y. Nakauchi and Y. Mori: Emergent Behavior Based Sensor Fusion for Robot Navigation System, Proc. of IEEE/SICE/RSJ Intl. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp.525-532, 1996.
- [3] D. Vischer: Cooperating Robot with Visual and Tactile Skills, IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.2018-2025, 1992.
- [4] S.A. Stansfield: “Robotic Grasping of Unknown Objects: A Knowledge Based Approach,” Intl. J. of Robotics Research, vol.10, no.4, pp.314-326, 1991.
- [5] P.K. Allen et al.: “Automated Tracking and Grasping of a Moving Object with a Robotic Hand-Eye System,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.9, no.2, pp.152-165, 1993.
- [6] R.A. Brooks, 五味：“複数の要素行動間の競合・協調により知能ロボットの行動を決めるサブサンプリングアーキテクチャ”，日経インテリジェントシステム別冊，春号，pp.152-167, 1992.
- [7] 久野：“ビヘビオバーストロボットの行動”，日本ロボット学会誌，vol.11, no.8, pp.1178-1184, 1993.
- [8] 西田，中内，森：“SSA を利用した自律移動型ロボットの開発”，電気学会産業計測制御研究会，IIC-95-56, pp.51-60, 1995.
- [9] 西田，中川，中内，森：“接触センサを用いた動的環境に適応したロボットの開発”，日本機械学会論文集 C 編，vol.63, no.606, pp.172-178, 1997.
- [10] S. Tadokoro et al.: A Human Recognition System for Avoidance of Robot Accidents, Proc. of IECON '91, pp.2247-2252, 1991.
- [11] A. Goldberg and D. Robson: Smalltalk 80: The Language and its Implementation, Addison-Wesley, 1983.
- [12] P. Maes: Adaptive Action Selection, Proc. of 13th Intl. Conf. of the Cognitive Science Society, pp.108-113, 1991.
- [13] J. Connell: SSS: A Hybrid Architecture Applied to Robot Navigation, Proc. of IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.2719-2724, 1992.

中内 靖 (Yasushi Nakauchi)

1963 年 10 月 23 日生。1988 年慶應義塾大学電気工学科卒業，1993 年同大学院計算機科学専攻博士課程修了。工学博士。同年防衛大学校機械工学教室助手，1994 年同大学校講師，現在に至る。マルチエージェントインタフェース，自律移動ロボットの研究に従事。情報処理学会，電子情報通信学会，(日本ロボット学会正会員)

ACM 各会員。

森 泰親 (Yasuchika Mori)

1952 年 5 月 21 日生。1976 年早稲田大学電気工学科卒業，1981 年同大学院電気工学専攻博士課程修了。工学博士。(株)東芝総合研究所，埼玉大学工学部助教授を経て，1992 年より防衛大学校機械工学教室助教授，現在に至る。制御系設計理論の研究に従事，1985 年計測自動制御学会論文賞受賞。日本機械学会，計測自動制御学会，システム制御情報学会，IEEE 各会員。(日本ロボット学会正会員)

西田洋一郎 (Youichiro Nishida)

1967 年 10 月 16 日生。1990 年防衛大学校機械工学教室卒業，現在同大学校研究科課程在学中。自律ロボットの研究に従事。計測自動制御学会会員。