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*

西田 洋一郎^{*1}, 中 川 一^{*1}
中 内 靖^{*2}, 森 泰 親^{*3}

Development of Adaptive Behavioral Robot Using Tactile Skills

Youichiro NISHIDA, Hajime NAKAGAWA,
Yasushi NAKAUCHI and Yasuchika MORI

In order to utilize autonomous robots in the service fields such as in offices and hospitals, the robots should be equipped with functions for co-existing with humans. In this paper, initially, we discuss the functions which service robots require, such as (1) safety for humans, (2) adaptability to unknown environments and (3) maintenance of appropriate function. We propose the architecture based on SSA (Subsumption Architecture) to realize the above functions. We have developed a prototype system using a 5-axes robot and touch sensors. We have confirmed the efficiency of our system by experimentation.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Sensor, Behavior-Based Artificial Intelligence, Human-Robot Interface, 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、ロボットを産業分野だけでなく、病院での看護、清掃、オフィスでのメールの配送など、人間が生活する、より一般的な分野で利用したいという要求が高まってきている。人間とロボットが共存する環境でのロボットのインタフェースは人間のために操作性の優れていることはもちろんのこと、人間とロボットが協調できることが重要である⁽¹⁾。

人間とロボットとの協調では、ロボットは、その作業空間を人間と共有するため、人間と物理的に衝突する恐れがある。そのため、どのような状況においても人間に対して安全であることが要求される。また、人間はロボットの作業空間に間接的に影響する場合が考えられる。ロボットの作業空間の中に、人間によって障害物を置かれたり、またはそれまで存在した物を取り除かれたりする場合がある。一般に障害物は、机の上のコップや本など、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移動する、動的な障害物との2種類に分けられる。したがってロボットは、このような周囲の環境の動的な変化に適応して行動できなければならない。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、機能が停止するようなことでは使いものにならない。与えられたタスクを遂行できるまで、考え得る複数通りの手段を用いて再試行するなどし、システムとして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、ロボットに要求される機能は、表1のようにまとめられる。

Vischer⁽²⁾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。このシステ

Table 1 Required functions for human-coexistent robots

1. Not to harm humans.
2. To avoid both static and dynamic obstacles.
3. To keep functioning.

ムでは、周囲の環境に関する情報を入力するセンサとしてカメラを用いており、ロボットの作業環境内に人間が入ると、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ぐために、加速度検知器を用いてロボットの位置決め動作を監視しており、異常時にはすぐ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。

未知環境において、静的ならびに動的な障害物を回避するためにはまず、環境の情報を入力するセンサが必要である。センサには視覚、触覚、力覚センサなど様々なものがあるが、特に視覚センサは、環境から大量の情報を非接触で一度に入力できることから、これまでも視覚センサを利用した多くのシステムが研究、開発されている。

Stansfield⁽³⁾らは任意の位置に置かれたコップをロボットに把持させるために、CCDカメラから得られた画像情報を用いて、ロボットの指がコップに接触しないようにコップの両端に挿入するシステムを開発した。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するために必要な最低限に落している。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Allen⁽⁴⁾らは、二次元平面上を移動する対象物をCCDカメラで捉えることにより、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た。移動

* 原稿受付 1996年2月9日。

^{*1} 防衛大学校学部生 (〒239 横須賀市走水1-10-20)。^{*2} 防衛大学校機械工学教室。^{*3} 正員、防衛大学校機械工学教室。

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の回避を行わせるためには、任意の背景の中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、素早く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画像処理により計測することは非常に困難である。

そこで本研究では、確実に人間ならびに障害物を検知することのできる接触センサを用いることにより、静的ならびに動的な障害物を回避することのできるロボットハンドシステムを開発する。さらに、様々な状況においてシステムが機能し続けるために、SSA (Subsumption Architecture)^{(5), (6)} に基づいてシステムを構築する。

2. システムの構成

2.1 SSA に基づくシステムの構成

SSA は Brooks らにより考案された知的処理のための新しい手法であり、知能ロボットを構築する際の構造・処理方式の新たな可能性を提示している^{(5), (6)}。SSA は従来の直列的な処理系に対して、並列的な階層構造の処理系となっている特徴をもつ。その処理系の単位行動から構成され、それら単位行動間の競合・協調によって知能ロボット全体としての行動が決定される。行動別に分解されたモジュールは「要素行動（またはエージェント）」と呼ばれ、それぞれ独立で並行動作可能であり、自らの認識と判断に基づいて行動する。すなわち SSA における出力側の最終的な行動の決定は、独立な要素行動間の競合・協調を図る「行動融合」ともいべき分散処理により行われる。

システム構築は、ある入力に対して反射的にある出力を行う拡張有限オートマトン (Augmented Finite State Machines: AFSM) を基本として、それを組み合わせて単位行動を作るという方法がとられる。そしてこの単位行動をもとに、まず下位のレベルからそれだけで動作するシステムを作り、次第に上位のレベルを作っていく。上位のレベルは下位のレベルの上に、それを含むように積み重ねられる。また上位レベルの行動は必要に応じて下位レベルの情報を参照する。したがって上位レベルの付加的な層は後で付け加えればよく、それまで動作していたシステムに手を加える必要はない。

本研究ではこれらの特徴に着目し、処理系を SSA に基づいて構築する。対象とするロボットには様々なタイプのものが考えられるが、腕を用いた作業が最も複雑で、障害物を回避するのが困難なことから、本研究

ではアームロボットを用いたプロトタイプシステムを構築することとした。アームロボットが行う代表的なタスクは対象物の探索、位置決め、対象物の把持である。本研究ではシステム構築の簡易性からロボットの可動範囲は図 1 に示すような Z-X 二次元平面上に限定することとした。

Fig. 1 The coordinates of the arm robot

図 2 に本システムの SSA を示す。まず下位レベルには反射行動群として、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記述する。ここでは level 0 の可動範囲内行動と level 1 の障害物回避行動が反射行動に該当する。そして上位レベルには具体的な目的を達成するための目的行動群を記述する。ここでは level 2 から level 6 までの目的行動に該当する。本研究ではロボットの可動範囲を二次元平面上に限定したため、障害物回避には上方からと下方からの 2 方向が考えられる。そこで、上方からの障害物回避用の行動モジュールとして level 3 を、また下方からの障害物回避用の行動モジュールとして level 4 をそれぞれ用意した。

Fig. 2 System architecture based on SSA

本システムの制御構造を AFSM のレベルで記述し

たものを図3に示す。図中のゲート s, d, i はそれぞれ subsume, default, inhibit の略であり、s は下位の行動を抑制して動作することを、d は信号を通過させることを、i は行動を禁止することを意味する。以下に各レベルとして表される行動、ならびに各行動を構成する AFSM のモジュールについて説明する。

level 0: 可動範囲内行動

アームロボットのショルダ、エルボ、リスト各関節の角度を調べ、可動範囲を超えないように動作方向を制御する。これによりロボット自身に稼働範囲を越えることによって生じるエラーの発生を防止する。

[joint angle] ロボットの各関節角を出力する。

[direction] 各関節の動作方向を出力する。各関節角が可動範囲の限界に近いとき、可動範囲を越えないように動作方向を切替える。

[move] [direction] から得られた動作方向に基づいて実際に関節を動かす。

level 1: 障害物回避行動

アームロボットの表面に取り付けた接触センサの情報をもとに、障害物を反射的に避ける。この行動により、環境の破壊などの致命的な失敗を防止する。

[sensor] 接触センサからの接触信号を出力する。

[avoid] 接触信号をもとに動かす関節とその方向を選択し、接触状態から回避する。

level 2: 対象物探索行動

ハンドの両端に取り付けた2台の CCD カメラを用いて、対象物体を探索する。より具体的には、対象物体を認識したら、三角測量の原理を用いてその3次元位置を計測する。

[search] CCD カメラから得た画像を解析して対象物を捕捉したかどうかを出力する。

[find object] 捕捉した対象物の重心位置を三角測量の原理を用いて求める。

[nothing] CCD カメラの画像内に対象物が存在しない場合、探索を続けるように関節を動かす方向を出力する。

level 3: 直線的接近行動

対象物の位置とハンド先端の位置の相対関係を求め、直線的に対象物体に向かって動く行動。

[position status] 対象物と現在のハンド先端との相対位置関係を算出する。

[from upper] 対象物と現在のハンド先端との距離・位置情報に基づいて、対象物に直線的に接近する。

[select joint] 対象物と現在のハンド先端との相対位置関係ならびに接触センサの情報に基づいて、対象物に直線的に接近するように動作させる関節を選択する。

[dead lock] 上方からの接近行動と下方からの接近行動が同時に発生し、手詰り状態になることを防ぐために、両者を切替える。

level 4: 迂回接近行動

level 3 の直線的な接近を行うのではなく、下方から迂回するように対象物体に向かう行動。障害物の位置などにより level 3 の行動が実行不可能な場合に発現する。

[from under] 対象物を迂回するように動作させる関節とその動作方向を選択する。

[select joint] 対象物と現在のハンド先端との相対位置関係に基づいて、対象物に接近するように動作させる関節ならびに方向を選択する。

level 5: 対象物体把持行動

対象物体がハンド先端から一定の範囲内に入ると、ハンドグリップを閉じて対象物体を把持する。

[grip close] 対象物と現在のハンド先端との距離が一定の範囲内にある場合、ハンドを閉じる。

level 6: 再探索行動

level 5 の対象物体把持行動において把持に失敗した時に発現する。現在の目的行動を禁止し、level 2 の対象物探索行動を再び発現させる。

[catch fail] ハンド・フィンガー部に取り付けられた把持センサの値を出力する。

[draw back] 把持センサの値により、把持に失敗したことを検出すると、アームを少し縮めるように動作方向と関節を選択する。その後、level 2 の対象物探索行動が発現することにより、再探索が実行される。

2.2 システムのハードウェア構成

本研究ではアームロボットのプロトタイプとして、図4に示すシステムを作成した。システムの外観を図5に示す。

プロトタイプではアームロボットには、5自由度垂直多関節型ロボット三菱電機製 RV-M2 を使用した。また、アーム先端には2本指の電動ハンドユニットを装着し、指の部分には把持が成功したかどうかを検知するためにマイクロスイッチを取り付けた。さらに、ハンドの左右側面には図1に示すように、CCD カメラの小型ヘッドユニット2台を取り付け、両眼視により対象物の位置計測ができるようにした。

Fig. 3 AFSM model of the system

Fig. 4 Hardware construction of the system

Fig. 5 The outlook of the arm robot

Fig. 6 Touch sensor

Fig. 8 The locus of the robot finger at situation 4

先端が静的障害物に接触した。そのため、4) 迂回接近行動の [from under] モジュールが起動された。これにより、障害物を下方から避けるように腕を回避させ、下方から関節を徐々に伸ばしながら手先を目的位置へ近づけた。そして、最後に5) 対象物把持行動により、対象物を把持できることを確認できた。

Fig. 9 The locus of the robot finger at situation 5

状況 6：頑強性の確認

状況 6 では画像処理による得られた対象物の位置に誤差があった場合である。このときのハンド先端の軌跡を図 10 に示す。

4) までは状況 1 と同様である。ところが 1) の対象物探索において対象物位置の計測に誤差があったために、物体把持に失敗した。そこで、5) 再探索行動が起動され、少し手を引いた位置に戻ってから再度対象物探索を行い、より正確な対象物の位置を計測することができた。そして、6) 最終的に物体を把持できることを確認できた。

Fig. 10 The locus of the robot finger at situation 6

3.2 考察

状況 2 の実験より、本システムが動的障害物に適応して動作できることが確認できた。さらに人間が存在する環境でも、人間の動作を妨げないようにアームを後退させることも確認できた。そして状況 3, 4, 5 の実験より、様々な位置に静的障害物が存在する場合でも、これらをうまく回避しながら所望のタスクを遂行することが確認できた。また状況 6 ならびに状況 2, 3, 4, 5 の実験より、様々な状況においてもシステムがフェイルすることなく動作し続け、所望のタスクを遂行することが確認できた。

本システムでは障害物の回避に必要な情報を、視覚センサではなく接触センサによって得ているが、本実験により様々な作業環境ならびに作業環境の変化に、接触センサによる情報だけで十分適応できることが確認できた。

障害物回避では接触を検知すると、その反対方向に避けることが確認された。これはアームロボットが元来た方向へ戻ることを意味しており、そこには障害物が存在しない確率が高いと考えられる。上記の実験では回避中にさらに障害物に接触する状況はなかったが、状況 1 で確かめられたように、障害物回避中にさらに障害物に接触した場合でも level 1 の障害物回避行動により、うまく回避することができると考えられる。

また視覚のように内部に複雑な処理を必要としない触覚を利用したことは、センサ群への入力から駆動系への出力までの距離を短くし、素早い行動を行わせるという SSA のアーキテクチャに即していたと思われる。ロボットに障害物を回避させるとき、視覚情報を利用して、環境に存在する物体の三次元的な位置情報を利用することも考えられる。しかしながら、それらの物体がロボットの動作の障害となるかどうかは、実際にロボットが腕を差し伸べてみて、はじめてわかることである。それゆえ、本研究のように接触情報を積極的に利用する手法は有効であるといえる。特に障害物を擦り抜けながら回避させるような場合、接触による

接触センサは図6に示すような、アクリル板、ワイヤ、マイクロスイッチを使用して自作したものである。全方向からの接触を鋭敏に感知するために、接触センサ1個につきマイクロスイッチ4個を使用した。接触センサは図1に示すように、アームの上下側面に合計8個取り付けられた。このように配置することにより、接触検知時に、各関節の動作可能な方向がわかるようにした。

CCDカメラおよび接触センサからの情報をもとに、アームロボットを制御するCPUボードとして、アパーラデータ製AVME-130MPUモジュールを利用し、この上に、リアルタイムOS(オペレーティングシステム)VxWorksを載せた。本ボードはVMEbus規格のラックに装着されており、VMEbusを介して画像取込ボードとデータの交換が可能である。図3に示した、SSAに基づくプログラムはUNIXワークステーション上でC言語により作成し、これをAVME-130MPUにダウンロードすることにより開発した。

3. システムの評価

3.1 実験

本システムの有効性を示すために、以下に示す6つの状況において対象物体を掴ませる実験を行った。なお、実験では全て、ロボットハンドは高い位置(x, z) = (300, 800)から動作を開始するようにした。また、ロボットの前方斜め下方に、把持すべき対象物として、暗幕を背景として、(x, z) = (690, 290)の位置に白い球を置いた。静的障害物としては棒状の角材をY軸と平行に置いて用いた。なお実験は、以下に示す6種類の状況を設定して行った。

状況1：動作確認

状況1では、本システムが目的の動作を遂行できることを確認するために、障害物のない状況で実験を行った。このときのハンド先端の軌跡を図7に示す。まずシステムは、1)対象物探索行動により対象物体を探索し始めた。2)対象物体をカメラで捕捉し、その3次元位置情報を得ると、3)直接的接近行動により対象物に向かって直線的に接近した。対象物と手先の位置誤差が一定範囲内になると、4)対象物把持行動により、対象物を把持できることが確認できた。

状況2：動的障害物回避の確認

状況2では動的障害物を回避できることを確認するために、動作中のロボットアームを人間の手で押した。人間の手で腕の部分を押し続けると、ロボットはこれを避けるように退き続けた。このように、ロボットは人間に危害を加えないように避けることが確認できた。

さらに押し続けると関節の可動範囲を超えそうになる場合があったが、ロボットはそれ以上退くことはなかった。このように、ロボットはエラー状態には決してならず動作し続けることができることも確認できた。

Fig. 7 The locus of the robot finger at situation 1

状況3：静的障害物回避の確認1

状況3では対象物探索行動中に静的障害物に接触する状況で実験を行った。静的障害物に、肘の内側に取り付けられたタッチセンサが触れると、それまで動かしていた肩の関節を動かすのをやめ、肘を動かして探索するようになった。このように、対象物探索行動中に静的障害物に接触しても、動かせる関節のみを利用して目的を達成できることを確認できた。

状況4：静的障害物回避の確認2

状況4では対象物接近中に静的障害物に接触する状況で実験を行った。このとき、上方からアームを回避することにより対象物にハンドが届くように、障害物は下方に配置した。状況4におけるハンド先端の軌跡を図8に示す。

まずシステムは、1)対象物探索行動により対象物体を探索し始めた。2)対象物体をカメラで捕捉し、その3次元位置情報を得ると、3)直接的接近行動により対象物に向かって直線的に接近しようとした。ところが、接近する途中に腕の下部が静的障害物に接触したため、4)障害物回避行動が起動された。そのため、上方から腕を障害物に押し当てては回避する動作を繰り返しながら、障害物に当たっていない腕の関節を徐々に伸ばし、手先を目的位置へ近づけた。そして、対象物と手先の位置誤差が一定範囲内になると、5)対象物把持行動により、対象物を把持できることを確認できた。

状況5：静的障害物回避の確認3

状況5でも対象物接近中に静的障害物に接触する状況で実験を行った。このとき状況4とは異なり、下方からアームを回避することにより対象物にハンドが届くように、障害物は上方に配置した。状況5におけるハンド先端の軌跡を図9に示す。

3)の直接的接近行動により対象物に向かうところまでは状況4と同様である。状況5ではここで、ハンド

情報を利用することにより、実際に動作の障害となる部分の情報を簡単にかつ確実に検知することができる。それゆえ、本システムでは、障害物の検知に失敗がなく、かつ処理に負担がかからないシステムを構成することができたといえる。

4. 結 論

本研究では人間共存型ロボットが具備すべき要件として、1) 人に危害を加えないこと、2) 障害物に対応できること、3) システムがフェイルしないことを掲げ、これらの要件を達成するために、環境を確実に検知することのできる接触センサを用いたロボットハンドシステムを構築した。また実験により、接触センサによる障害物の検知能力により、静的ならびに動的な障害物を回避することができ、システムが動的な環境に適応できることが確認された。

本システムでは、プロトタイプシステムの可動範囲を二次元平面上に限ったことから、上方からと下方からの2通りの障害物回避用の行動モジュールをそれぞれ用意する手法をとった。非常に単純な手法ではあるが、これら単純な行動の繰り返しにより所望の動作を実現することを確認した。

今後、三次元空間での任意の動作への対応、ならびに非接触センサの併用など、機能の拡張が必要と考えられる。本システムはSSAに基づいて設計したため、このような機能拡張も比較的容易であると期待される。

文 献

- (1) Nakauchi,Y., Sato,M., Yamamoto,Y. and Anzai,Y., *FRECS: Interface System for Human-Robot Cooperation*, Proc. of 5th International Conference on Human-Computer Interaction, Vol.A, (1993), pp.237-242.
- (2) Vischer,D., *Cooperating Robot with Visual and Tactile Skills*, IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, (1992), 2018-2025.
- (3) Stansfield,S.A., *Robotic Grasping of Unknown Objects : A Knowledge Based Approach*, Intl. J. of Robotics Research, 10-4, (1991), 314-326.
- (4) Allen,P.K. et al., *Automated Tracking and Grasping of a Moving Object with a Robotic Hand-Eye System*, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 9-2, (1993), 152-165.
- (5) Brooks,R.A., 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, (1992), 152-167.
- (6) 久野, 「ビヘービアベースロボットの行動」, 日本ロボット学会誌, 11-8, (1993), 1178-1184.