

プロジェクト名: 高信頼性環境制御知能システムの開発

知能ロボットの知性の創発

(実環境における学習の包摂構造化による自律的障害物回避と目的行動の発現)

機械工学科 川副 嘉彦

概要

本研究では、SMPA (Sense-Model-Plan-Act) フレームワークに基づく従来のモデル・ベースト・知能ロボットの実環境における本質的な欠陥をブレークスルーすることをめざして、生き物の行動の巧みさ、人間オペレータの技量・巧みさ、人間の行為の巧みさ、さらに、文化的な型にはまることが死を意味した時代の上泉新陰流兵法を包摂構造化の観点から吟味した結果に基づいて、知能ロボットの知性 (巧みな動き) の創発への開発スタイルを提案した。刻々変化する未知の実環境のモデル化やリアルタイムの学習は不可能であること、実環境においてオフラインで学習した結果を要素行動として積み上げていくような知能ロボットが未来の方向あるいは開発スタイルであり、知能ロボット研究開発の構造改革が急務であることを指摘した。

1. 研究の背景

知能ロボットの実現が期待されるのは、従来のロボットのように作業の精度、速度、効率を追求することではなく、刻々変化する複雑な実世界での作業環境において、柔軟で自然な動きを見せるロボットである。このようなロボットに従来の知能ロボットの開発で採用された方法を適用することはきわめて非現実的である[1]-[6]。

ロボティクスの学問体系の未熟さが改めて指摘されており[7]-[9]、感覚から行動を直接結ぶ手懸かりを発見することにこそロボティクスの神髄があるという指摘がある。一見華やかなロボットブームと裏腹にロボティクス研究には閉塞感があり、従来の延長線上でない新たな原理と根底からの技術革新の必要性が指摘されている[10]。さらにヒューマノイドの応用や将来の産業展開は現在の延長線上では構想しにくく[11]、大規模な研究開発投資を長期間続けるのは容易ではないことが指摘されている[12]。

現実世界で本当に知的に動くロボットは現在の延長線上では実現しそうもないことは最近では多くの研究者が認識している。それにもかかわらず従来と同じような開発スタイルが継続されているのは真の解答を誰も知らないからである。

従来の知能ロボットは、SMPA (Sense-Model-Plan-Act) フレームワークに基づくモデル・ベースト・ロボットと呼ばれ、図1の例に示すように、外界をセンサで認識し、そのモデルを内部に構築し、行動計画を立て、そして実際に行動を起こす。しかし、このような直列方式では、以下のような二つの大きな問題点がある。一つはロバストネスの欠如、すなわち各機能を実現するモジュールのどこかに誤りがあると、最終行動は失敗してしまう。しかも、致命的な失敗を招く恐れがある。二つ目は開発方法が困難な点である。すなわち、各モジュールごとに完全を目指して設計して最終的にそれぞれのモジュールを統合するアプローチを採る開発スタイルでは、ある理想的な状況において各モジュールごとにもうまく動いたとしても、それらを統合するとうまく動かないことが多い。また、各機能モジュールのどこかに新たな機能を付加しようとする、それが他の機能モジュールの設計仕様に影響し、結局すべてのモジュールを一から作りなおすことになる[1]-[6]。

一方、Brooks が提案したサブサンプリング・アーキテクチャ(SA, 包摂構造化)を用いたビヘービア・ベースト (行動型) ロボットは行動そのものを概念の中心に据え、行動ごとにモジュール化する。単純な行動でも環境に応じて適切に発現することこそ知能の本質であるという主張は衝撃的であったが、SA をベースにした Brooks の複雑系としての知的ロボットは十分理解されていないようである[1]-[6]。

2. 本研究の目的

行動型 SA ロボットの各要素行動は、知覚から実際の動作まですべての機能を独立して持たされており、上位の行動が失敗しても、下位の Level の要素行動が実行され、致命的な失敗を防ぐことができる。要素行動を積み上げていくにつれて行動が広がっていき、次第に能力が向上していく。

衝突検知センサ (Bumper) により障害物との接触を検知して方向を変える要素行動 (エーゼント) Escape, 近赤外線センサ(IR)により障害物の接近を検知して回避する要素行動 Avoid, 直進のみを行う要素行動Cruiseにより実験環境における移動ロボットの巧みな動きの発現とロバスト性について考察し[4],[5], さらにIRの代わりに位置検出素子 (Position Sensitive Detector, 以下PSD)を採用し, CCD カメラでRGBを取得して色を識別して床と壁の赤い部分を判別するとその場で歓喜の右回転をするという要素行動Searchを積み上げて (図2), 実験環境 I および実験環境 II において自律的に障害物を回避しながらの目的行動を考察した[6]. PSDはIR(近赤外線)と距離測定の機能を持つセンサである. 自律走行ロボットでの実験結果は生き物の巧みな動きを思わせた. 人間と共存する環境でも適応し, 障害物が突然現れたような場合に, 高度なアルゴリズムを備えた従来の頭でっかちロボットが危機状態になるのに比べてはるかに知的である.

刻々変化する実環境は, ロボットにとっては危険に満ちており, 予期せぬ障害に遭遇する. 本研究では, 坂になった二つの出入口と狭い通路を実験環境 II に追加設置して実験環境 III とし, 変化に富んだ新しい未知の実験環境 III において障害物を回避しながらの色探索という目的行動を試み, 新たな未知の外界においてロボットが経験に基づいて学習した行動を要素行動としてどのように積み上げたらよいかというアーキテクチャを提案する. 新しい要素行動は, 新しい未知の実環境における学習, すなわち, 新しい未知の実環境との相互作用により生まれるという発想である.

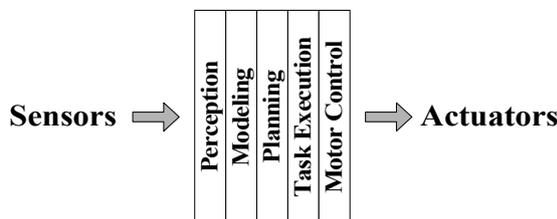


図1 従来のロボットの処理系の例
: 要素機能でモジュール化

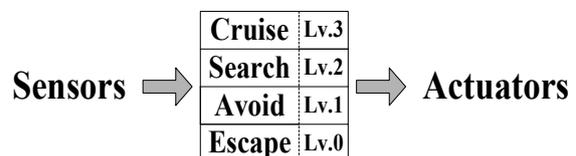


図2 サブサンプリング・アーキテクチャ (SA) ロボットの処理系の例: 要素行動を並列的に積み上げる

3. 狭い通路と坂道のある未知の外界における SA ロボットの自律走行と目的行動の発現

図3は本実験で用いた自律走行型ロボットの平面図である. モータは左右に1つずつ搭載されていて, それぞれが独立して動く. 図5は, ロボット (要素行動 Escape・Avoid・Search・Cruise) が未知の実験環境 III (図4) において坂になった出入口と狭い通路に入り込んだときの挙動を示す. 広い場所 (plain) では障害物や人間のような動く障害物があっても大きな衝突をしないで自律走行できたが, 狭い通路に入り込んだロボットは引き返してしまった. 通路を巧みに走行出来るように試行錯誤により学習して得られた要素行動が Avoid2 である. 狭い通路を走行するときは前方・左右 45 度の 3 つの PSD にさらに左右 90 度の 2 つの PSD を追加して 5 つの PSD を使用した. Avoid2 を積み上げた新しい行動アーキテクチャは, Avoid1 は平地(Plain), Avoid2 は狭い通路(Passage)における障害物回避要素行動とし, PSD 値の組合せにより平地と狭い通路を識別する. 実践的練習を繰り返し, 実践でたとえば 80%以上の成功率で使えるという目処がついたところで本番の試合で使える武器に加えるというチャンピオンの戦術と同じ発想である. このようにして新しい環境との

相互作用によって生まれた新しい要素行動を積み上げていけばロボットは危険に晒されることなく行動を広げていくことができる。

図6は、狭い通路と坂のある実験環境Ⅲにおいて障害物を回避しながら赤色を探してまわるとい目的行動の発現を示す。図6(a)は坂になった出入り口と狭い通路を通ってスムーズに目的地に到達したときの軌跡であり、図6(b)~図6(e)は狭い通路での走行軌跡の拡大である。図6(f)は、図6(a)での目的地 (End Point) までの動きの様子である。同じ条件下

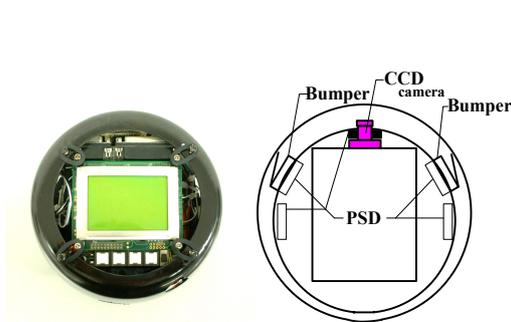


図3 モービル・ロボット

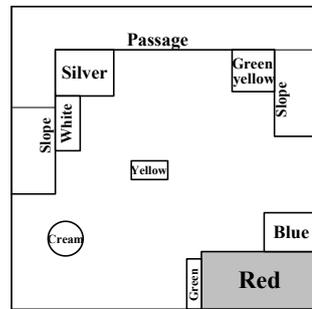


図4 狭い通路と坂のある実験環境Ⅲ

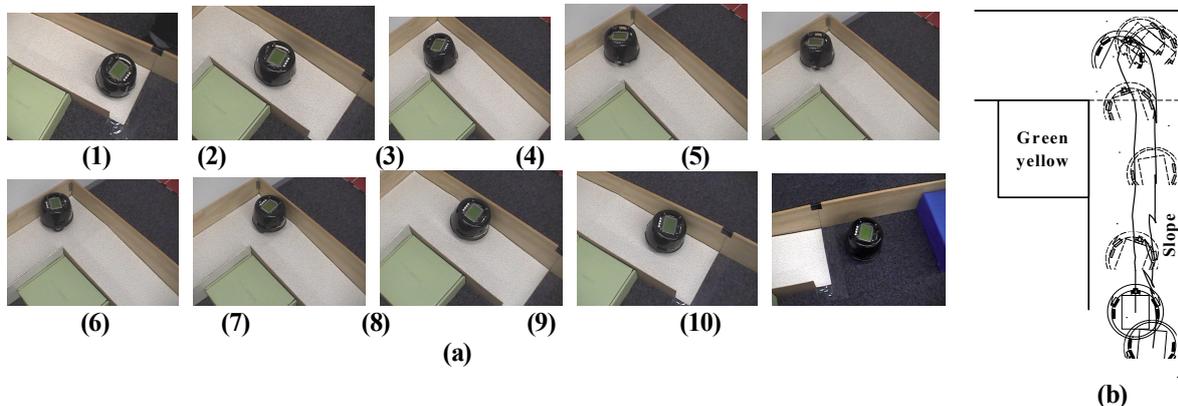


図5 狭い通路と坂道のある未知の新しい実験環境Ⅲにおけるロボットの自律走行挙動 (未知の環境に遭遇してロボットが引き返した挙動, 要素行動 Escape・Avoid・Search・Cruise による)

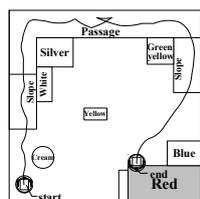


図6(a)実験環境Ⅲにおける軌跡(1)

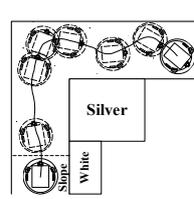


図6(b) 右折の軌跡拡大

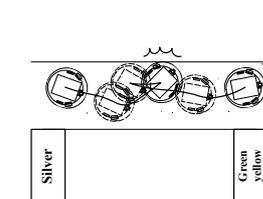


図6(c) 通路走行の軌跡拡大

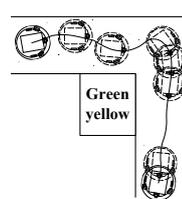


図6(d) 下りの右折の軌跡拡大

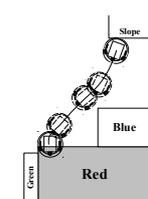


図6(e) 下り終わってから End point までの軌跡拡大

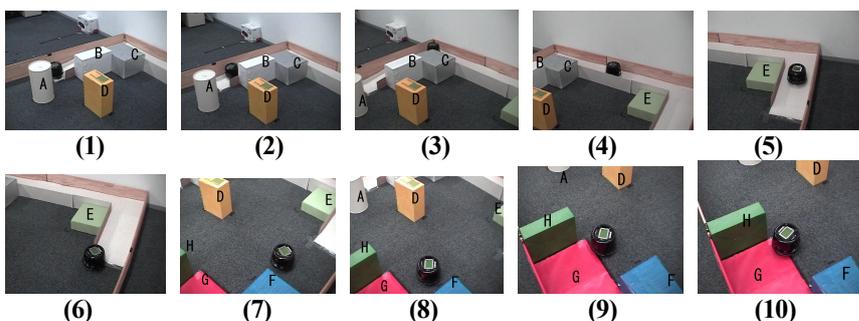


図6(f) 要素行動 Escape・Avoid1・Avoid2・Search・Cruise による自律走行と目的行動 (赤色探索) (実験環境Ⅲ, 図6(a)に対応)

- A: Cream
- B: White
- C: Silver
- D: Yellow
- E: Greenyellow
- F: Blue
- G: Red
- H: Green

でも複雑な道なりに目的地に到達する場合もある。目的地の赤色を識別しても衝突回避・障害物回避が優先されると目的地になかなか到達しない。メカニズムの誤差や走路の摩擦変化などのパラメータ変動の影響を受けて軌跡が毎回少しずつ変わり、人間が同様の動作を行う際の状況に似ており、環境の変動に対して動作が適応能力に富んでいることを示す。

図7は動く人間の足を動的障害物として認識する回避行動、図8は人間の手の動きを動的障害物として認識する回避行動、図9は実験環境Ⅲの外界（実環境）において寝転がっている人間の動きを動的障害物として認識して回避行動をするロボットの挙動を示す。

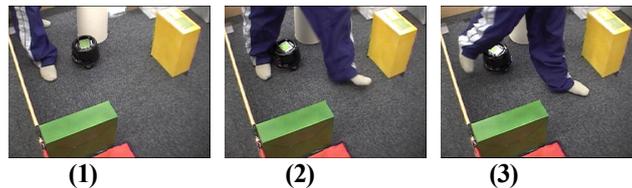


図7 動く人間の足を動的障害物として認識しての回避行動

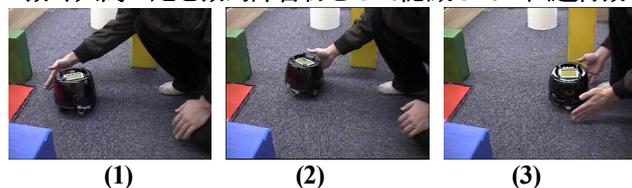


図8 人間の手の動きを動的障害物として認識しての回避行動



図9 実験環境Ⅲの外界（実環境）に寝転がっている人間の動きを動的障害物として認識して回避行動するロボット

4. 結論

大規模プロジェクトとして展開されつつある最先端の知能ロボットでさえ、現状では、その行動は人間で言えばヨチヨチ歩きの赤ちゃんレベルであり、赤ちゃんに幾何学や物理学の知識を詰め込むような開発スタイルが依然として展開されている。ロボットはプログラムの通りに動くだけで、設計者のみが賢くなっているように見える。

本研究では、従来のモデル・ベスト・知能ロボットの实環境における本質的な欠陥をブレークスルーすることをめざして、生き物の行動の巧みさ、人間オペレータの技量・巧みさ、人間の行為の巧みさ、さらに、文化的な型にはまることが死を意味した時代の上泉新陰流兵法を包摂構造の観点から吟味した結果に基づいて、知能ロボットの知性（巧みな動き）の創発への開発スタイルと学習により得られた要素行動をSAスタイルで積み上げていく行動アーキテクチャを提案した。刻々変化する危険に満ちた未知の実環境（外界）はモデル化やリアルタイムの学習が不可能であること、実環境（現場）においてオフラインで学習（練習）した結果を要素行動として積み上げていくような知能ロボットが未来の方向あるいは開発スタイルであり、知能ロボット研究開発の構造改革が急務であることを指摘した。刻々変化する未知の実環境において自在に動き回ることができないようなロボットには、外界モデルも経路計画も無意味であり、目的行動を達成することができないのは自明である。赤ちゃんロボットには母親の介助に相当する設計者の補助が必要であるが、赤ちゃん自身が学習により要素行動を積み上げていくような知能ロボットが未来の方向あるいは開発スタイルであることは間違いないであろう。（文献省略）