

プロジェクト 1

人間の動きの巧みさと知能ロボットの知性

川副嘉彦

埼玉工業大学・機械工学科

1. 研究の背景と目的

従来の自律走行型ロボットは SMPA (Sense-Model-Plan-Act) フレームワークに基づいている。これは、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。一つはロボットの欠如である。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。たとえば、あらかじめ与えられる環境モデルが曖昧なものであれば行動計画は意味をなさない。また、たとえ環境モデルと行動計画が完全であっても、ロボットが計画通りに動かなければ、意味をなさない。二つ目は開発方法が困難な点である。開発のスタイルとして、各モジュールごとに完全を目指して設計していくのが普通であり、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ことが多い。しかしこの方法では、ある理想的な状況において各モジュールごとに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⁾⁽²⁾。

知能ロボットの実現が期待されるのは、少子・高齢化社会とも関連して、「3K 産業」に代表されるような困難で嫌われる作業状況下でのサービスロボットや介護ロボットなど、必然的に周辺の人間の中に交ざって働いたり、人間との間に情報やタスクばかりでなく、やがては感情も含めたやり取りをするようなロボットである。すなわち、作業の精度、速度、効率を追求する従来のロボットに対し、柔軟性に富み、複雑な実世界での作業環境や人間の要求に良く適応し、自由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困難であり、現実世界で本当に知的に動くロボットは、長い間の研究にもかかわらず、まだ実現されていない⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。

一方、MIT の Brooks は、1986 年に行動ご

とにモジュール化するサブサンクション・アーキテクチャ(SA)を発表した。この SA を用いて、行動そのものを概念の中心に据えているのがビヘービア・ベースト(行動型)ロボットである。単純な行動でも、環境に応じて適切に発現すれば、外から見れば知的に行動しているように見えるのであり、これこそが知能の本質であるという主張は衝撃的であった。しかし、北米や欧州の一部の研究者以外には認められず、攻撃・批判の嵐当たりが強かったらしい。日本でも、従来からの知能の延長に留まっていて十分な理解は得られなかったが、1995 年(平成 7 年)度あたりから「感覚と行動の統合による機械知能の発現機構の研究」が行われるようになってきた⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。また、多目的行動調停のための学習によるアプローチを SA と比較した久保田らの最近の論文⁽⁹⁾もあるが、基本行動(要素行動)の積みあげかたや学習の評価項目そのものが適切だとは言い難く、SA をベースにした Brooks の複雑系としての知的ロボットはまだ十分理解されていないようである。

本研究では、人間の動きの巧みさと知能ロボットの知性について考察し、SA によるビヘービア・ベースト・移動ロボットを実装して知能ロボットの自律走行の巧みさと知性の発現のメカニズムを探る。

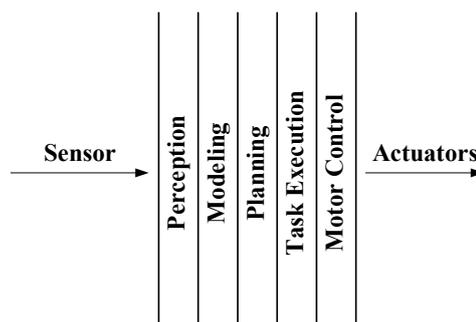


図 1. 従来のモデル・ベースト・ロボットの処理系の例⁽¹⁾

2. 人間の動きの巧みさと知能ロボットの知性

2.1 人類の知能の進化とサブサンクション・アーキテクチャ

地球の歴史は 46 億年、単細胞生物が出現したのがおよそ 35 億年前、魚類と脊椎動物が 5 億 5000 万年前、昆虫が 4 億 5000 万年前、哺乳類が 2 億 5000 万年前、類人猿の祖先がわ

ずか 1800 万年前、人類は 250 万年前、人類が農耕を始めたのが約 2 万年前、文字を書くようになったのが 5000 年前、専門的知識を所有するようになったのはここ数百年だと Brooks は指摘している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。単細胞から昆虫に進化するのに 30 億年かかったのに対して、そこから人類に達するのにわずか 5 億年しかかかっていない。問題解決行動、言語、専門的知識とその応用、推論などはすべて、「実世界で行動することの本質」がいったん獲得されたなら極めて単純な事柄であって、その「本質」とは、動的な環境世界のなかでの可動性、視覚、そして生存に関連する作業をやっている能力であり、真の知能の発展にとって不可欠の基盤であることを示唆しているというのである。この「本質」の部分は、「進化」がその時間を最も多く費やしたところであり、それは他の部分よりもはるかに厄介な問題であると言っている。

現実の世界で人間と共存し、それ自身によって知的な存在であると人間に認められるような自律的な移動ロボットを製作するには、われわれ人間が住んでいる現実世界でテストすることが決定的に重要であり、単純化された世界でテストしたものを単純化されていない現実の世界に移そうとしても、すべての部分が再構築されねばならないという救い難いことになる。Brooks は自らの経験から指摘している。

2.2 人間による技量・巧みさの獲得

倒立振り子のように不安定な非線形系を人間が制御して安定化させるためには、人間には過酷な状況判断が要求され、人間が介在するこのような閉ループ系には、システム全体として複雑系が形成される可能性がある。

台車上の倒立振り子を倒さないように手動により制御することは練習により可能になる。60 秒間倒さないように制御するという技量に習熟した試行者 8 人の時系列実測波形についてエントロピー診断を行ったところ、どれも無秩序さの多いことが明らかになり、習熟度が増すと無秩序さの程度が低減した。また、カオス性を示す尺度として算出した最大リアプノフ指数も正の値を示した⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁵⁾。この場合の技量・巧みさは、不安定な非線形系と人間との相互作用により獲得された(発現した)ものであり、複雑系の世界と見ることができよう。

2.3 スポーツや将棋における巧みさの発現

スポーツの研究のなかには巧みさの発現に関する興味深い例が数多くある。

合気道の関東学生大会で優勝した学生が老師範に歯が立たないというので、何故かと聞くところのやろうとしていることが全部読まれていると答えたそうである。逆にその老師範にこの学生のことを聞くと動きが全部読

めると答えたそうである。ところが、この老師範がみんなのしている前でこの学生を格好良く投げ飛ばしてやろうという気持ちに少しでもなると簡単に負けてしまうそうである。無心でなくなっただけでプレッシャーを感じたために、相手の強い力をうまく反らしていた微妙な感覚が狂うのである。

棒高跳びの選手が飛ぶ前に「脚の角度はどのくらいですか？」と同僚の選手から聞かれて「そんなこと考えたこともない」と言ったものの、その後それが気になってまったく飛べなくなったという例もあるらしい。無心じゃない状態である。

野球の達人・イチロー選手の「やるべきこと(要素行動という)を一つ一つ積みあげていくのです。そうすると、そうしようと思わなくても、結果は出てくるのだと思います」という言動は、彼が「人間の行動」をよく理解していることを示す。これこそ SA の本質である。プレッシャーにつぶされることもなく、無心、自然体で次々と素晴らしい結果が出てくる秘密はここにあると考えられる。実世界でどのような行動が発現するかは、自分が積みあげて来た「要素行動群」と「状況」との相互作用によって自然に決まってくるものであり、「実世界に必要な要素行動」を一つ一つ積みあげていけば、何も意識しなくても、自然と結果はついてくるということであろう。

テニスの巧みな動きも、「バウンドするまえのボールの打ち方(ボレー)」、「バウンドしたボールの打ち方」、そして「サーブの入れ方」、この 3 つの単純な要素行動を実践的な環境で積みあげるだけで、相手や状況次第で、しかもそれぞれのレベルで、巧みな(賢い)ダブルスが生まれてくる。ただし、自分より格段に下手な相手とのゲームでは、巧みさは発現する余地がない。これは、スポーツだけではないらしい。巧みな将棋をする名人が、相手がつまらない手を打ってくると、やる気が失せて負けてしまうことがあるらしい。

3. サブサンクション・アーキテクチャを用いたビヘービア・ベスト・ロボット

サブサンクション・アーキテクチャ(SA)では、要素行動(エージェント)ごとにモジュール化する。図 2 にモジュール化の例を示す。主張点の一つは、ロバストネスの確保である。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、すべてのモジュールは絶えず動いている。もし上位の行動が失敗しても、下位のレベル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。もう一つの主張点は、開発過程の容易性である。開発の方法としては、下位レベルから限定条件のない実世界で動くものを作り、次第に上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 (subsume) ように積み重ねられる。したがって、新たな行動を付加したときに、従来の部分に手を加える必要はない。すなわち高い拡張性が得られる。このため、現実世界で動くロボットが次第に能力が向上していく形で実現できる⁽¹⁾⁽²⁾。

例えば電柱とガードレールとの狭い間隙を自転車で通り抜けるような場合を想定すると、人間は走りながらハンドルの右端から電柱までの距離、あるいは左端からガードレールまでの距離を刻々計測することはしない。仮に人間の感覚系及び行動発生系の中に、右側の隙間のおおよその大きさを見て行動を決める要素行動、左側の隙間を見てそれに対応しようとする要素行動、道全体のおおよその隙間の大きさを感じてペダルを踏む力やブレーキを握る力に翻訳する要素行動などが存在して、これらは必要なときにいつでも自発的に起動する、というふうにと考えると、SAを用いた行動型ロボットの要素行動群による駆動原理が理解できる⁽²⁾。

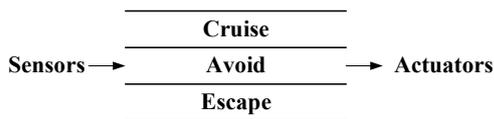


図 2. サブサンプリション・アーキテクチャ (SA) を用いたビヘービア・ベースト・ロボットの処理系の例：要素行動 (エージェント) を並列的に積み上げる。

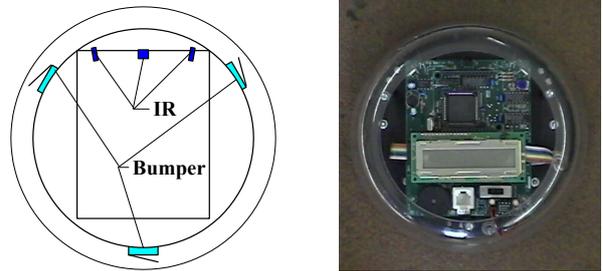
4. ビヘービア・ベースト・ロボットの自律走行挙動

図 3 は実験で用いた自律走行型移動ロボットの平面図である⁽¹⁶⁾。Escape, Avoid, Cruise の 3 つの要素行動を積み上げていった。要素行動 Escape は、衝突検知センサ (Bumper) により障害物との接触を検知し、方向を変える (レベル 0)。要素行動 Avoid は、近赤外線センサ (IR) により障害物の接近を検知し、それを回避する (レベル 1)。要素行動 Cruise はただ直進するのみである (レベル 2)。図 4 はそのフローチャートである。上に向かうほど要素行動の優先度があがっていく。このとき、新しいレベルを付加するときには、既存のレベルには手を加えない。

Escape と Cruise の 2 つの要素行動モジュールのみの行動であっても要領よく進むが、行き詰まりを起こすこともある。

図 5 は Avoid を付加した場合である。Escape のみでは行き詰まった場所でもスムーズに通過し、動き回る。この結果は、ビヘービア・ベースト・ロボットの要素行動が増えるにつれ行動が広がっていく、つまり知的レベルがあがっていくことを示している。センサの検知範囲の不安定性、メカニズムの誤

差、実行中の走路の摩擦の変化などからくる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いる。動作の精度を追うのではなく、環境の変動に対して動作が非常に適応能力に富んでいることを示している。



(a) 簡略図 (b) 写真
図 3. モービル・ロボットの平面図

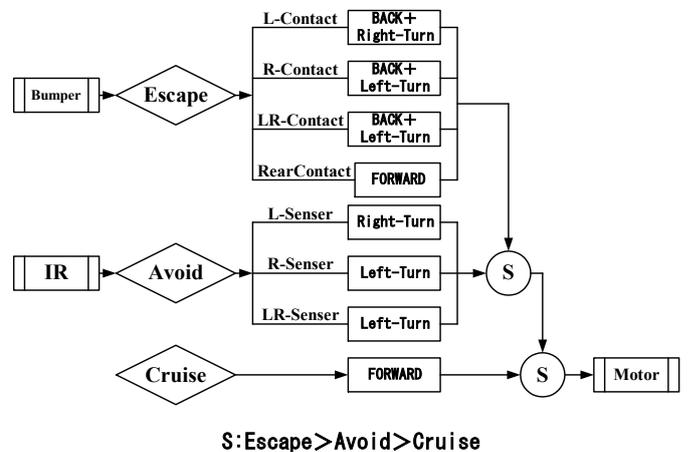


図 4. ロボットの行動フローチャート

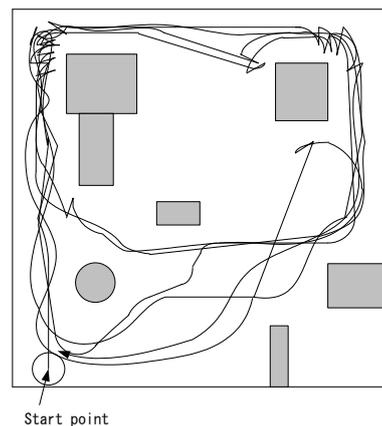


図 5 要素行動群 Escape・Avoid・Cruise による行動：実験環境 (1)

図 6 (a) は、障害物が 1 つ変わった場合でも、同じロボットが新たな状況に容易に適応することを示している。図 6 (b), 図 6 (c) は図 6 (a) の 1 部分を拡大した軌跡、図 6 (d) は実験風景である。図 7 は、障害物をさらに複雑に配置した実験環境での行動の写真例である。このように、環境が大きく変化してもロボットは

何の変更も必要とせずによく適応する．この実験では，3つの要素行動モジュールだけしか持たないにもかかわらず，外部からの視点で観察すると，高度の知的行動をしているように見える．知的行動と見なされるような

動きには，必ずしも複雑な処理が必要ではないことを意味しており，むしろ単純な行動でも，環境に応じて適切に発現すれば，外から見れば知的に行動しているように見えるという複雑系の世界のように見える．

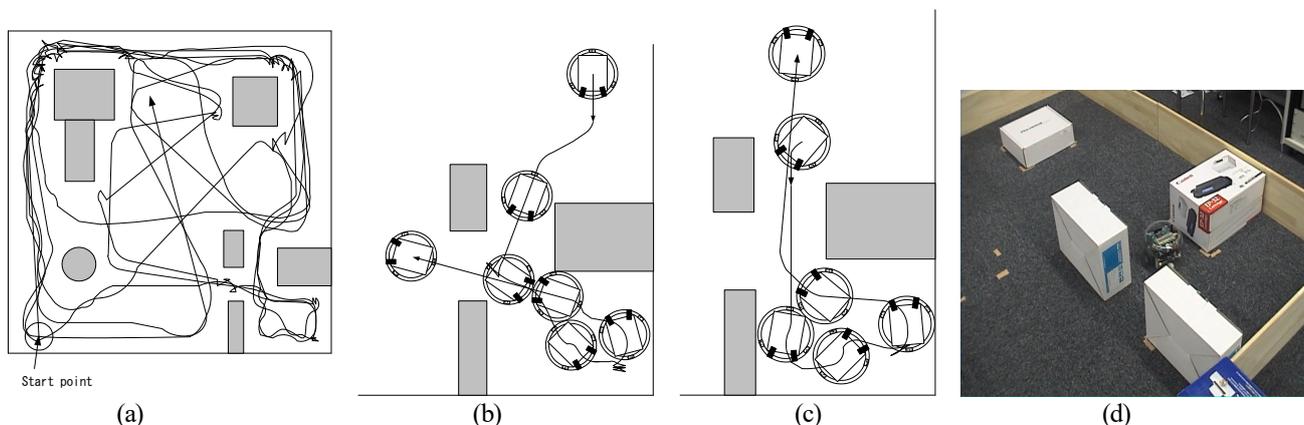


図6. (a) Escape・Avoid・Cruiseでの行動：実験環境(2), (b) 拡大図 (その1), (c) 拡大図 (その2), (d) 実験風景



図7. 実験風景 (さらに複雑な実験環境)

5. 結論

人間の動きの巧みさと知能ロボットの知性について，さらにSAを用いた行動型移動ロボットを実装して自律的走行挙動について考察して以下のことを吟味した．(1) 知的行動は要素行動群と外界との相互作用によって出現する．(2) それは簡単な要素行動モジュールの積み重ねにより実現できる．(3) ロボット自身の拡張 (知的レベルの向上) も簡単に行うことができる．また，(4) 従来のモデル・ベースト・ロボットのように外界の完全なモデルの獲得が不要である．したがって，(5) 簡単な処理で実現でき，外界に対して頑健な (ロバスト性に優れた) ロボットが得られる．今後の課題は以下のようなことである．(1) 障害物のある狭い廊下での2台のロボットによるすれ違いのように，もっと複雑な問題を試みること．(2) 巧みな動きとカオス・複雑系の関係を検討すること．(3) 要素行動の追加により様々な目的行動をさせること．

文献

(1) Brooks, R. A., IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 2, No. 1, March 1986, pp. 14-23.
 (2) Gomi, T, Evolutionary Robotics ER'98, AAI Books, Ontario, Canada, 1998, pp.487-519.
 (3) 井上博允, 計測と制御, 35-4, (1996), 計測自動制御学会, pp.237-242.
 (4) 白井良明, 計測と制御, 35-4, (1996), 計測自動制御学会, pp.256-261.

(5) 井上博允, 日本ロボット学会誌, 16-5, (1998), pp.578-585.
 (6) Brooks, R. A., Artificial Intelligence, Vol.47, (1991), pp. 569-595.
 (7) ロッドニイ・A・ブルックス, (柴田正良訳), 現代思想, 18-3, (1990), 青土社, pp.85-105.
 (8) 久野義徳, 日本ロボット学会誌, 11-8, (1993), pp. 1178-1184.
 (9) 久保田直行ほか4名, 日本機械学会論文集, 67-664, (2001), pp.3876-3882.
 (10) Kawazoe Y., Ohta T., Tanaka K., Proc. of ICMA2000-Human friendly mechatronics, (2000), pp.457-462.
 (11) Kawazoe Y., Motion and vibration control in Mechatronics, Edited by Seto K., Mizuno T. & Watanebe T., (1999), pp.133-138.
 (12) Kawazoe, Y., Proc. 6th Int. Symp. on Artificial Life & Robotics, (2001), pp.9-12.
 (13) Kawazoe, Y., J. Robotics & Mechatronics, 13-1, (2001), pp.23-29.
 (14) 川副嘉彦・松本仁, 17回ファジィシステムシボジウム論文集, (2001), 日本ファジィ学会, pp. 715-718.
 (15) 川副嘉彦・松本仁, 第11回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, (2001), 計測自動制御学会, pp.415-420.
 (16) Jones J L, Rug Warrior Pro™, Assembly Guide, AK Peters LTD (USA).