

知能ロボットの知性の創発 (第 1 報, 複雑系としての人間の行為・運動の巧みさと サブサンプション・アーキテクチャ)

川副嘉彦

Emergence of the Intelligence of an Autonomous Robot : Human Dexterity and Subsumption Architecture as Complex Systems

Yoshihiko KAWAZOE

概要 作業の精度・速度・効率を追求する従来のロボットに対し, 知能ロボットの実現が期待されるのは, 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, 長年の研究にもかかわらず, まだ実現されていない. 一方, 行動そのものを概念の中心におく Brooks の Subsumption Architecture (SA) を用いたビヘービア・ベースト (行動型) ロボットの提案は衝撃的であり, 多くの注目を浴びた. 日本においても 1995 年頃から行動と感覚の統合による知能ロボットの研究が大規模プロジェクトとして始まった. しかし, 巧みな (知的な) ロボットの実現という意味では, 多くの時間と経費が費やされたにもかかわらず, 将来の見通しが難しく, 複雑系としての Brooks の知的ロボット (SA ロボット) の理解には混乱が見られる. 本論文は, 人間の行為における巧みさの発現, さらに人間の手による操作の巧みさの発現について考察し, 知能ロボットの知性は人間や生き物の動きの巧みさの発現のなかにあることを指摘し, SA ロボットを開発の原点に据えて, SA 的な開発スタイルで要素行動を積み上げていくことが知能ロボットを実現するための唯一可能な方法であることを主張した. SA による簡単な要素行動を実装した移動ロボットの自律走行の創発については続報に考察する.

1. 研究の背景と目的

1.1 従来のモデル・ベースト・ロボットの 問題点

SMPA (Sense- Model- Plan- Act) フレームワークに基づく従来からの自律走行型ロボットは, 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¹⁾. 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 (頑健さ) 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つ

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, 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

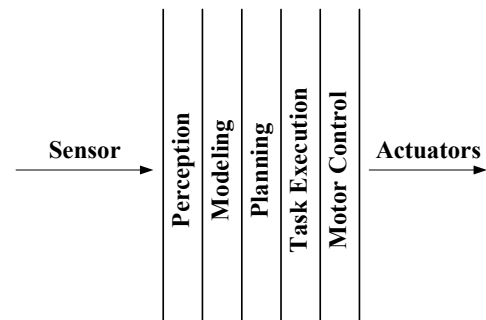


図 1. 従来のモデル・ベースト・ロボットの
処理系の例¹⁾

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が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) - 3)}。

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間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、自由に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、長年の研究にもかかわらず、まだ実現されていない^{2), 3)}。

1.2 サブサンプション・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

一方、MIT の Brooks¹⁾は、1986 年に行動ごとにモジュール化するサブサンプション・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。

サブサンプション・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。要素行動を並列的に積み上げる。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て方向を変える(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て回避する(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)。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。要素行動が増えるにつれ行動が広がっていき、知的レベルがあがる。

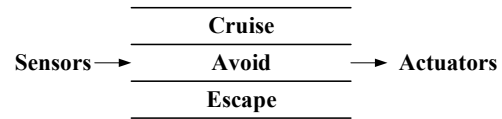


図 2. サブサンプション・アーキテクチャ(SA)を用いたビヘービア・ベースト・ロボットの処理系の例

サブサンプション・アーキテクチャ(SA)の主張点の一つは、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能力を次第に向上させていく形で実現できる^{1) 2)}。

例えば電柱とガードレールの間の狭い間隙を自転車を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) 3)}。

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・批判の風当たりが強かったと云う^{2),3)}。日本でも、一部の研究者を除くと従来からの知能の延長に留まっていたが、1995年頃から「感覚と行動の統合による機械知能の発現機構の研究」が大きなプロジェクトとして始まった⁴⁾⁻⁶⁾。

1.3 現在までのSAロボット研究の問題点と

本研究の目的

西田ら⁷⁾は、SAに基づいて接触センサだけでロボットハンドシステムを構築し、動的な環境への適応性や機能の拡張性について確認している。しかし、久野⁸⁾も指摘しているように、ビヘービア・ベースト・ロボットに対して、「反射的な行動をしている程度の下等なものなら実現できるが高次の知能は実現できない」という批判が必ず出てくる。ビヘービア・ベースト・ロボットはこのような狭い意味に誤解されやすい。要素行動を単純反射行動だけに限る必要は無いにもかかわらず、SAをベースにしたBrooksの複雑系としての知的ロボットはこのような誤解を受けやすい。

従来のSMPAフレームワークに基づく手法では、時間と経費をかけた長年の研究にもかかわらず、ゴキブリ程度の行動をするロボットでさえ未だ実現されていないのである。現実世界で本当に知的に動くロボット、たとえば夕方の買い物客でごった返す商店街の歩道を走るようなロボット³⁾への道は依然として遠い。

たとえば、多目的行動調停のための学習によるアプローチをSAと比較した最新の研究⁹⁾においても、SAによるビヘービア・ベーストに対する理解、基本行動(要素行動)の積みあげかた、あるいは学習の評価項目そのものに疑問が残る。SAと対比するアプローチというより、SAの発展・拡張と捉えるべきであり、複雑系としての捉え方がなければSAによる知能ロボットの本質を理解することは不可能であろう。

本報では、人間の行為における巧みさの発現、さらに人間の手による操作の巧みさの発現について考察し、続報において、SAによる簡単な要素行動を実装した移動ロボットの自律走行の創発について考察し、知能ロボットの知性は人間や生き物の動きの巧みさの発現のなかにあることを指摘し、SAロボットを開発の原点に据

えて、SA的な開発スタイルで要素行動を積み上げていくことが知能ロボットを実現するための唯一可能な方法であることを主張する。

2. 人間の巧みさの発現とサブサンプリング・アーキテクチャ

2.1 人類の知能の進化とサブサンプリング・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Brooks¹⁰⁾は指摘している。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。「実世界で行動することの本質」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たのける能力であり、これらが真の知能の発展にとって不可欠の基盤であることを生物の進化は示唆している。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、他の部分よりもはるかに厄介な問題であるが、いったん「実世界で行動することの本質」が獲得されたなら、問題解決行動、言語、専門的知識とその応用、推論などはすべてこの本質に比べたら極めて単純な事柄であるという指摘である。知能ロボットの知性とは、現段階では、まず、巧みな動き・知的に見える動きであろう。巧みな動きがなければ実環境の認識も不可能である。

さらにBrooksは、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ことを指摘している。

2.2 人間の行為における巧みさの発現とサブサン プション・アーキテクチャ

スポーツや芸術、あるいはリハビリテーションの現場における人間の行為には巧みさの発現に関する興味深いヒントが数多くみられる。

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、何故かと聞くとこちら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知っ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。無心でなくなったためにプレッシャーを感じて、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¹¹⁾。

棒高跳びの一流の選手が飛ぶ前に「脚の角度はどのくらいか？」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¹¹⁾。

無心でない状態のときには筋肉の働きのバランスが悪くなり、これがいわゆるプレッシャー状態である。相手のあらゆる攻撃に対応できるプログラムを持っている状態が無心の状態であり、相手の動きが読める状態である。この状態にあればプレッシャーは感じない¹¹⁾。

野球の質やレベルに関する日本と米国との大きな相違にもかかわらず、米大リーグ1年目いきなりリーグ最多安打、盗塁王、ゴールドグラブ賞(守備力)、新人王、最優秀選手(MVP)という記録を残した野球の達人・イチロー選手はTVコマーシャルで次のように言っている。

「やるべきこと(要素行動に相当)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う」。

「やるべきこと」とは要素行動(エージェント)である。プレッシャーにつぶされないで、無心、自然体で次々と素晴らしい結果が出てくるのは、「人間の行動」あるいは「巧みさ」のメカニズムを身体がよく理解しているからであろう。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、結果は自然についてくるというのであろう。さらに、監督やコーチ陣が「今年もやと思うが、重圧をかけたくない」と口をそろえるのに対して、本人が重圧を感じている様子は一向にない。イチローの最大の武器は柔軟さ・順応力であり、どんな球にでも反応して広角に打つことができる。前年はシーズン前に、相手の投球ホームに合わせる、足の上げ方を小さく変えた。マークがさらにきつくなることについては、「厳しくマークされるのは日本でも同じでしたから」と言っている¹²⁾。日本で7年連続首位打者を獲得した自信は、メジャーでも揺るがないのである。日本における1994年の大記録210安打の翌年、彼はさらに本塁打と打点を飛躍的に伸ばす変貌ぶりを見せた。ボールを遠くへ運ぶ技術を身につけたのである。今年はどんな「進化」と「変化」を見せてくれるかが期待されている¹²⁾。安定して打率を残せるのは、追いつめられた時のオプションをいくつも持っているからだと言田¹³⁾は言う。大リーグ2年目のイチロー選手はさらに要素行動を積みあげている。開幕戦2試合のヒットは、いずれも「追い込まれて」から打った「決して綺麗ではない」ヒットだったという。彼は、追い込まれてからはどうすればいいのか、そういう時には強い打球を打ちにいくよりもいろんな技術でファウルにしたり、ヒットにしたいという思いを語っており、実際にオープン戦で絶好球をあっさり見逃していたのは、わざとツーストライクに追い込ませておいて、そこからの対応を試すためだったという。これがイチロー選手のオプションを読み解く鍵である¹³⁾。「一喜一憂はまわりがすることで、僕がすることじゃない」¹⁴⁾というコメントに、彼がきわめてロバストである理由を見出すことができる。

テニスの達人 Martina Navratilova は次のように言う¹⁵⁾。「集中するということは、簡単なことではない。必要な集中力は試合のずっと前からもっていなければならない。集中力は、練習中のコートで生まれるものである。グランドストローク、サーブ、素早い足の動きなど、すべてが練習から生まれるものである。練習も試合のときと同じように精神面が大切であり、打つ

ボールすべてに集中して、ひとつひとつのショットをカバーするとき、精神的な準備は、意識しなくても自然にできるようになる。これが本物のプロのやり方である。」もう1人のテニスの達人 Jimmy Connors は次のように言う¹⁵⁾。「コートでは、どろどろの戦いが展開されていて、試合中の自信が重要である。試合中の自信は、ただ自分に勝つぞと言いきかせたり思い込ませたりするのは違う。そんなものは簡単に敵に打ち返されてしまう。信じるものは本物でなければダメだ。本物の自信をつける方法はただひとつ。しっかりとサボらずに十分時間をかけて練習すること。そして、心から自分はできるんだという確証を持つことだ。目的を持って練習することが必要である。練習時間の長さではなくて、どれだけ充実した時間を過ごしたかが意味を持つ。」実践を想定した要素行動の積み上げの重要性を指摘している。

元フェドカップ(女子テニスの国別対抗試合)日本チーム監督・小浦氏も興味深いことを言っている¹⁶⁾。世界のトップ・伊達選手の具体的な指導に関して、ストップウォッチを7秒, 30秒, 7秒, 30秒・・・にセットし、7秒間は振り回しを行う。7秒間・・・と時間は短い、全力で走らせる。7秒というのは試合においてラリーが続く平均的な時間である。また、ボールが飛んできた方と別の方向に打たせる。30秒間はただ休むだけでなく呼吸法などを指導し、有効に使うようにする。30秒間というのは、ラリーが途切れて次にプレーを始めるまでの時間である。単に肉体的にトレーニングするのではなく試合を想定し、心理面をも同時にトレーニングするのである。以前よく行われていたような長時間の振り回しはやらない。全力で走ったのは当然最後まで持たないから、「あと何分」というところに集中してしまい、全力で走らなくなる。これでは試合に有効とは言えない。また小浦氏は、“眼”と“身体”との協調性が重要であると言う。鋭い指摘である。音よりも、視覚的な合図を用いたほうが良いという。また、“肘”とか“膝”だけに注目したようなデータではなく、学者は全体を1セットにした話をすべきである。ほとんどの雑誌、講習会での学者の話は、個々の細かい話に終始しがちであり、その個々

の話を役立つ形にまとめるのは一般のコーチには難しい。即応可能で次第に能力が向上していく形が求められており、新たな知見がさらに追加されても、従来の部分に手を加える必要はなく、拡張性が高いものという意味に解釈できる。

テニスの巧みな動きも、「サービスの入れ方(スタート)」、「バウンドしたボールの打ち方」、そして「バウンドするまえのボールの打ち方」、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、プロでなくても相手や状況次第、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、自分より格段に未熟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。巧みな囲碁をする名人が、相手がつまらない手を打つてくると、やる気が失せて負けてしまうことがあるらしい。

独自の碁風「宇宙流」で有名な第20期名人・武宮正樹は彼の著書¹⁷⁾で次のように言っている。「宇宙流」とは「自然流」のことである。「宇宙流」は最初から「地」をほしがるような戦法ではなく、「隅」にしろ「辺」にしろ、石を高く(中央に近く)打ち、戦ったうえで最終的に「地」を得るという「未来思考」の戦法なのである。碁も人生もわからないことばかりである。神ならぬ身の私たちは、間違ふことでしか碁の、そして人生の真理に近づくことはできない。結果にこだわるばかりでは、けっして真理は見えてこないのである。また、次のようにも言う。私は目標を立てない。目標は「立てる」ものではなく「持つ」ものだと思っている。目標を「立てる」場合、その目標は、小さなもの、目先のものが対象になる。逆に、目標を「持つ」場合の目標は、人生を通してやりとげようような大きなものが対象になる。

「住吉の長屋」で日本建築学会賞を受賞した安藤忠雄は次のように言う¹⁸⁾。自然の移ろい、その刺激が人間の身体と精神をはぐくむ。どこでも等しく整えられた生活より、自然に応じて多様な日々のほうが、はるかに豊かである。建築とは自然と人間との対話を喚起する装置である。

第15回山本周五郎賞を受賞した作家の江國香織は次のようにコメントしている。「恋愛は、他人の意見や情報が役に立たず、主観的な判断だけで人が行動する数少ないもの。小説でも、登場人物の考え方に耳をすまして慎重に行動を決めています。」¹⁹⁾

佐々木²⁰⁾によると、リハビリテーションの現場では、運動障害の身体は、新しい環境と出会ったとき、新しい姿勢、動きを要求される。頸椎の脱臼・骨折により損傷部以下の知覚と運動が完全に麻痺した障害者の「靴下はき」の観察によると、(a) 転倒しないこと(調整され続ける)、(b) 足と手を接触する位置に脚をもってくる(全身の変形)、(c) 全身の変形を持続したまま足先位置で手先の操作をする、という3種を目標としており、(b)と(c)の間も(a)が持続して達成されていることが重要である。三歳児は皆、座るという確実な方法でこれを達成する。「靴下はき」の発達についても詳細な記述がある。

さらに、佐々木²¹⁾によると、行為をそのまま捕獲しようとする、とたんにいきづまる。行為はまさに場に応じて自在に変わりつづけている。杵をつくってそこに追い込もうとしてもするりと逃れる。光の感覚のない視覚障害者の歩行習得過程の観察によると、壁の切れ目、道の区切れ目を発見する技術が重要であり、ナビゲーションの基本である。ギブソンは知覚者の周囲にあるのは、物のように輪郭で区切れるものではなくて、相互にどこまでも隣り合っている表面のレイアウトだと言う。動けば表面間には相互に隠す・隠されるという変化が生じ、この特徴ある表面の推移を「遮蔽」(Occlusion: さえぎりおおうこと)とよぶ。「遮蔽」は視覚にとって重要な出来事であり、それによって、「環境全体」をみることができる。遮蔽は次の遮蔽を包み込んでおり(subsume)、多数の遮蔽の包摂(Subsumption)集合が、広大な環境への定位の意識を我々に与える。移動は遮蔽を繋げていく経験であり、全環境を移動という観点から定義するならそれは遮蔽の包摂(Subsumption)によって現れてくる不変である。視覚障害者は、出来事間の遮蔽、ローカルなところでの遮蔽と大規模な「壁」との遮蔽、小さな遮蔽と小さな遮蔽、小さな遮蔽と大きな遮蔽との遮蔽を利用

している。

解剖学者・養老孟司²²⁾は、人類の未来に関して次のようなコメントをしている。「社会が脳化していることが問題である。脳化とは、ああすればこうなると考えることである。すべてが意識のもとにコントロール可能だと思いたがることである。でも、肝心の人間は自分の死期さえわからない、不確定性に満ちた存在である。自分が不確かである程度に不確かな自然世界が、一番暮らしやすい。」さらに、「情報とは、一度だれかの頭を通過して言葉に置き換えられたものだから、現実との間に必ずズレがある。事実は多面的で、そのままそっくりは再現できない。人間が本当に物を学ぶのは現場からである。この本質は、五感を通じて入ってくるものに直面し、そこからつかみ取るしかない」。「脳で考えるのではなく、体で感じて謙虚に生きる方法を取り戻さないと、本当に手遅れになる」。

人間の行為における巧みさの発現はSAの世界そのものであり、達人はそれぞれ本能的にSAの本質を見事にとらえている。作家・武者小路実篤の「見るも良し、見ざるも良し、されど我は咲くなり」の世界である。

3. 複雑系としての人間の技量・巧みさの発現

図3は、人間オペレータによる倒立振子(倒立棒)の安定化制御実験の様子を示す²³⁾⁻²⁷⁾。倒立棒の下端をシャフト及びミニチュア・ベアリングを使用して摩擦の少ない状態で支持している。台の上にリニアベアリング用のスライド・レールを固定し、倒立棒が傾くと、人間の手によりリニアベアリングに固定した台車を水平に移動させて、棒が倒れないように制御を行う。倒立棒の傾斜角と台車の移動変位をポテンシオメータにより検出し、AD変換器を通してパーソナルコンピュータに取り込む。

手動で台車を移動させて倒立棒が倒れないように制御することはかなり難しく練習を必要とするが、練習を重ねることにより倒立棒を60秒間倒れないように有限振幅で安定化制御することが可能になる。60s間の安定化制御にある程度習熟した試行者(人間オペレータ)による挙動にはリミットサイクル(Self-excited

vibration)的な周期的変動やリミットサイクルが揺らぐような不規則的変動が見られ、個人と習熟度の差異が顕著である。コンピュータ制御実験によると、リミットサイクル的(線形的には不安定)あるいはリミットサイクルが揺らぐような不規則的な動きは予期せぬ外乱に対してロバスト(頑健)であった^{24),25)}。一般的にリミットサイクルは軌道安定だから、過渡的な外乱が加えられてもリミットサイクルに収束する。構造安定でもあり、状況の変化に応じた運動の変化が起こりうる²⁸⁾⁻³¹⁾。したがって、人間オペレータによる安定化制御は、適応性や柔軟性をもつことになる。人間の巧みな制御特性が同定できれば、外乱にロバストな制御器を実現で

きる可能性がある³²⁾⁻³⁷⁾。

倒立棒のように不安定な非線形系(傾き角の大小により振動周期が異なる)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³²⁾⁻³⁷⁾。

倒立棒を倒さないように安定化制御するという技量・巧みさは、不安定で非線形な倒立棒系と非線形な人間系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る。不安定で非線形な倒立棒系と非線形な人間身体系との相互作用により、倒立棒が倒れないで直立する状態が生まれる。

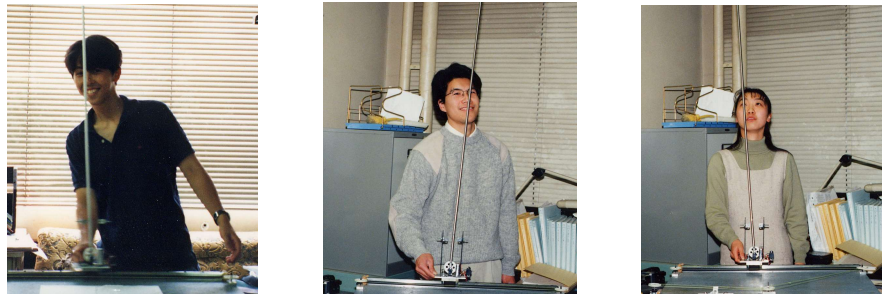
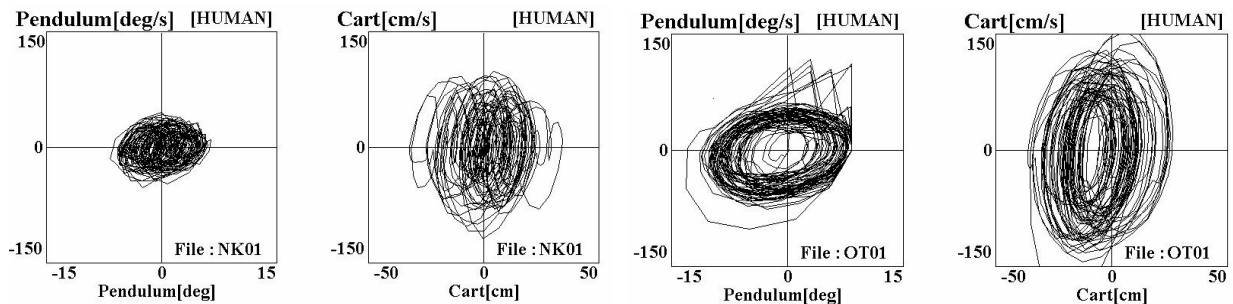
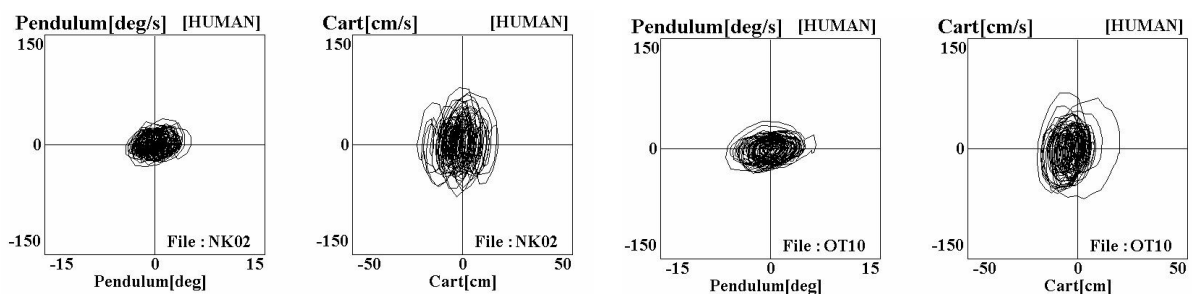


図3 人間オペレータによる倒立振子の安定化制御実験状況



(a) 人間 NK の第1回目の試行 NK01

(c) 人間 OT の第1回目の試行 OT01



(b) 人間 NK の第2回目の試行 NK02

(d) 人間 OT の第10回目の試行 OT10

図4 人間による倒立振子・台車系の安定化制御挙動(位相面表示)

倒立棒系の非線形ダイナミクスと人間身体系の非線形ダイナミクスとが相互に引き込みを起し、系全体でリミットサイクル・アトラクターが生成されることになる。リミットサイクル・アトラクターの形成が、安定かつ柔軟な制御の生成に対応する。このような柔軟性は、理想軌道からの誤差を減らすという線形制御方法では決して実現できない^{28)~31)}。

台車上の倒立棒を 60 秒間倒さないように制御するという技量にある程度習熟した試行者 8 名のそれぞれ 10 回の時系列波形を記録した。図 4 は、そのうちの 2 名の試行 4 例の位相面表示である。左は振り角変位（倒立棒傾斜角度）－角速度、右は台車変位－台車速度である。位相面上の軌道は毎回少しずつ変わり、左右非対称な動きや不規則な動きが生成される。

図 5 は、人間オペレータ NK の試行 1 回目から 10 回目までの実測波形のエントロピー診断結果である。縦軸のエントロピーの割合は無秩序さ、あるいは不規則さの程度を表し、1 は完全にランダムな状態を意味する。どの試行も無秩序さの程度が大きく、習熟度が増すと無秩序

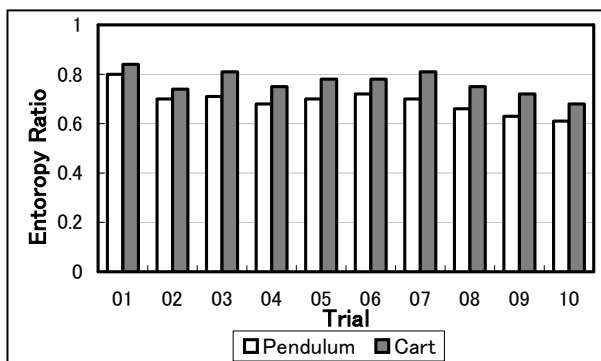


図 5 人間 NK における試行回数と総エントロピーの割合の変化

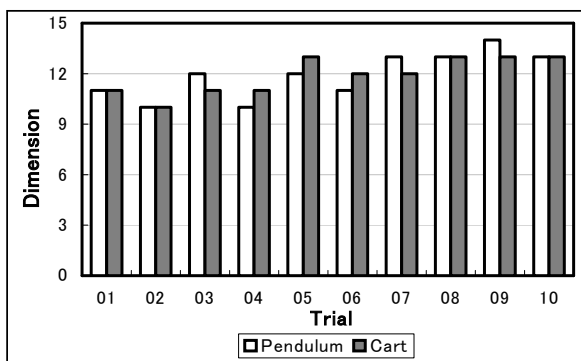


図 6 人間 NK における試行回数と推定次元数の変化

さの程度が低減することを示す。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、カオ斯的挙動であることがわかった。図 6 は、最大リアプノフ指数の算出値から推定した次元数（運動の自由度）である。試行を重ねると推定次元数が増す傾向があり、習熟度が増すと、運動の自由度の数が増えていく（腕系関節の自由度を多く使う）ことを示す。ファジィ推論やニューラルネットワークによるオペレータの巧みさの同定結果もほぼ同様の性質を示した^{32)~37)}。

多賀³¹⁾は、人間の歩行について、直立姿勢の獲得期、安定化制御の獲得期、習熟後期という段階を導入して、習熟が進むにつれて、始め凍結されていた自由度が独立に動くようになることで運動の安定化と複雑化が同時に起こると述べている。また、身体を介した脳神経系と環境との間の動的な相互作用の在り方に運動の創発の可能性があると論じている。

ギブソンは、従来の二分法、すなわち動物の運動を意志のある「随意運動」と無意志の「不随意運動（反射）」、あるいは「能動」と「受動」に分けて研究する方法に反対して、自己と外界、能動と受動が混合している「姿勢」という行為の単位を提案している²⁰⁾。ギブソンによると、行動は姿勢に依存しており、姿勢から分離できないものであり、立位のような平衡姿勢ですら、多数の微細な修正の動きからなっている。立つこと、あるいは姿勢は、環境への定位である。すなわち、立つことは止まることではなく、種々の情報を統合して探られる、倒れないための「不安定幅」の持続である。「環境への定位」である「姿勢」の止まらないという性質が、身体に動きをもたらす²⁰⁾。

ある運動障害患者の「靴下はき」の発達について、靴下が患者の身体に取り込まれていくこと、その全身の組み替えの柔軟さ、速度の変化に驚かされることを佐々木²¹⁾は報告している。患者はまず全身が靴下に定位する（つまり、「靴下をはく」）ための姿勢の種を探すのである。

従来の知能ロボットは、むしろロボット設計者が知的になるだけで、ロボット自身が知的（巧み）とは言いがたい。ロボットの知性（巧みさ）にも「心・技・体」という行動要素群が求めら

れるとすれば、生き物あるいは人間のように「体」、「技」、「心」の順序で積み上げるべきであろう。まず「体」が動くこと、次は「体」を動かしながら「技」を積み上げること、最後は「体」と「技」を持続しながら「心」を積み上げるのである。

知能ロボットの知性は、複雑系としての人間や生き物の動きの巧みさの発現のなかにあると言える。

4. 結 論

人間の行為における巧みさの発現、さらに人間の手による操作の巧みさの発現について考察し、行動そのものを概念の中心におく Brooks のSAロボットについて複雑系としての理解に混乱が見られること、知能ロボットの知性(巧みさ)は人間や生き物の動きの巧みさの発現のなかにあることを指摘した。SAロボットを開発の原点に据えて、SA的な開発スタイルで要素行動を積み上げていくことが知能ロボットを実現するための唯一可能な方法であることを主張した。SAによる簡単な要素行動を実装した移動ロボットの自律走行の創発については続報に考察する

なお、本研究の一部は埼玉工業大学ハイテク・リサーチ・センターの援助によって行われたことを付記する。

文 献

- 1) Brooks, R. A., A robust layered control system for a mobile robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 2, No. 1, 14-23(1986).
- 2) Gomi, T, Impact of Non-Cartesianism on Software Engineering, Evolutionary Robotics ER'98, AAI Books, Ontario, Canada, 1998, pp.487-519.
- 3) 五味隆志, 知的移動ロボット: 知能の新しい見方, ロボットの新たな役割, Evolutionary Robotics ER'98, AAI Books, Ontario, Canada, 1998, pp.427-454.
- 4) 井上博允, 知能ロボットに関する最近の研究動向: 重点領域研究「知能ロボット」とその周辺, 計測と制御, 35-4, (1996), 計測自動制御学会, pp.237-242.

- 5) 白井良明, 感覚と行動の統合による実環境の理解, 計測と制御, 35-4, (1996), 計測自動制御学会, pp.256-261.
- 6) 井上博允, 重点領域研究「知能ロボット」, 日本ロボット学会誌, 16-5, (1998), p.578-585.
- 7) 西田洋一郎・中川一・中内靖・森 泰親, 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, 63-606, (1997), pp.492-498.
- 8) 久野義徳, ビヘービアベーストロボットの行動, 日本ロボット学会誌, 11-8, (1993), pp.1178-1184.
- 9) 久保田直行・増田寛之・谷口和彦・小島史男・福田敏男, 移動ロボットの多目的行動調停のための学習, 日本機械学会論文集, 67-664, (2001), pp.3876-3882.
- 10) Brooks, R. A., Intelligence without representation, Artificial Intelligence, Vol.47, (1991), pp. 139- 159.
- 11) 吉福康郎 スポーツとロボティクス・キーノート講演: 格闘技における力とエネルギーの伝達, 第17回日本ロボット学会学術講演会, (1999年9月)
- 12) 山田佳毅, 「重圧」無縁・揺るがぬ自信, 朝日新聞, 2002年3月30日.
- 13) 石田雄太, イチロー&マリナーズ Ichiro: the desire for evolution, Sports Graphic Number, 23-8, (2002), pp.52- 57.
- 14) 由利英明, 定位置も飛躍への通過点, 朝日新聞(夕刊), 2002年5月27日.
- 15) リンバーク, M. 編, 金井哲夫訳, 勝利の秘訣, (1996), アスペクト出版.
- 16) 小浦猛志, 「テニスにおける科学と経験の接点ー日本女子テニス選手の活躍の秘密を探るー」, 日本機械学会創立100周年記念特別フォーラム「スポーツと科学」(1997), テニスの科学, 第6巻, (1998), pp.20-26.に村松憲の報告あり.
- 17) 武宮正樹, 「宇宙流」生き方のすすめー"ここ一番"は明日やって来る, 廣済堂出版
- 18) 朝日新聞夕刊, 2002年4月6日, 自然との対話呼び起こす建築: 安藤忠雄(建築家, 東大教授)
- 19) 加藤修, 朝日新聞, 2002年5月17日, ひ

と：江國香織さん。

- 20) 佐々木正人, 物と行為を一体に記述する試み：靴下はきの場合, 季刊「発達」, 22-87, (2001), ミネルヴァ書房, pp.2-8.
- 21) 佐々木正人, ナヴィゲーションと遮蔽, 佐々木正人・三嶋博之編「アフオーダンスと行為」, 金子書房, (2001), pp.85-130.
- 22) 養老孟司, 明日はあるか, 朝日新聞, 2002年1月8日.
- 23) 川副嘉彦：人間の手による制御とコンピュータ制御（倒立振子の制御実験）, 日本機械学会・第2回運動と振動の制御シンポジウム講論集, No.910-52, (1991), pp. 95-100.
- 24) 川副嘉彦, 台車上の倒立振子の制御における人間の制御特性に関する研究（第1報, コンピュータ制御における非線形挙動）, 日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集, (A), No.920-55（1992）, pp.1-6
- 25) Kawazoe Y (1992), Manual control and computer control of an inverted pendulum on a cart, Proc. of the First International Conf. on Motion and Vibration Control, pp.930 -935.
- 26) Kawazoe Y & Ju DY (1994), Nonlinear characteristics of human operator with the stabilizing control of an inverted pendulum on a cart, Proc. 2nd International Conf. on Motion and Vibration Control, pp.645- 650.
- 27) Kawazoe Y, Ohta T, Tanaka K , Measurement and analysis of chaotic behavior of human operator stabilizing an inverted pendulum on a cart, Proc. of ICMA2000-Human friendly mechatronics, pp.457-462. (2000)
- 28) 川副嘉彦, 空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究（第1報, 原因を探る諸実験）, 日本機械学会論文集 51-461, pp. 404- 409.(1985),
- 29) 川副嘉彦, 空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究（第3報, 低速ハンチングの計算機シミュレーション）, 日本機械学会論文集, 51-471, (1985) ,pp.2789-2795.
- 30) 川副嘉彦, 空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究（第9報, 非線形挙動の考察－その1）, 日本機械学会論文集, 56-523, (1990), pp.693-699.
- 31) 多賀厳太郎, 歩行の創発, 日本ロボット学会誌, 15- 5, (1997), pp. 680- 683.
- 32) Kawazoe Y (1999), Nonlinear characteristics of a human operator during stabilizing control of an inverted pendulum on a cart: Fuzzy identification from experimental time series data and Fuzzy control simulation, Motion and vibration control in Mechatronics, Edited by Seto K, Mizuno T & Watanebe T, pp.133-138.
- 33) Kawazoe, Y., Fuzzy identification of chaotic and complex behavior of human operator stabilizing an inverted pendulum on a cart., Proc. 6th Int. Symp. on Artificial Life & Robotics, (2001), pp.9-12.
- 34) Kawazoe, Y., Measurement of Chaotic Behavior of Human Operator stabilizing an Inverted Pendulum and Its Fuzzy Identification from Time Series Data, J.Robotics & Mechatronics, 13-1. (2001), pp.23-29.
- 35) 川副嘉彦・松本仁, ファジィ推論による人間オペレータの技量獲得（倒立振子の安定化制御におけるカオスの時系列データからの制御ルールの同定）, 第17回ファジィシステムシンポジウム論文集, 日本ファジィ学会, (2001.9). pp. 715-718.
- 36) 川副嘉彦・松本仁, ファジィ推論による時系列データからの人間オペレータの技量獲得（倒立振子の安定化制御における技量の個人差の同定）, 第11回インテリジェント・システム・シンポジウム, 計測自動制御学会, (2001), pp. 415-420.
- 37) 川副嘉彦・榎本弘一・松本仁・岡部澄夫・半田昌司, ニューラルネットワークによる人間オペレータの技量と巧みさの獲得（倒立振子の安定化制御におけるカオスの時系列データからのニューロ制御器の生成）, 第29回知能システムシンポジウム, 計測自動制御学会, (2002), pp.217-222.
- 38) Jones J L, Rug Warrior Pro™, Assembly Guide, AK Peters LTD (USA).