

知能ロボットの知性の創発 (第 2 報, S A を用いた行動型移動ロボットの自律走行の発現)

川副嘉彦

Emergence of the Intelligence of an Autonomous Robot : Autonomous Behavior of a Mobile Robot with Subsumption Architecture

Yoshihiko KAWAZOE

概要 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 Sense- Model- Plan- Act フレームワークに基づく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、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発現について考察し、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 (知性) の発現についての前報の考察も吟味して、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た。SA ロボットを研究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現実世界で本当に知的に動く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。

1. 緒 言

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 SMPA (Sense- Model- Plan- Act) フレームワークに基づく従来からの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¹⁾⁻³⁾。一方、Brooks¹⁾ の Subsumption Architecture (SA) を用いて行動そのものを概

念の中心におくビヘービア・ベースト (行動型) ロボットの提案は衝撃的であり、この複雑系としての知的ロボット (SA ロボット) は多くの注目を浴びた^{2),3)}。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⁴⁾⁻⁶⁾。しかし、巧みな (知的な) ロボットの実現という意味では、費やされた多くの時間と経費にもかかわらず、将来の見通しがよいとは言い難く、複雑系としての知的ロボットの理解には混乱が見られる⁷⁾⁻¹²⁾。

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の前報¹²⁾の考察も吟味して、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実験に基づいて実世界での行動の本質と発現について考察する。

2. 人間の巧みさの発現とロバストネス

一般にリミットサイクルは軌道安定だから外乱にロバストであり、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こと、また、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こと²⁴⁾⁻²⁷⁾、したがって、周期的不規則変動が見られる人間の操作は適応性や柔軟性をもつことを前報¹²⁾で触れた。

図1は、人間オペレータによる倒立棒の安定化制御(図2)における倒立棒傾き角の60秒間の時系列波形である¹³⁾⁻¹⁷⁾。手でレール上の台車を移動させて倒立棒が倒れないように制御する。練習を重ねて60s間の安定化制御にある程度習熟した4名の人間オペレータAT, ME, NK, OTの試行1回目の例である。実測波形(左)とファジィ制御によるシミュレーション波形(右)を示している¹⁸⁾⁻²³⁾。図3は人間オペレータNKの試行1回目(NK01)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。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、位相面上の軌道は毎回少しずつ変わり、左右非対称な動きが生成されるのが特徴である。

図4は、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)であることを示すコンピュータ制御実験結果である^{14),15)}。図4左は、台車上の倒立棒のPI制御において、比例ゲインP, 積分ゲインPIを変えた場合の倒立棒(振り)の傾き角とレール中央からの台車変位を示す。図4右は、衝撃により倒立棒に過渡的な外乱を与えた場合の応答波形である。線形理論による安定範囲(図4上の実線)にある場合A(安定限界に近いので絶えず小さく変動している)と線形理論では不安定な微小変動が

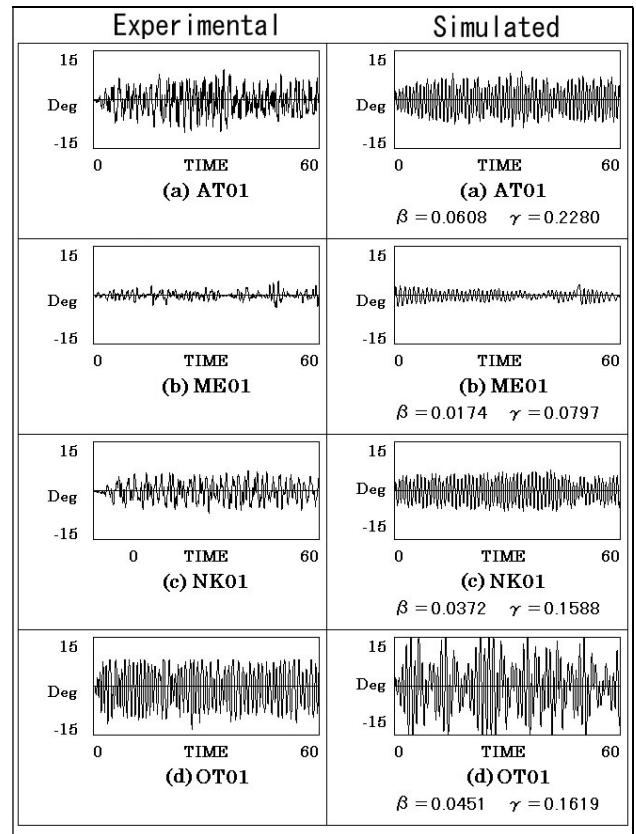


図1 人間オペレータによる倒立棒の安定化制御における倒立棒傾き角の時系列波形

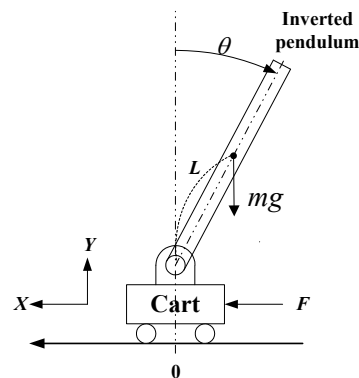


図2 台車上の倒立棒(制御対象)

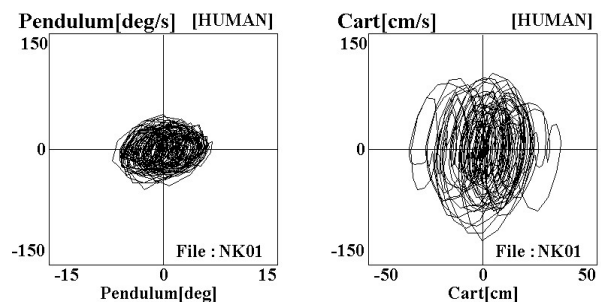


図3 位相面表示, 左: 倒立棒傾斜角度－角速度, 右: 台車変位－台車速度。

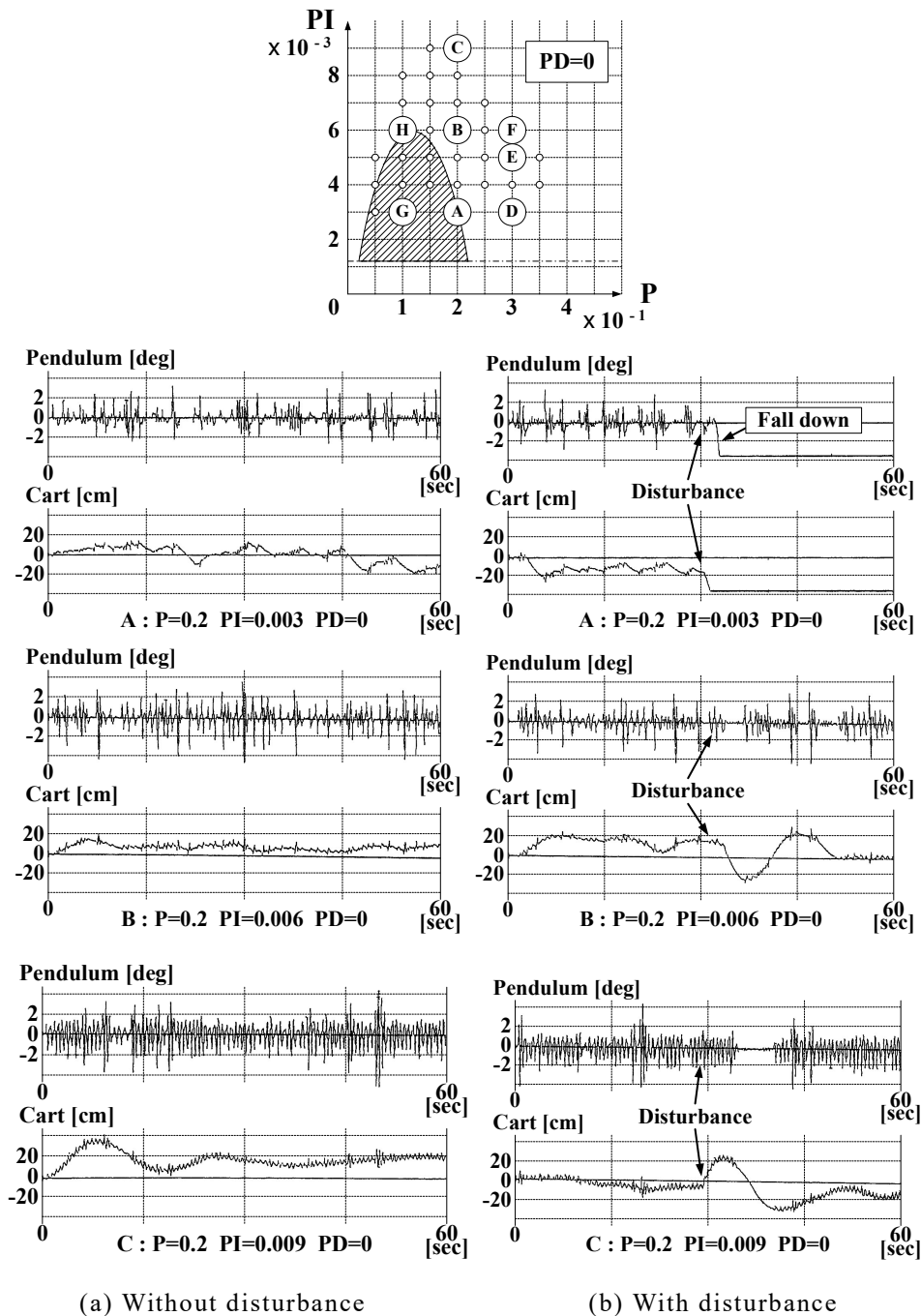


図4 リミットサイクル的不規則変動と過渡的外乱に対する応答 (コンピュータ制御)

周期的大振幅変動に発達する場合 B,C を示す。B,C では微小振動が不安定で発散しても、非線形特性により振幅は一定の変動幅に収まる。倒立棒が倒れない範囲では、変動振幅が大きいほど外乱に対してロバスト (頑健) である。

PID のパラメータを変えていくと、1 次のリミットサイクルから 2 次のリミットサイクルへのシフト、あるいは両者が同時に現れて不規則的な揺らぎを示す。

人間オペレータによる倒立棒の安定化制御における巧みさの発現は、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生まれる。倒立棒系の非線形ダイナミクスと人間系の非線形ダイナミクスとが相互に引き込みを起こし、系全体でリミットサイクル・アトラクターが生成されるのである。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。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。

図 5 (a) は、閉ループ・ディーゼルエンジン・調速機系のハンチング (自励振動, リミット・

サイクル) が生まれる経過を示す実測・時系列波形である²⁴⁾。低速より絞り弁を次第に開いて回転速度を上げていくと、エンジン回転速度 650 rpm 付近で長周期の変動が生まれ、制御用吸気圧力 P_d 、燃料噴射量調節ラック R_e 、エンジン回転速度 N_e 、吸気管ベンチュリ圧力 P_v とともに次第に変動が大きくなる。短周期波は各シリンダの作動に対応する変動である。図 5(b) は、各平衡回転速度における位相面表示である。横軸は回転速度、縦軸は噴射時期における燃料噴射量調節ラック変位 (トルクあるいは角加速度に対応) である。平衡回転速度 700~800 rpm において大振幅の変動が持続する。回転速度 1000 rpm になると長周期変動は消滅する。この自励振動は、平衡点不安定なディーゼル・エンジン系の非線形ダイナミクスと調速機系のダイナミクスとが相互に作用して、系全体でリミットサイクル・アトラクターが生成されたものである。

図 6 は、噴射量調節ラックのストップによりハンチングを抑えた状態からストップをはずしたときの実測・過渡挙動を示す²⁶⁾。ストップをはずすと約 2 Hz の大振幅のリミット・サイクルが再び現れる。リミット・サイクルが過渡的外乱に対してきわめてロバストであり、もとのリ

ミットサイクルに巻きつくことを示す。

図 7 は、平衡回転速度 800 rpm の場合についてリミットサイクルのロバスト性 (安定性, 定常性) をシミュレーションにより示したものである。図 7(a), (b) はリミットサイクルの内部点から出発した場合, (c), (d) はリミットサイクルの外側の任意の点から出発した場合であり, 内側からも外側からも安定であり, リミットサイクルの近傍を通る軌道が内外から巻きつくので, このリミット・サイクルはきわめて安定である²⁵⁾。

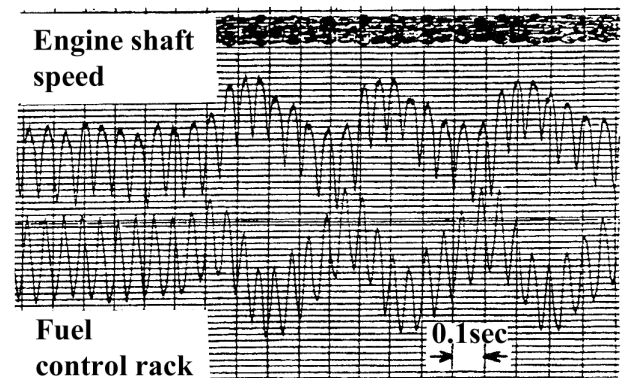
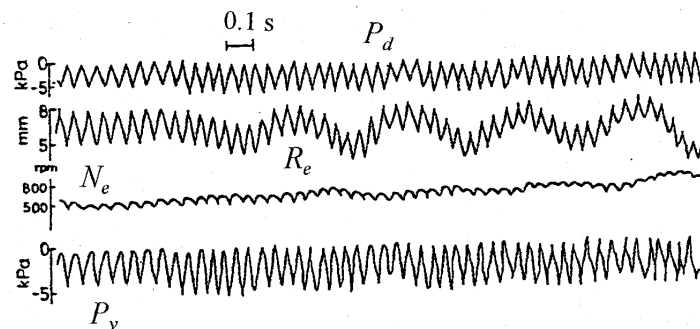
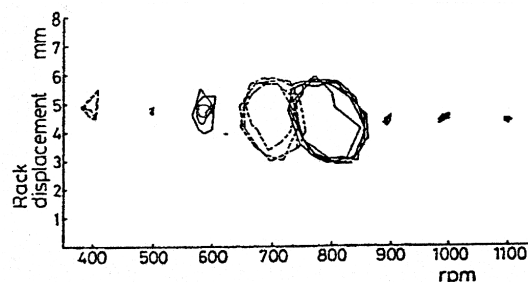


図 6 リミットサイクルのロバスト挙動



(a) 時系列波形 (低速より回転速度を上げていく)



(b) 各平衡点における位相面表示

図 5 ディーゼル・エンジンと調速機系の相互作用によるリミットサイクルの発現過程

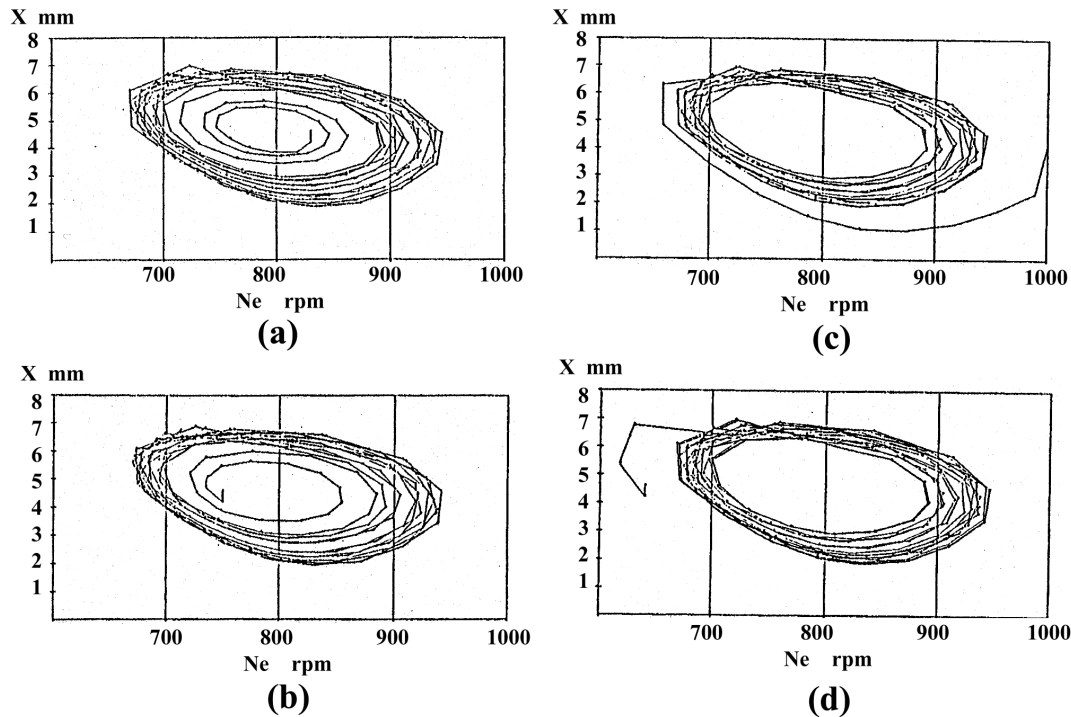


図7 平衡点におけるリミットサイクルのロバスト性 (シミュレーション)

3. SAを用いた行動型移動ロボットの巧みな自律走行の発現

3.1 SAロボットの概要

モデル・ベースト・ロボットと呼ばれる 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、図8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

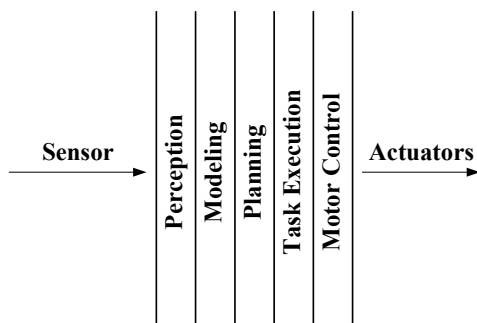


図8 従来のモデル・ベースト・ロボットの処理系の例¹⁾

かし、このような直列方式では、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。二つ目は開発方法が困難な点である。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⁾。

一方、MITのBrooks¹⁾が提案したサブサンプリング・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 (SAロボット) は、行動そのものを概念の中心に据えて図9の例のように要素行動 (エーゼント) ごとにモジュール化し、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

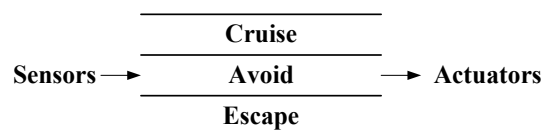


図9 SAロボットの処理系の例

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). SA ロボットは, 行動目的そのものも創発的という考え方である. 主張点は, ロバストネスの確保と開発過程の容易性である^{1),2),12)}.

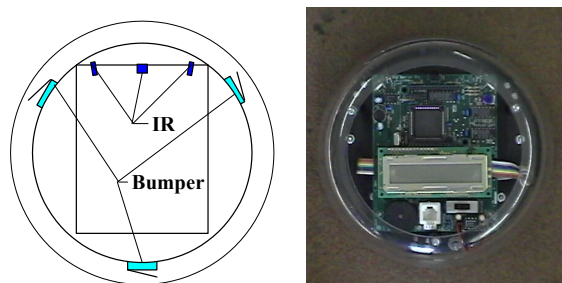
3.2 SA ロボットの実装

図 10 は実験で用いた移動ロボットの平面図である⁽²⁸⁾. 要素行動 Escape, Avoid, Cruise の 3 つを積み上げた場合のフローチャートが図 11 である. 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. 要素行動を積み上げていくにつれて, 行動が広がっていき, 知的レベルがあがる.

3.3 環境との相互作用による自律走行の発現

人間共存型ロボットが具備すべき要件は, (1) 人に危害を加えない, (2) 障害物に対応できる, (3) システムがフェイルしないことである⁷⁾. 静的・動的な障害物を回避し, 動的な環境に自律的に適応できるかという生き物としての最重要な行動が SA によりどのように発現するかをみてみよう.

図 12 は, 図 11 の 3 つの要素行動群 Escape・Avoid・Cruise を積み上げた SA ロボットの実験環境(1)における自律走行の発現を示す. 図 12(a)は走行軌道, (b)は実験風景, (c), (d), (e)は(a)の 1 部分を拡大した軌道である. 要素



(a) 簡略図 (b) 写真

図 10 移動ロボットの平面図

行動 Cruise は動き回り, Avoid と Escape は行き詰らないようにする.

Avoid の障害物回避行動にもかかわらず衝突が起こったときは, Escape が接触を検知して方向を変える.

Escape と Cruise だけでも行動できるが, 行き詰まりを起こすこともある. 要素行動 Avoid を積み上げたことにより, Escape と Cruise の 2 つだけでは行き詰まった場所でもスムーズに通過する.

要素行動を積み上げるにつれて SA ロボットが進化する. アルゴリズム無しのシンプルな構造であるにもかかわらず, 生き物の巧みな動きを思わせる.

センサの検知範囲の不安定さ, 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道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.

図 13 は, 障害物の位置が 1 つ移動した実験環境(2)における場合である. (a)は走行軌道, (b)は実験風景, (c), (d)は(a)の 1 部分を拡大した軌道である.

図 14 は, 障害物をさらに複雑に配置した実験環境(a)~(d)での例である. このように, 環境が大きく変化しても SA ロボットは何の変更も必要とせずうまく適応する.

図 15 は, 人間と共存する環境(a),(b),(c)での自律走行の発現を示す. (a) 両足の間を抜

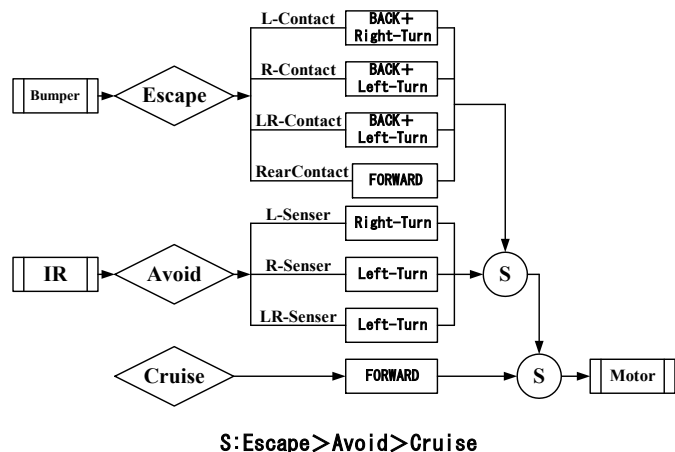


図 11 SA ロボットの行動フローチャート

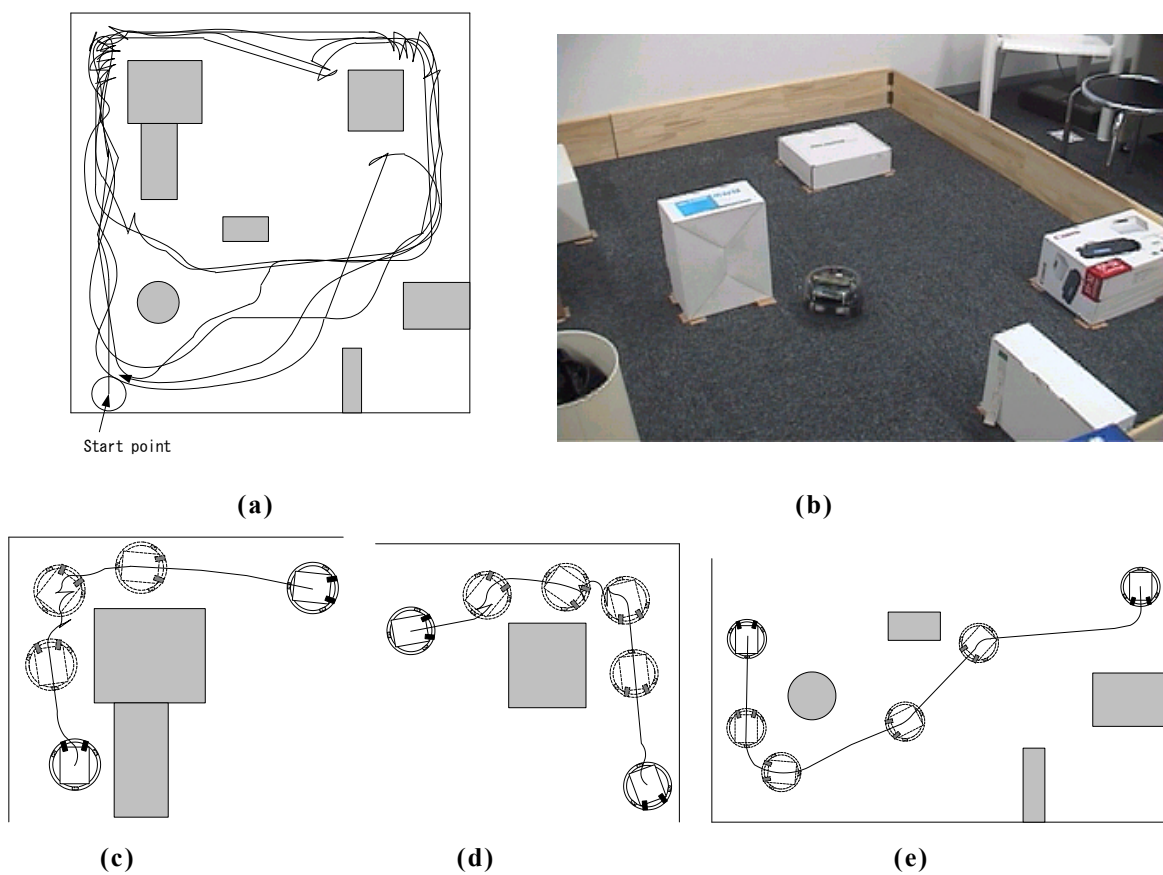


図 12 要素行動群 Escape・Avoid・Cruise での行動：実験環境(1)

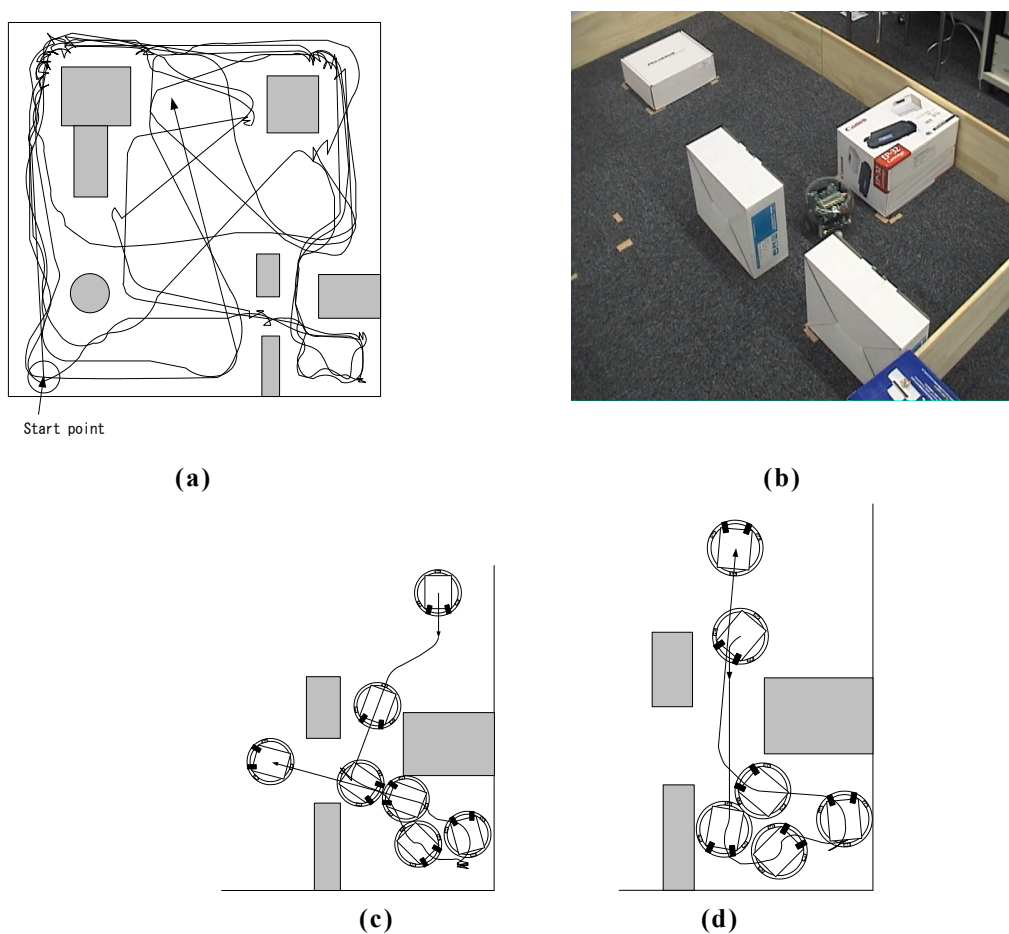


図 13 要素行動群 Escape・Avoid・Cruise での行動：実験環境(2)



図 14 実験風景 (さらに複雑な実験環境)

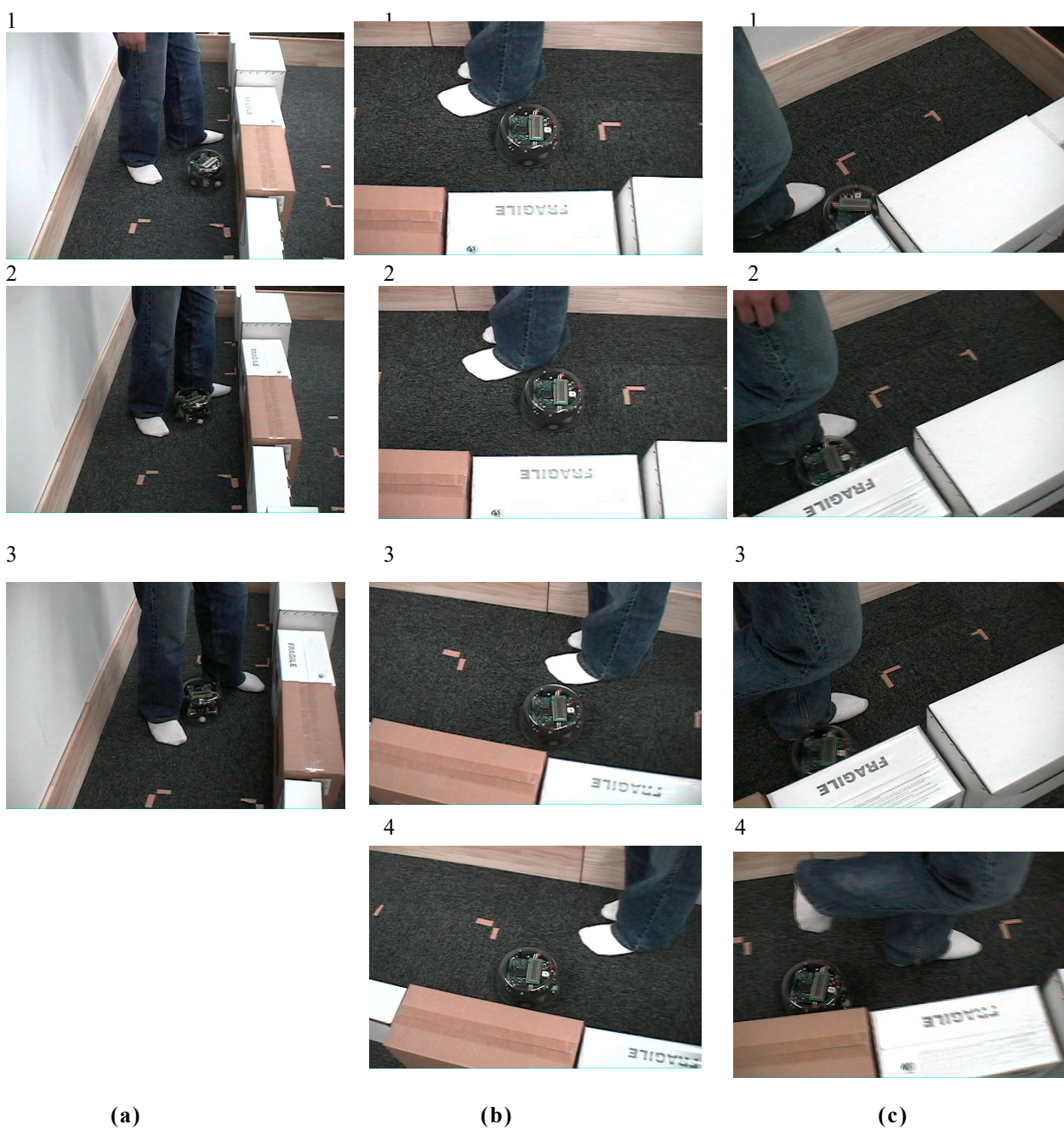


図 15 人間と共存する環境での自律走行の発現

ける, (b) 人間の傍らを通過する, (c) 人間が追い越していく状況であるが, うまく適応する.

3つの要素行動モジュールを積み上げただけの非常にシンプルなSAロボットが, 外部からの視点で観察すると, いとも簡単に高度な知的行動をしているように見える. 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. 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く, 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である.

以上の実験により, 次の点が確認できる.

- (1) 知的行動は要素行動群と外界との相互作用によって発現する.
- (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)も簡単である.
- (4) 従来のモデル・ベーストのように外界の完全なモデルの獲得が不要である.
- (5) 簡単な処理で実現でき, 外界に対してロバストなロボットが得られる.

知能ロボットの研究開発が大規模プロジェクトとして展開されるようになったが, 巧みな(知的な)ロボットの実現という意味では, 費やされる多くの時間と経費に対して, 将来の見通しがよいとはいえない. ゴキブリ程度の行動をするロボットさえ実現されていないのである. 複雑系としての知的ロボットの理解に混乱が見られることが大きな理由であろう. SAロボットを研究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現実世界で本当に知的に動く知能ロボットを実現するための唯一可能な方法であろう.

4. 結 論

サブサンクション・アーキテクチャ(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発現について考察し, 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の前報の考察も吟味して, 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た. SAロボットを研究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現実世界で本当に知的に動く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.

おわりに, 実験にご協力いただいたビジネスネット(株)原田洋氏に感謝し, 実験・作図にご助力いただいた埼玉工大・平成13年度卒研究生 橋本和馬・大澤渉の両君に厚くお礼申し上げる.

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), pp. 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) 川副嘉彦, 複雑系としての人間の巧みさと自律ロボットの知性の発現, 日本機械学会 2002年度年次大会講演論文集, No.02-1, (2002), pp.171-172.
- 12) 川副嘉彦, 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リング・アーキテクチャ), 埼玉工業大学紀要, 第10&11号, (2002), pp.9-19.
- 13) 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演集, No.910-52, (1991), pp. 95-100.
- 14) 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
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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)
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) 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),
- 25) 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.
- 26) 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, 非線形挙動の考察ーその1), 日本機械学会論文集, 56-523, (1990), pp.693-699.
- 27) 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.
- 28) Jones J L, Rug Warrior Pro™, Assembly Guide, AK Peters LTD (USA).