

知能ロボットの知性の創発 (学習の包摂構造化と巧みさの発達)

川副 嘉彦

Emergence of the Intelligence of an Autonomous Robot : Dexterity Development by Learning with Subsumption Architecture

Yoshihiko KAWAZOE

ABSTRACT

This study has investigated the approach to the emergence of the intelligence of an autonomous robot for breaking through the problems of the conventional intelligent robot with SMPA (Sense- Model- Plan- Act) framework in the real world. It is based on the development of human's dexterity or proficient skills with Subsumption Architecture (SA). It showed how to build up the behavior architecture by learning in the real world.

Key words: Robotics, Autonomous Robot, Emergence, Intelligence, Real World, Subsumption Architecture, Learning, Complex System, Dexterity, Development

1. はじめに

1.1 研究の背景

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よく動いたとしても、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と、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]-[10].

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]-[10].

日本ロボット学会設立20周年の総括では、ロボティクスの学問体系の未熟さが指摘されており、現在のロボット技術と江戸時代における”からくり”の技術はいまだに同類項で

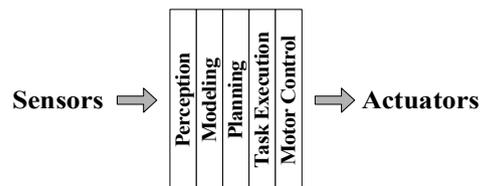


Fig.1 Conventional model-based robot with modules of functional elements.

あると梅谷[11] は云う。ロボティクスが先端科学技術になりうるかという議論もなされており、従来からロボットをすべて計算づくで動かせるという錯覚があり、ロボティクスの理論的研究は、ほとんど逆運動学や逆動力学の計算論的研究に終始し、感覚から行動に直結しているはずのフィードバックループは解明されていないと有本[12]は指摘している。有本によると、感覚から行動を直接結ぶ具体的に明白な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り、ロボティクスの目的が人間サイズの常識的世界の中で常識的に実行し得る能力を機械に与えることにあるならば、過去の20年間におけるロボティクスの研究は大した成果をあげたとは言い難く、日常物理学を覆うベールをはがすような地道な発明、発見が期待される。

ロボット工学が一般大衆に大きな誤解を植え付けてきたと広瀬[13]は指摘する。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[14]。さらに、経済産業省と新エネルギー産業技術総合開発機構により実施された大型プロジェクト「人間協調・共存型ロボットシステム研究開発 (HRP)」[15]の総括によると、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[16]、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[17]。このように、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なもの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。

1.2 知能ロボットの壁

「まだ世間（とくに大学）には解析幾何学を使ってひたすら軌道計算し、センサーベースだと自慢しているロボットが生存している。メカは貧弱、実社会では危なくて使えそうもないので実用指向とはいえないし、人間の知能の解明をしている訳でもなさそうで、不思議な研究である。これらが淘汰されないでいる訳は、世間（マスコミ）がちやほやしているからでしょう。」という星野[18]の鋭い指摘がある。

知能ロボットとしては、ホンダのASIMOとソニーのQRIOが良く知られている。

ホンダのASIMOは遠隔操縦であり、自律ではない。ASIMOの二足歩行は、①足の裏で踏ん張る、②転倒力を制御する、③理想的な位置に着地する、という三つの要素から成っており、あらかじめ組み込まれたプログラムを基に動き、決められたパターンの動作や反応しかできない。「将来、人に合わせて自在に活動する協調作業を行ったり、障害物を自ら回避することができるようにしたい」という。

ソニーのQRIOの特徴は、産業用ロボットや実装技術の集大成であり、絶妙なバランス制御で成り立っている高度な機械である。しかし、スペックをひとつ変えるだけで、全体のバランスは簡単に崩れてしまう。状況の変化に柔軟に対応できる知的ロボットの開発をめざして、「インテリジェント・ダイナミクス」という新しい学問領域の立上げを意図した知能ロボットに関するソニー主催のシンポジウムが2004年4月に開催され、次世代ロボットの研究所をソニーが設立するという[19]。

2004年3月、米国・モハーベ砂漠を約240キロにわたって横切るコースに挑んだ15台の自律走行車は、技術的な不具合や有刺鉄線のフェンス、地面のでこぼこなどに打ち負かされ、車両のほとんどは、2キロも行かないうちに動けなくなったり、横転したり、コースをはずれてしまったりした。スタートの数秒後に壊れたものもあった。スタート地点から最長でも十数キロメートルまでのあいだに、全車リタイアした[20]。自律走行車の壁である。

1.3 本研究の目的

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イクスルーすることをめざして、前報までに[5]-[9]、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を死を意味した時代の上泉新陰流兵法を包摂構造（サブサンプルション・アーキテクチャ、SA）の観点から吟味し、包摂構造をもつ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実験環境における移動ロボットの行動の発現を通して考察してきた。

従来から、SAをもつビヘービア・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」、あるいは「学習ができない」などという批判が必ず出てくる[6].「学習は死んだ」とBrooks は言ったが[21],これは従来のロボティクスや制御での学習の意味であり、従来の意味での学習を取り込んでも好ましい結果は得られない. また、たとえば、「刺激・反応系で記述された行動は、行動間で独立であり障害物を回避しながら目的地の方向へ移動するというような融合的な行動出力ができない[22][23]」というように狭い意味に誤解されやすい. 多目的行動調停のための学習によるアプローチをSAと比較してあるが[22], 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できないであろう[6]. 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[5]-[10].

本報では, 巧みさの発達に見える包摂構造と刻々変化する未知の実環境(外界)における学習について考察し, 移動ロボットが危険に満ちた未知の実環境(外界)において学習を包摂構造化して要素行動として積み上げていく行動アーキテクチャを実装し, 知能ロボットの開発スタイルを提案する.

2. 巧みさに見える包摂構造と学習の包摂構造化

2.1 動物の運動と試行錯誤

養老[24]によると, 多くの運動は「無意識」である. 日常慣れた動作でも, 意識したとたんにギコチなくなる. 原始的な運動系は, おそらく反射系だけで成立しており, 知覚入力 that だちに運動出力に結合する. 昆虫のように, ごく小さな脳しか持たない動物でも, かなり複雑な行動を行う. 試行錯誤は運動系の大切な性質の一つであり, ネズミが餌のありかを覚えるいちばん確実なやりかたは, 試行錯誤である. したがって, 運動ないし行動には, 始めから「間違い」が許されている. 運

動系は「やってみなけりゃ, わからない」のである.

2.2 トンカツ屋のおやじに見える包摂構造

前田[25]は, トンカツ屋のおやじについて以下のように記述している(著者要約).

”ほとんど口をきかず, 毎日にこにこと店でトンカツばかり揚げているようなおやじがいて, このおやじのトンカツが飛びきり美味いとしたら, この人ほどものを考えている人間は少ないかもしれない.

トンカツ屋のおやじは, 豚肉の性質について, 油の温度について, パン粉の付き具合について随分考えているに違いない. この人のトンカツが, こうまで美味しいからには, その考えは常人のおよばない驚くべき地点に達している可能性が大いにある. このことを怖れよ, この怖れこそ, 大事なものである. こうした怖れを知らぬ者の考え出すことが, やがて人間を滅ぼすだろう.

トンカツ屋のおやじは黙ってトンカツを揚げている. 彼は学問を軽んじているのでも, 理想を軽蔑しているのでもない. ただ, 彼は自分の仕事が出会ういろいろなものの抵抗で, それらの抵抗を克服する工夫で, いつも心をいっぱい満たしているから, 余計なことを考える暇も必要もないのである. こういう男のトンカツが, いつのまにか万人の舌を説得している. このことにこそ人間の大事がある.

怖れることができるには, 自分より桁外れに大きなものを察知する知恵がいる. ところが, この桁外れに大きなものは, 桁が外れているが故に, 寝そべっている人間の眼には見えにくい. 見習い坊主もまた, パン粉を付けてみるしかない. それは, 初めちっとも面白い仕事ではないだろう. 怖れる知恵がまだ育っていない者に, 心底面白い仕事などあるわけがない. だが, 知恵は育つのだ. 豚肉やパン粉があり, 怖いおやじがいる限りは.”

2.3 宮大工・棟梁の学習と知性

法隆寺の解体・修理の棟梁だった宮大工・西岡[26]によると, 法隆寺は千三百年前の建築時においてすでに樹齢千年から千三百年を経っていたのだそうである. 樹齢千年の木で建てた堂塔は千年もつという大工の言い伝えはほんとうだったと言う. この棟梁は, 千年以上

にわたって檜の育つのを見てきたように話す[25] (著者要約)。

”ヒノキ林は地面までほとんど日が届かないから、木から実が落ちてすぐには芽が出せない。何百年も種は我慢しているのである。林が切り開かれるか、周りの木が倒れるかしてスキ間ができるか、今年も去年の種も百年前のものも、いっせいに芽を出す。木は日に当たって大きくなるのだから、早く大きくなると、となりの木の日陰になってしまう。日陰になったらおしまいだから、何百年もの間の種が競争する。それが勝ち抜くものだから生き残った木は強い。大きくなると、少し離れた木が競争相手になるし、風や雪や雨から逃げるわけにはいかない。じつとがまんして、がまん強いのが勝ち残る。千年たった木は千年以上の競争に勝ち抜いた木である。法隆寺や薬師寺の千三百年以上前の木は、そんな競争を勝ち抜いてきた木なのである。このような樹木の性質を飛鳥時代の工人たちが知り抜いていたことにこの棟梁は感嘆する。

この棟梁が行ってきた「物の学習」は、地質学、生物学、工学、歴史学のすべてを超え、それらのすべてに開かれている。

いつもおなじ方向から風が吹く所にある樹木は、その風に振られまいとして伸びる。振られまいとして生まれる樹木の成長力が、その樹木の「クセ」になる。棟梁は木のクセのことを木の心と言う。木のクセが見分けられなければ仕事はあからさまに失敗する。木のクセとおなじだけ多様な大工のクセが、木のクセを組む。

「木の心」は、言うまでもなく、のみ・かんな・釘・のこぎりの接触によって知る。木に「物の心」があるように、のみ・かんな・釘・のこぎりにも鉄としての「物の心」がある。「人」の手が「鉄」を通して「木」に触れる、その接触の中にすべてが現れてくる。現れなければ、大工とは言えない。木の学習は鉄の学習を通してだけなされる。これに気付かない大工は、一生何にも気付かない素人だと棟梁は言う。

物の学習をどこまでも深くする棟梁の知性は、図面を引いてもっぱら記号の学習を極める設計者の知性とはまったく異なるのである。”

2.4 絵画の巨匠と包摂構造

前田[25]によると、セザンヌは「自然を、円筒・球・円錐で処理せよ」、浮世絵師・北斎は「ほとんどの絵は、円と四角に分解できる」と言ったそうである。セザンヌの「赤い岩」は、美術館で「ある位置まで遠ざかった時、色の散らばりの中から、樹や岩や葉が絡み合い、半ば浸透し合うようにしてキャンバスから滲み出してくる」。マチスは、セザンヌの「3人の水浴の女たち」を購入後、37年間手元に置いて眺め続けた。ピカソは、セザンヌの「5人の水浴の女たち」を購入後、水浴する人たちの連作を始めた(以上は著者要約)。「自然=在るもの」は、知覚(perception)や知性(intelligence)といった頭脳的なものや幾何学的なものによっては把握できないのであり、感覚(sensation)を研ぎすまさないことができない。カオス・複雑系の世界である。

2.5 ベッポじいさんに見える包摂構造

エンデの「モモ」[28]に登場する道路掃除夫ベッポじいさんにも包摂構造が見える(著者要約)。

”孤児院から逃げ出してきた女の子「モモ」の二人の親友はベッポじいさんと若者ジジである。道路掃除夫ベッポじいさんの仕事ぶりは、「一足(ひとあし)ーひと呼吸(いき)ー一掃き(ひとはき)」「ひとあしーひと呼吸ーひとはき」。時々ちょっと足を止めて、前の方をぼんやり眺めながら、物思いにふける。それから、また進むー「ひとあしーひと呼吸ーひとはき」ー。「ひょっと気がついたときには、一步一步すすんできた道路が全部終わると。どうやってやりとげたかは、自分でもわからん。これが大事なんだ”。モグラの穴掘り[8][9]に似ている。

”若者ジジの空想力も、モモが傍で聞いてくれると、まるで春の野のように花開く。空想力が翼を得て空高く舞うのである。空想力が自分をどこに連れていくのか、自分でもわからないほどである。しかし、モモがいないと、ベッポじいさんの知恵も若者ジジの空想力もみじめなものになってしまう。モモに聴いてもらっていると、ばかな人にも急にもな考えが浮かんでくるらしい”。

2.6 ダンサー・山田うんに見える包摂構造

ダンサー・振付家として活躍する山田うんは、次のよう語る[29]. 「ダンスは日常のささいな断片を切り取ったり、再生したり、リピートしたりしているうち生まれる偶然の積み重ねのようなもの」、「動きやリズムが生まれた瞬間がダンスだ」

2.7 シンクロ・井村コーチの見る実環境

「五輪は何回行っても、新しい. 前の大会はちっとも参考にならへん、時代が変わり、世界が動き、価値観が変化する. 人の心の反応も変わるから、いつでも五輪はニューワン、オンリーワンの大会になる」とシンクロ・井村コーチはいう[30]. 従来のロボティクスや制御でいうところの学習は実環境では通用しないのである. 学習が弊害になることさえある.

2.8 イチロー選手の巧みさの発達と

学習の包摂構造化

前報[5][8]に述べたように、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」のリハビリは、まず(a) 転倒しないことを徹底して練習する、次に(a)を持続しながら、(b) 足と手が接触する位置に脚をもってくる練習、(a)(b)を持続しながら(全身の変形を持続したまま)、(c) 足先位置で手先の操作をする、という3種を目標として練習する.(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.

野球の達人・イチロー選手(写真1)の巧みさの発達は上記のリハビリに似ている.(a) 日本における1994年の大記録210安打(ボールにバットを当てる技術)の翌年、さらに(b)本塁打と打点を飛躍的に伸ばした(遠くへ飛ばす技術). (c)大リーグ2年目の開幕戦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. 彼がオープン戦で絶好球をあっさり



Photo.1 Ichiro (Seattle Mariners, October 2001)

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[5][6][9].

4年目を迎えた開幕1週間前に、「練習でできることは、もう終わっている. これから1週間練習しても同じ. あとはゲーム(感覚)」、「毎年、重圧があるようにしたい. プレシャーのないシーズンにはしたくない」 「(目標に) 真新しいものはない. 進化という言葉は好きではないが、そういう方向ではありたい」[10][31].

公式戦で遭遇した課題をキャンプで学習して包摂構造化して要素行動として積み上げているように見える. 「やるべきことを一つ一つ積み上げていくのです. 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」ということになる[9][10].

さらにイチロー選手の巧みさは発達する. 3度目の20試合連続安打(球団初)、左腕との対戦打率が3割8分3厘、常識を覆すようなデータについて: 「どうしてか僕はよくわからない(首をかしげる)」, 「それぞれの特徴はピッチャーによって違うもの. そこは(情報として) 頭に入っている」[32].

一試合5安打(大リーグで自身初)に対して: 「結果は特別. でも、そこ(打撃の状態)で感じているものは特別ではない」. 「絶好調の定義にもよるが、すごくいい状態がどういうものかよく分からない」. 「ボールが止まって見えるのでは」の問いに対して: 「止まっていないものが止まって見えるのは明らかに特別でしょう. 僕には、(ボールが) 常に、それもやたらと動いて見えるよ」[33].

新人から4年間での大リーグ最多安打記録(75年前)を破る841安打を打って: 「(周りに) 驚かされているならまだまだ. 驚かれないようになりたい」[34].

頭部死球(あと数センチで致命傷だった)後の4季連続200安打: 「打席で怖いと思ったことはない. それはこれからもないでしょう」. 8月は56安打(月間最多安打, 68年ぶり)に対して: 「言うことがなくなってきましたね. どうですか」[36].

今期3度目の1試合5安打: 第1, 2打席と内角球を流し打たれた左腕ピッチャーは、外角を意識した配球に切り替えた. しかし、

3打席目は粘られた末の10球目を右前打された。直球，スライダー，チェンジアップにカーブと豊富な球種をことごとくファールされ，最後は意表をついて横手から投じた内角スローカーブを運ばれた。相手捕手は「もう投げる球がない。君に投げる球などないよ」[37].

3. 学習の包摂構造化による知能ロボットの巧みさの発達

3.1 包摂構造を用いた行動型ロボット

Brooksらが提唱したサブサンクション・アーキテクチャ(SA, 包摂構造)を用いたビヘービア・ベスト(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見方である[1]-[10]. 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．

3.2 未知の実環境における自律移動ロボットの障害物回避挙動と目的行動

前報までに[5][7]-[9]，衝突検知センサー(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, 近赤外線センサー(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自律走行型ロボット(図2)の巧みな動きの発現とロバスト性について考察した．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．要素行動Cruiseは動き回り，

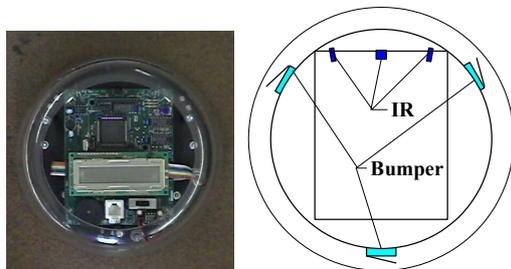


Fig.2 Mobile Robot 2001

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．

さらにIR(近赤外線)の代わりにIRと距離測定機能を持つ位置検出素子PSD (Position Sensitive Detector)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を積み上げた(図3)．障害物を回避しながらの目的行動として色探索行動を追加して自律走行実験を行った．図4は行動アーキテクチャを示す．色探索(目的行動)という機能拡張(知的レベルの向上)が要素行動を積み上げるだけで容易に実現できた．障害物回避のためのセンサーをIRからPSDに変えた結果は，処理時間が増したにもかかわらず障害物回避能力が向上した．色探索のための色識別は処理時間がかかるので，要素行動として追加するとロボットの動作が鈍くなることが考えられるが，SA理論による自律走行は十分巧みな動きを示した．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

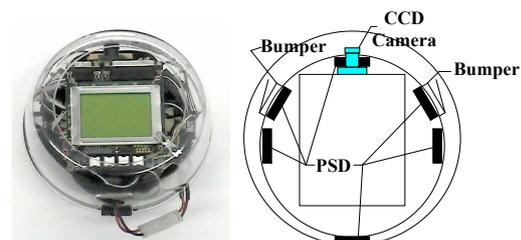


Fig.3 Mobile Robot 2002

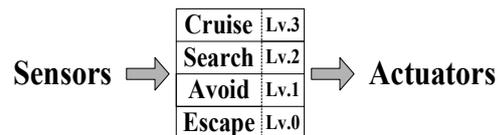


Fig.4 Subsumption architecture model with parallel modules of agents.

状態になるのに比べてはるかに知的である。

3.3 変化に富んだ未知の実環境における障害物回避と目的行動

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。

坂になった二つの出入口と狭い通路を実験環境に追加して、図5のように新しい実験環境とし、この変化に富んだ新しい未知の実験環境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た。

図6は、ロボット（要素行動Escape・Avoid・Search・Cruise）が未知の実験環境（図5）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）では複雑な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。図7はその軌跡を示す。

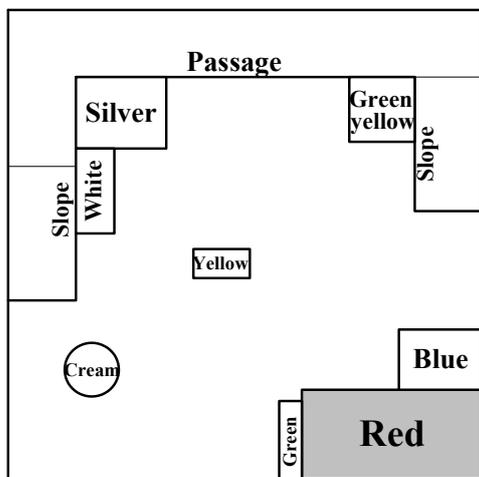


Fig.5 New unknown environment with ascend & descend at narrow passage.

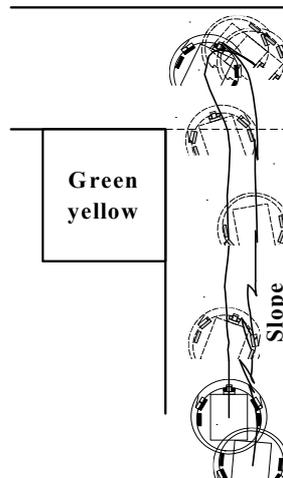


Fig.7 Trajectory of mobile robot with the agents of Escape・Avoid・Search・Cruise turns back when he encounters the unknown environment with ascend & descend at narrow passage.

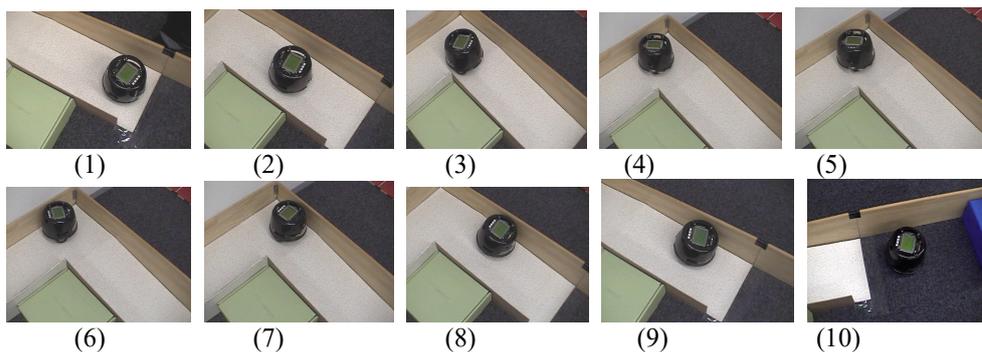


Fig.6 Mobile robot with the agents of Escape・Avoid・Search・Cruise turns back when he encounters the unknown environment with ascend & descend at narrow passage.

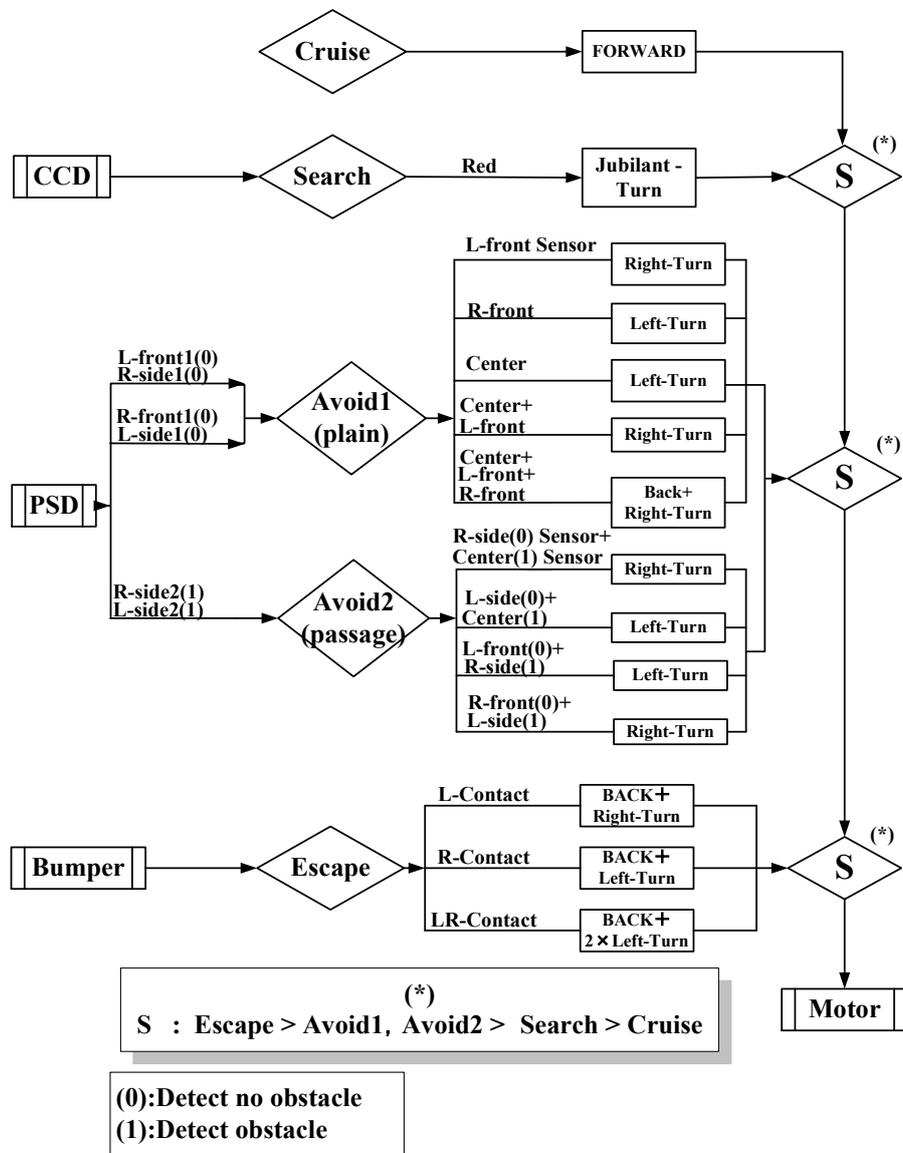


Fig.8 Subsumption architecture with Escape, Avoid1, Avoid2, Search and Cruise.

Table 1 PSD settings learned for distinguish between plain and narrow passage

L-front1(0)	over 50cm	Avoid1: Detect no obstacle
R-front1(0)	over 50cm	Avoid1: Detect no obstacle
L-side1(0)	over 25cm	Avoid1: Detect no obstacle
R-side1(0)	over 25cm	Avoid1: Detect no obstacle
L-side2(1)	within 12cm	Avoid2: Detect obstacle
R-side2(1)	within 12cm	Avoid2: Detect obstacle

3.4 未知の実環境における学習の

包摂構造化による巧みさの発達

坂になった二つの出入口と狭い通路のある変化に富んだ新しい未知の実験環境において障害物を回避しながらの色探索を試みた結果は、図6、図7に示したように、ロボットは坂を上って狭い通路の角まで行って引き返してしまった。

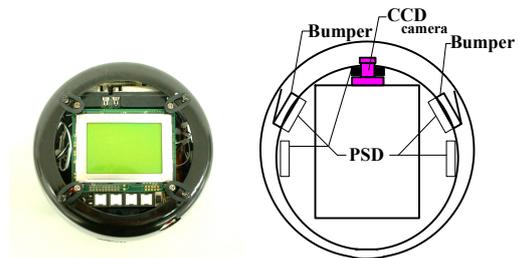
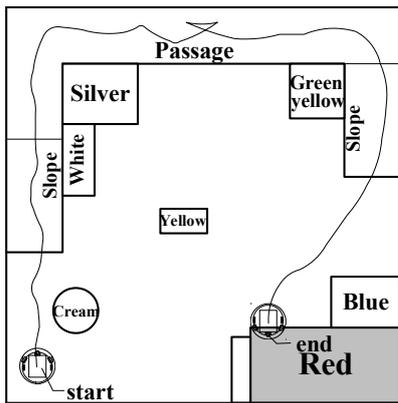
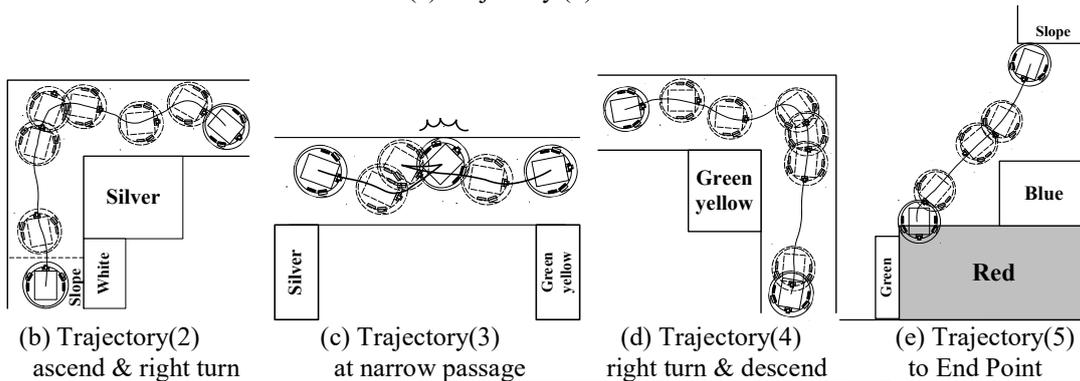


Fig.9 Mobile Robot 2003



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

(a) Trajectory (1)

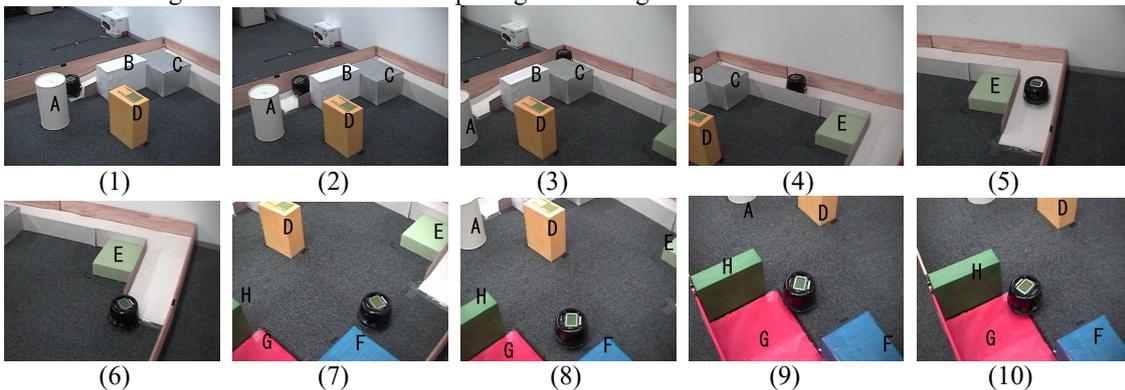


(b) Trajectory(2)
ascend & right turn

(c) Trajectory(3)
at narrow passage

(d) Trajectory(4)
right turn & descend

(e) Trajectory(5)
to End Point



(f) Video photos

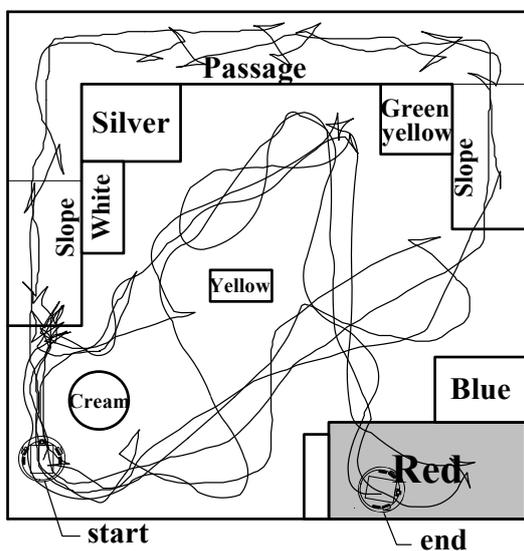
Fig.10 Autonomous behaviors of a mobile robot with subsumption architecture by learning in a new unknown environment. Mobile robot searched for Red color with CCD camera while avoiding obstacles and arrived at the goal (agents: Escape·Avoid1·Avoid2·Search·Cruise).

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考察した。新しい要素行動は、新しい未知の実環境との遭遇、すなわち環境との相互作用により生まれるという発想に基づき、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を Avoid2として、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ことにした。ロボットがどこにいるかという「場」をセンサーにより識別し、「場」に応じた障害物の回避の仕方をするようになる。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。

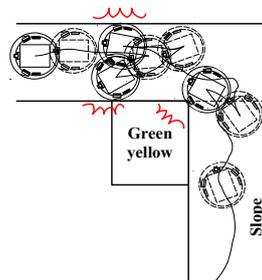
図8は、ロボットの行動アーキテクチャを示す。表1は、平地と狭い通路の識別のための距離センサーPSDの働きを示し、L-front, R-front は左右45度の2つのPSD, L-side,

R-side は左右90度の2つのPSDを意味する。図9は図8のアーキテクチャを実装した自律走行型ロボットである。

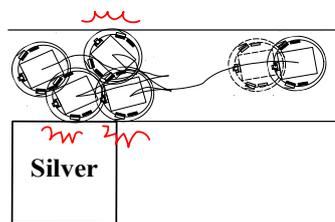
図10は、図9のロボットが狭い通路と坂のある実験環境において障害物を回避しながら赤色を探してまわるという目的行動の発現を示す。図10(a)は、坂になった出入り口と狭い通路を通してスムーズに目的地に到達したときの軌跡であり、図10(b)~図10(e)は狭い通路での走行軌跡の拡大である。図10(f)は、図10(a)での目的地 (End Point) までの動きの画像である。同じ条件下でも、図11のように、複雑な道り方で目的地に到達する場合もある。目的地の赤色を識別しても衝突回避・障害物回避が優先されると目的地になかなか到達しない。メカニズムの誤差や走路の摩擦変化などのパラメータ変動の影響を受けて軌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[5]-[10].



(a) Trajectory (6)



(b) Trajectory (7): left turn



(c) Trajectory (8): at narrow passage

Fig.11 Autonomous behaviors of a mobile robot with complex trajectories.

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学習により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。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における武器として加えるという戦術と同じ発想である。

オールスターで活躍して、「特別な目的は持たないが、こういう場所に来れば見えてくるものがある」というイチロー選手の「場」の哲学である[8][9].

3.5 人間を動的障害物と認識して衝突回避しながらの目的行動

図12は、実験環境において動く人間の足を動的障害物として回避行動をしながら赤色探索をする走行ロボットの挙動を示す。図13は人間の手の動きを認識する障害物回避行動である。図14は実験環境の外界(実環境)において寝転がっている人間の動きを認識して回避行動をするロボットの挙動を示す。ロボットは周囲の環境をモデル化しないでも柔軟な動きを示す。

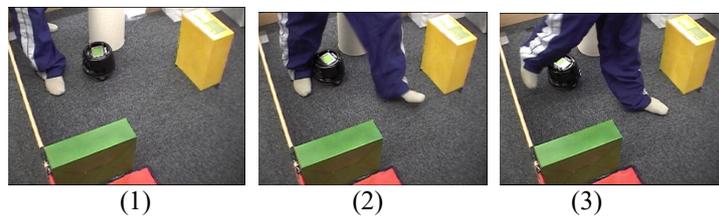


Fig.12 Behaviors of avoiding moving human legs as obstacles.

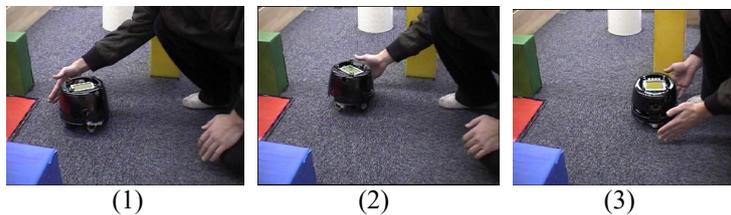


Fig.13 Behaviors of avoiding moving human hands as obstacles.



Fig.14 Behaviors of avoiding a moving human body lying down outside experimental environment.

4. 知は現場にあり(未知の環境で働く機械の開発のあり方)

2004年10月4日開催の第6回EA(工学アカ

デミー) 国際シンポジウム「ロボットとの共生」の開催趣旨[38]によると, ”ロボット工学の発展により, ロボットの活躍の場は製造現場からオフィス, 一般家庭, 医療および

災害現場などに広がりつつある。その結果、我々人間は社会生活において、ロボットを仕事仲間、友人、助っ人、さらには遊び相手として受け入れざるを得なくなってきた。日本人はもともとロボットとの共生に抵抗はない。しかし、いわゆる人型ロボットを目の当たりにし、将来ロボットと人間が共生することに対していくばくかの不安も依然として感じている。このシンポジウムでは、ロボット工学の近年の進歩を概観し、社会への影響と意義についてさまざまな側面から議論することによってロボット産業の未来を展望したい”。しかし、著者には、現状を見てもロボットとの共生はなかなか見えてこない。

養老[24]によると（著者要約），“システムとは「意識」によってつくられた世界である。（現代は）すべてを「システム」化、すなわち「自動化」しようとする。「自動化」をすすめているのは「意識」である。「意識化」できないこと、つまり、「理由」がわからないことが発生するのは不祥事になる。人間のつくった世界では、何事も「理由」がある。

しかし、ヒトも身体も「自然」である。「自然」のすべてを「意識化」することはできない。「自然」に「理由（意識）」はない。

したがって、「自然」は、技術者が最も苦手な対象になる。技術者が設計したロボットは、「自然」によって妨害されることになる。現状の知能ロボットは技術者が作ったプログラム通りに制御されるものであり、ロボット自身が賢くないのはこの理由による。

ロケットや衛星（宇宙開発）の度重なる打ち上げ失敗など、人間・環境・地球・宇宙の時代に見える大きな壁も同様だろう。未知の世界（宇宙や海底）や生き物の世界（自然）で動く機械（たとえばロケットの打ち上げ、火星探査ロボット、人間共存型ロボットなど）には生き物のような適応性・柔軟性が必要である。大量生産時代の手法は通用しない。

動物園の浅いプールで飼っていたアザラシを深いところに入れると溺れてしまうらしい。イヌ、ネコは練習しなくても犬掻きで泳げる。様々な状況のもとに自在に泳ぎ回る必要のあるアザラシにとっては、犬かきでは生きていけない。アザラシの泳ぎは本能にインプットされているものではない[39]。

時速100キロで走るチータの走りも同じである。母親が24時間保育で1年近い特訓が必要らしい。母親の特訓無しではチータは生きていけないのである。

オオカミに育てられた人間の子は、手足4本で走るという話もある。歩行だけでなく、人間は生活技術の本能がほとんどない[39]。直立二足歩行ができないと、手で道具を使うこともパソコンを操作することもできない。赤ちゃんの二足歩行の特訓にも命がかかっていることになる。

赤ちゃんロボットには「意識」よりも「無意識」の行動が先決問題だろう。青信号で横断歩道を歩いている、ヨチヨチ歩きでは、途中で赤信号になってしまう。知能ロボットの開発スタイルも体・技・心の順序が自然である[5]-[10]。

ロボットにとって人間社会は未知の環境（自然）である。自然を知らない技術者が設計した回転ドアはいつでも事故が起こりうる。車椅子ロボットの設計は技術者だけではできないはずがない。自分にとって望ましい車椅子はそれぞれの身障者しかわからないからである。コンピュータだけで自律・車椅子ができると思うのは設計者の思いあがりということになる。いつ何が起こるか分からないのが実環境である。

5. 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。ロボットは設計者のプログラム通りに動くだけで、ロボット自身が知的（巧み）であるとは言い難い。

本報では、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、ヒトの巧みさと巧みさの発達を包摂構造の観点から吟味し、危険に満ちた未知の実環境ではモデル化や従来のリアルタイムでの学習の概念が非現実的であり、実環境（現場）で遭遇した課題をオフラインで**試行錯誤により**学習（練習）し、その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の現実的

な開発スタイルを提案した。刻々変化する未知の実環境において柔軟・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、目的を達成することができないのは自明である。ロボット自身が学習により要素行動を積み上げていくのが未来の方向であるが、現状では、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。しかし、「知は現場にあり」が鉄則であろう。

おわりに、ご協力いただいたミズノ(株)佐藤文宣・小西善和の両氏、ビジネスネット(株)原田洋氏に深謝し、実験・作図にご助力いただいた埼玉工大・平成15年度卒研究生石井達也・石坂大悟の両君に厚くお礼申し上げます。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] Brooks, R. A., Intelligence without representation, Artificial Intelligence, Vol.47, (1991), pp. 139- 159.
- [3] Gomi, T, Impact of Non-Cartesianism on Software Engineering, Evolutionary Robotics ER'98, AAI Books, Ontario, Canada, 1998, pp.487-519.
- [4] 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.
- [5] 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, pp.171-172, (2002).
- [6] 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11&12号, pp.9-19,(2002)
- [7] 川副嘉彦, 知能ロボットの知性の創発(第2報, SAを用いた行動型移動ロボットの自律走行の発現), 埼玉工業大学紀要, 第11&12号, pp.21-31,(2002)
- [8] 川副嘉彦, 人間の巧みさの発現と包摂構

造(スポーツにおける巧みさへのアプローチ), 日本機械学会・機械力学・計測制御部門講演会 D&D Conference 2003, CD-ROM集, pp.1-6, (2003).

[9] 川副嘉彦, 知能ロボットの知性の創発(生き物・人間の巧みさと包摂構造からのアプローチ), 埼玉工業大学紀要, 第13号, pp.13-23, (2004)

[10] 川副嘉彦, 学習の包摂構造化による知能ロボットの知性の創発と人間の巧みさの発現, 日本機械学会2004年度年次大会講演論文集, pp.169-170, (2004).

[11] 梅谷陽二, RSJ-黎明期から今日まで, 日本ロボット学会誌, 20-6, (2002), pp.566-567.

[12] 有本卓, ロボティクスは先端科学技術になりうるか, 日本ロボット学会誌, 20-6, (2002), pp.569-570.

[13] 広瀬茂男, 大衆工学としてのロボット, 日本ロボット学会誌, 21-2, (2003), pp.138-140.

[14] 國吉康夫, ロボットの知能-創発実体主義の挑戦-, 計測と制御, 42-6, (2003), pp.497-503.

[15] 井上博允・加賀美 聡, ロボットの知能とシステム統合, 日本ロボット学会誌, 20-5,(2004), pp.4642- 469.

[16]井上博允, 人間型ロボットが拓く未来社会と新産業の創成, 日本ロボット学会誌, 22-1,(2004), pp.2-5.

[17]比留川博久, 人間型ロボットの近未来応用, 日本ロボット学会誌, 22-1,(2004), pp.6-9.

[18] 星野力, 『日本のロボット研究って変ですぬ』, 情報処理学会誌「情報処理」, 41-3, インタラクティブ・エッセイ(2000.3)

[19]ソニー,研究所設立へ:考えるロボット脳科学で開発,2004/03/14, 朝日新聞.

[20] Wired News 2004年3月13日 AP 通信

[21] 五味隆志, 新 AI 科学と介護ロボット, 日本ファジィ学会誌, 2001年2月号, pp.1-11, (2001)

[22] 能島裕介・小島史男・久保田直行, 多目的行動調停に基づく移動ロボットの行動獲得, 日本機械学会論文集, 68-671, (2002), pp.2067-2073.

[23] 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.

- [24] 養老孟司, 唯脳論, 筑摩書房, (2002)
- [25] 前田英樹, 倫理という力, 講談社, (2001)
- [26] 西岡常一, 木に学べ, 小学館, (2003)
- [27] 前田英樹, 「絵画の二十世紀」, 日本放送出版協会, (2004)
- [28] ミヒャエル・エンデ, (大島かおり訳), モモ, 岩波書店, (1976)
- [29] 金城倫明, 丹野賢一・山田うん「SSW」既成概念を超える刺激的パフォーマンス, 琉球新報 2001年7月12日.
- [30] 朝日新聞, 2004年2月11日.
- [31] 朝日新聞, 2004年2月27日.
- [32] 朝日新聞, 2004年7月29日.
- [33] 朝日新聞, 2004年7月31日.
- [34] 朝日新聞, 2004年8月13日.
- [35] 朝日新聞, 2004年8月28日.
- [36] 朝日新聞(夕刊), 2004年9月1日.
- [37] 朝日新聞, 2004年9月6日.
- [38] 第6回EA(工学アカデミー)国際シンポジウム「ロボットとの共生」開催趣旨.
(2004年10月4日,5日)
- [39] 甲野善紀, 武術の新・人間学, PHP 研究所. (2002)