

自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた (第1報, 古の身体操法に学ぶ人間型二足ロボット「源兵衛」の ナンバ歩き・ナンバ走りの発現)

川副 嘉彦

How Should Be the Robot That Coexists with Nature, Life and Human : Emergence of NANBA Walk and Run of Humanoid Biped Robot GENBE Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art

Yoshihiko KAWAZOE

ABSTRACT

There is no robot around us in our society at the current stage and also there will be no robot in the future if we define a robot as an autonomous machine working in the arena of offices, homes, and disaster sites, etc. outside the factories and continue the present conventional research and development (R&D) style in robot projects. It seems that the emergence of intellectuality in an autonomous robot exists in the dexterity of human or creatures as complex systems and the research style and the development procedure along this approach should be necessary for realization of a real intellectual robot. This paper realized the simple self-sustained humanlike robust walking & running NANBA of humanoid biped robot GENBE based on distributed control of physical body in a martial art without ZMP (Zero Moment Point) control, which uses only small active power with simple chaotic limit cycle using gravity, further developing into autonomous walking & running.

1. 研究の背景と目的

1.1 ロボットの壁

少子・高齢化社会に期待されるサービスロボットや介護ロボットなど、我々の周囲に存在して知的に動く(従来の機械とは質的に異なる)機械をロボットと定義するならば、長年の研究にもかかわらず、我々の周りには1体、1匹、1台、あるいは1個のロボットも実在しない[1]-[22].

作業の精度、速度、効率を追求するモデルベースと呼ばれる従来の知能ロボットは、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(SMPA: Sense- Model- Plan-Act). しかし、このような直列方式の頭でっかちロボットは、人間の住む実世界では、障害物が突然現れたような場合に立ち往生してしまう[4]-[10].

二足ロボットとして知られているホンダのASIMOやソニーのQRIOは、設計者が従来の制

御技術を総動員して徹底的に細部まで作り込むことによって滑らかな二足歩行を実現した極めて高度な機械であり、遠隔操縦であって絶妙なバランス制御ゆえに、スペックをひとつ変えるだけでバランスが簡単に崩れてしまう。産学官の大プロジェクトによるHRP-2の動きも知的とは言い難く、ヨチヨチ歩きの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ように見える。

刻々変化して一瞬たりとて止まることのない未知の実環境は、ロボットにとっては危険に満ちており、現在のアプローチをとる限り、制御すべきパラメータが爆発的に増えることになる。横断歩道を渡ろうとするロボットが青信号を認識して歩き出した途端に赤信号に変わってしまうような状況が想像される。ロボットに俊敏・柔軟な動きを期待すればするほど、従来のモデル・ベースやリアルタイムでの学習の概念が非現実的なものになる[1]-[10]. 世界の70

億の人びとが日本人と同じようにエネルギーを消費するとしたら地球が5つ必要だといわれている。エネルギー問題の視点からも、ロボットにとって環境問題と省エネルギーは極めて深刻な問題である。

昆虫程度のロボットというような表現をしたり、昆虫のような行動に見えてしまうとして試行錯誤的なロボットの行動アーキテクチャをデメリットと見なしたり[22]、シミュレーションしかやっていないのに人工生命を作っていると簡単に言っているのけたり、ロボットがやがて人間を越えるかもしれないなどと本気で心配したりする研究者が多いが、これらは自然・生き物・ヒトを理解していないための誤解か、あるいは手品としか考えられない。ブルックス[2]が指摘するように、地球の歴史は46億年、単細胞生物が出現したのが35億年前、単細胞から昆虫に進化するのに30億年、昆虫から人類に達するのに5億年。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5千年前、専門的知識を所有するようになったのは数百年前である。我々はまだ単細胞さえ作れない。地球が生まれてから単細胞が生まれるまでに10億年、しかも昆虫になるまで単細胞時代は30億年も続いたのである。

自然・生き物・ヒトの生態系は、何が起こるかかわからない、コンピュータ・シミュレーションが通用しない世界である。したがって、自然・生き物・ヒトと共存するロボットは動いてみないとわからない。一時期ブームであった人工知能研究にコンピュータ・シミュレーションが通用しないことは20世紀後半の歴史が示した。数千年前の人たちが文字や計算と関係なく暮らしていたことを考えれば、計算能力は生命（知能：生きる能力）の極めて微小な部分にすぎない。「機械（ロボット）がどんなに人間に近付いても問題はない。怖いのは、人間が機械になることだ」とチェコの作家イバン・クリーマ氏は言う（ロボットという言葉の世界で最初に使ったチャペックはチェコの作家である）[23]。これが日常物理学の常識的な感覚であろう。ロボットが人間に近づく速度より人間がロボットに近づく速度の方が速いように見える。

養老[21][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、知覚入力が

た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、運動系は「やってみなけりゃ、わからない」のである。さらに、”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。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。”西垣[25]も、”ヒトの身体内にうごめく情報は、意識されないもののほうがはるかに多い。大半の生物は意識など持たずに生きているのだ。”と言う。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。

「はちはお花のなかに、お花はお庭のなかに、お庭は土べいのなかに、土べいは町のなかに、町は日本のなかに、日本は世界のなかに、世界は神さまのなかに。そうして、そうして、神さまは、小ぢなはちのなかに。」の詩[26]にも、人間が「はちロボット」を作れない理由が見える。賢いのはロボットのお手本となる生き物である。ミミズの穴ふさぎ、ゴキブリの動き、モグラの穴掘り、アザラシの泳ぎ、チータの走り[21][27][28]は、「ロボット学」の視点からは極めて知的に見える。

多くの時間と経費を費やして大規模プロジェクトとして展開されてきた日本の産学官のヒューマノイド・ロボット研究もようやく一段落したように見える。終わってみると、生き物や人間の住む現実世界で俊敏・柔軟・ロバストに動くロボットは、現在の延長線上では実現しそうもないことが開発に実際に取り組んできた研究者[15]–[17]だけではなく一般にも認識され始めたが[29]、まだ十分に理解されているとはいえない。「2050年にワールドカップ人間チームに勝つ」という目標をかかげて日本の研究者の提案で始まったヒューマノイド・ロボカップ世界大会において、ヨチヨチ歩きロボットがバタバタ転倒する惨憺たる状況について、専門家は直立二足ロボットに歩かせたり走らせたりするのは本来極めて難しいことだと解説している。しかし、たとえ目標達成が2050年だとしても（目標自体がユーモアだとしても）、ロボット

の動きは恐ろしく緩慢で頼りなく、ロボット学会設立時の知的ロボットへの期待[30]-[34]からはほど遠い。刻々変化する未知の実環境においては、俊敏・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明かである。これがロボットの壁である。

「未来、過去、現在の三人きょうだいは、ひとつの家に住んでいる。ほんとはまるでちがうきょうだいなのに、三人を見分けようとすると、それぞれたがいにうりふたつ。」「未来はいま いない、これからやっとならわれる」

「過去も いない が、こっちはもう家から出かけたあと」「現在だけがここにいる、それというのも、現在がここに いないと、未来と過去は、なくなってしまうから」「でもそのだいたい現在のいるのは、未来が過去に変身してくれるため」「現在をよくながめようとしても、そこに見えるのはいつも未来と過去だけ！」エンデの「モモ」[37]の過去・現在・未来（著者要約）である。「ロボット」および「ロボット学」のありかたを示唆している。

ロボット研究開発の現状を打破しない限り、我々の住む現実世界で動くロボットの実現は不可能であろう。

ところで、歩きや走りは本当に難しいだろうか。特別な知識や筋力がなくても「ヒトは誰でも簡単に歩き、走る」。

1.2 生き物とヒトの知性はどのように生まれるか

ダーウィンの観察によると、ミミズの穴ふさぎ、モグラの穴掘りは巧みである。モグラは、頭を絶えず左右に動かして石や土の硬さを感じるとその反対側へ、湿っている方向があればその方向に、向きを変える。時々穴掘りを中断して重力感覚で下の方を確かめてもっと深い穴を掘り始める[8][27]。これがモグラの知性である。浅いプールで泳ぎを覚えたアザラシは海では溺れてしまう。アザラシの泳ぎにも犬かきとは質の異なる知性が見える[20][28]。

上泉新陰流についての前田[35]の考察は鋭い。「スポーツ選手の頂点は、残酷なほど若い時にやってくる」。「ほんとうに上達する技とは、年齢の積み重なりによってのみ少しずつ可能となってくるような技術である」。「深まるものは、量ではなく、質以外にない。最初にその質が植え付けられていない限り、上達の過程は始まり

ようがない。故に、基本と極意とは、まったく同質のものでなくてはならない」。野球の達人・イチロー選手、怖いトンカツ屋のオヤジ、宮大工の棟梁、絵画の巨匠、エンデの童話「モモ」の道路掃除夫ベッポじいさん、ダンサー・山田うん、シンクロ・井村コーチにも同じような構造が見える[8][20][21]。

1.3 21世紀のロボットと人間の知性のあり方

宇宙や海底や生き物の世界で働くロボットには大量生産時代の産業用ロボットの開発手法は通用しない。ロボットにも設計者にも適応性・柔軟性が求められる。生き物やヒトの巧みさの発達を包摂構造の観点から吟味すると[1]-[10][20][21]、現在展開されている知能ロボット開発における本質的な欠陥を克服するヒントが見えてくる。自然・生き物・ヒトの世界で働くロボットは自然・生き物・ヒトの巧みさの発達に学ぶしかない。

1.4 本研究の目的

ホンダの ASIMO やソニーの QRIO、あるいは産学官の大規模プロジェクトによる HRP-2 に代表される従来の二足歩行ロボットは、慣性力や転倒力を邪魔なもの（障害）と位置づけて「足の裏で踏ん張る、転倒力を制御する、理想的な位置に着地する」という重心と ZMP (Zero Moment Point) の制御を歩行の基本としている。しかし、このように重力や慣性力に逆らう歩行法は前方への推進力のブレーキとなり、エネルギー的にも無駄が多く、サーボモータの負担も大きく、複雑精妙な制御を必要とし、しかも、実環境における外乱に弱い[7][8]。

一方、最近は受動歩行[36]が再び国内外で注目され始めた。このことは、ヒューマノイド実現への希望を抱かせるが、これまでの受動歩行の研究はダイナミクス自体の研究がほとんどであり、エネルギー消費や地球環境を考慮して受動歩行をベースにして実環境で動くロボットの実現をめざす研究はほとんどない。

本研究は、自律型ロボットにおける包摂構造化による知性の創発へのアプローチ[5]-[10][20][21]を二足歩行ロボットに展開し、従来のヒューマノイド（人間型二足）ロボットの歩行原理であるモデル・ベースト (SMPA) や ZMP (Zero Moment Point) 制御とは反対の歩行原理により、従来の二足歩行ロボットとは質の異なる

る人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟・ロバストな歩き・走りの実現をめざす。

「源兵衛」は、江戸-仙台間 300 km を1日で走ったといわれる飛脚にちなんで名づけた名前である。

「ロボット」および「ロボット学」が21世紀に生き延びるためには、エネルギー消費や地球環境を考慮して、重力・慣性力などの自然の力やメカニズムを利用した受動歩行をベースにして自然・生き物・ヒトに学ぶサブサンプレション的研究開発のスタイル[1]-[10],[20][21]が、ロボット実現へのただ一つの道であることを提示したい。「源兵衛」の歩き・走りの俊敏・柔軟・ロバスト性のメカニズムについては人間の安定化制御特性と対照して続報に考察する。

2. 古の身体操法に学ぶ自立型二足歩行ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの発現

2.1 生き物のように柔軟に適應する歩き・走りの原理

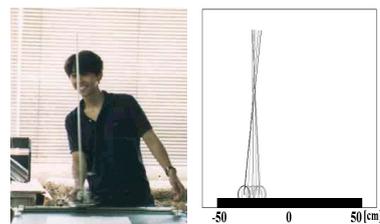
ギブソンは、行動は「姿勢」に依存しており、立位のような平衡姿勢ですら多数の微細な修正の動きからなっており、立つことは止まることではなく、倒れないための「不安定幅」の持続であり、「姿勢」の止まらないという性質が、身体に動きをもたらすと述べている[8]-[9]。

従来の機械やロボットの制御は、たとえば台車上の倒立棒を安定化制御するとき常に偏差を零にして目標値に近づけようとする。しかし、多くの人間オペレータによる安定化制御実験における習熟過程を解析すると、人間オペレータは機械におけるような制御はしない。倒立棒はほとんど垂直には立っておらず、重力による転倒力により常にゆれており（図1）、右と左の方向の切り替えの途中は制御していない。あらゆる転倒状況（倒立棒の傾き角、角速度、台車の位置、速度などの組み合わせ）において転倒しないような切り替えのコツを試行錯誤により獲得する。試行を重ねて習熟していくと動きが次第に滑らかになり、倒立棒は図2のように静止しているように見える。しかし静止しているのではなく、絶えず細かく動いているのである。詳細は続報に考察する。

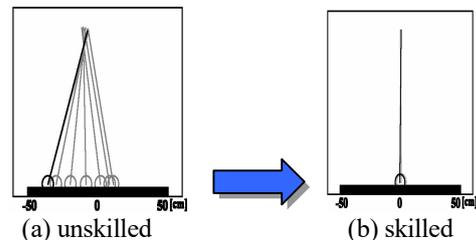
コンピュータ制御実験によると、平衡点が線形的に安定な動きに比べて、平衡点が線形的に不安定なリミットサイクルや不規則な揺らぎのあるカオス的動き（図3）は予期せぬ外乱に

対してロバスト（頑健）である[38]-[40]。リミットサイクルは軌道安定だから過渡的な外乱にロバストであり、構造安定でもあるから、状況の変化に応じた運動の変化が起こりうる[41]-[44]。これが人間の立位あるいは歩行が外乱に対して強いロバスト性をもつ理由であり[38]-[40]、人間型二足ロボット「源兵衛」の歩行原理である。倒立棒の前方への傾き角度に応じて台車の速度を増すと倒立棒は小さく揺れながらほぼ垂直の姿勢で前方に走る。倒立棒が左右二本になったのが時速30キロで走ったと言われる江戸時代の飛脚「源兵衛」のナンバ走り、あるいは高橋尚子選手や末続慎吾選手に見える走りの原理と考えることができる。速度の遅い赤ちゃん歩きから飛脚走りまで進展するメカニズムである[45][46]。

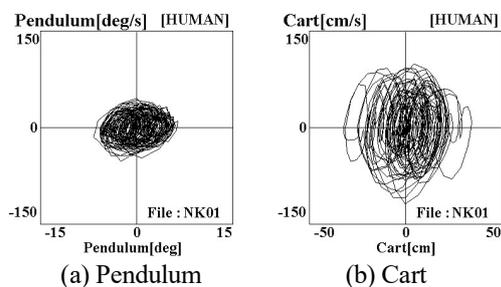
一方、古武術は古人が命がけの対決を通じ



(a) Experiment (b) Stick picture
Fig.1 Stabilizing control by a human operator



(a) unskilled (b) skilled
Fig.2 Skill-up process of human operator during stabilizing control of inverted pendulum



(a) Pendulum (b) Cart
Fig.3 Behavior of an inverted pendulum in a phase plane.

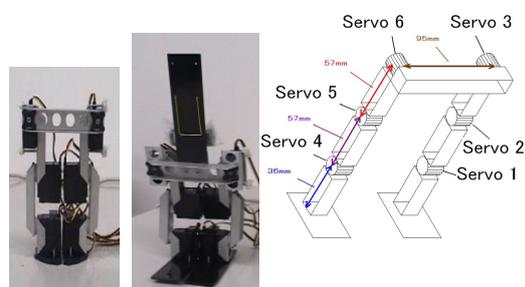
て培った適応性のある柔軟な動作が基本であり、「捻らない、うねらない、踏ん張らない」というのが特長である[35]. ナンバ歩きは古武術の足の運びに見られる。「足の裏で踏ん張らない、転倒力を利用する、着地位置は気にしない」という従来とは反対の歩行原理を基本として試行錯誤に基づく包摂構造的な手法により、自在の速度で歩き・走り、方向を変え、安全に転倒し、あるいは俊敏に起きあがる柔軟・ロバストな人間型二足ロボットの開発方法を以下に述べる.

2.2 自立型二足歩行ロボット「源兵衛」のサブサンプリング的開発

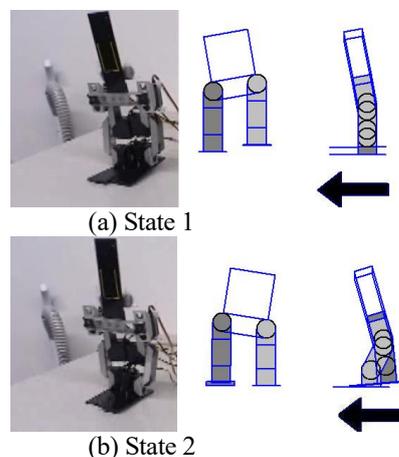
サーボモータ (HS-422: Hitec 社製, トルク 3.3 kg·cm) を用いたアームロボット (Rascal: Advanced Design Inc.製) を転用して簡単な構造の6自由度ロボット「源兵衛1号」(図4(a)) を製作し、歩行実験を開始した. サervoコントローラを介してパソコンで作成した命令をサーボモータに転送することによりロバストな歩行の実現を試みた. 上体を模擬して脚部の上に重量を付加したのが「源兵衛2号」(図4, 身長 300 mm, 体重 550g, 足の幅 36 mm, 長さ 120 mm) である. 全体の重心が上へと移行したことにより、「転倒力を利用する」効果が大きく、前進速度が増す. ナンバ歩きの基本は、図5のように、前傾姿勢で、(1) 状態1: 身体を右に傾けると、左脚が浮く. (2) 状態2: このとき左脚を前に出す姿勢をとれば身体が自然に左前方に倒れ、左足が接地する. (3) 状態3: 身体を左に傾けると、右脚が浮く. (4) 状態4: このとき右脚を前に出す姿勢をとれば身体が自然に右前方に倒れ、右足が接地する、という四つの状態が基本である. 足を上げたとき自然に前方へ倒れようとする力を利用する. 歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足がでることにより重力を利用して自然に前進する.

図6は「源兵衛2号」のロバストな「ナンバ歩き」「ナンバ走り」を示す. 姿勢制御無しで設計者の介助によりロボットが試行錯誤的に

サーボの回転角速度と傾き角の組み合わせを学習することにより、自在の速度での歩行を獲得する. この場合の前進速度は、9.7 cm/s (人間の身長なら 時速 2km) である. 脚の切り替え (ピッチ) 速度が遅い段階では、赤ちゃん歩きのように左右の傾き角度が大きいと (たとえば 10 度) 倒れる. このときは、身体の左右への傾き角を減らす (5 度にする) と多少歩行速度は遅くなるが (8.3cm/s), 横転しないで歩行する. あるいは、ピッチ速度を高めると、歩行速度は遅くならないで (9.7cm/s), 安定した歩行をする. 前傾角度、左右の傾き角度を大きくしてピッチを速くすると自然に歩きから走りに転ずる.



(a) GENBE No.1(Left) & No.2 (Right) (b) Legs
Fig.4 Biped Robot GENBE No.1 & No.2



(a) State 1
(b) State 2
Fig.5 States of NANBA Walking of GENBE



Fig.6 Emergence of simple humanlike robust walking NANBA of biped robot GENBE No.2. Height: 30 cm, walking speed: 10 cm/s (2 km/h: reduced walking speed to height 170 cm)

「源兵衛 2 号」の上体の一部としてマイコン (Joker 社製 Eye-bot) を搭載したのが自律型の「源兵衛 3 号」であるが、歩行の速度を上げると、脚関節の負担が大きすぎたので、トルクの大きいサーボ KRS-7841ICS を備えた筐体 KHR-1 (近藤科学製) を採用し、人間型二足ロボット「源兵衛 4 号」(図 7) と名づけた。「源兵衛 4 号」は、二枚のボードで 17 個のサーボモータ (脚部 10 関節) を制御し、340 (身長) × 180 (幅) mm, 脚部の長さは 210 mm, 足裏 59×113×1.5 mm, バッテリー等を搭載した重量は約 1.2 kg である。足首の関節自由度が追加されている。パソコン上で作成したモーションデータ (サーボ・ポジションデータの集まり) をロボットのコントロールボードにダウンロードして実行させる。ポジションは「源兵衛 2 号」での“状態”に相当する。脚部 6 関節の「源兵衛 2 号」で獲得した動きを脚部 10 関節の「源兵衛 4 号」で展開する。「源兵衛 4 号」におけるサーボの回転速度レベルは 8 段階で設定し、設定速度が同一なら回転角度が異なっても基本的にはほぼ同一の時間で回転する。

いで重力を利用するので、サーボの負担と消費エネルギーが大幅に低減する。図 12 は「仰

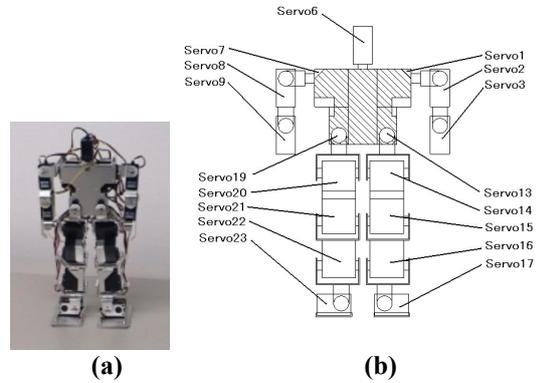


Fig.7 Self-sustaining humanoid biped robot GENBE No.4.

2.3 古の身体操法に学ぶ自立型二足ロボット 「源兵衛4号」のナンバ歩き・ナンバ走り

図 8 は「源兵衛 4 号」のナンバ歩きの 4 つの状態を示す。足首の関節を使って上体が左右に傾かないようにする。図 9 は「源兵衛 4 号」のナンバ歩き (歩行速度:7.9cm/s, 身長 170 cm の人間に換算すると 1.4km/h), 図 10 はナンバ走り 14.7cm/s (身長 170 cm なら 2.7 km/h), 図 11 は超ナンバ走り 18 cm/s (1 秒間に 6 歩走る) である。すべてが ZMP と反対の歩き・走りであり、「足の裏で踏ん張らない、転倒力を利用する、着地位置は気にしない」。図 9, 図 10 は、立位から歩行あるいは走りの左右各 1 歩までを示すが、立位から歩行開始への移行, あるいは定常歩行・定常走りから停止への移行もシンプルである。倒れる前に足が出るという原理は、人間オペレータの倒立棒の安定化制御の原理と同じであり、西洋式近代スポーツ理論に見られる腕の振り不要であり、歩きながら・走りながらも手作業がしやすい。歩行に計算を使わずに済むので、いろいろなタスクへの展開が見えてくる。また、身体の移行は目標軌道制御をしな

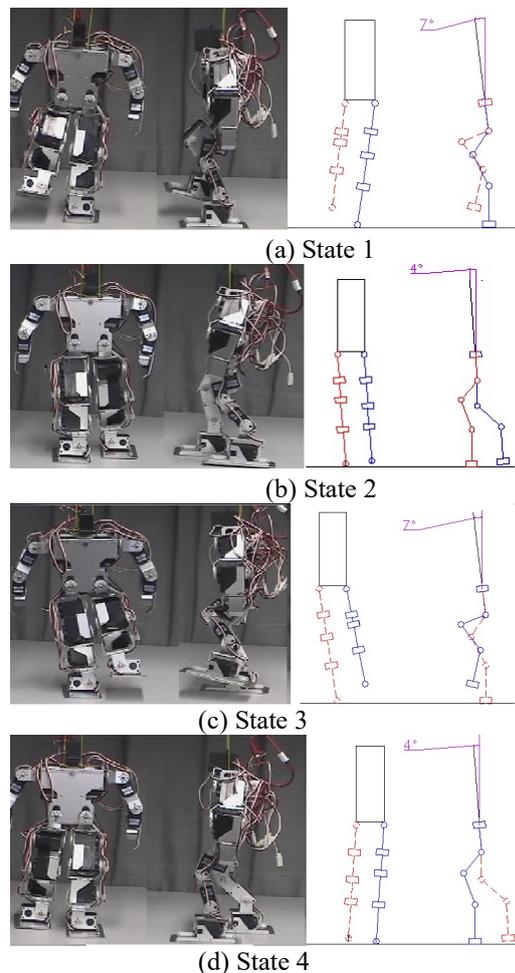
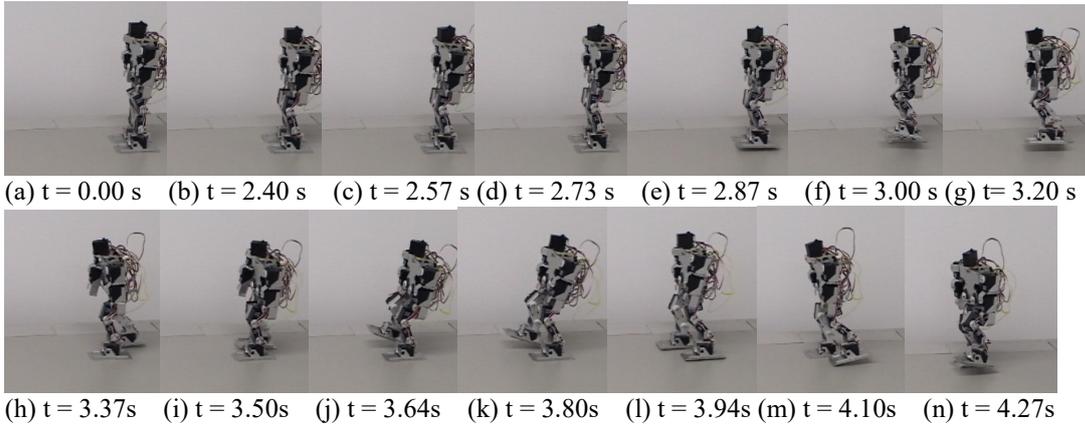
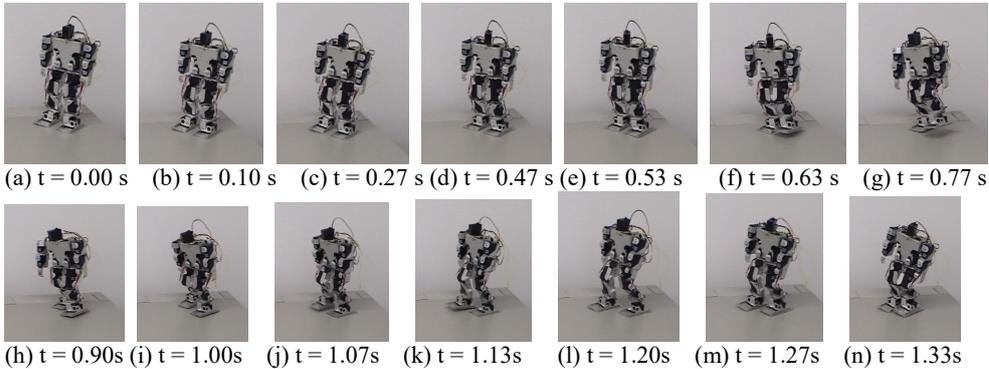


Fig.8 Four states of GENBE-No.4 with 10 freedom legs



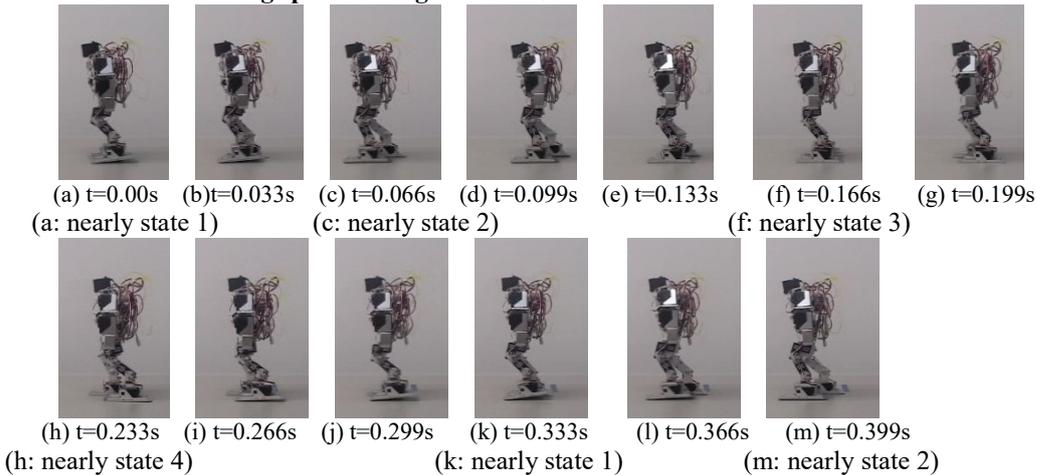
(a) $t = 0.00$ s (b) $t = 2.40$ s (c) $t = 2.57$ s (d) $t = 2.73$ s (e) $t = 2.87$ s (f) $t = 3.00$ s (g) $t = 3.20$ s
 (h) $t = 3.37$ s (i) $t = 3.50$ s (j) $t = 3.64$ s (k) $t = 3.80$ s (l) $t = 3.94$ s (m) $t = 4.10$ s (n) $t = 4.27$ s

Fig.9 Emergence of simple self-sustained humanlike robust walking NANBA of self-sustaining humanoid biped robot GENBE No.4. Height: 34 cm, Walking speed: 7.9 cm/s (1.4 km/h : reduced walking speed to height 170 cm).



(a) $t = 0.00$ s (b) $t = 0.10$ s (c) $t = 0.27$ s (d) $t = 0.47$ s (e) $t = 0.53$ s (f) $t = 0.63$ s (g) $t = 0.77$ s
 (h) $t = 0.90$ s (i) $t = 1.00$ s (j) $t = 1.07$ s (k) $t = 1.13$ s (l) $t = 1.20$ s (m) $t = 1.27$ s (n) $t = 1.33$ s

Fig.10 Emergence of simple self-sustained humanlike robust running NANBA of self-sustaining humanoid biped robot GENBE No.4. Height: 34 cm, walking speed: 15 cm/s (2.7 km/h: reduced walking speed to height 170 cm).



(a) $t = 0.00$ s (b) $t = 0.033$ s (c) $t = 0.066$ s (d) $t = 0.099$ s (e) $t = 0.133$ s (f) $t = 0.166$ s (g) $t = 0.199$ s
 (a: nearly state 1) (c: nearly state 2) (f: nearly state 3)
 (h) $t = 0.233$ s (i) $t = 0.266$ s (j) $t = 0.299$ s (k) $t = 0.333$ s (l) $t = 0.366$ s (m) $t = 0.399$ s
 (h: nearly state 4) (k: nearly state 1) (m: nearly state 2)

Fig.11 Emergence of simple self-sustained humanlike robust running NANBA of self-sustaining humanoid biped robot GENBE No.4. Height: 34 cm, walking speed: 18 cm/s (3.2 km/h: reduced walking speed to height 170 cm).

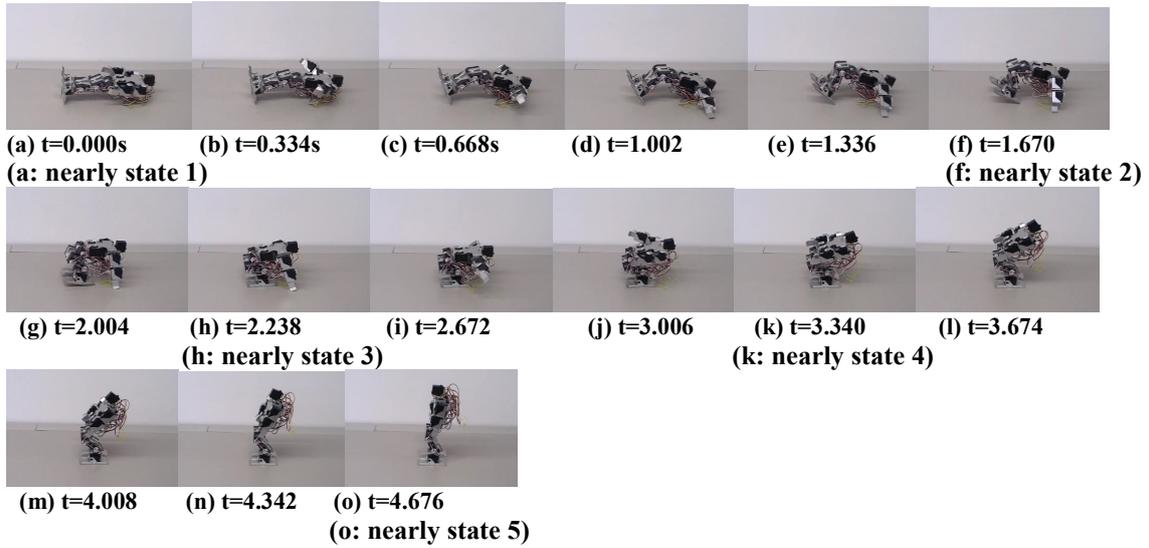


Fig.12 Self-sustaining humanoid biped robot GENBE No.4 rising from lying on his back.

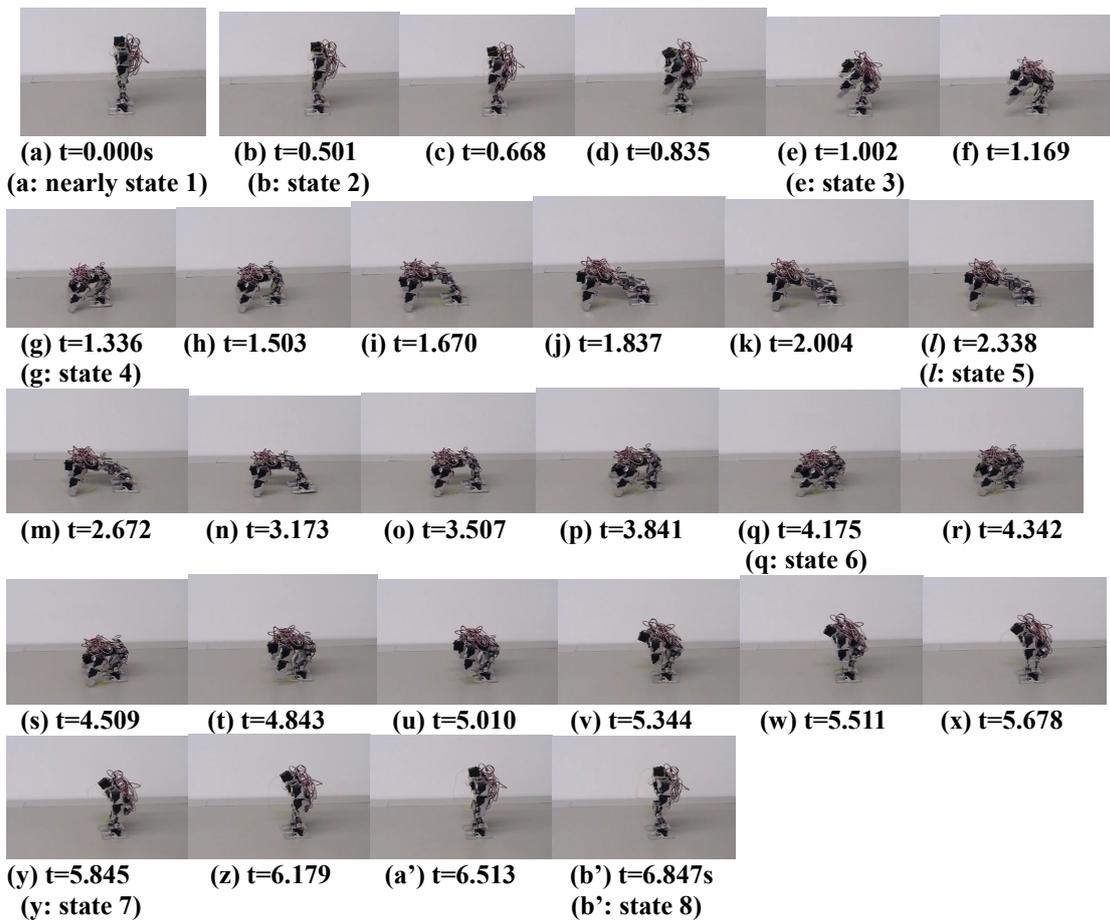
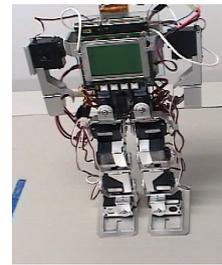


Fig.13 Self-sustaining humanoid biped robot GENBE No.4 break-fall for preventing falling down and picking himself up.

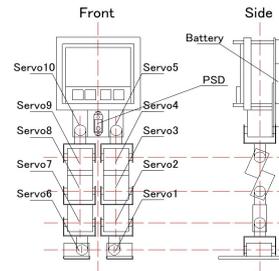
向けからの起き上がり運動」, 図 13 は「前方に転倒する場合の受け身と起き上がり」である.

3. 人間型二足ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの自立から自律への展開

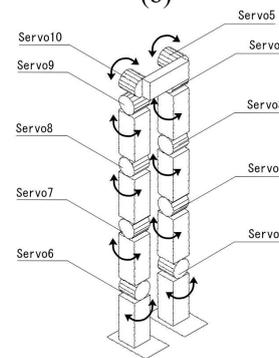
自律的な行動要素の積み上げを想定(拡張性を考慮)して, 「源兵衛 4 号」の脚部の上に上体の一部を兼ねて 32bit マイコン (Eye-bot: CPU はモトローラ社製 MC68332ACF 25) を搭載し, センサ[5]-[10]を取り付けたのが自律型「源兵衛 5 号」(図 14)である. 全高は約 350mm, 重量は約 1.4kg である. センサ入力により反射的に行動する要素をサブサンプリング的に積み上げていく. 「源兵衛 4 号」の試行錯誤的に獲得した動きを自律型「源兵衛 5 号」におけるサーボの回転速度は任意に設定できるようにし, 設定速度が同一なら回転角度が異なっても基本的にはほぼ同一の時間で回転するようにし, 「源兵衛 4 号」の速度設定値とほぼ対応できるようにした. 「源兵衛 5 号」の二足歩行は, ①状態数, ②各状態におけるサーボモータの角度および③回転速度, ④状態間の待ち時間, という 4 つの要素を設定することで多様な歩行動作を生成する. 状態を組み合わせるにより 1 つの歩行動作が生成される. 図 15 は「源兵衛 5 号」のナンバ歩き 7.6 cm/s である. 図 16 は, 胴体中央部に障害物回避用の距離検出素子(PSD)センサを搭載し, 障害物を回避する例である.



(a)

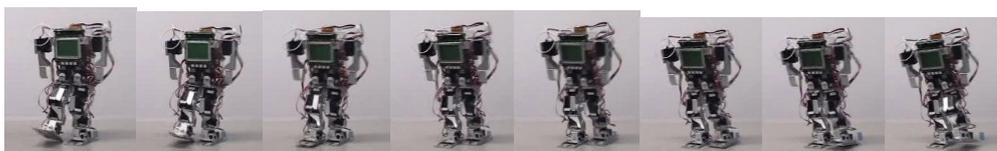


(b)

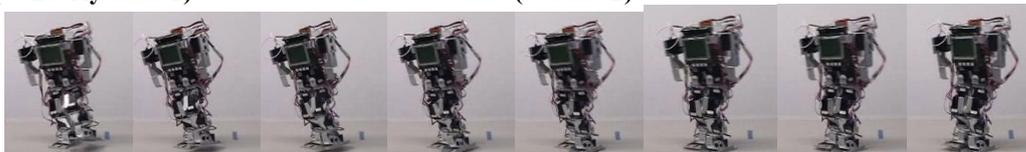


(c)

Fig.14 Autonomous humanoid biped robot GENBE No.5



(a) t=0.000 (b) t=0.067 (c) t=0.200 (d) t=0.303 (e) t=0.334 (f) t=0.400 (g) t=0.501 (h) t=0.535
(a: nearly state 1) (e: state 2)



(i) t=0.568 (j) t=0.768 (k) t=0.835 (l) t=0.902 (m) t=1.002 (n) t=1.069 (o) t=1.102 (p) t=1.135
(i: state 3) (m: state 4)

Fig.15 Emergence of simple self-sustained humanlike robust walking NANBA of humanoid biped robot GENBE No.5. Height: 35 cm, Walking speed: 7.6 cm/s (1.14 km/h: Reduced walking speed to height 170 cm)

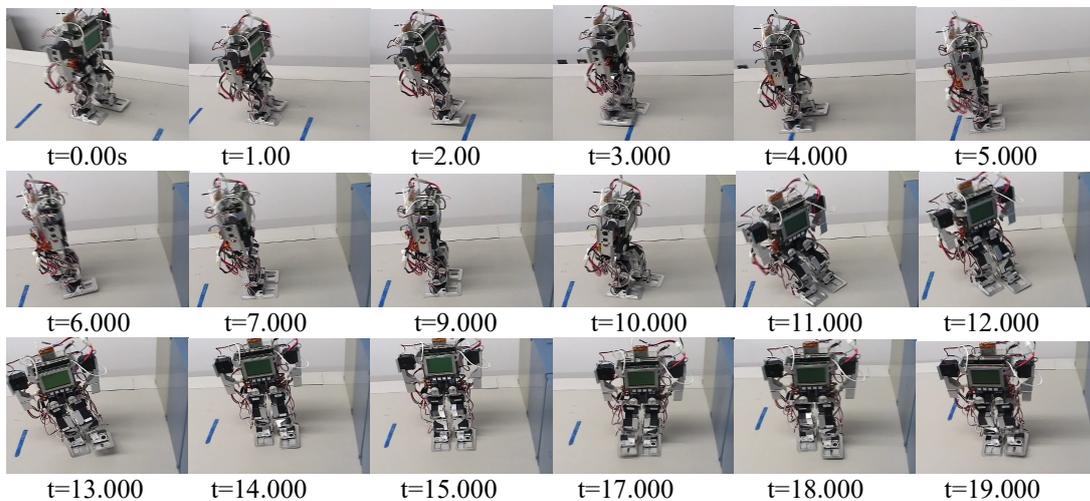


Fig.16 Emergence of simple self-sustained humanlike robust walking with autonomous obstacle avoidance of humanoid biped robot GENBE No.5.

要素行動 Walk（前進）と要素行動 Avoid（障害物を検知し回避する）からなる簡単な制御構造であり、障害物を検知すると Avoid が優先される。要素行動 Avoid（障害物回避）が発現すると、停止した後、約 90° 右旋回し、Avoid が終了すると、Walk に戻って前進を再開する。センサの追加などハードウェアの変更等にも柔軟に対応できるので、新たな要素行動を積み上げていくことにより、衝突を検知しての回避行動、坂道や階段などの環境における歩行、CCD カメラを用いた色探索の目的行動、転倒防止や転倒時の受け身など、次第に能力が向上していく形で巧みな動きの進展が期待できる[5]-[10][20][21]。また、足と地面の接地状況を判断すれば、さらに柔軟で自在な自律歩行が実現できる可能性がある。足の裏に取り付ける接地状況検知用センサを試作中である。

4. 結論

以上の内容を要約すると、

(1) 「歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」という歩行原理により、従来のホンダ、ソニーのロボットや産学官プロジェクトによる HRP-2 などの目標軌道追従型の ZMP (Zero Moment Point) 制御とは質の異なる人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟・ロバストな歩き・走りを実現した。「源兵衛」は、江戸ー仙台間 300 km を 1 日で走った

といわれる飛脚にちなんで名づけた名前である。

(2) この歩きを二足歩行ロボットに生かすと俊敏で柔軟な動きをつくりやすい。また、関節への負担が軽く、省エネルギーで済む利点がある。

(3) 歩行原理は①足の裏で踏ん張らない②転倒力を利用する③着地位置を気にしない。すなわち、足の裏で踏ん張り、倒れないように制御し、理想的な位置に着地する従来の二足歩行ロボットと反対である点が特長である。

(4) 筐体、サーボ速度、関節の自由度数、床の状況などの違いがあっても柔軟に対応できる。

(5) 重力による転倒力と地面との間に形成されたリミットサイクル・アトラクターを利用したきわめてシンプルな二足ロボットの歩行であり、軌道安定だから予期せぬ外乱に対して頑健であり、構造安定だから状況の変化に応じた柔軟性がある。

(6) 実環境で必要とされる歩行・走行を姿勢制御無しで設計者の介助により試行錯誤的に学習することにより始動・停止・方向転換を含めて実用的な自在の速度で歩行する。

(7) 転倒力を利用した歩行速度は、同一サーボモータ速度で従来の ZMP 制御の 10 倍であり、従来型に比べると風のように走る。

(8) 関節の負担が軽いので、障害者の歩行やリハビリの指導、短距離走やマラソン、テ

ニスのボレーにおける身体操法の研究など広範囲の応用が期待できる。

(9) さらに、SAを採用して、障害物を回避しながらの自律的「ナンバ歩き」への展開の方向を示した。

立花[47]が哲学者ヴィーゴを引用して指摘する「真理は作ることそのものにある」は、ロボットに最も当てはまる。「能書きを並べる」よりも「ロボットがいかにか動くか」が先決である。「動かしてみなくちゃわからない」のが自然・生き物・ヒトと共存するロボットである。「能書き」は後からついてくる。

おわりに、本研究に励ましと指導をいただいた森政弘（東工大名誉教授）、養老孟司（東大名誉教授）、五味隆志（アプライド・AI・システムズ社）、甲野善紀（松聲館）、佐々木正人（東大教授）の諸先生に深謝する。また、埼玉工業大学・平成16年度4年生・南雲・伊能・鈴木の諸君、および17年度4年生・須永・桃井・原田・清水の諸君のご助力に感謝する。

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クション・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CD-ROM論文集, 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), 埼玉工業大学工学部紀要, 第13号, pp.13-23, (2003)

[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な』, 情報処理学会誌「情報処理」, 41-3, (2000)

[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] 川副嘉彦, 21世紀のロボットと人間の知性のあり方 (学習の包摂構造化による巧みさの発達), 第3回21世紀連合シンポジウム-科学技術と人間-抄録集, pp.15-16. (2004)

[21] 川副嘉彦, 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) 埼玉工業大学工学部紀要, 第14号, pp.3-16, (2004).

- [22] 藤田雅博, 知能ロボットにおける技術統合: 行動制御アーキテクチャとインテリジェンスダイナミクス, 計測と制御, 44-10, (2005), pp.729-734.
- [23] 愛の旅人チェコ, 2005/10/15, 朝日新聞
- [24] 養老孟司, 唯脳論, 青土社, (1989)
- [25] 西垣通, 知能というもの, 2004/09/15, 朝日新聞 (夕刊).
- [26] 金子みすず, はちと神さま, 金子みすず童謡集, JULIA出版局, (1984), pp.90-91.
- [27] 佐々木正人, 知性はどこに生まれるか, 講談社, (1996)
- [28] 甲野善紀, 武術の新・人間学, PHP研究所. (2002)
- [29] 室山哲也, ロボットシティへの質問, 日本ロボット学会誌, 22-7, (2004), pp.853-855.
- [30] 藤井澄二, ごあいさつ, 日本ロボット学会誌, 1-1, (1983), p.3.
- [31] 森政弘, ロボット制御への身体図の導入, 日本ロボット学会誌, 1-1, (1983), pp.13-16.
- [32] 藤井澄二, ロボット学への期待, 日本ロボット学会誌, 3-3, (1985), pp.175-176.
- [33] 三浦宏文, 自然循環におけるロボット利用への期待, 日本ロボット学会誌, 4-2, (1986), pp.124-125.
- [34] 井口雅一, 21世紀はロボットの世紀, 日本ロボット学会誌, 4-6, (1986), p.640.
- [35] 甲野善紀・前田英樹, 剣の思想, 青土社, (2001)
- [36] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, M. Wisse, Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers, Science, Vol.307, (2005), pp.1082-1085.
- [37] ミヒャエル・エンデ, (大島かおり訳), モモ, 岩波書店, (1976)
- [38] Kawazoe Y (1992), Manual control and computer control of an inverted pendulum on a cart, Proc. of the 1st International Conf. on Motion and Vibration Control, pp.930 -935.
- [39] 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.
- [40] Kawazoe, Y., Chasos-Entropy Analysis and Robustness of Human Operator's Skill during Stabilizing Control of an Inverted Pendulum, Proc. of the 7th International Conference on Motion and Vibration Control, MOvIC '04, CD-ROM pp.1-10 (2004).
- [41] 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)
- [42] 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.
- [43] 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), 日本機械学会論文集, 56-523, (1990), pp.693-699.
- [44] 多賀巖太郎, 歩行の創発, 日本ロボット学会誌, 15-5, (1997), pp.680-683.
- [45] 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共生するロボットのありかた (人間型二足ロボット「源兵衛」の赤ちゃん歩きから飛脚走り・忍者走りへの道筋), 第4回21世紀連合シンポジウムー科学技術と人間ー抄録集, (掲載予定)
- [46] 川副嘉彦, 人間型二足ロボット「源兵衛」による捻らない・うねらない・踏ん張らない身体操法の研究, テニスの科学, 第14巻, (掲載予定)
- [47] 立花隆, 21世紀のロボティクスと社会, 日本ロボット学会誌, 21-3, (2003), pp.239-246.