

自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた (第2報, 人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟・ロバスト性のメカニズム)

川副 嘉彦

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

Yoshihiko KAWAZOE

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. The previous 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. This paper showed the mechanism of robustness of the NANBA walk and run of humanoid GENBE compared to the skill-up process of human operators during stabilizing control of an inverted pendulum and the NANBA-like running of the Olympic top athletes.

1. 研究の背景と目的

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。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]。

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[1]。したがって、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。

一方、最近では受動歩行[1]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。

野球の達人・イチロー選手は次のように言う。「やるべきことを一つ一つ積みあげていくと、そうしようと思わなくても、結果は出てくる」。「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[1]。イチロー選手の場の哲学である。

現実世界で本当に知的に動くロボットには、

生き物のような適応性・柔軟性が求められる。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、「自然」のすべてを「意識化」することはできない。したがって、「自然」は技術者の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。ロボットにとって人間社会は未知の環境（自然）である[1]。

ブルックスが提唱した包摂構造をもつ行動型ロボットは、要素行動と呼ばれる単純なモジュールを並列的に積み上げていき、次第に能力が向上していく。上位レベルの行動が失敗しても、下位レベルの行動が実行され、致命的な失敗を防ぐ[1]。

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]、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。ロボットにも設計者にも適応性・柔軟性が求められる。

前報[1]では、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」という原点から出発して、実環境（現場）で遭遇した課題を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スタイルを人間型二足ロボット「源兵衛」の開発に適用し、俊敏・柔軟・頑健な「ナンバ歩き・ナンバ走り」を実現した。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・ロバスタな歩き・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「源兵衛5号」の自律的「ナンバ歩き」への展開の方向を示した。

さらに、「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り、ロボットは、「能書きを並べる」よりも「いかに動くか」が先決であること、「能書き」は後からついてくるべきであることを指摘した。

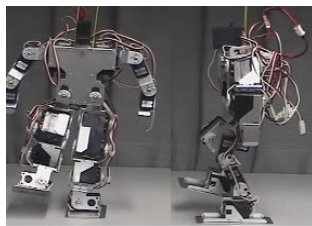
本報では、人間型二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」の俊敏・柔軟・ロバスタ性のメカニズムについて、人間の手による台車上の倒立棒の安定化制御における習熟過程の解析結果および世界のトップ競技者・高橋尚子選手・末続慎吾選手・イチロー選手に見える身体操法と対照して考察する。赤ちゃん歩きから飛脚走りまで試行錯誤に基づく学習により永遠に進展しうるメカニズムである。

2. 人間型二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」のロバスタ性のメカニズム

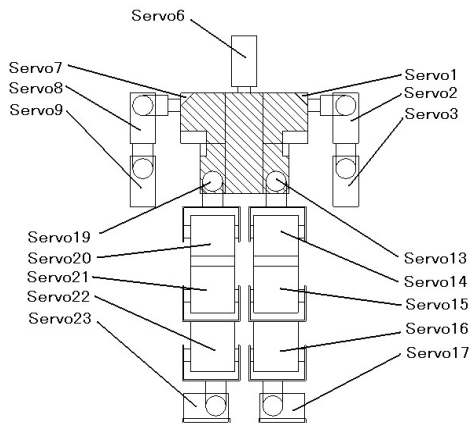
ナンバ歩きの基本は、最もシンプルな源兵衛2号（脚部6自由度、身長30 cm）の場合、前傾姿勢で、(1) 状態1：身体を右に傾けると左脚が浮く。(2) 状態2：このとき左足を前に出す姿勢をとると体が自然に左前方へ倒れ、左足が接地する。状態3と状態4は体を左へ傾けた

反対の動きであり、こうした動きを左右交互に繰り返して歩く。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[1].

図1は、「源兵衛4号」であり、脚部10自由度、身長34cmである[1].「源兵衛4号」の歩行は以下の4つの状態を繰り返す。(1)状態1：股関節と足首のロール方向のモーターを使用して上体がロール方向に傾かないようにして左側に体を寄せ、同時にピッチ方向のモーターを使用して右足を曲げ、上体を少し前に傾ける。(2)状態2：ピッチ方向のモーターを使用して状態1で曲げていた右ひざを伸ばし、左ひざを曲げ、上体をやや起こす。同時にロール方向のモーターを使用して上体が傾かないようにして状態1で寄せていた体を戻す。その結果、自重によって右前方に倒れこみ、右足が接地する。(3)状態3：股関節と足首のロール方向のモーターを使用して上体が傾かないようにして右側に体を寄せ、同時にピッチ方向のモーターを使用して左足を曲げ、上体を少し前に傾ける。



(a) GENBE-No.4



(b) GENBE-No.4 with 10 freedom legs

Fig.1 Humanoid Biped Robots GENBE utilizing instability.

(4)状態4：ピッチ方向のモーターを使用して状態3で曲げていた左ひざを伸ばし、右ひざを曲げ、上体をやや起こす。同時にロール方向の



Fig.3 NANBA Run of Naoko TAKAHASHI (Sakaiya Sport)



Fig.4 NANBA Walk of GENBE No.4.

モーターを使用して上体が傾かないようにして状態3で寄せていた体を戻す。その結果、自重によって左前方に倒れこみ、左足が接地する。

「源兵衛5号」の歩行原理は、「源兵衛4号」と同じであるが、重量、重量分布、全高などが異なるので、状態の設定は多少異なることになる。

図2は、「源兵衛4号」の「ナンバ歩き」(約0.7秒間)である。足首関節を使って上体(頭)だけは左右に傾かないように歩く。図2(e)において右足が着地したときにはすでに左足が浮いており、さらに(f)~(m)において転倒力を利用して自然に左足が右足の横を通過して進行方向に着地する。実環境に必要な歩行を姿

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学習することにより自在の速度で歩行する[1]。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へに転ずる。これまで毎秒2cmから毎秒18cmまでの歩行速度を実現した[1]。「ナンバ走り」では、右足が着地したときにはすでに左足が浮いており、転倒力を利用して自然に左足が右足の横を風のように通過して進行方向に着地する。「ナンバ歩き」を人間型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。関節

への負担も軽く、省エネルギーで済む利点もある。

図3は高橋尚子選手の走法であり、図4の「源兵衛4号」の身体操法と似ている。高橋選手は胸を張ってから走っているのではない。身体の重心（丹田）を前方に出して倒れ込みながら同時に足を前脚の形に作るから前脚が着地することにより背筋がのびる（上体が垂直になる）のである。倒れるより脚の方が速ければ、前方に倒れ込んでも上体は後に反り返ることになる。両方のバランスがよくとれている（習熟している）から良い姿勢になっているのである。

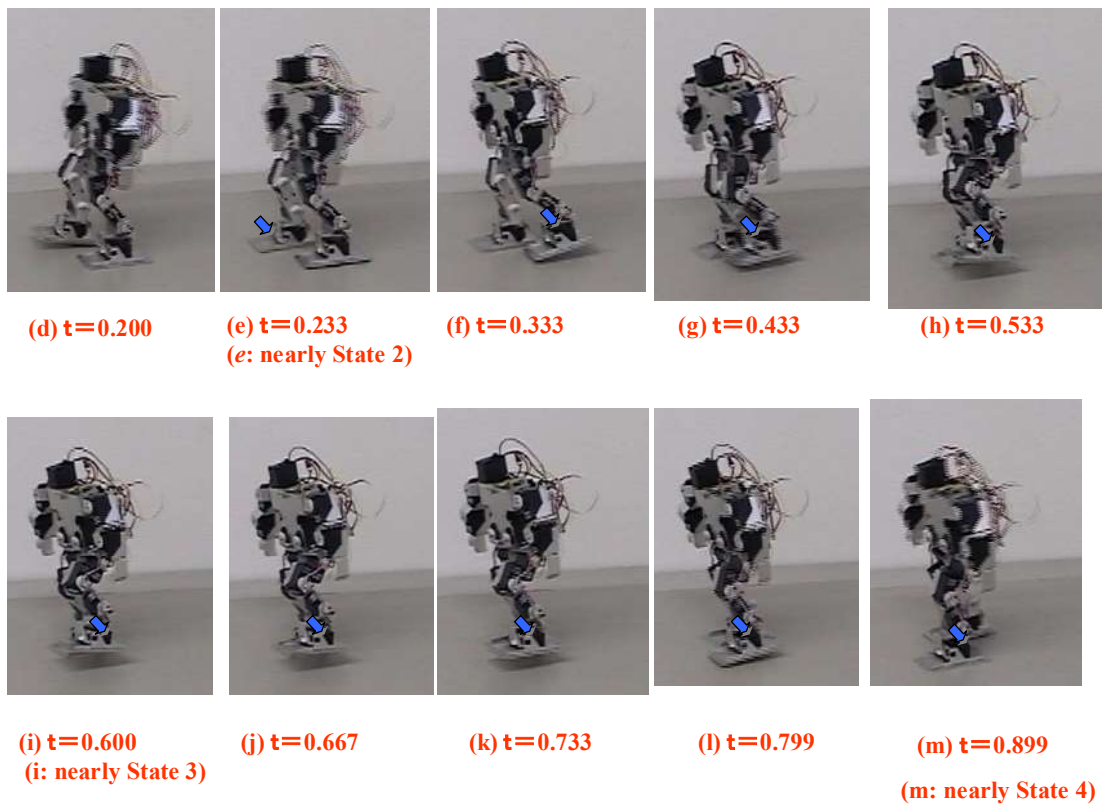


Fig.2 Behavior of self-sustained humanlike robust walking NANBA by humanoid biped robot GENBE No.4 (height: 34 cm, weight 1.2 kg). Walking speed: 7.9 cm/s (reduced walking speed to height 170 cm: 1.4 km/h).

前方に転倒しない範囲でさらに丹田を前方に出して前方へ倒れ込めば、スピードがさらに増すはずであり、疲労も少ない。水鳥の脚である。胸を張って脚を交互に動かすだけでは、いかに速く動かしても（ピッチを速くしても）、前に進まない。特に地面が滑るような場合は、その場で脚をバタバタ

させるだけである。大きく前方に上体が倒れ込み、それ以上に左右交互に繰り返す足のピッチが速いので、自然に姿勢が起きてくる。ピッチが遅くなると前傾をゆるめるか、脚で踏ん張らないと前方に転倒する。逆に、ピッチが速くなるにつれて前傾を大きくするか、脚で地面を強く蹴るかしない

と、後に反り返って滑って転倒する。人間型二足ロボットの歩行・走行の実験から推測できることである。

陸上・短距離走の末続慎吾選手の場合の身体操法も「源兵衛4号」に似ている。末続慎吾の場合は、さらにピッチを速めればスピードが増して姿勢が垂直になってくるはずである。さらにもう一段前傾すればもう一段スピードも増すはずである。ピッチを速める練習が効果的である。大リーグ・イチロー選手の身体操法も、「ナンバ走り」の原理に近く、「捻らない、うねらない、踏ん張らない」という古武術における身体の自律分散制御が見える。詳細は別の機会に述べたい。

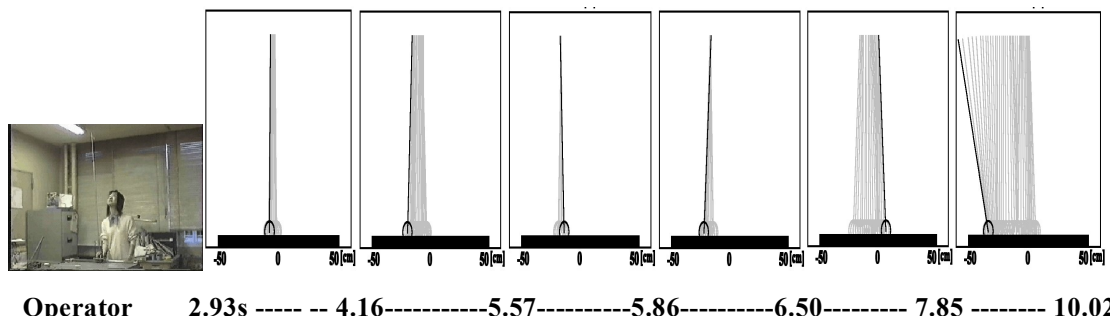
「進みたい方向に倒れ、倒れる方向に足が出るという歩き・走りの原理」は、習熟した人間オペレータの倒立棒の安定化における非線形制御の原理と同じである。西洋式近代スポーツ理論に見られる腕の振りは不要であり、歩きながら・走りながらも手作業がしやすい。走り・歩きにおいて目標軌道計算をしなくて済むので、ヒトにとってもロボットにとってもいろいろなタスクへの展開が見えてくる。筋力を必要とする目標軌道制御をしないで重力エネルギーを利用して身体を移行するので、関節の負担と消費エネルギーが大幅に低減する。

図5は、人間の手による倒立棒の安定化制御の習熟過程である。従来の機械やロボットの制御は、この例の場合、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あるいは目標軌道に近づけようとする。図5はこのような機械制御に似た

人間オペレータ NR の安定化挙動であり、試行開始後約 10 秒後に倒立棒は倒れてしまった。練習を繰り返したが、結局、60 秒間の安定化制御の成功には至らなかった。

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（図5に似た）制御はしない。図6(a)に示すように、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、右と左の方向の切り替えの途中は制御していない。図6(b)のように、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次第に動きが滑らかになり、図6(c)のように倒立棒は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。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[1]、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」、あるいは高橋選手や末続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[1]



Operator 2.93s ----- 4.16-----5.57-----5.86-----6.50----- 7.85 ----- 10.02
Fig.5 Stick pictures of stabilizing behavior of human operator similar to conventional Zero Moment Point (ZMP) control falling down after 10 seconds from start of trial (NR01).

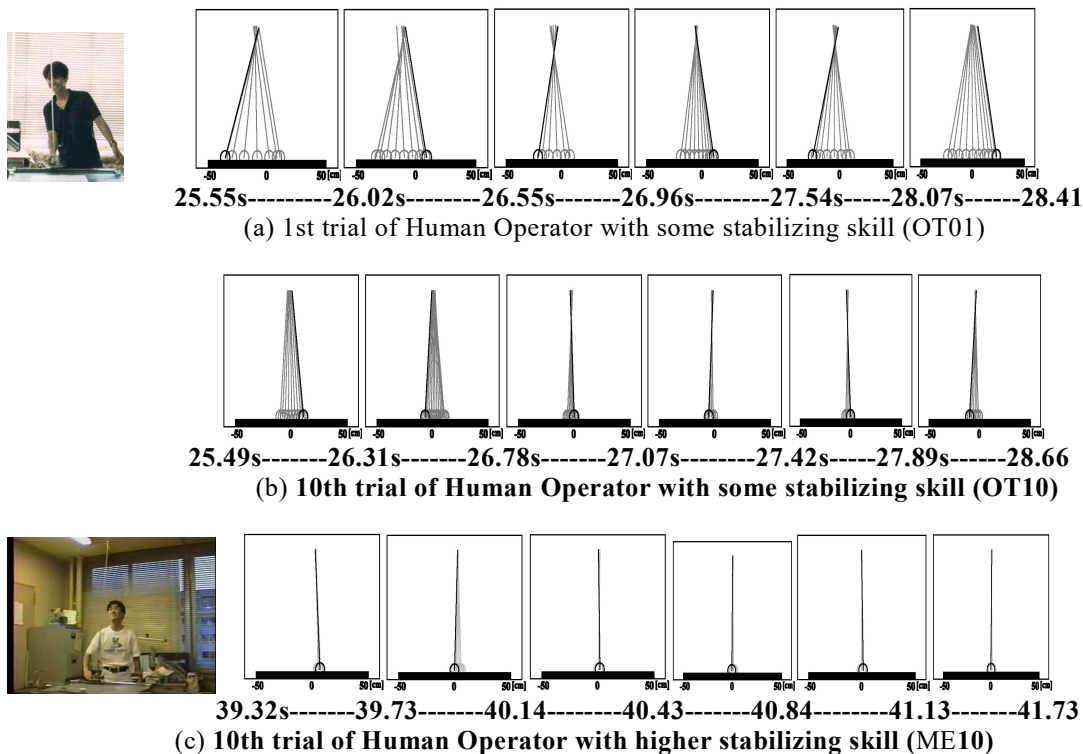


Fig.6 Stick pictures of stabilizing behaviors of human operators showing the mechanism developing from baby walk to Japanese express messenger.

図 7 は、「源兵衛 4 号」の脚部関節角度と歩行ピッチを変えることにより歩行速度を高めた場合の約 0.5 秒間の動きであり、「ナンバ歩き」から「ナンバ走り」になっていく。状態①～④の繰り返しという原理は「ナンバ歩き」と同じである。

3. 人間型二足ロボット「源兵衛」の今後の展開

転倒力を利用した自立型「源兵衛 4 号」の様々な速度での歩き・走り，転倒するときのさまざまな受け身と起き上がり，人間のように自在の方向に瞬時に方向転換する動作，スムーズに楽に椅子に座ったり椅子から立ち上がる動作，素早い階段の昇降動作（階段を駆け上がる），などを自律型「源兵衛 5 号」（図 8）において PerAc (Perception and Action) 的に展開していく。すでに実績のある自律型移動ロボットでの知見を生かして，距離センサーによる障害物回避行動，タッチセンサーによる衝突回避行動，CCD カメラによる赤色探索，高速接近障害物を瞬時に避ける行動などをサ

ブサンクション（包摂）的に包摂構造化して積み上げていき，二足ロボットが次第に多くの能力を獲得していくような開発スタイルを確立する。

現場でロボットを使いながら研究課題を見つけ，それを解決しながら現場の使用者と設計者が協力して少しずつ常に進展していくようなスタイルが重要である。具体的な課題はその時々環境に応じて次々に生まれてくる。複雑な行動が必要になれば，ファジィ・ニューロを使って試行錯誤的学習により獲得した巧みさの技[1]を要素行動として包摂構造的に積み上げていく。ロボットは自分のおかれている刻々の状況だけを判断すれば，状況にふさわしい行動が反射的に発現するのが理想である。

経済産業省の辻本・中桐[2]によると，1998 年度から 2007 年度終了予定の経済産業省ロボット・プロジェクト約 180 億円の国費投入ほか総務省・文部科学省・国土交通省・農林水産省などがロボットのプロジェクトを実施しているが，産業用ロボットを除いて，いわゆるサービス用ロボットの

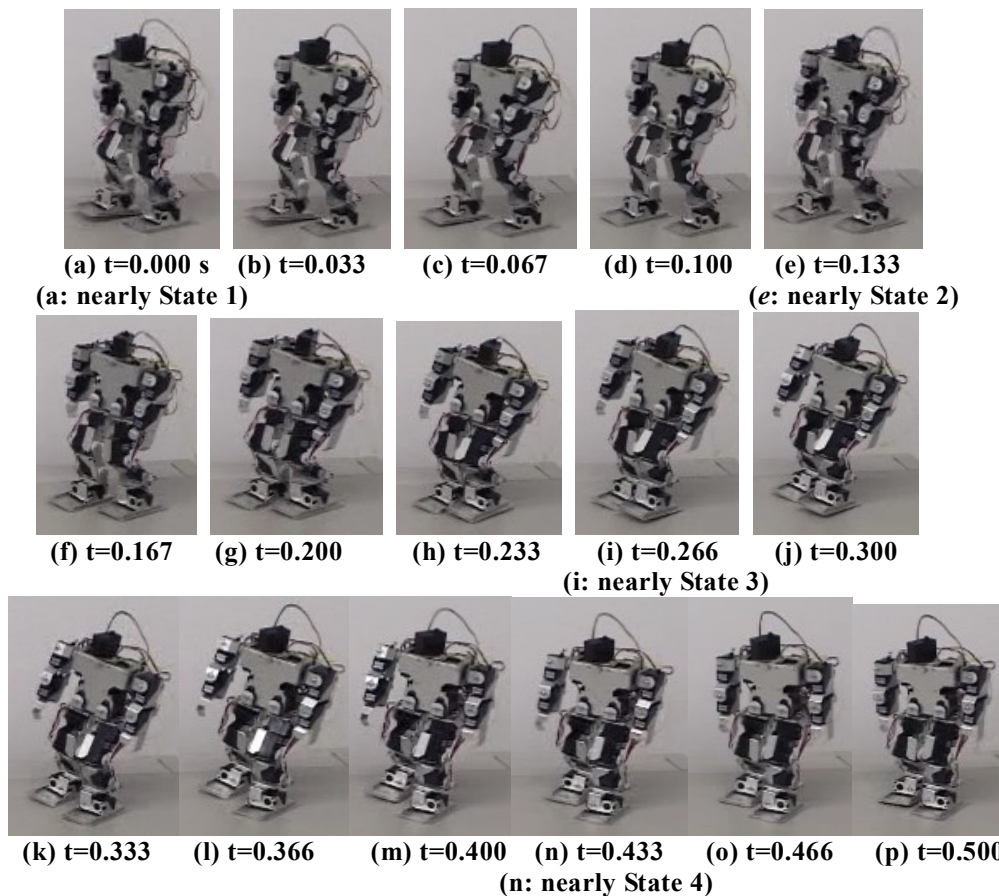


Fig.7 Behavior of self-sustained humanlike robust running NANBA by humanoid biped robot GENBE No.4 (height: 34 cm). Walking speed: 15 cm/s (2.7 km/h: reduced walking speed to height 170 cm).

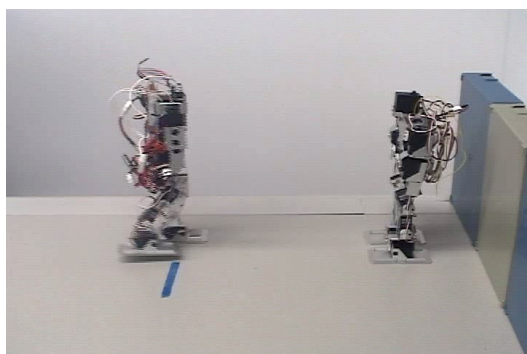


Fig.8 GENBE No.4 (right) & GENBE No.5 (left)

市場はほぼゼロである。さらに、二足歩行のヒューマノイドロボットが脚光を浴びることが多いが、ロボット実用化・ビジネス成立という観点から見れば、その実用化はかなり先になる。2004年度以降、実環境下でのロボット実証実

験までを含む研究開発へ移行し、実用化に向けた取り組みを強化しているが、ロボットの市場創出（製品化・実用化）には至っていない。また、ロボット市場を創出するには、今の技術レベルでも実現できる実用的ロボットの導入実績をとにかくも積み上げること、ロボットの導入はニッチな分野（隙間産業）から徐々に始まると考えるのが自然であり、市場で実需が存在するという事実と製品を実際に導入したユーザーの声が不可欠であること、安価で高機能のロボットが実現すれば爆発的に売れる可能性もあるが、世間でやみくもに高まっている期待やニーズに技術や価格が追いつかず、現状では売れる製品になりにくいと指摘している。

製品を実際に世の中に提示し、ユーザーから評価を受ければ、新しいニーズも喚起され、次段階のシステム開発につながってロボットのさ

らなる高度化にも資する可能性があるという指摘は極めて重要である。

4. 結論

現実世界で本当に知的に動くロボットには生き物のような適応性・柔軟性が求められる。従来の ZMP やモデルベースに基づく知能ロボットは、障害物が突然現れたような場合に立ち往生してしまう。生き物・ヒトの世界で働くロボットは、生き物・ヒトの巧みさの発達に学ぶしかない。実環境で遭遇した課題を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スタイルを適用し、直立二足歩行ロボット「源兵衛」で生き物・ヒトの巧みさに学ぶ歩行を実現した。ロボットの転倒力により地面との間に形成されるリミットサイクル・アトラクターを利用した歩行は、関節自由度数、筐体、歩行速度などが異なっても、姿勢制御無しで、歩行の開始、停止、旋回も含めてきわめてロバスト・柔軟である。習熟すれば飛脚「源兵衛」のような速い走りや「薄氷を踏むが如く」のような柔軟で自在な歩行への進展が見えてくる。21 世紀の知能ロボットは、設計者の知識にあるのではなく、自然・生き物・ヒトの巧みさ、イチロー選手の場の哲学に見える。

「我思う故に我あり」から「我あり故に我思う」への質の転換しかない。

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・池田の諸君、および17年度4年生・須永・桃井・原田・清水の諸君のご助功に感謝する。高橋尚子選手の写真は(有)さかいやスポーツ・酒井孝典氏に提供いただいた。厚くお礼申し上げます。また、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] 川副嘉彦, 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), 埼玉工業大学工学部紀要, 第15号, (2005), pp.11-23.
- [2] 辻本崇紀・中桐裕子, ロボットブームの終わりとロボットビジネスの始まり, 日本ロボット学会誌, **23-5**, (2005), 513-516.