

# ヒューマノイドロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの発現と身体操法のメカニズム

## Emergence of NANBA Walking by Humanoid Robot GENBE with Distributed Control of Physical Body in a Martial Art

川副嘉彦 (埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Okabe, Saitama

It seems that the emergence of intelligence 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 intelligent robot. This paper realized the simple self-sustained humanlike robust walking NANBA of humanoid biped robot GENBE based on distributed control of physical body in a martial art without ZMP control, which uses only small active power with simple chaotic limit cycle using gravity, further developing into autonomous walking.

**Key Words:** Humanoid Biped Robot, Dynamic Walking, Autonomous Robot, Limit Cycle, Chaos, Human's Dexterity, Inverted Pendulum, Martial Art, Emergence, Complex System

### 1. 研究の背景と目的

「スポーツ選手の頂点は、残酷なほど若い時にやってくる。酷使して、あちこち壊れかかった体を残して現役を退いた時には、彼らは後進の指導とかいうもの以外、スポーツに対してもう何をしたらいいかわからない。(中略) 私が誉めそやしたい技術は、もっと別なところで、おそらくは黙々と生きている技術である。年齢の積み重なりと強く関わり、それ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。こういう技術は、組織的にはほとんど利用することができない。利用するには、いささか手間がかかり過ぎる。待つ時間が長過ぎる。けれども、ほんとうに上達する技とは、そうした在り方しか実はしていないものではないだろうか。」という近代スポーツに対する鋭い指摘がある<sup>(1)(2)</sup>。

一方、自然・生き物・ヒトと共生して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が、現在のロボットの延長線上では実現しそうなことが次第に認識され始めた<sup>(3)-(17)</sup>。二足ロボットとして知られている ASIMO はきわめて高度な機械であるが従来の制御技術を極めた設計者による遠隔操縦であって自律できず、QRIO は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。産官学の大プロジェクトによる HRP-2 もゴキブリやフェレットの知的な動きにはかなわない。これらの代表的な二足ロボットは、「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おり、近代スポーツの動きの基本に似ている。しかし、このように重力に逆らう歩行は推進力のブレーキとなり、エネルギー的にも無駄が多く、関節の負担も大きく、複雑精妙な制御を必要とし、外乱に弱い<sup>(17)</sup>。

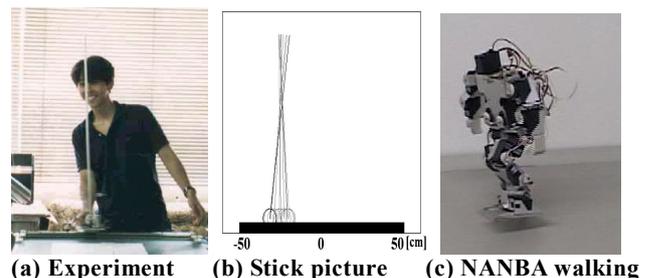
古武術は命がけの対決を通じて培った適応性のある柔軟な動作が基本であり、「捻らない、うねらない、踏ん張らない」<sup>(17)</sup>というのが特長である。本論文では、前報<sup>(17)</sup>で実現した古の足運びに学ぶ「足の裏で踏ん張らない、転倒力を利用する、着地位置は気にしない」という従来とは逆の発想を基本とした自立型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟な歩行・走行の実験結果を考察し、「捻らない、うねらない、踏ん張らない」という身体操法への質的転換の指針を探る。

### 2. 人間型二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」のメカニズム

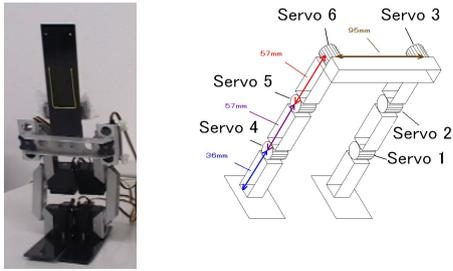
ギブソンによると、行動は「姿勢」に依存しており、立位のような平衡姿勢ですら多数の微細な修正の動きからな

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。図 1 (a)(b)は、ヒトの手により倒立棒を倒さないように安定化する実験である。従来の機械制御が絶えず釣り合い位置(垂直)に近づけようとするのに対して、ヒトは練習を重ねると、倒立棒が倒れない範囲の有限振幅の制御をする。倒立棒はほとんど垂直には立っておらず、常にゆれている。これは不安定な倒立棒系と非線形な人間系の相互作用により経験的に獲得されたリミットサイクル・アトラクタであり、外部から一時的な外乱があっても自律的に安定な振動状態にもどる。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運動の変化(適応)が起こるのである<sup>(18)-(22)</sup>。習熟していくと動きが滑らかになって揺れが目立たなくなり、無秩序さの程度が低減し、運動の自由度が増大する。これはカオス的リミットサイクルであり、不規則に見えるが規則性をもつ<sup>(18)-(21)</sup>。図 1 (c)は古の身体操法に学ぶ「源兵衛」のナンバ歩き<sup>(17)</sup>である。

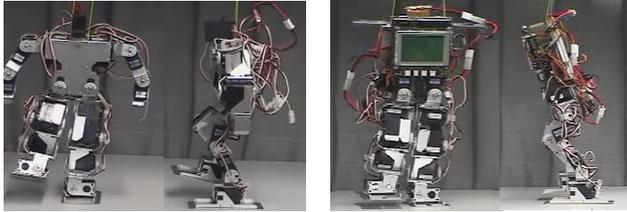
古の足運びに見られるナンバ歩きの基本は、前傾姿勢を取り、(1) 状態 1 : 身体を右に傾けて左脚を宙に浮いた形に作る。(2) 状態 2 : 左脚を前脚の形に作ると、左前方に倒れていき、左足が接地する。(3) 状態 3 : 身体を左に傾けて右脚を宙に浮いた形に作る。(4) 状態 4 : 右脚を前脚の形に作ると、右前方に倒れていき、右足が接地する、という四つの姿勢からなり、重力による転倒力により状態から状態へ移行し、地面との間にシンプルなりミットサイクルアトラクタを形成する。姿勢の各状態は静バランス的には不安定だから転倒する(図 2)。腕は振らない。実環境に必要な歩行を姿勢制御無しで設計者の介助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。「倒れる前に足を出す」である<sup>(17)</sup>。図 2(a)は「源兵衛 2



(a) Experiment (b) Stick picture (c) NANBA walking  
Fig.1 Stabilizing behavior of a human and a robot.



(a) GENBE-No.2 with 6 freedom legs



(b) GENBE-No.4(Left) & No.5(Right) with 10 freedom legs  
Fig.2 Humanoid Biped Robots GENBE utilizing instability.

号」であり，脚部 6 自由度，全高 30 cm，重量 550g，図 2(b)は，「源兵衛 4 号」と「源兵衛 5 号」であり，両者の脚部は 10 自由度，サーボ KRS-7841ICS とドライブを備えた KHR-1（近藤科学製）を使用した。「源兵衛 4 号」は，全高 34 cm，重量 1.2 kg であり，サーボの回転速度は 8 段階で設定できる。「源兵衛 5 号」は，全高 35 cm，重量 1.1kg，32 ビット CPU：MC68332ACF25 とセンサを実装した自律型であり，サーボの角速度は状態間の角度差の分割数増減により可変にした<sup>(17)</sup>。図 3，図 4，図 5 は，それぞれ「源兵衛 2 号」，「源兵衛 4 号」，「源兵衛 5 号」の 4 つの基本状態を示す。左は正面図（手前に前進），右は側面図（左に進行）である。「源兵衛 4 号」は教示により学習し，その動きを自律型「源兵衛 5 号」により展開する。

「源兵衛 2 号」(図 3)の歩行は，以下の 4 つの状態が基本であり，これらを繰り返すと転倒力を利用して自然に歩行が発現する。(1) 状態 1：ロール方向のモーターを使用して体を左に傾け，同時にピッチ方向のモーターを使用して体を前に傾けることにより，右足が上がる。(2) 状態 2：ピッチ方向のモーターを使用して右足を曲げ，ロール方向のモーターを使用して体を垂直に戻す。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：ロール方向のモーターを使用して体を右に傾け，同時にピッチ方向のモーターを使用して体を前に傾けることにより，左足が上がる。(4) 状態 4：ピッチ方向のモーターを使用して左足を曲げ，ロール方向のモーターを使用して体を垂直に戻す。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 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部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，上部を少し前に傾ける。(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，上部をやや起こす。同時にロール方向のモーターを使用して上部が傾かないようにして状態 1 で寄せていた体に戻す。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部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，上部を少し前に傾ける。(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，上部をやや起こす。同時にロール方向のモーターを使用して上部が傾かないようにして状態 3 で寄せていた体に戻す。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。

### 3. 人間型二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」の身体操法とロバスト性

図 6 は，「ナンバ歩き」に学ぶ「源兵衛 2 号」(脚部 6 自由度，身長 30 cm)の歩行 (10cm/s，人間の身長なら 2km/h に相当)である。図 7，図 8 はそれぞれ，「源兵衛 4 号」，「源兵衛 5 号」(脚部 10 自由度)の歩行である。歩行速度が増すと「ナンバ歩き」になる。図 6 の「源兵衛 2 号」は足を高く上げないので写真では動きが見にくい，図 6，図 7，図 8 は似た動きを示す。図 7 の(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というナンバ歩きの特長が見える。図 8 の(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，左足が右足の横を通過して(n)において進行方向に着地する。

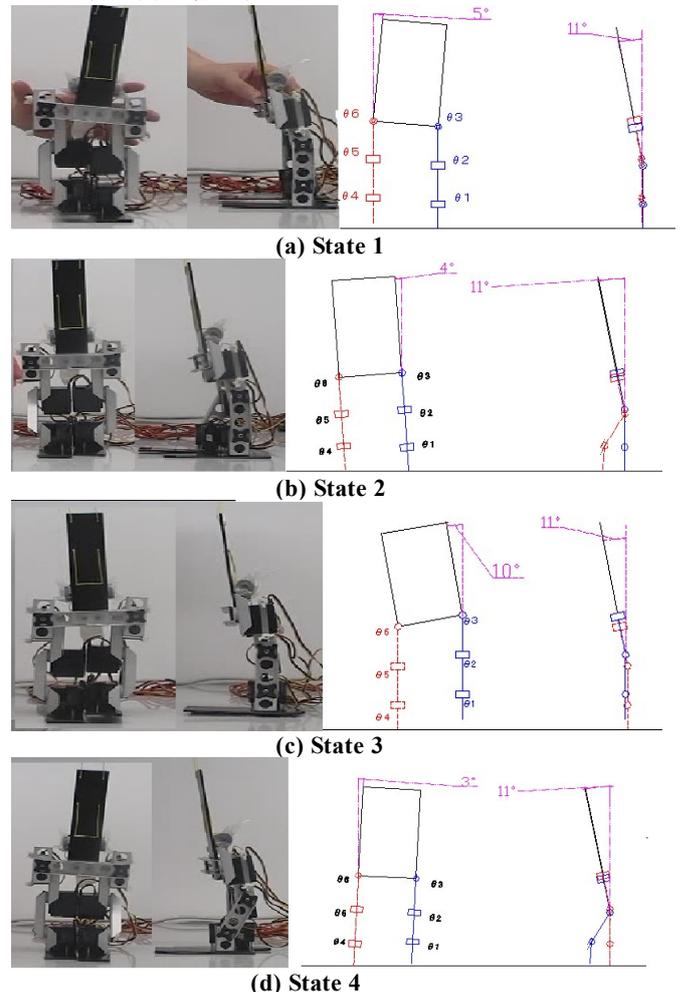


Fig.3 4 States of GENBE-No.2 with 6 freedom legs

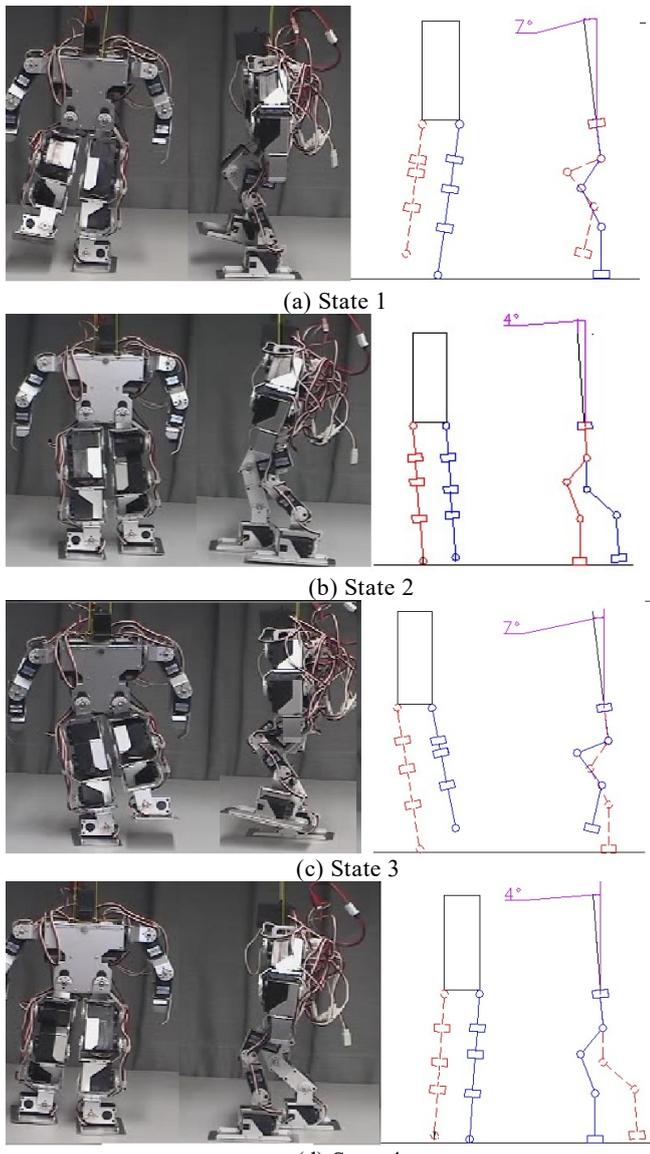


Fig.4 4 States of GENBE-No.4 with 10 freedom legs

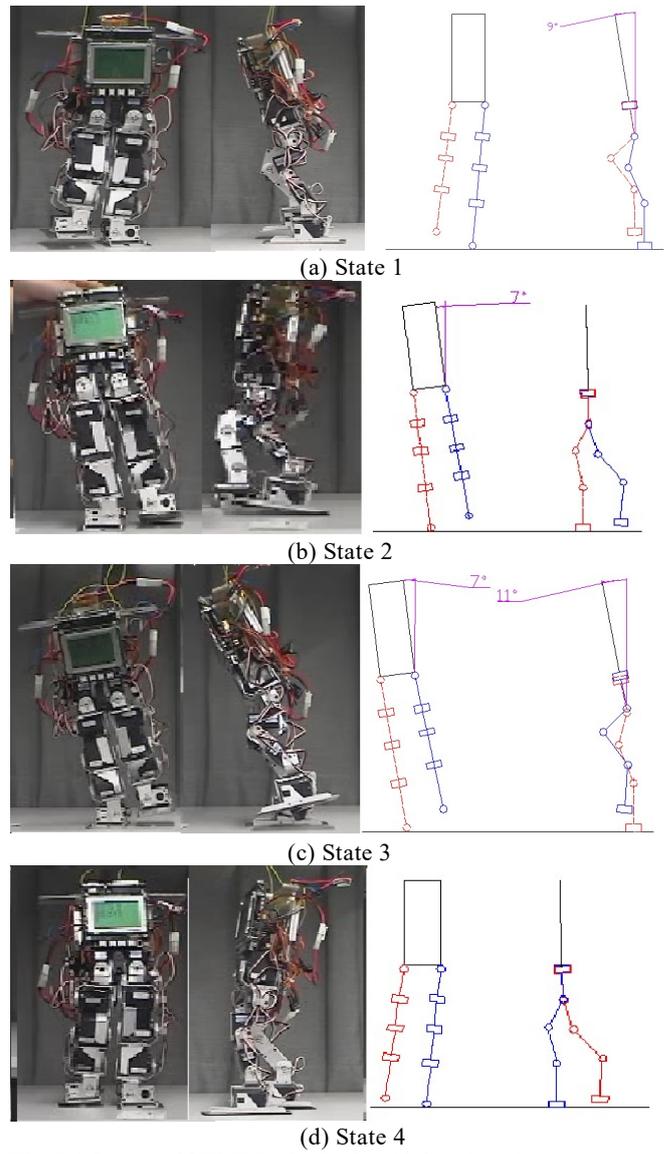


Fig.5 4 States of GENBE-No.5 with 10 freedom legs

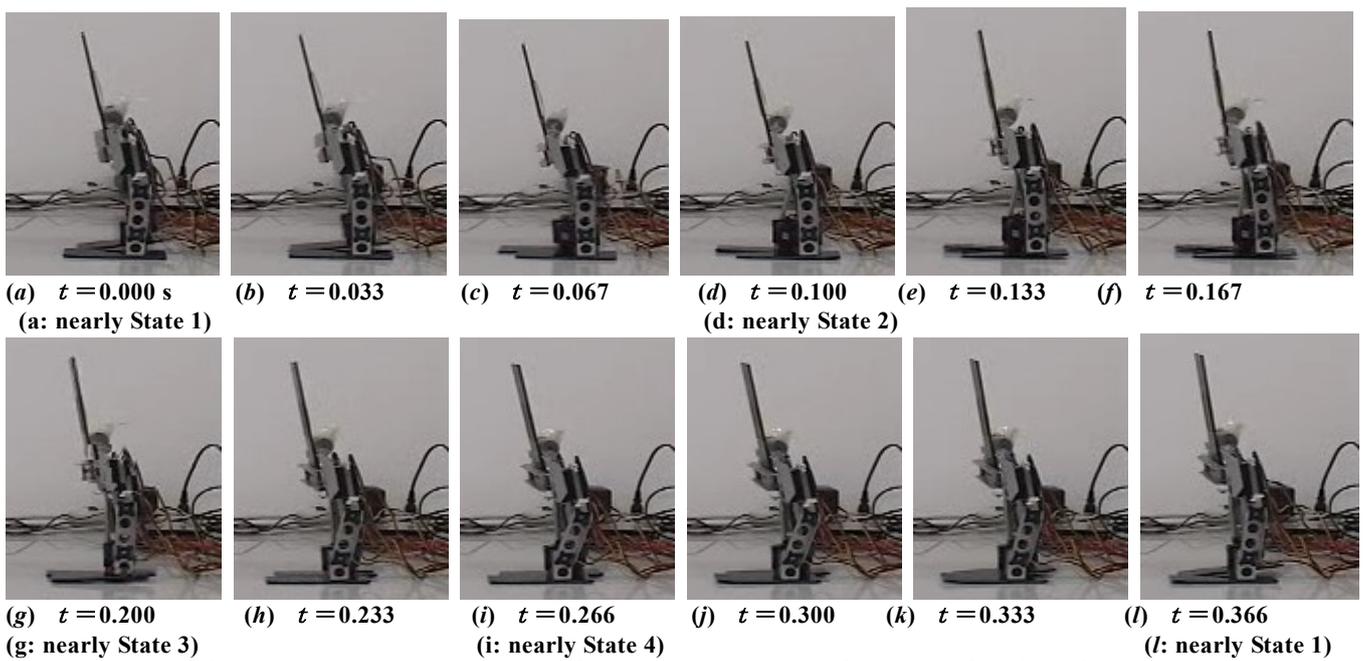
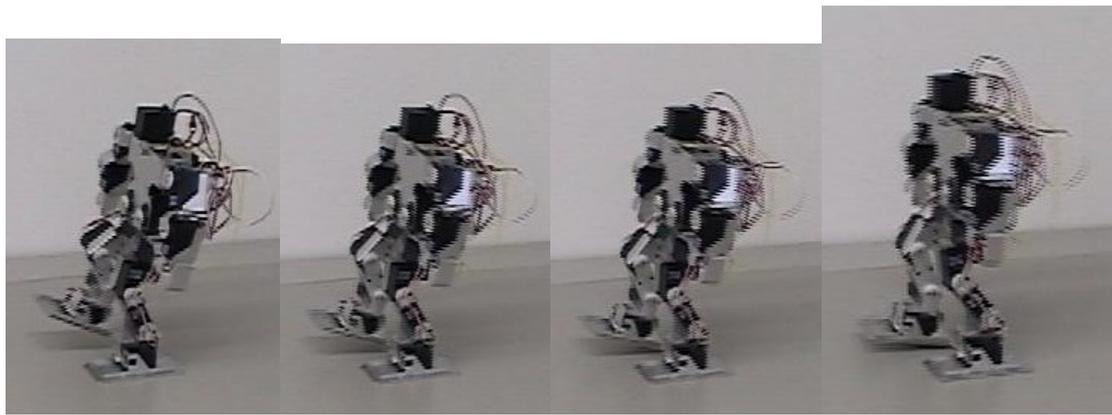
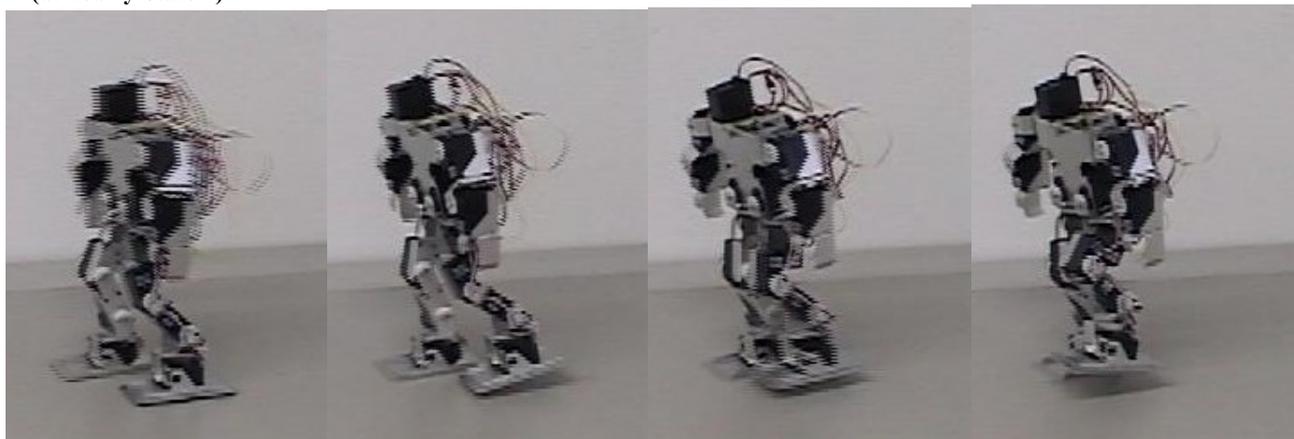


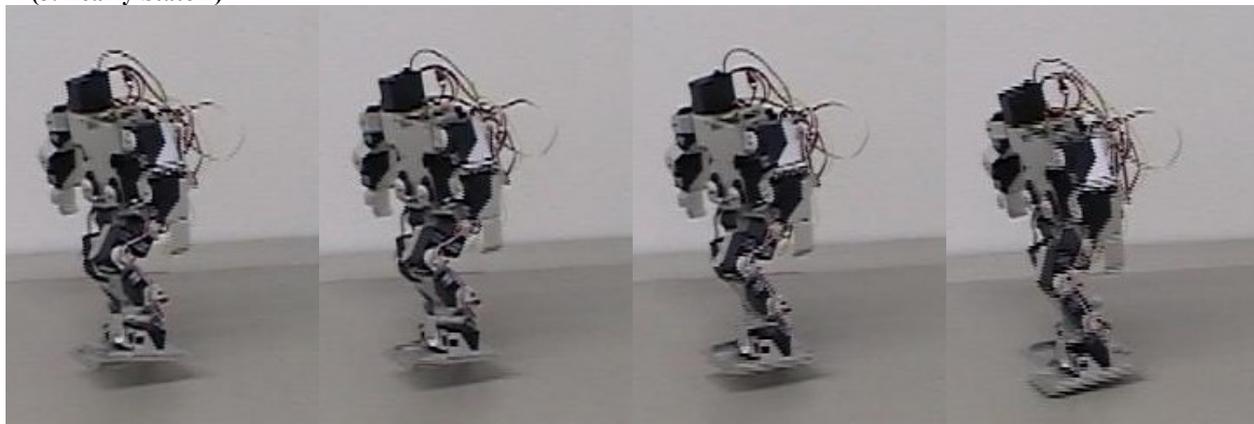
Fig.6 Emergence of simple robust walking NANBA of humanoid biped robot GENBE No.2 (height: 30 cm, weight: 550 g).  
Walking speed: 10 cm/s (Reduced walking speed to height 170 cm: 2 km/h)



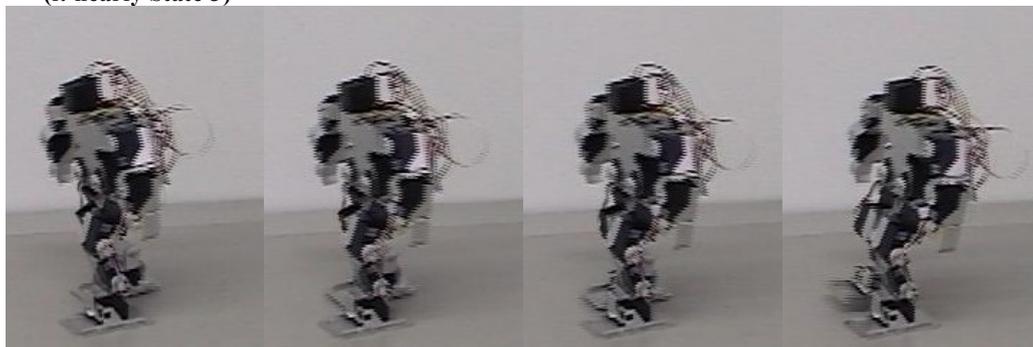
(a)  $t = 0.000$  s (a: nearly State 1) (b)  $t = 0.067$  (c)  $t = 0.133$  (d)  $t = 0.200$



(e)  $t = 0.233$  (e: nearly State 2) (f)  $t = 0.333$  (g)  $t = 0.433$  (h)  $t = 0.533$

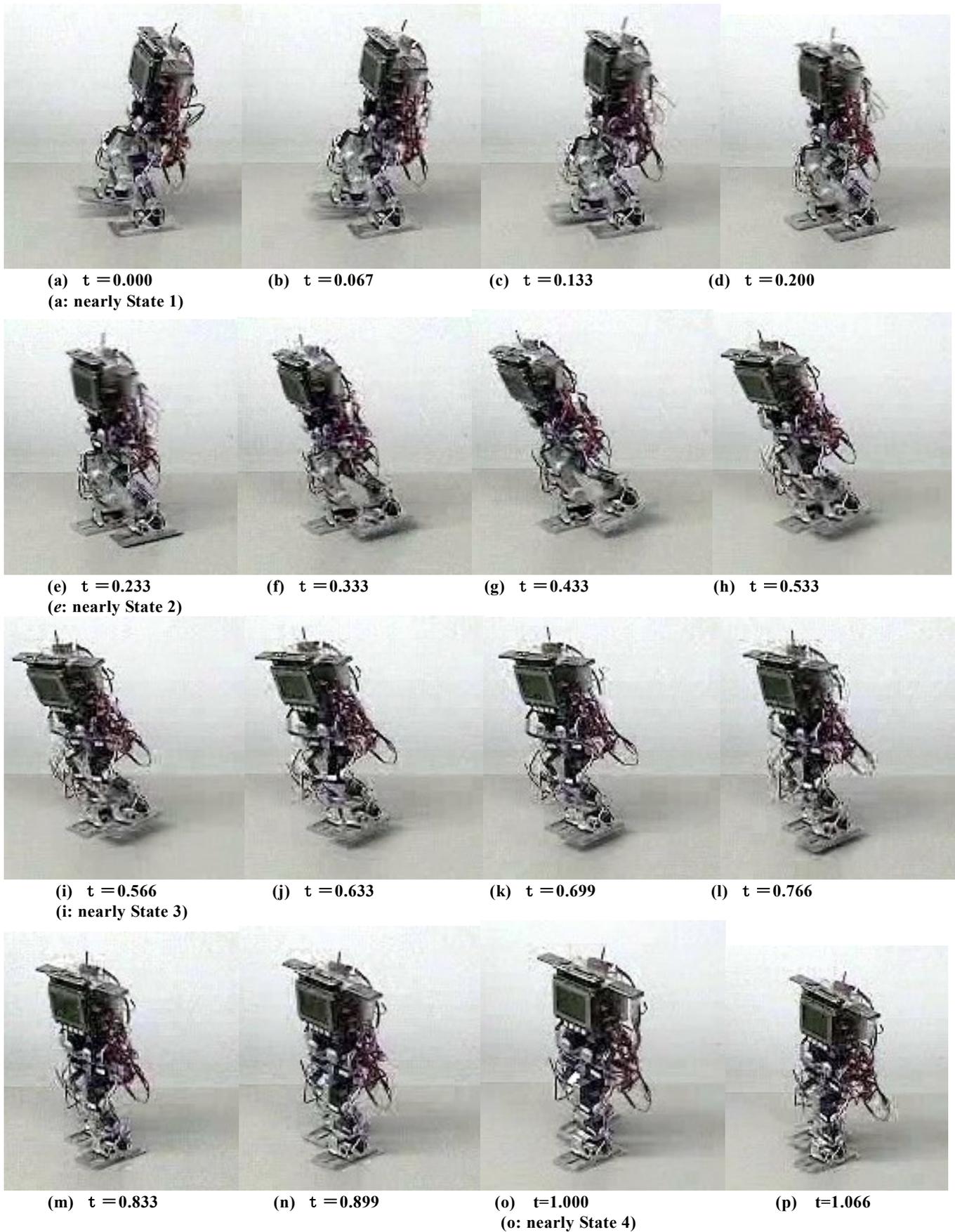


(i)  $t = 0.600$  (i: nearly State 3) (j)  $t = 0.667$  (k)  $t = 0.733$  (l)  $t = 0.799$

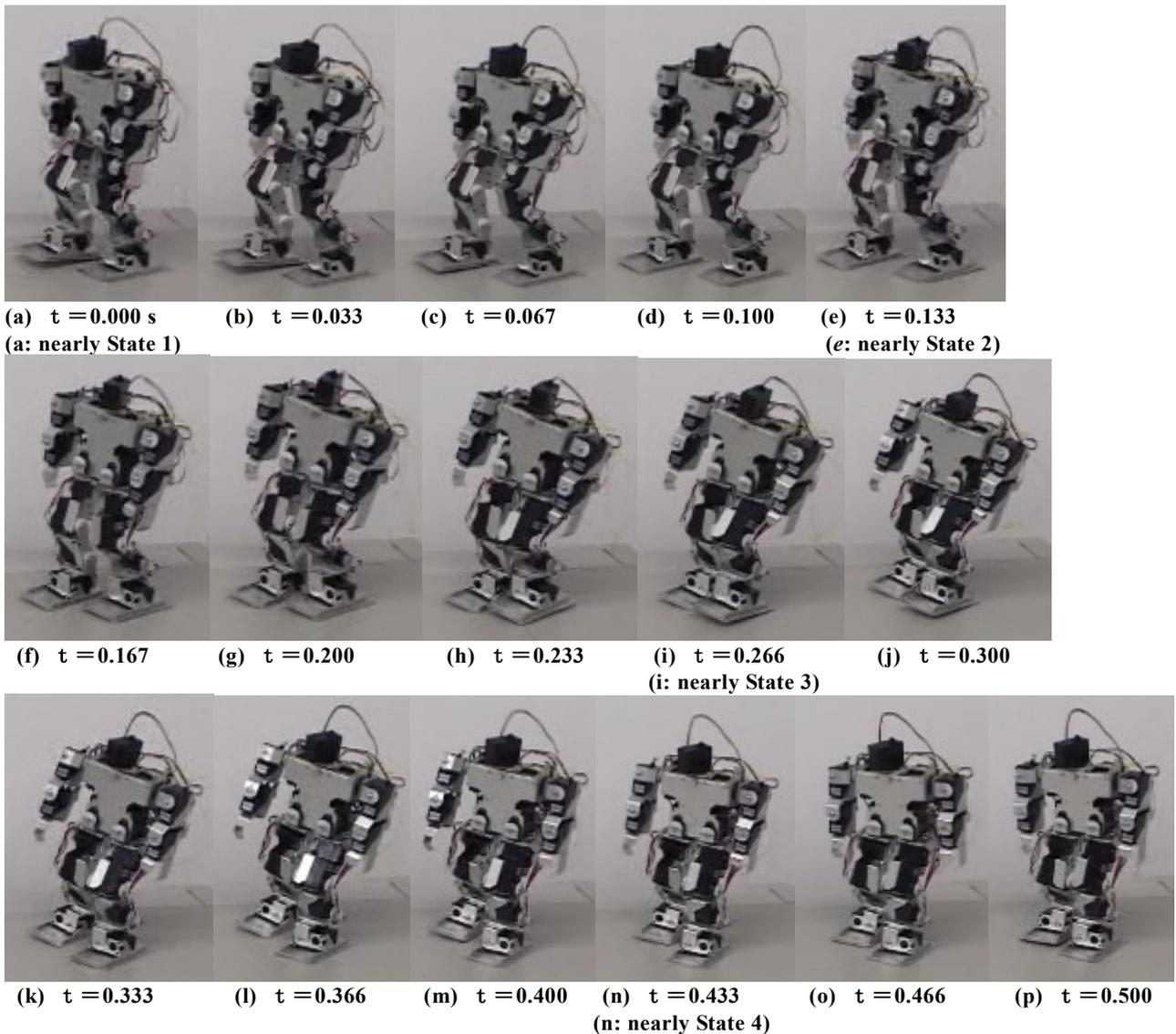


(m)  $t = 0.899$  (m: nearly State 4) (n)  $t = 0.966$  (o)  $t = 1.032$  (p)  $t = 1.099$

**Fig.7 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).**



**Fig.8 Behavior of self-sustained humanlike robust walking NANBA by humanoid biped robot GENBE No.5 ( height: 35 cm, weight 1.1 kg). Walking speed: 6.5 cm/s (Reduced walking speed to height 170 cm: 1.14 km/h).**



**Fig.9 Behavior of self-sustained humanlike robust running NANBA by humanoid biped robot GENBE No.4 (height: 34 cm, weight 1.2 kg). Walking speed: 15 cm/s (reduced walking speed to height 170 cm: 2.7 km/h).**

図9は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であり、ナンバ走りになっていく。

#### 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。

おわりに、作図にご助力いただいた埼玉工大・平成16年度4年生 南雲貴志・伊能新一・鈴木一彰および平成17年度 須永智文・原田一臣・桃井孝昌の諸君に感謝する。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) 甲野善紀・前田英樹, 剣の思想, 青土社, (2001)
- (2) 川副嘉彦, D&D2003, CD-ROM論文集, pp.1-6, (2003).
- (3) Brooks, R., IEEE J. Robotics and Automation, 2-1,14 (1986).
- (4) Brooks, R., Artificial Intelligence, 47, (1991), 139 -159.
- (5) Gomi, T, Evolutionary Robotics ER'98, 1998, 487-519.
- (6) 川副嘉彦, 2002年度年次大会講論集, 171-172, (2002).
- (7) 川副嘉彦, 2004年度年次大会講論集, 169-170, (2004).
- (8) 梅谷陽二, 日本ロボット学会誌, 20-6, (2002), 566- 567.
- (9) 有本卓, 日本ロボット学会誌, 20-6,(2002), 569-570.
- (10) 広瀬茂男, 日本ロボット学会誌, 21-2, (2003), 138-140.
- (11) 國吉康夫, 計測と制御, 42-6, (2003), pp.497-503.
- (12) 井上博允, 日本ロボット学会誌, 20-5(2004), 464- 469.
- (13) 井上博允, 日本ロボット学会誌, 22-1,(2004), pp.2-5.
- (14) 比留川博久, 日本ロボット学会誌, 22-1,(2004), pp.6-9.
- (15) 星野力,情報処理学会誌「情報処理」, 41-3, (2000)
- (16) 室山哲也, 日本ロボット学会誌, 22-7, (2004), 853-855.
- (17) 川副嘉彦ほか, 第9回 MOVIC2005 講論集, (2005.8)
- (18) Kawazoe, 1st International MOVIC, (1992), 930 -935.
- (19) Kawazoe, J.Robotics & Mechatronics, 13-1 (2001),23-29.
- (20) Kawazoe, 7th Int. MOVIC'04, CD-ROM, (2004), 1-10.
- (21) 川副嘉彦ほか, D&D2005, CD-ROM論文集,(2005),1-6,
- (22) 多賀敏太郎,日本ロボット学会誌, 15- 5, (1997), 680- 683.