

不安定を利用する非線形制御による 人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏自在の身体操法

Emergence of JIZAI Movement of Humanoid Biped Robot GENBE Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art Utilizing Instability

正 川副嘉彦(埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama

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. This paper proposed the approach for realization of a real intelligent robot. We call this Human-Robotics, where robots and engineers should learn and develop in collaboration with each other in the real world on the basis of the dexterity of nature, life and human. We showed in this paper as the case studies the humanlike robust NANBA walking & running & instantaneous turn of humanoid biped robot GENBE based on distributed control of physical body in a martial art, which uses only small active power with simple chaotic limit cycle utilizing instability. Furthermore, the simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability was shown. Instability makes the natural movement and can be applied to walking of a physically handicapped person, rehabilitation, sports, and so on.

Key Words: Robotics, Human-Robotics, Humanoid Biped Robot, Martial Art, Limit Cycle, Nonlinear Control, Dynamic Walking, Autonomous Shock Avoidance, Falling Down, Instantaneous Rising, Emergence, Complex System

1. 研究の背景と目的

ナンバといわれる身体操法が、最近、話題になっており、現代人は動きに無駄が多く、現代人の身体の使い方の問題点が指摘されている。

「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。」という鋭い指摘がある[1]。

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」というのが特長である。

本研究では、人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟な歩行・走行・方向転換、さらに転倒時の衝撃回避を紹介し[2][3]、重力(不安定)を利用する「捻らない、うねらない、踏ん張らない」という身体に負担の少ない俊敏自在の身体操法への質的転換の指針を探り、障害者の歩行やリハビリ、ジョギングやテニスなどのスポーツにおける身体操法などへの応用の可能性を示す。「源兵衛」は江戸・仙台間を1日で走ったと言われる江戸時代の飛脚にちなんで名づけた。ロボットの手本である「動物」は動く物、「働く」は人が動くこと、「動く」は重力がヒントである。

2. 人間型二足ロボット「源兵衛」の捻らない・うねらない・踏ん張らない身体操法と自在の走り

ホンダのASIMO、ソニーのQRIO、産官学のHRP-2などに代表される二足歩行ロボットは、従来の制御技術を極めた高度な機械であるが、「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、筋力トレーニングが必須の近代スポーツの動きに似ている。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、予想外の外乱に弱い[1]-[3]。高精度なZMP操作の研究も精力的になされているが、俊敏・柔軟な動きが求められる実環境においては精密な測定と計算に頼るZMP制御の限界はもはや明かである。既存のヒューマノイドで実現されていないのは、全身を駆使して素早く巧みな運動を多様な姿勢や環境接触と予測困難な外乱やモデル化誤差のもとでロバストに達成することだと言われる。現代人だけではなく、最先端と言われる二足歩行ロボットは動きに無駄が多く、ロボットの身体の使い方は間違っているということになる。

本研究のナンバと称する歩きの基本は、最もシンプルな源兵衛2号(Fig.1, 脚部6自由度, 身長30cm)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。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して歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足がでることにより不安定(重力による転倒力)を利用して自然に前進する。不安定な形が動きをつくり、動きが地面によって拘束されることにより、シンプルなりミット

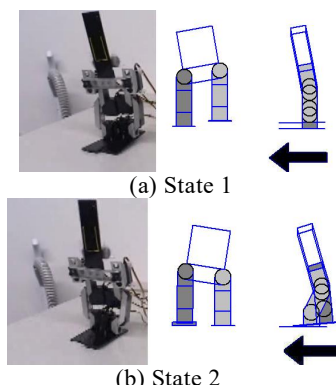


Fig.1 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.2 with 6 freedom legs

サイクルが形成される．リミットサイクルはロバストである．

Fig.2 は、「源兵衛 4 号」(脚部 10 自由度，身長 34 cm)のナンバ歩き[1] [2]である．足首関節を使って上体(頭)が左右に傾かないように歩く．Fig.3(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．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．これまで毎秒 2cm から毎秒 18cm (1 秒間に 6 歩) までの歩行速度を実現している．ナンバ歩

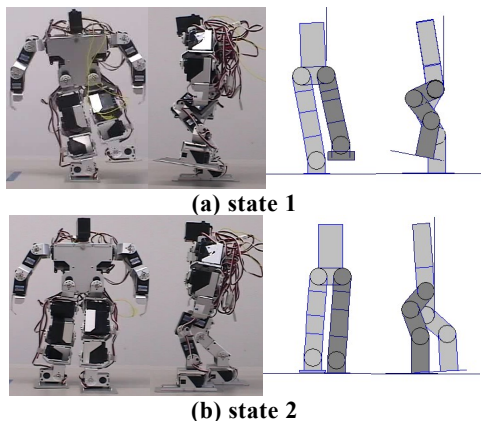


Fig.2 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.4 with 10 freedom legs

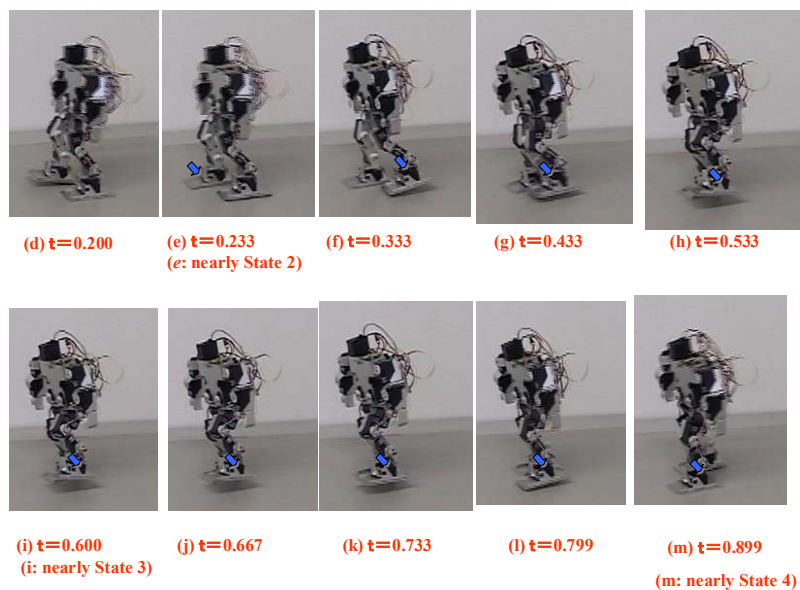


Fig.3 Emergence of simple self-sustained humanlike robust walking NANBA of humanoid biped robot GENBE No.4. Height: 34 cm,

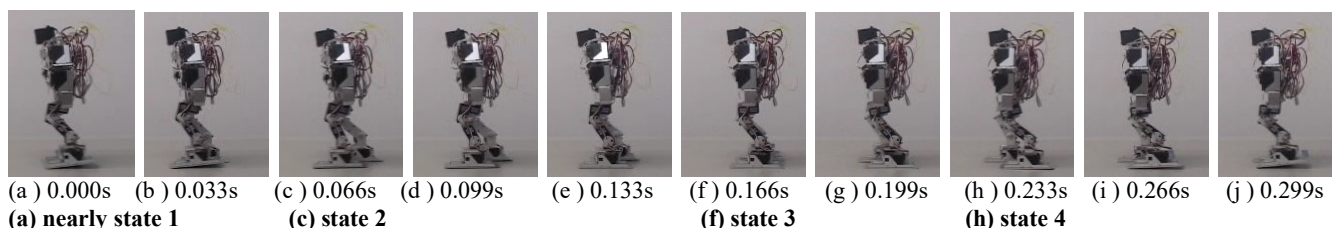


Fig.5 Emergence of simple self-sustained humanlike robust running NANBA of humanoid biped robot GENBE No.4. Height: 34 cm, running speed: 18 cm/s (6 steps/s).

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．

Fig.4 の高橋尚子選手の走法は胸を張ってから走っているのではない．大きく前方に上体が倒れ込む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ないと前方に転倒する．逆に，ピッチが速くなるとつれて前傾を大きくしないと反り返って滑って後に転倒する．腕を振ったり，足で地面を蹴る必要がない．動きを外から見た(フォーム)だけでは体の内の関節の動きはわからないことに注意すべきである．Fig.5 は，速い走り (18cm/s, 「ナンバ・ダッシュ」) であり，約 0.3 秒間を表示している．状態図と比べて脚があまり上がっていない．Fig.6 は，横軸に歩行のピッチ速度(歩数/秒)を取って 4 種類の歩行・走行速度をプロットしたものである．4 種類の歩行・走行の状態図はほぼ同じ

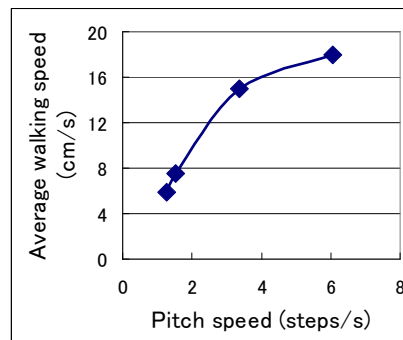


Fig.6 Measured average walking speed vs. pitch speed.

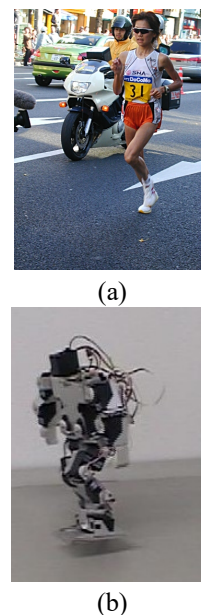


Fig.4 NANBA Run

である。ピッチ速度が上がるにつれて、歩行・走行速度もほぼ比例的に上がるが、ピッチ速度が 6 steps/s (歩行速度 18 cm/s) で走行速度が伸びなくなる。これは、速いサーボ速度レベル speed 0,1,2 ではトルク不足により、設定した時間内に設定した関節角度まで到達しない(足を上げて前足の形を作りきれない状態で左右の足を切り替える)ためである。状態図の関節角度まで至らないまま、次の動作に移っている。高速ビデオ画像解析による複歩の正確な測定時間は 0.276 秒 (1 歩 0.138 秒) とかなり速いが、Fig.6 のようにサーボのトルク限界がなければ重力を利用してもっと高速の走りができることを意味している。また、高速走行のプログラムで与えた姿勢通りにならなくても十分速い速度で走行し、極めてロバストである。

3. 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までのロバスト性のメカニズム

Fig.7 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法では目標値あるいは目標軌道に近づけようとする。図 7 はこのような機械制御に似た人間オペレータ NR の安定化挙動の例であり、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

返したが、結局、人間オペレータ NR は 60 秒間の安定化制御の成功には至らなかった。しかし、安定化制御実験における多くの人間オペレータの習熟過程を解析すると、Fig. 8(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。(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[19]。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、(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」、あるいは陸上競技の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[1][2]。

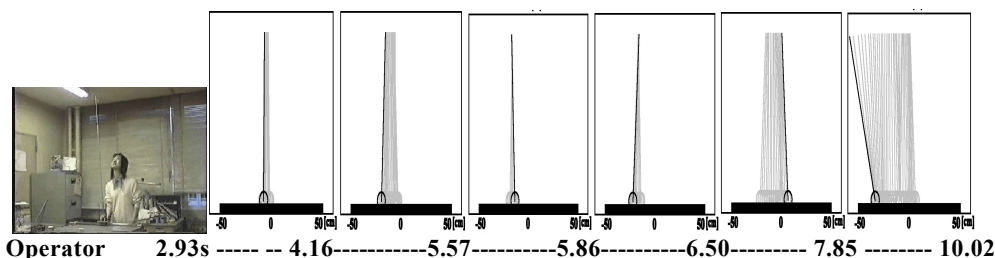
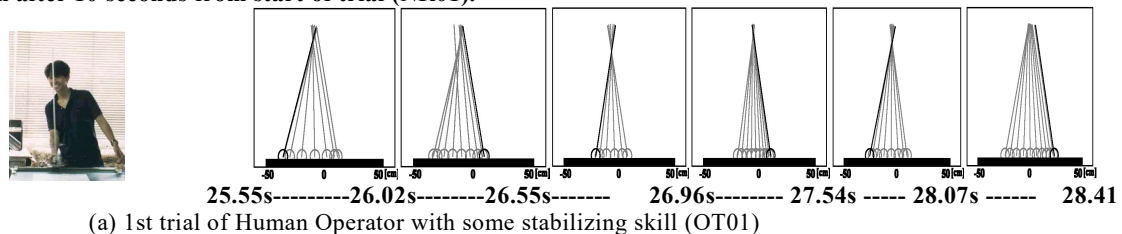
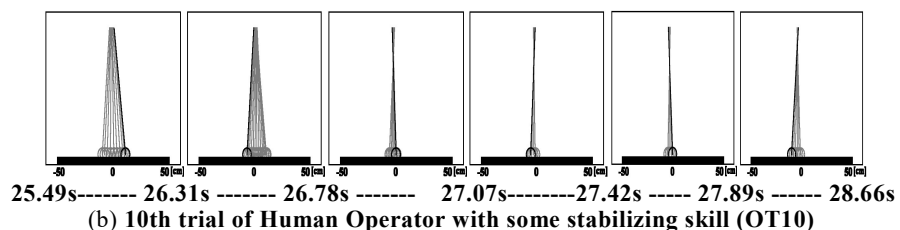


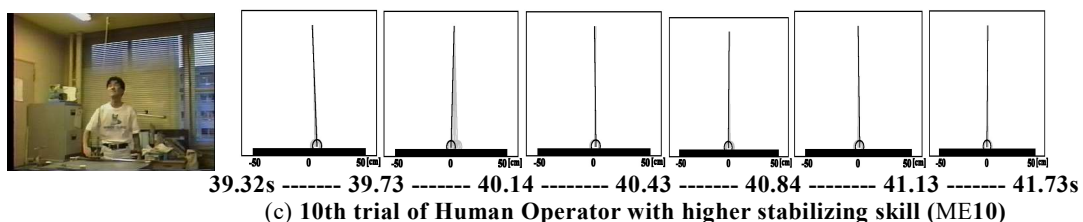
Fig.7 Stick pictures of stabilizing behavior of human operator similar to conventional Zero Moment Point (ZMP) control falling down after 10 seconds from start of trial (NR01).



(a) 1st trial of Human Operator with some stabilizing skill (OT01)



(b) 10th trial of Human Operator with some stabilizing skill (OT10)



(c) 10th trial of Human Operator with higher stabilizing skill (ME10)

Fig.8 Stick pictures of stabilizing behaviors of human operators showing the mechanism developing from baby walk to Japanese express messenger.

4. 二足ロボット源兵衛の瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」の発現

転倒力による不安定と状態の遷移(切換)を利用したナンバ的な動きにより、一瞬でその場で方向転換する俊敏な

動き(ナンバ・ターンと呼ぶ)の発現を試みた。

Fig.9 は、不安定を利用する瞬間的な方向転換の例であり、Fig.10 に示すように、左脚を前に出して前傾で左脚に重心を乗せた状態(状態 1)から右脚を前に出した状態(状態 2)

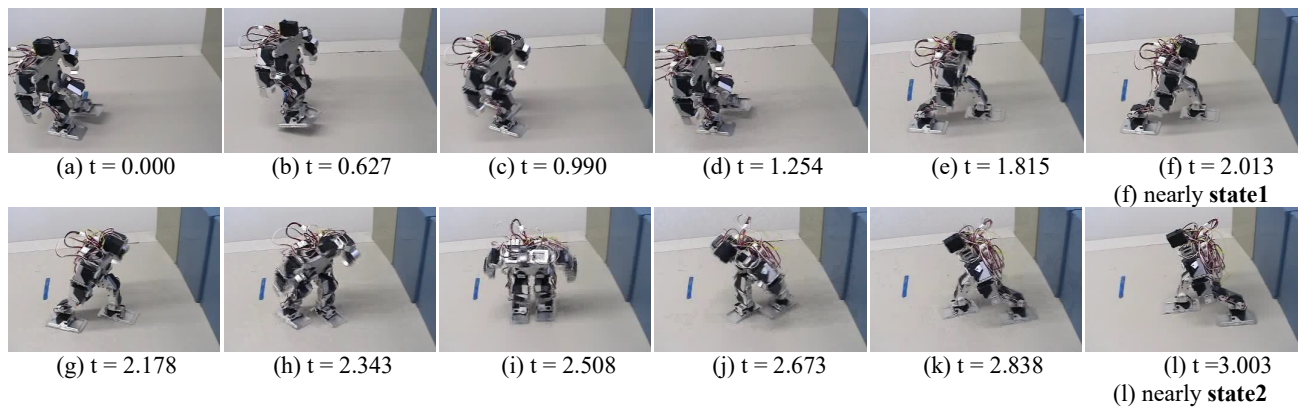


Fig.9 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees per second.

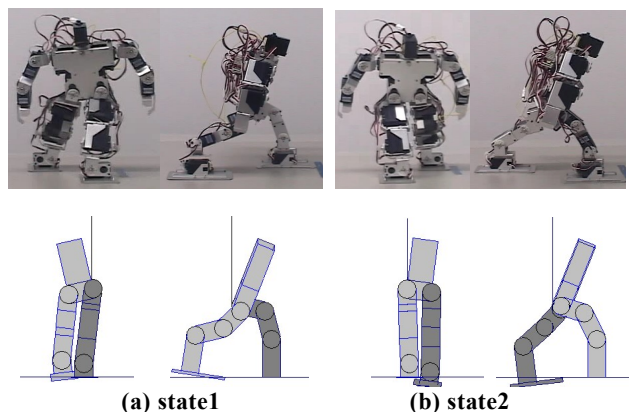


Fig.10 Fundamental two states of 180 degrees NANBA

に遷移することにより、その場で瞬間的に 180 度方向転換する。歩行してきた流れのまま一気に方向転換する。サーボの speed 5 (任意の関節角度を作るのに 0.752 s) で約 180 度の方向転換に要した時間は約 1 秒である。Fig.11 は回転角度の実測時系列である。

Fig.12 は、Fig.13 において、ロボットの前後方向の歩幅に対する瞬間的方向転換角度を示す実測値であり、平均値とバラツキを示す。Fig.13 は、瞬間的に 90 度の方向転換するための源兵衛 4 号の(a)状態 1 と(b)状態 2 である。(a)状態 1 から(b)に遷移することにより瞬間的に 90 度の方向転換ができる。(a)状態 1 は、左脚を前に出して前傾で左脚に重心を乗せた状態、(b)状態 2 は直立の状態である。教示により前脚を作り、前脚の形に合わせて自然に後脚を地面に下ろすと後脚の形ができる。サーボ speed 5 (任意の関節角度を作るのに 0.752 s) で約 90 度の方向転換に要した時間は約 1 秒である。方向転換角度は歩幅 60 mm 以上でよく回転し、歩幅にほぼ比例している。

Fig.14 は、方向転換の回転角度実測値におよぼす前傾角度の影響を示す。前傾角度が大きい方が回転角度も大きい。

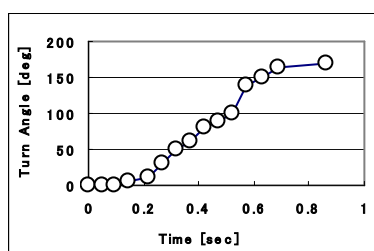


Fig.11 Time historical turn angle during instantaneous 180 degrees NANBA TURN

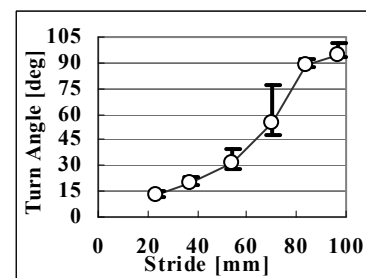


Fig.12 Turn angle vs. stride (○:average of 10 trials, Upper: Standard deviation, Lower: Standard error)

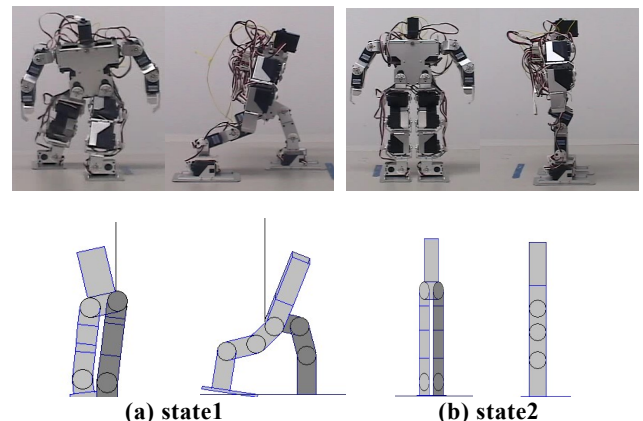


Fig.13 Fundamental two states of 90 degrees NANBA TURN.

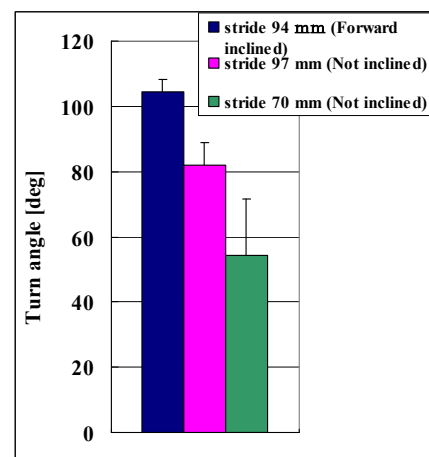


Fig.14 Effect of forward inclination on the turn angle of NANBA TURN (right turn).

5. 予測困難な外乱により転倒するときの瞬間的衝撃回避 動作・起き上がりの自律的発現

不意にうしろから押されたりして倒れたときに壊れないというのは二足歩行ロボットにとっては大前提であり、倒れても壊れないで手をついて自分で立ち上がるというのはヒューマノイド・ロボットの夢である。

突然うしろから押されて前方へ転倒した場合に、転倒をすばやく自律的に検知して、転倒時の衝撃を最小限にするような受け身的な動きを瞬間的に発現し、手をついて身体を支えた後に素早く（2～3秒で）転倒から立ち上がる動きの生成を試みた。

自律的動きへ展開していくために「源兵衛4号」で獲得した歩行の教示データをベースにして、上体に拡張性のあるマイコン（Eye-bot, CPU 32ビット）を実装した「源兵衛5号」（Fig.15）を実験に使用した[1]-[3]。転倒時にロボットに求められるのは転倒をすばやく探知することであるが、転倒の判断は非常に難しい。転倒検知用の適切なセンサを持ち合わせていないので、ここでは前方障害物回避のために胴体中央部に取り付けられた距離検出センサ PSD を利用した。Fig.16 は PSD センサを使用した転倒判断法である。PSD の探知距離精度が悪いので、対地ではなく対壁距離を利用した。ロボットの直立状態での探知距離 x_1 と転倒時の探知距離 x_2 の距離差 ($x_1 - x_2$) を設定値として転倒衝撃回避行動の作動条件とした。パラメータ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状態間の待ち時間を組み合わせることにより1つの歩行動作が作成される。状態とはロボットの形（姿勢）である。Fig.17 と Fig.18 は、それぞれ SA(Subsumption Architecture)による並列処理構造と各要素行動の処理系を示す。要素行動 Upright posture(直立)と Shock-Avoid(転倒時の衝撃回避と起き上がり行動)を積み上げた。転倒時は Shock-Avoid が優先する。

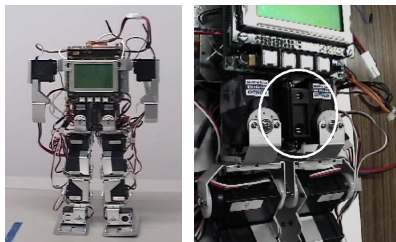
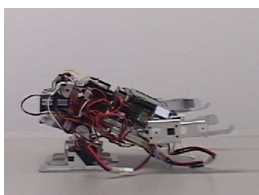
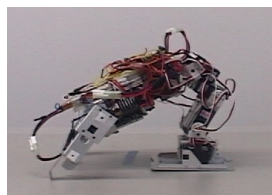


Fig.15 GENBE No.5 (Left) and Position Sensitive Detector (Right).

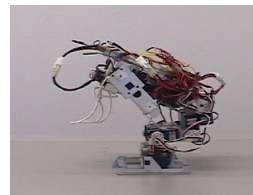
Fig.19 はナンバの動きに基づく転倒時の衝撃回避と転倒からの起き上がり行動の基本状態である。状態1：両脚と腰を使い、できるだけ重心を後ろに倒す。状態2：腰を曲げて手と脚の位置を近づけ、頭を護るために手を伸ばして手をつく。状態3：前かがみの形で重心を後方に持っていく。状態4：直立である。Fig.20, Fig.21 は、うしろから不意に押されてロボットが転倒するとき、転倒を認識して Fig.19 の状態を遷移させて、受身と起き上がりを発現した結果である。Fig.20 では、(a) $t=0.72s$ ：後から押し始める、



(a) State 1 (throw back the head)



(b) State 2 (crouching posture)



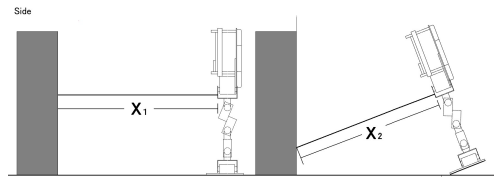
(c) State 3 (rising posture)



(d) State 4 (Upright)

Fig.19 Four states for realizing autonomous shock avoidance during falling down owing to being pushed from backside and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability.

(b) $t=1.40s$ で転倒を検出し Shock Avoid を開始。(c)～(d)：膝を曲げ上体を後ろにそらす状態1の姿勢で転倒速度を遅くし、頭部(液晶モニターやCPU)の破損を防ぐために身体を沈めて膝から落ちる。(e) $t=1.72s$ ～(f) $t=1.84$ ：膝が軽く接地するとともに手を前方に突いて倒れる。(g) $t=2.00$ ：手が着くとすぐに状態2の手と足の距離を縮めて膝を浮かしてそのまま一気に起き上がる。転倒することを認識し、受け身をして転倒し、転倒してから起きあがるまでの時間は合計約2.5秒である。Fig.21では、膝が接地しないうちに手をついて一気に起きあがる。巧みな身体の使い方である。転倒を検出してから起きあがるまでの時間は約2.5秒である。シンプルな大変動の非線形力学による大胆・複雑な動きの生成例であり、従来の二足歩行ロボットには見られない新しい動きである。



(a) Before falling down (b) after falling down
Fig.16 Detection of falling down using Position Sensitive Detector (PSD).

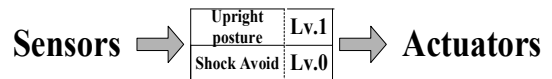


Fig.17 Subsumption Architecture of GENBE No.5 with parallel modules of agents.

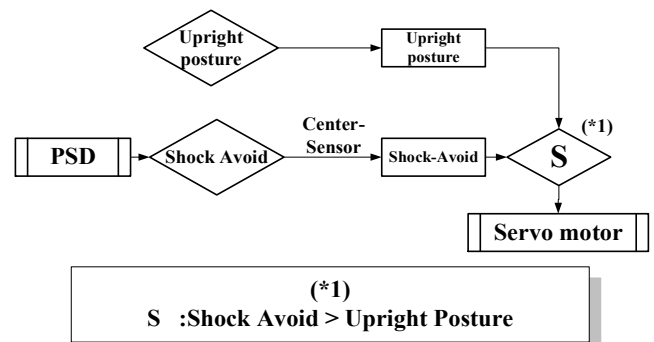


Fig.18 Subsumption Architecture of GENBE No.5 with shock avoidance and instantaneous rising.

6. 結論

- (1) 重力による転倒力と地面との間に形成されたりミットサイクル・アトラクターを利用したシンプルな二足歩行は、自在な速度の俊敏・柔軟な歩き・走りを実現する。
- (2) 約1秒間で180度まで一瞬で向きを変えるその場での瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」は、不安定を利用した状態遷移により瞬間的に身体の向きを変える。

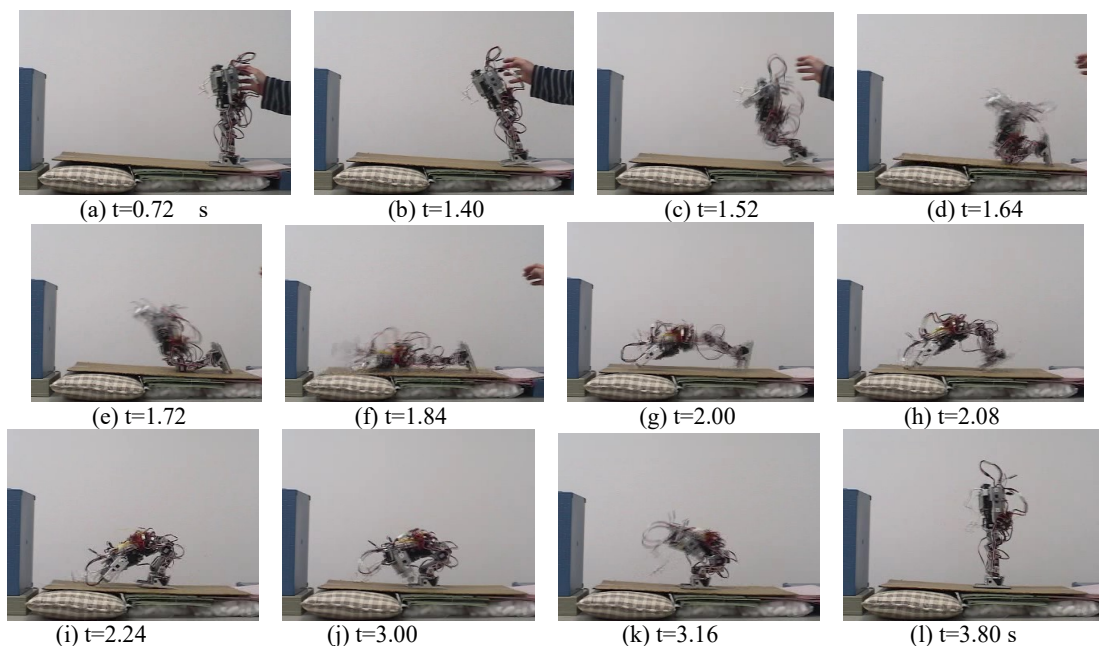


Fig.20 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability - Part 1. It takes only 2.5 seconds.

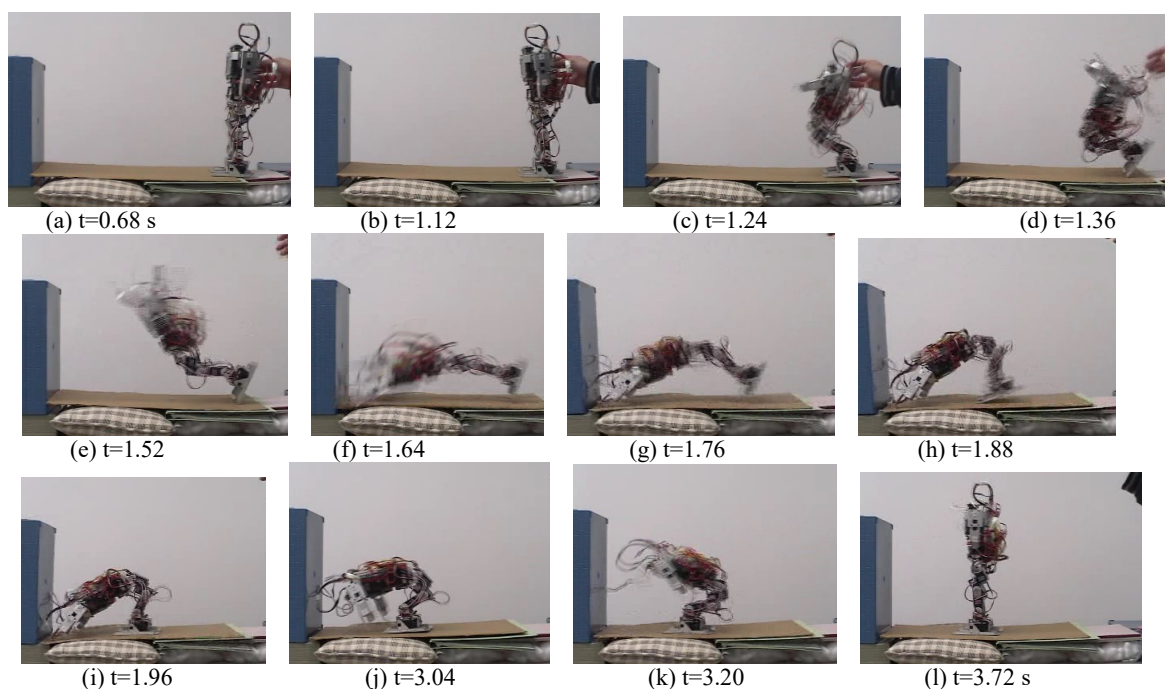


Fig.21 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability - Part 2. It takes only 2.5 seconds.

(3) 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、テニスのボレーなどのスポーツにおける身体操法に広範囲の応用が期待できる。

おわりに、高橋尚子選手の写真の提供をいただいた(有)さかいやすスポーツ・酒井孝典氏、ご助力いただいた埼玉工大・平成16年度4年生・南雲・伊能・鈴木・池田および17年度4年生・須永・桃井・原田・清水の諸君に感謝する。

文 献

- [1] 川副嘉彦・南雲貴志・伊能新一・鈴木一彰，古の身体操縦に学ぶ人間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，日本機械学会主催，第9回運動と振動の制御シンポジウム論文集，(2005)，pp.514-519。
 [2] 川副嘉彦・須永智文・桃井孝昌，二足ロボット源兵衛のAnti-ZMPによる瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」の発現，

日本機械学会・機械力学・計測制御部門講演会 D & D 2006 CD-ROM 論文集 560, (2006), pp.1-6

[3] 川副嘉彦・原田一臣・清水祐一，自律型二足ロボット源兵衛の Anti-ZMP による瞬間的転倒衝撃回避と起き上がり，日本機械学会・機械力学・計測制御部門講演会 D & D 2006 CD-ROM 論文集 550, (2006), pp.1-6

[4] 杉原知道・中村仁彦，非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作，日本ロボット学会誌，24-2, (2006), pp.222-231.

[5] 國吉康夫・大村吉幸・寺田耕志・長久保晶彦，等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起き上がり行動の実現，日本ロボット学会誌，23-6, (2005), pp.706-717.

[6] 國吉康夫，ヒューマノイドの身体性，現代思想，33-8, (2005), pp.114-120.