

自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた (不安定を利用した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)

川副 嘉彦

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

Yoshihiko KAWAZOE*

* Saitama Institute of Technology, 1690 Fusaiji, Fukaya, Saitama 369-0293, Japan

ABSTRACT

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. The previous paper realized the simple self-sustained humanlike robust walking and running NANBA of humanoid biped robot GENBE based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power with simple chaotic limit cycle formed by the interaction between the unstable gravitational force and the ground. This paper realized the simple humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE utilizing instability which makes the movement.

1. 研究の背景と目的

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]-[14]。生活分野、公共分野、医療福祉分野等においてロボット技術の多様な利用が期待されているが、現状のロボット技術は、将来の市場拡大に対応したロボット技術の具体的用途や技術の実現可能性を明確にできないでいる[14]。

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、絶妙な制御ゆえに、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。これらのロボットは、重心とZMP (Zero Moment

Point) の制御を歩行の基本とし、重力や慣性力に逆らう歩行法だから、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][2]。杉原・中村らにより高精度なZMP操作の研究も精力的になされているが[15]、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ろう。実世界で必要な行動能力のうち、既存のヒューマノイドで実現されていないのは、(1)全身を駆使して素早く巧みな運動を、(2)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であると國吉らが指摘している[16][17]。

前報では[3]-[5]、従来のZMP制御とは反対のAnti-ZMPと名づけた不安定を利用する歩行原理により、人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟・頑健な「ナンバ歩き・ナンバ走り」を実現した。ロボットの状態遷移（切換）により地面との間にもっともシンプルなりミッ

トサイクルを形成する。状態とは姿勢（形状）であり、状態そのものが動きをつくる。「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。

人間や他のロボットとの衝突回避のようにその場での一瞬の方向転換が求められる状況では、足踏みしながらの旋回による従来の方向転換は通用しない。本報では、関節角度、関節角速度などの組み合わせによる自在の歩行速度の発現を試み、さらに従来の旋回による方向転換とは質的に異なる瞬間的方向転換（「ナンバ・ターン」と呼ぶ）の発現を試みた。「ナンバ・ターン」は、身体の向きをその場で 180 度まで一瞬のうちに変える。パラメータ調整による自在の歩行・走行の設計指針については別報[18]に述べる。

2. 人間型二足ロボット「源兵衛」のナンバ走りの進展と走行時のサーボ性能の高速ビデオ画像解析

図 1 は、脚部左右各 3 自由度ロボット「源兵衛 1 号」に上体を模擬して脚部の上に重量を付加した「源兵衛 2 号」であり、歩行原理がわかりやすい。「ナンバ歩き」の基本は、図 1 のように、前傾姿勢を取り、(1) 状態 1：身体を右に傾けると左脚が宙に浮く。(2) 状態 2：左脚を前脚の形にすると、自然に自重で左前方に倒れていき、左足が接地する。(3)(4) は(1)(2)と反対の動きであり、この四つの状態を繰り返す[1][3]。サーボの回転角度と角速度の組み合わせにより、自在の速度での歩行が可能である。トルクの大きいサーボを備えた KHR-1（近藤科学製）を採用したのが「源兵衛 4 号」であり、図 2 は「源兵衛 4 号」の状態図である。17 個のサーボモータ（脚部 10 関節）を制御し、身長 340mm、バッテリー搭載重量は 1.2 kg である。「源兵衛 4 号」の歩行原理は「源兵衛 2 号」と同じであるが、足首の関節を使うことにより上体が左右に揺れるのを防ぐ。「源兵衛 5 号」（図 3）は、上体に拡張性のあるマイコン（Eye-bot, CPU 32 ビット）を実装し、「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、自律的歩行へ展開していく[1][3]。

図 4 は、図 5 の状態図を与えたときの速い走り（18cm/s、「ナンバ・ダッシュ」）であり、約 0.3 秒間を表示している。図 5 の状態図と比べて脚があまり上がっていない。図 6 は、横軸に歩行のピッチ速度（歩数/秒）を取って 4 種類の歩行速度をプロットしたものである。4 種類の歩行の状態図はほぼ同じである。ピッチ速度が上がるにつれて、歩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 18cm/s）で歩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ためである。

表 1 は、源兵衛 4 号の動作設定時における設定項目 speed について speed1～speed7 について動作時間と最大動作角度を高速ビデオ画像解析により実験的に調べた結果である。項目 speed は動作時間の長短を設定するので、時間設定と呼ぶ。遅めの速度設定 speed 5～speed 7 では、180 度回転させる動作時間を 2 倍ずつ変化させることができるが、速めの速度設定 speed1～speed4 では、設定動作時間では、サーボの有限のトルク特性により 180 deg までは回転させることができず、表 1 に示した角度しか回転できなかった。図 4 のナンバ・ダッシュ（約 18cm/s）は、サーボ速度 1,2 を使って動作を設定しており、(a), (c), (f), (h) はそれぞれ各基本状態に近いが、図 5 の状態図のような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、図 6 のようにサーボのトルク限界がなければ理論的には無限の高速の走りができることを意味している。また、上述のように、高速走行において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。

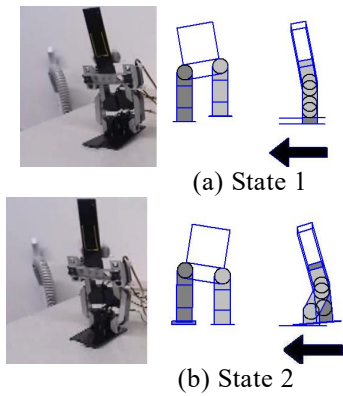


Fig.1 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.2 with 6 freedom legs.

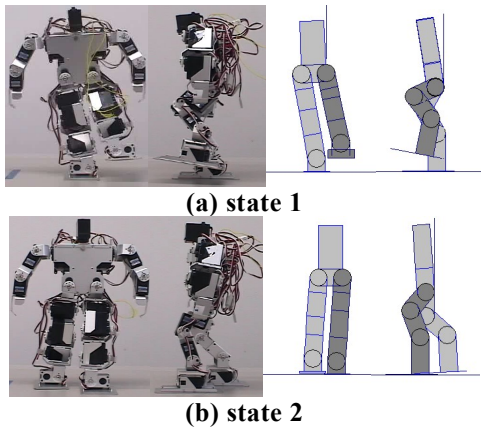


Fig.2 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.4 with 10 freedom legs.

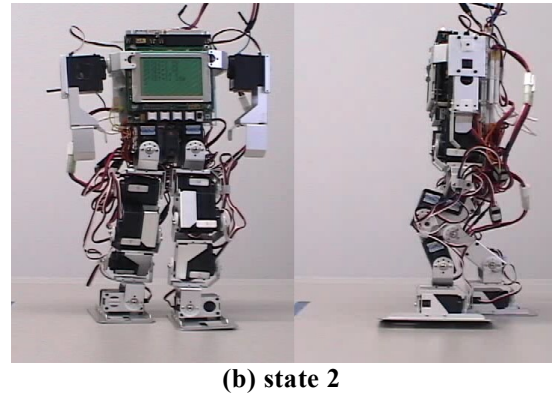
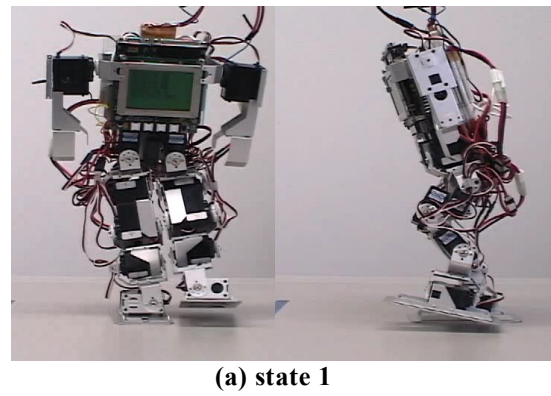
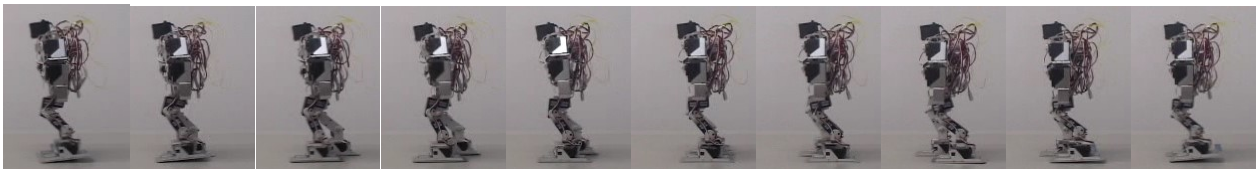


Fig.3 Fundamental States NANBA Walking of Autonomous GENBE-No.5 with 10 freedom legs.



(a) 0.000 s (b) 0.033 s (c) 0.066 s (d) 0.099 s (e) 0.133 s (f) 0.166 s (g) 0.199 s (h) 0.233 s (i) 0.266 s (j) 0.299 s
 (a) nearly state 1 (c) state 2 (f) state 3 (h) state 4

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

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

図 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、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 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

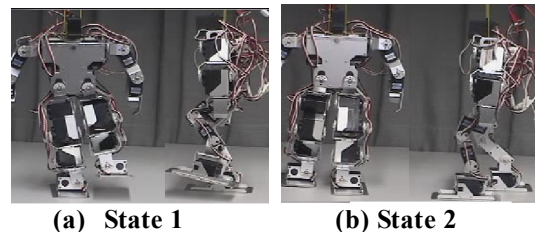


Fig.5 Fundamental States of NANBA dash of GENBE No.4.

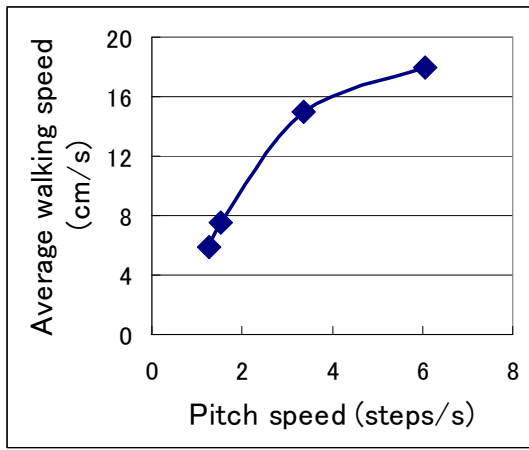


Fig.6 Measured average walking speed vs. pitch speed.

Table 1 Measured operating time and max operating angle vs. time setting (speed) of GENBE No.4.

Time Setting (speed)	Operating Time	Max Operating Angle of Servomotor	Max Operating Angle velocity of Servomotor
1	0.047sec	15deg	319deg/sec
2	0.094sec	30deg	319deg/sec
3	0.188sec	60deg	319deg/sec
4	0.376sec	120deg	319deg/sec
5	0.752sec	180deg	239deg/sec
6	1.504sec	180deg	120deg/sec
7	3.008sec	180deg	60deg/sec

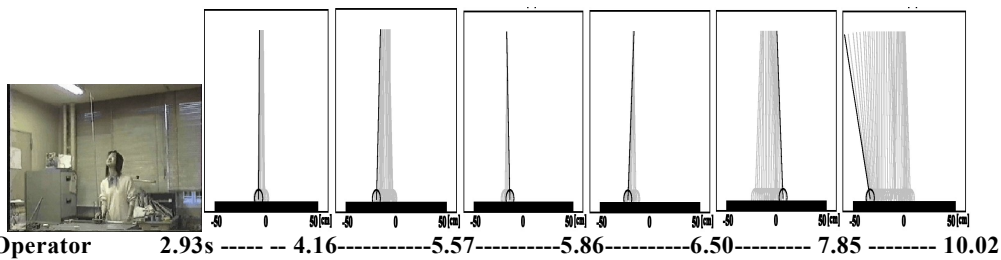


Fig.7 Stick pictures of stabilizing behavior of human operator similar to conventional Zero Moment Point (ZMP) control falling down after 10 seconds from start of trial (NR01).

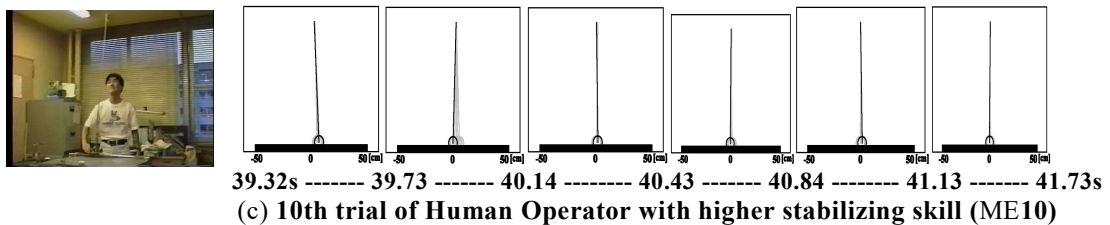
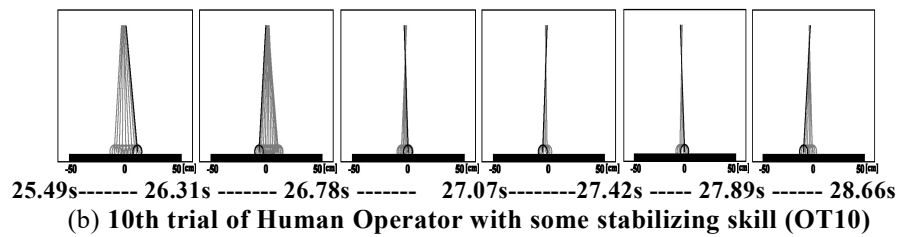
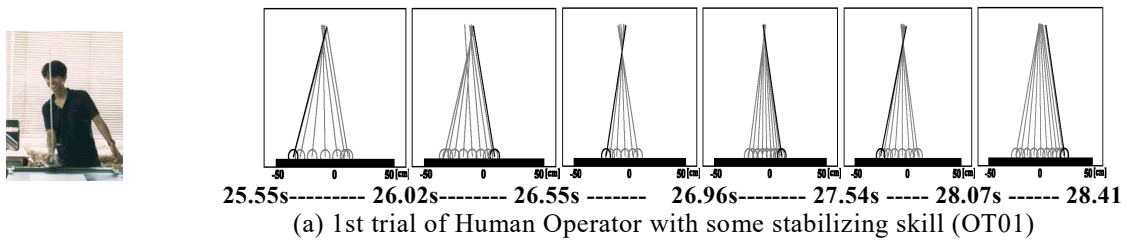


Fig.8 Stick pictures of stabilizing behaviors of human operators showing the mechanism developing from baby walk to Japanese express messenger.

熟過程を解析すると、人間オペレータのほとんどは機械におけるような（図7に似た）制御はしない。図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。図8(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，図 8(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][20][21]．

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）を応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．

図 9 の(a)状態1から(b)状態2に遷移することにより発現した瞬間的な90度方向転換が図11である．図 9 の(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．

図11において，(a)～(e)：ナンバ歩き(7.5cm/s)，(f)：状態1に近い形，(f)～(k)：前脚は後ろへ，後脚は前へ移動し，(l)：状態2（両脚が揃う）に近い形になる．サーボのspeedは5（0.752 s）で(f)状態1から(l)状態2までの約90度の方向転換に要した時間は約1秒である．

図 10 の(a)状態 1 から(b)状態 2 に遷移することにより発現した瞬間的な 180 度方向転換が図 12 である．図 10 の(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，図 10(b)状態 2 は逆に右脚を前に出した状態である．

図 12 において，(a)～(d)：ナンバ歩き（7.5cm/s），(e)(f)：状態 1（左脚前）に近い形，(g)～(k)：左脚は後ろへ，右脚は前へ移動し，途中の(i)で両脚がそろった状態になりながら(l)で状態 2（右脚前）に近い形になる．サーボの speed 5（0.752 s）で(f)状態 1 から(l)状態 2 までの約 180 度の方向転換に要した時間は約 1 秒（旋回の 1/5）である．ナンバ・ターンは歩行してきた流れのまま一気に方向転換する．

5. 瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」による障害物回避の自律的発現

自律型ロボットに期待されるのは，柔軟性に富み，複雑な実世界での作業環境や人間の要求によく適応するロバストな動きである[6]-[13]．

前報[3]-[5]では，自立型「源兵衛 4 号」の動きを基本として，サブサンプレション（SA）的開発[6]-[13]により自律型二足歩行ロボット「源兵衛 5 号」の自律への展開を試み，「ナンバ歩き」の発現や障害物を検出して回避する要素行動を積み上げた．こ

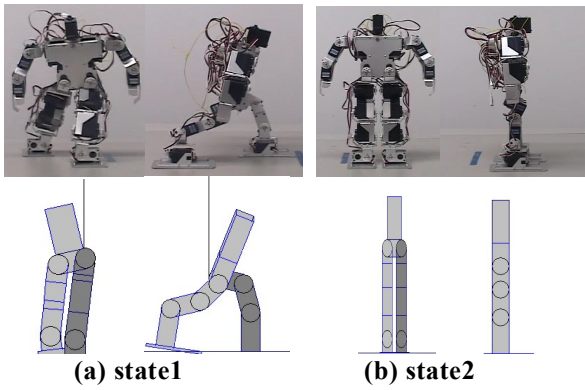


Fig.9 Fundamental two states of 90 degrees NANBA TURN.

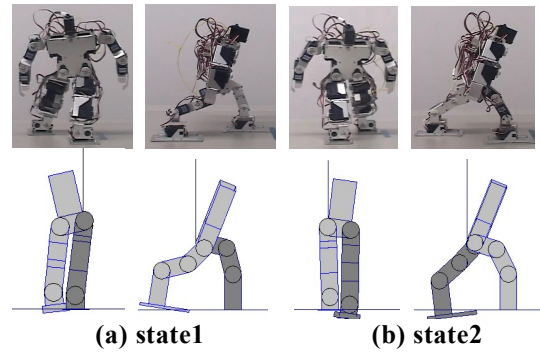


Fig.10 Fundamental two states of 180 degrees NANBA TURN.

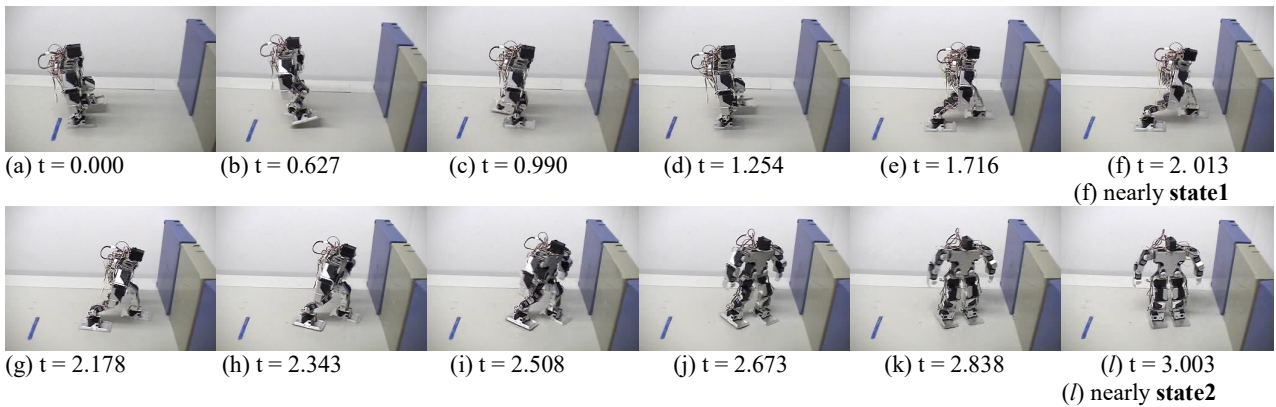


Fig.11 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously 90 degrees per second.

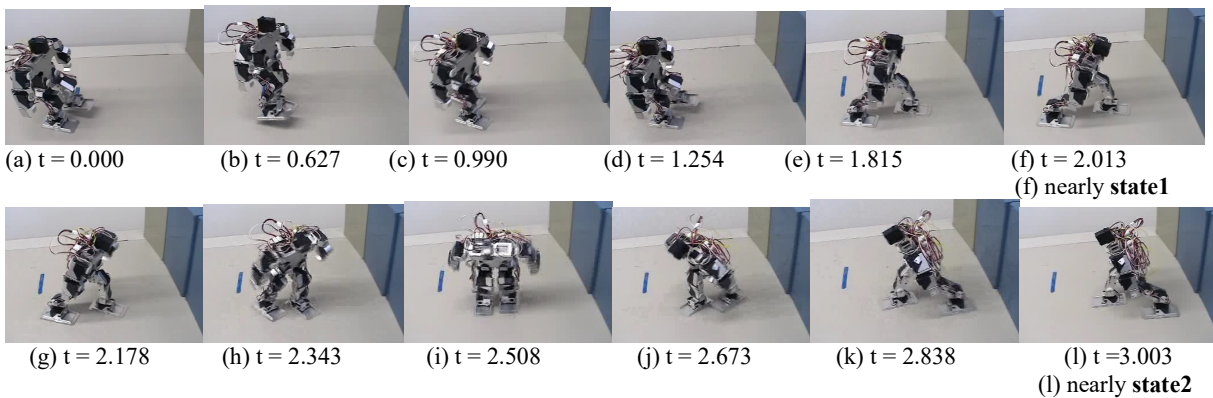


Fig.12 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees per second.

ここでは、障害物を検出して自動的にその場で歩行の向きを瞬間的に変える瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」を試みた。

図 13 は「源兵衛 5 号」の全体図と前方の障害物回避のために胴体中央部に取り付けられた距離センサー (PSD) を示す。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、

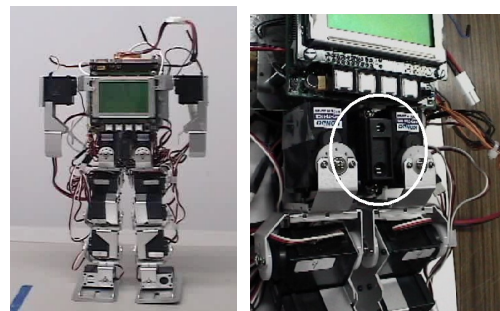


Fig.13 GENBE No.5 (Left) and Position Sensitive Detector (Right).

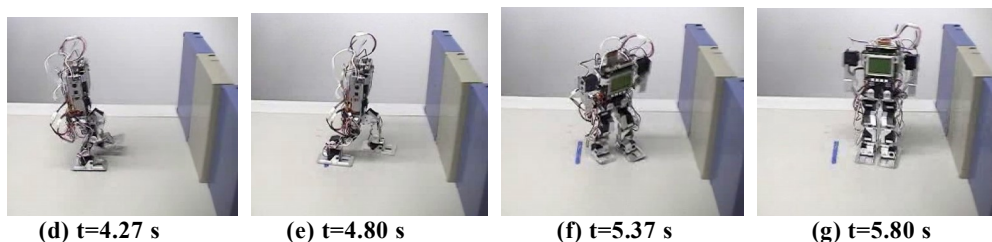


Fig.14 Obstacle (front wall) avoidance of humanoid biped robot GENBE No.5 using a simple humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously about 90 degrees per second.

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，各サーボモータに角度データを与えた後のロボットの形（姿勢）である。図14は，前方の壁を検出して瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」により右折した挙動を示す。PSDが障害物を検知してロボットは立ち止まり，(d)～(g)で瞬間的に約90度右に向きを変える。角度90度の方向転換に要する時間は約1秒であり，軽快・巧みである。

6. 結論

- (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・ロバストな自在な速度の歩き・走りを実現した。
- (2) 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り，省エネルギーで済む利点がある。
- (3) 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。
- (4) 重力による転倒力と加速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きわめてシンプルな二足歩行であり，予期せぬ外乱に対して頑健であり，状況の変化に応じた柔軟性がある。
- (5) 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な速度で歩行する。

(6) 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，従来型に比べると極めて俊敏に走る。

(7) 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。

(8) 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」を発現した。状態を一つ遷移する（切替える）だけで瞬間的に身体の向きを変えることができる。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の発現である。

人間型二足ロボットの動作設計の観点からの瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」の回転角度と諸パラメータの関係，さらに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，手をついた後に素早く転倒から立ち上がる動きの発現については別報[18]に述べる。

おわりに，本研究に励ましとご指導をいただいている森政弘（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），梅谷陽二（東工大名誉教授），佐々木正人（東大教授）の諸先生に深謝する。

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] 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), 埼玉工業大学工学部紀要, 第15号, (2005), pp.25-32.
- [3] 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.
- [4] 川副嘉彦, ナンバ歩きに学ぶ人間型二足歩行ロボット「源兵衛」のロバスト性のメカニズム, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集, No.05-1, (2005), pp.241-242,
- [5] 川副嘉彦, 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, 日本機械学会主催ジョイントシンポジウム(スポーツ工学& ヒューマン・ダイナミクス)講演論文集, No.05-16, (2005), pp.171 - 176.
- [6] 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).
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 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).
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 山本哲也, 次世代ロボット実用化プロジェクト, 日本ロボット学会誌, 24-2, (2006), pp.169-170.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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 CD-ROM 論文集, pp.1-6, (2006).
- [19] 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.
- [20] 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 ― 科学技術と人間 ― 論文集, (2005 年
11 月), pp.27-28.
[21] 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,
pp.20-21.