

# 障害予防とパワーアップのためのロバストな「ナンバ・テニス」の提唱 (平衡点不安定を利用する地面を蹴らない動きの生成)

## NANBA TENNIS with Powerful and Injury-free Robust Movement Utilizing Equilibrium Instability without Kick of Ground

○川副嘉彦(埼玉工大) 伊倉良明(埼玉工大) 武田幸宏(埼玉工大) 中川慎理(埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama  
Yoshiaki IKURA, Saitama Institute of Technology  
Yukihiro TAKEDA, Saitama Institute of Technology  
Masamichi NAKAGAWA, Saitama Institute of Technology

We 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, which uses only small active power with simple chaotic limit cycle utilizing instability. Instability makes the natural movement and can be applied to walking of a physically handicapped person, rehabilitation, sports, and so on. This paper showed the development of robust NANBA walking of humanoid Biped Robot GENBE to NANBA-Tennis making full use of instability as a source of driving force.

**Key Words:** Robotics, Humanoid Biped Robot, NANBA Walking, NANBA-Tennis, Martial Art, Limit Cycle, Nonlinear Control

### 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のかわからない。(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。」という指摘がある<sup>(1)</sup>。

現代日本人の心身にある問題を武術研究者・甲野善紀が指摘している。かつての日本人の体の使い方は現代のスポーツ選手よりはるかに優れていたと確信できると言う。すべての分野で機械化が進んでいる現代とは異なり、昔は何をやるにしても体を使ってこなさなければならなかったもので、必然的に疲れにくく精度の高い体の運用が求められたのである<sup>(2)</sup>。武術とスポーツの身体操法の違いについて、「たとえば、サッカーにおいて選手Aが走りぬけようとする動きを選手Bがブロックしたとき、選手Aは方向を大きく変えることになる。しかし、武術的な身体運用法を用いると全く違った展開が拓けてくる。選手Aは選手Bの当たりを利用して、選手Aが行きたいと思っている方向へ運んでもらうという形をとるように出来るからである。このことは、一般的に知られているウェイト・トレーニング等を行って、走り込みをする、というトレーニング方法とは違った身体運用の訓練法が存在していることを示しているのではないかと述べている<sup>(2)</sup>。逆風を利用するヨットの原理である。「人間の動きに、いわゆる科学的視点と手法が導入され、それによって解析し、論文を書こうとした時、未解明なことがあまりに多い人間の運動について、現状の科学分析法では説明できないことが漏れ落ちてしまう。その記述しがたい微妙な動きが、身体運用の優位さを競う時に、決定的に大きな違いとなる。」<sup>(3)</sup>

本研究では、関節に負担が軽くて省エネルギーの「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」という2足歩行ロボットの「ナンバ」的な動き<sup>(4)-(7)</sup>をテニスに展開する。ロボットの自由度は人間に比べて少ないので、動きの原理がわ

かりやすい。「ナンバ」という身体操法に関する用語は、明確な一般的な定義があるわけではない。われわれは、「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」という動きのイメージとして象徴的に使う。「歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」という二足ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの原理を基本にして、関節に負担が少ない動きを使った「ナンバ・テニス」を提唱する。平衡点不安定を利用して地面を蹴らないで一気に遷移するロバストなテニスを探る(図1)。「源兵衛」は、江戸-仙台南 300 km を1日で走ったといわれる伝説の飛脚の名にちなんでいる。



Fig.1 Study of NANBA TENNIS

### 2. 「軸を消す・軸を作らない」不安定がロバストな動きを生む

図2と図3は、二足ロボットによる横移動(サイドステップ)である。図2(a)は一般的な蹴る横移動のコマ写真であり、図3は足裏を浮かせて地面を蹴らない横移動(ナンバ・サイドステップ)の刻々の動きを示す。身体の傾きが反対になっている。

図2(b)は図2(a)の蹴るサイドステップの動きの原理を示す状態図であり、状態1で、状態2のプログラムを与え左脚を左に開こうとするが、脚を開く方向に地面により抵抗を受ける。そのためにロボットは足を開いた方向(左)とは逆の方向(右)に移動する。状態2で動かしているモータはロボットの左脚の股関節のみである。

図3(b)は図3(a)の蹴らないサイドステップの動きの原理を示す状態図であり、脚を広げると同時に膝を曲げ脚を上げることで地面との反発がなくなり、転倒力により脚を広げた方向と同じ方向に倒れ込む。支持足の反発もなく、反作用力も小さい。状態2では、①のモータ(股関節)の他に②~④のモータを動かして膝を曲げて脚を上げながら脚を開く。不安定な平衡状態から安定な状態へ一瞬(約0.3秒)で遷移する。これを「ナンバ・サイドステップ」と呼ぶ。

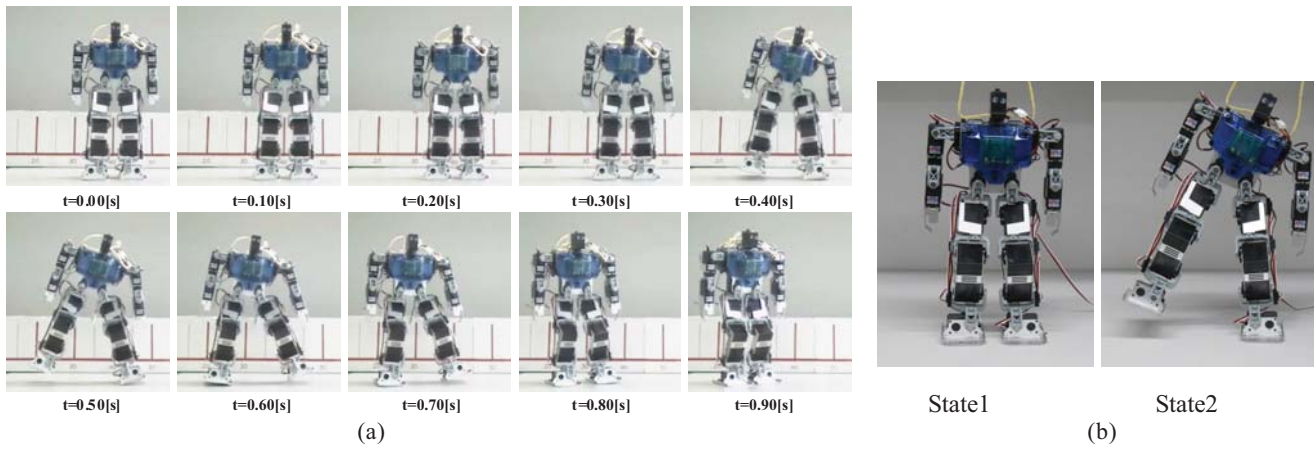


Fig.2 Right side step with kick of ground by left leg.(250 fps)

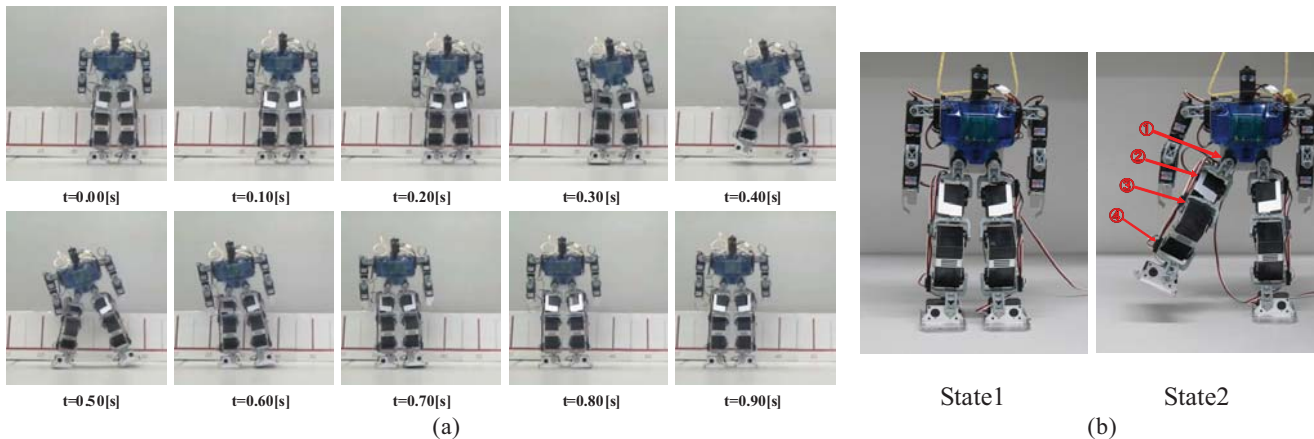


Fig.3 Robust instantaneous NANBA side-step of humanoid biped robot GENBE No.4-2 utilizing instability, which uses only small active power. Right side step using instability without kick of ground. (250 fps)

体重を支脚（左足）に残さず、蹴らないで不安定を利用して横移動するので、図 2(a)が足裏が滑って向きが多少変わっているのに対して、図 3(a)のように足裏が滑らずに自然に真横に移動する。支持脚で蹴るより蹴らないサイドステップの方が股関節のサーボモータにかかる負荷が小さい。

### 3. 二足ロボット「源兵衛」のナンバ走りのロバスト性

甲野式「ナンバ走り」は、体を上手に使うことで体全体に滞りがなくなり、ある状態から別の状態に一気に変化することにより速さを生むという。

二足歩行ロボット「源兵衛」のナンバ歩きの基本は、最もシンプルな脚部 6 自由度の場合、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。脚部 10 自由度の場合（図 4）、足首関節を使って上体（頭）が左右に傾かないように歩く。ナンバ歩きは、前傾角度を大きくしてピッチを速くすると自然に走りに転じる。

超高速ナンバ走りは、バスケットボールやサッカーなどの瞬間的な加速や極短距離のダッシュに有効であるが、走り出しが非常に速い反面、身体の手操作が従来の走りに比べてあまりに複雑で、最初の二、三步は何とかなっても持続的にこれを行うことは非常に難しいといわれる[8]。前方への転倒を検出して転倒時の衝撃を最小にするような受け身の動きと、転倒から素早く立ち上がる動きの自律的発現については前報<sup>(9)-(12)</sup>に述べた。

腰の関節をねじることのできない二足ロボット源兵衛の「ナンバ歩き」の原理は、不安定な平衡状態（姿勢・形）

から不安定を利用して安定な平衡状態（姿勢・形）へ速さと威力のある自然な遷移を繰り返す、いわゆる、非線形力学におけるリミットサイクル・アトラクターである。

歩行のピッチ周期も振幅（歩幅）もほぼ周期的であるが、関節（サーボモータ）への負荷の大きさや足裏のすべりなどが足を上げる時間や歩幅に微妙に影響し、歩行の周期も歩幅も微妙に変化するが、それゆえに、予期せぬ外乱に対してロバスト（頑健）であり、状況の変化に柔軟であるのが特長である。

理論的には、歩幅が一定であればピッチ速度に比例して前進速度も増すが、現実には、ピッチ速度が増すと関節（サーボモータ）のトルク不足により脚が上がらず、歩幅も小さくなって転倒しやすい。しかし、二足ロボット「源兵衛」

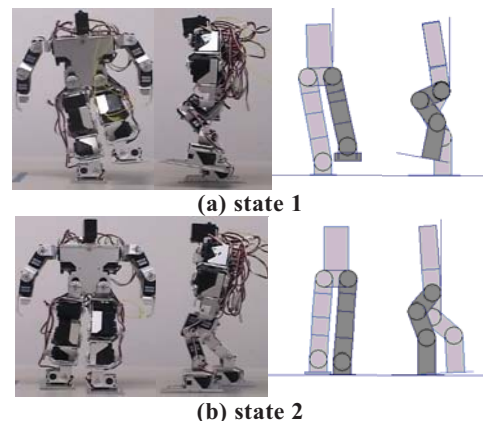


Fig.4 Fundamental States NANBA Walk and Run of GENBE-No.4 with 10 freedom legs

のナンバ歩き・ナンバ走りは、ピッチ速度が速くなって足が十分に上がりきらない場合でも、常に足裏が前方に滑るかのようになり、転倒しないでピッチ速度に比例して前方へ走る。足裏を浮かせて地面を蹴らないで移動するのが動きの特長であり、関節の負担が少ない。

### 3. 二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」のボレーへの展開

ナンバボレーは、「打ちたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」。図5は、二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ・フ

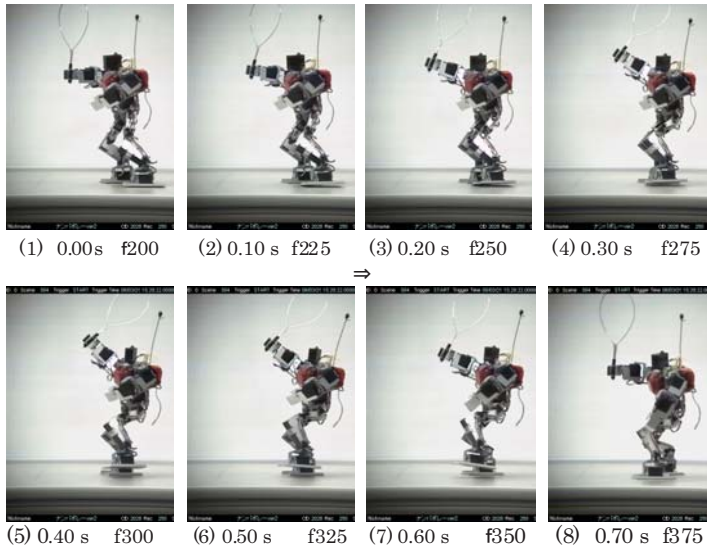


Fig.5 Robust instantaneous NANBA volley of humanoid biped robot GENBE No.4-2 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability.

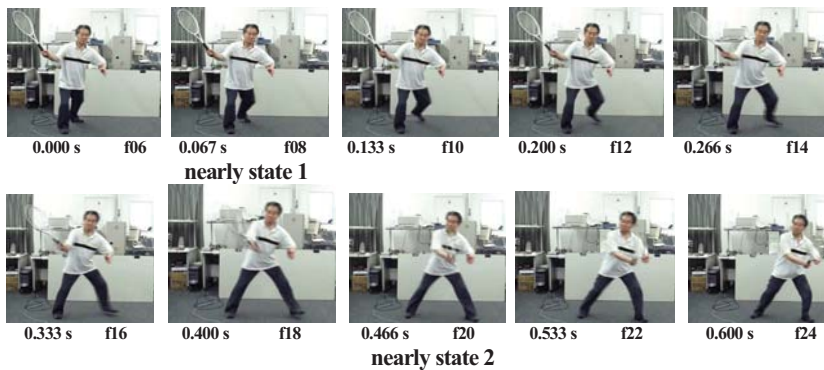


Fig.7 Robust instantaneous NANBA forehand-volley proposed by Kawazoe utilizing instability, which uses only small active power.

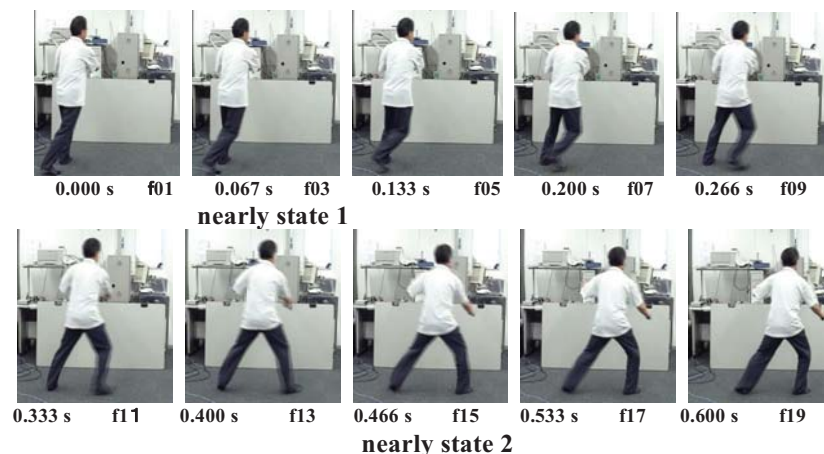


Fig.9 Robust instantaneous NANBA backhand-volley proposed by Kawazoe utilizing instability, which uses only small active power.

ォアボレー」である。図6は2つの状態図である。図7は、筆者が提案する「ナンバ・フォアボレー」である。状態1(f08)から状態2(f20)まで一瞬(この場合は約0.4秒以内)で遷移する。ボールとのタイミングをとってf18(左足は浮いている)とf20(左足が接地)の間(0.066秒間)にボールを呼び込めば、この間のラケット面の動きは少ないので、転倒力が活かされた自然で身体に負担の少ないロボバスト(頑健)で確実なインパクトになる。状態1は相手プレイヤーのボ

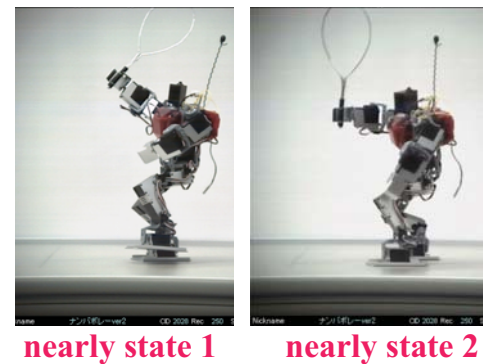


Fig.6 Fundamental two states of NANBA Volley of GENBE-No.4 with 10 freedom degrees legs.



Fig.8 Fundamental two states of NANBA Fore-Volley proposed by Kawazoe.



Fig.10 Fundamental two states of NANBA Back-Volley proposed by Kawazoe.

ールの軌道や球質により決まる．状態 2 はどこに打ちたいかによって決まり，ボールを呼び込むタイミングだけを意識すればよい．

図 9 は，筆者が提唱する「ナンバ・バックボレー」，図 10 は，その 2 つの状態図である．

#### 4. 二足ロボット「源兵衛」の瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」のストロークへの展開

図 11 は，甲野善紀による瞬間的 180 度方向転換（所要時間：約 0.5 秒）の提示である．図 12 は，不安定を利用する瞬間的な方向転換の原理であり，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）に移ることにより，その場で瞬間的に右回りに 180 度方向転換する．図 13 は実行例であり，歩行してきた流れのまま一気に（約 0.5 秒で）方向転換している．不安定（転倒力）と足裏のすべりを利用した二足ロボットの瞬間的ナンバ・ターンである<sup>(6)</sup>．

図 14 は，テニスへの展開である．コート右サイドに走ら

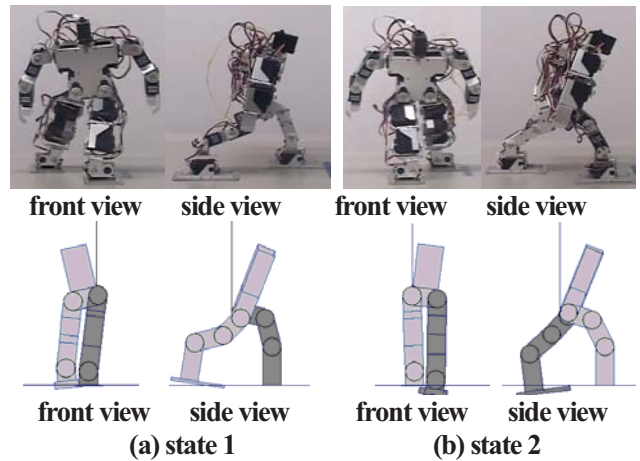


Fig.12 Fundamental two states of 180 degrees NANBA TURN.



Fig.11 NANBA Turn of Yoshinori KOHNO. It turns instantaneously 180 degrees in 0.5 seconds.

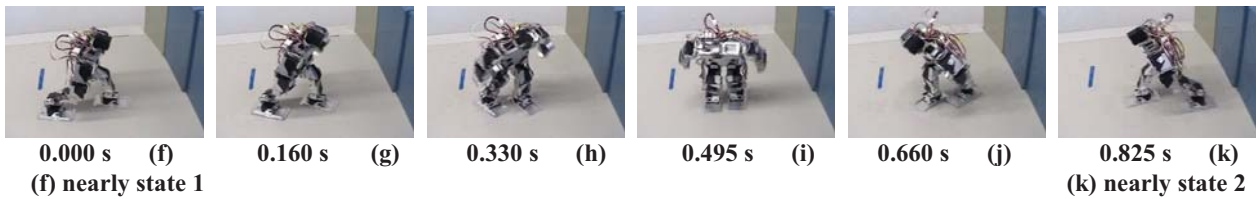


Fig.13 Robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 utilizing instability, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees in 0.7 seconds.

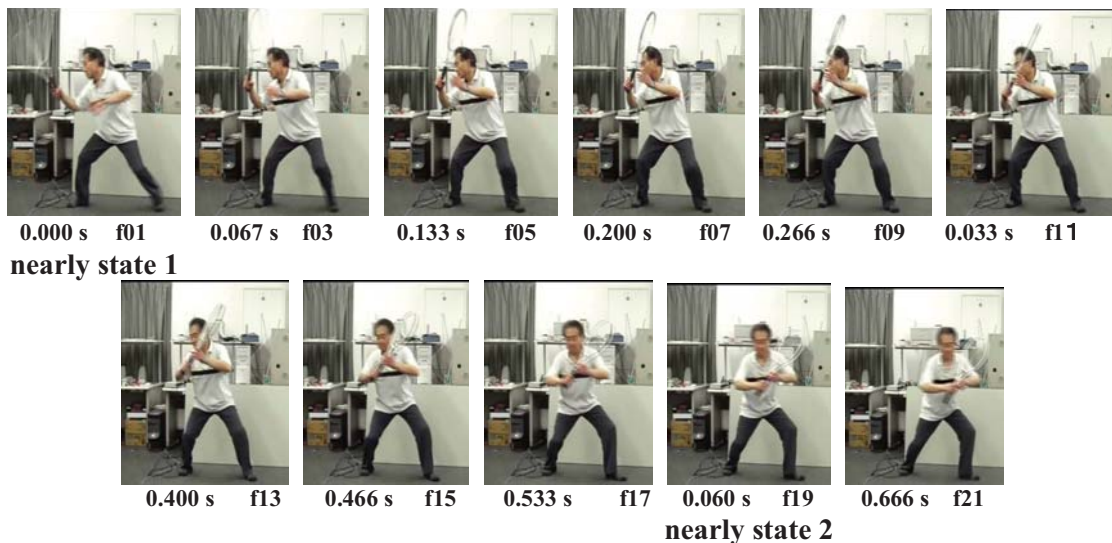


Fig.14 Robust instantaneous NANBA TURN utilizing instability, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees in 0.7 seconds.

されてやっとボールにラケットが届いたような状況で、時間稼ぎにロビングを打って（空中高くボールを打つ）コート中央に戻るときに、身体を前傾させながら、両足裏を浮かせて、前右脚を後脚の形に、後左脚を前脚の形に変えると、前脚・右足裏と後脚・左足裏は同時に左に回りながら、状態1(f01)から状態2(f19)まで一瞬（この場合は約0.6秒）で左回りに180度方向が変わる。

5. 速さ・威力・ロバスト性のある「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」ストローク

図15のように転倒力を利用して状態図3から状態図4へ一気に遷移すると速くて威力のあるスイング（0.3秒）が図16のように生まれる。腰を捻らないで足裏のすべりを利用するナンバ・バックハンド・ストロークであり、ナンバ・ターンの応用である。

図17は、世界のトッププレイヤー Roger Federer 選手のフォアハンドストロークの3次元映像解析である。捻らない、

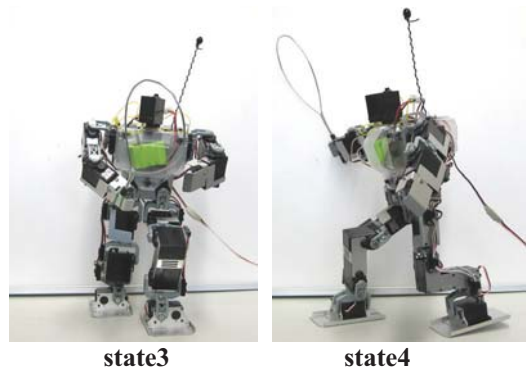


Fig.15 Two states for robust instantaneous NANBA backhand-stroke of humanoid biped robot GENBE utilizing instability, which uses only small active power. (250 fps)

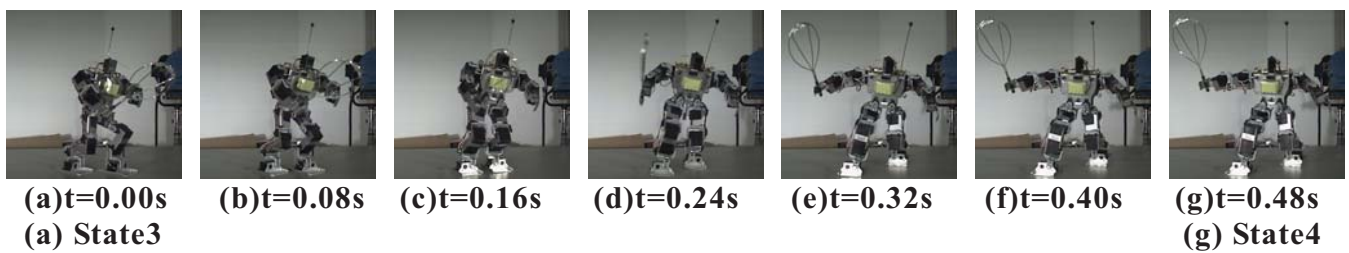
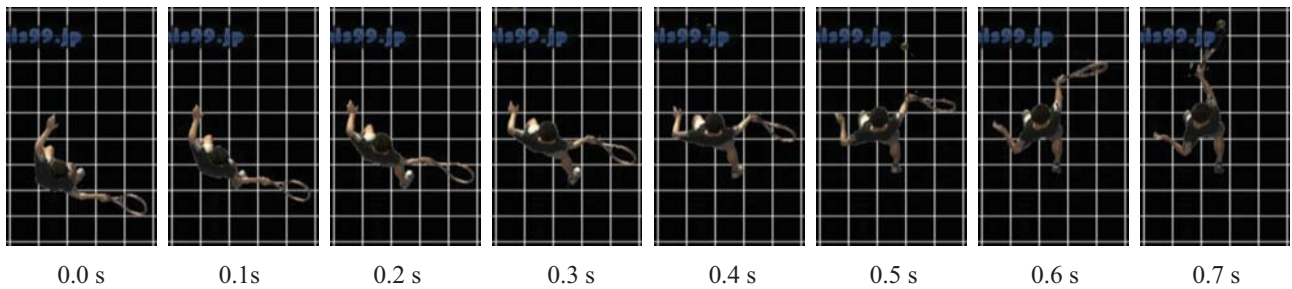
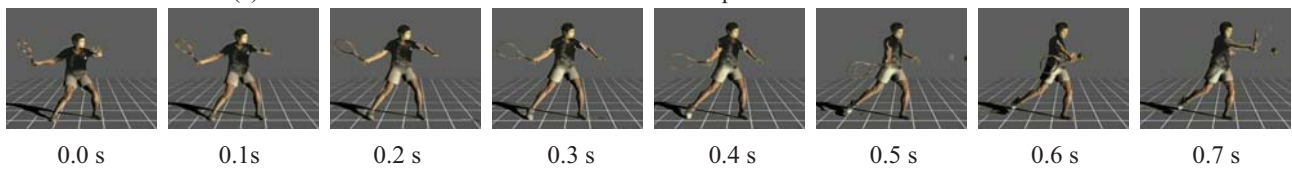


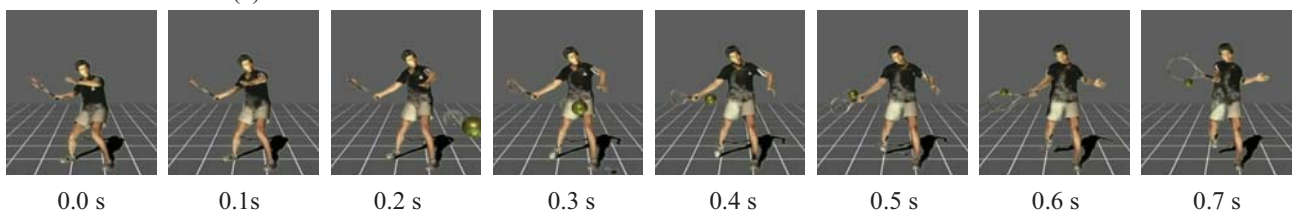
Fig.16 Robust instantaneous NANBA backhand-stroke of humanoid biped robot GENBE utilizing instability, which uses only small active power. (250 fps)



(a) 3Dimensional CG time historical frames: top view



(b) 3Dimensional CG time historical frames: side view



(c) 3Dimensional CG time historical frames : front view

Fig.17 Three dimensional analysis of forehand strokes by top-pro Roger Federer.



Fig.18 Conventional forehand-stroke by KAWAZOE.



0.0 s      0.1 s      0.2 s      0.3 s      0.4 s      0.5 s      0.6 s  
 (a) NANBA forehand stroke proposed by Kawazoe (Proto-type1)



0.0 s      0.1 s      0.2 s      0.3 s      0.4 s      0.5 s      0.6 s  
 (b) NANBA forehand stroke proposed by Kawazoe (Proto-type 2)

Fig.19 Robust instantaneous NANBA forehand-stroke utilizing instability, which uses only small active power.



nearly state 1      nearly state 2      nearly state 1      nearly state 2  
 (a)(Proto-type1)      (b) (Proto-type 2)

Fig.20 Fundamental two states of NANBA Forehand strokes proposed by Kawazoe.

地面を蹴らない動きが見える。

図 18 は筆者の従来のフォアハンド, 図 19 は (習熟していないが) 筆者が提案するナンバ・フォアハンド, 図 20 は 2 つの状態図である. 身体全体を同時並列的に動かすことにより手打ちになりやすく, 非力でもスイングが鋭く速く, 安定しやすい. 状態 1 は相手プレイヤーのボールの軌道や球質により決まり, 状態 2 はどこに打ちたいかによって決まるので, ボールを呼び込むタイミングだけを意識すればよい.

## 6. 結論

平衡点不安定を利用して地面を蹴らない二足ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの原理をテニスに展開し, 不安定を利用して身体を同時並列的に一気に遷移するロバスタなテニスの打法「ナンバ・テニス」を提案した.

ねじらない・うねらない・踏ん張らない「ナンバ・テニス」は, 関節に負担が少なく, 省エネルギーであり, テニスの経験を重ねる(ボールのはずみや回転などの性質を学ぶ)ことにより誰でも自然に少しずつ習熟していく極めてシンプルな原理であり, インパクトを点ではなく領域として捉えるので, ボールに当たるという意識が少なく, プレシャーのかかるような状況で特に威力を発揮するはずである.

テニスプレイヤー・ロジャー・フェデラーの 3 次元映像作成にご助力いただいたテニスリゾート 9 9・村上安治氏に深謝する. また, 熱心な協力を頂いた年々の大学院, 学部最終学年学生のご助力に深謝する.

## 文献

- (1) 甲野善紀・前田英樹, 剣の思想, 青土社, (2001)
- (2) 甲野善紀, 日本人古来の動きを取り戻せ, 中央公論, 2006 年 11 月号, pp.184-192.
- (3) 甲野善紀, 武術とスポーツの身体操法の違い: 身体運動に対する新たな視座を, 科学, Vol.74, No.6, (2004), pp.772- 773.

- (4) 川副嘉彦, ねじらない・うねらない・ためない「ナンバ・テニス」の研究, 第 19 回日本テニス学会・第 8 回テニスフォーラム共催大会抄録集, 2007, p.29.
- (5) 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.
- (6) 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, 日本機械学会主催 Dynamics and Design Conference 2006 CD-ROM 論文集 560, (2006), pp.1-6
- (7) 川副嘉彦, 不安定を利用する人間型二足ロボット「源兵衛」に学ぶ関節に負担の少ない身体操法, 福祉工学シンポジウム 2006, (2006), pp.301-304.
- (8) 甲野善紀監修, 甲野善紀の驚異のカラダ革命, 学習研究社, (2006)
- (9) 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
- (10) 川副嘉彦, 自律型二足ロボット「源兵衛」に学ぶ俊敏な転倒時・衝撃回避受け身と起き上がり, 福祉工学シンポジウム 2006, (2006), pp.297-300.
- (11) 川副嘉彦, 「ロボットと人間が 21 世紀を生きるための「ヒューマン・ロボット学」の提唱」, 第 5 回 21 世紀連合シンポジウム - 科学技術と人間 - 論文集, (2006), pp.23-26.
- (12) 川副嘉彦, 人間型二足ロボット「源兵衛」を用いたナンバ歩きからナンバ走りの再現, バイオメカニクス研究, 12 巻, 1 号,(2008), pp.23-33.