

パワーテニスにおける滑りにくい転倒しにくい 身体負荷の少ない省エネ・フットワーク

川副 嘉彦^{*1}

Energy Saving Footwork that is hard to Slip and Turn over with a Little Physical Load in Power Tennis

Yoshihiko KAWAZOE^{*1}

^{*1} Kawazoe Laboratory
Kaga 2-3-1-904, Itabashi-ku, Tokyo, 173-0003 Japan

After seven singles players had retired or withdrawn with injuries at Wimbledon 2013, the All England Club issued an extraordinary statement defending the state of its grass. According to the International Tennis Federation, the seven retirements and walkovers in singles were believed to be the most on the same day at a Grand Slam event in the Open era. All of the slipping and injuries led to questions of why. The suggested culprits included the length of the season, the short time to adjust to grass from clay, and the condition of the courts. There have been several significant falls, the most graphic being when Azarenka twisted her right knee during her first-round that left her lying on the court in tears for several minutes. With so many players being asked about court conditions in news conferences and so many news media requests to speak to the groundskeeper, the All England Club issued a statement about the grass. "The court preparation has been to exactly the same meticulous standard as in previous years, and we expect them to continue to play to their usual high quality." It is said that different types of tennis injury have been associated with play on different court surfaces and current knowledge of tennis player and court interactions is limited. Some research with tennis injury incidence, player movements and the biomechanics of slips were begun and a new direction for assessing tennis player-surface interactions has discussed for practical use in the future regulation of tennis courts. On the other hand, in sports, moving body parts around a fixed joint is very popular, but it seems to limit one's power, whereas more power can be generated and the strain on the body is lessened by using the entire body without twisting motion and not resorting to just the fixed joint. This paper proposed the approach for realization of robust physical movements in tennis based on distributed control of physical body in humanoid biped robots, which uses only small active power making full use of equilibrium instability as a source of driving force with simple state transition. Making postures simultaneously by using the entire body produces natural movements.

Key Words : Sports Engineering, Human Dynamics, Dexterity, Physical Movement, Tennis Injury, Humanoid Biped Robot, Biomechanics of Slips, Tennis player, Robustness, State Transition, Constructive Approach.

1. 緒 言

1.1 怪我で棄権する選手が続出したウィンブルドン・テニス選手権 2013

テニスのウィンブルドン選手権 2013 では、パワーあふれる好ゲームが展開された。しかし、滑って転倒したり、怪我で棄権する選手が続出した。第3日は、自慢の芝コートで滑って膝をひねるなど、怪我で棄権する選手の数が7人にのぼり、「史上まれにみる異常な事態」（英BBCテレビ）となった。ロイター通信は同日、「ウィンブルドンの暗黒の日」と伝えた。国際テニス連盟（ITF）によると、1968年のオープン化以降の四大大会で1

^{*1} 正員，フェロー，川副研究室（〒173-0003 東京都板橋区加賀 2-3-1-904）
E-mail: kawazoe.yoshihiko@gmail.com

日の棄権者数としては過去最多という。女子シングルスで第2シードのビクトリア・アザレンカ（ベラルーシ）が右膝負傷で棄権。続いて男子シングルス1回戦で全仏オープン王者のラファエル・ナダル（スペイン）に勝ったステイーブ・ダルシス（ベルギー）が右肩、第6シードのジョーウィルフリード・ツォンガ（フランス）が対戦中に左膝を痛めて有力選手が相次ぎ棄権した。棄権した7人中4人は膝の故障だった。第3シードのマリア・シャラポワ（ロシア）は怪我はしなかったものの、試合中に何度も滑って転び、敗北。その後、芝コートの表面が滑りやすくなっているとクレームを伝えたが、大会主催者側は「例年と何も変わっていない」と述べ、クレームを一蹴した^{(1)・(3)}。しかし、一步間違ったら惨事になるような転び方はきわめて危険であり、障害防止対策の問題が残る。

ウインブルドン・テニス2013において1936年のフレッド・ペリー以来77年ぶりとなる悲願の地元優勝を果たしたアンディ・マレー（英国）は、その後、腰の手術を受け、予定されていた3大会の全てをキャンセルし、今後のスケジュールも白紙の状態であるという⁽⁴⁾。

各種のテニス障害は異なるコート面でのプレーに関係しており、テニスプレーヤーとコート面の相互作用についての現在の知識は限られていると言われている。テニス障害の発生率、プレーヤーの動き、スリップのバイオメカニクスなどの新しい研究が始まっており、将来のテニスコートの規則の見直しも想定して、テニスプレーヤーとコート面の相互作用の評価に向けての新しい方向が検討されている⁽⁵⁾。

1.2 地面を蹴らない動き

一方、テニスコートのサーフェスの検討や改良の方向とは別に、滑ったり転倒したりしにくい俊敏な身体操法の研究も重要である。うねって力を伝えることの有効性はよく知られており^{(6)・(7)}、鞭の先端は音速を超えるほどの威力を発するが、鞭がしななって順々に力を伝えるまでに距離と時間がかかり、気配がでる。さらに、鞭の原理の場合は強い踏ん張りが必要なために身体を痛めることが多いが、身体全体をうまく組み合わせて使えるようになると身体の各部位にかかる負担が少なくてすむという指摘がある⁽⁸⁾。

甲野⁽⁸⁾は、スポーツにおいて体をつなげて鞭の原理で動かそうとするのに対して、武術としての使い方は、体を割り、その割ったそれぞれが、群泳する魚が一斉に方向転換するようにして、総和的に動くのではないかと推測している。鞭の原理の場合は強い踏ん張りが要るが、体が割れてくると、身体の各部位は、それほど速く動かなくても、トータルとしては速くなるので、身体保全上も重要であり、武術が準備運動をしないのは、身体全体をうまく組み合わせて使えるようになると身体の各部位にかかる負担が少なくてすむことも大きな理由ではないかと述べている。現代剣道の体の使い方が床を強く蹴って攻撃するため足首やアキレス腱を痛めることが多いこと、手首のスナップを利かせるため稽古量の多い人は腱鞘炎に悩まされること、一方、伝書「願立剣術物語」の「足下薄氷を踏むが如し」という一条は床を踏みしめたり蹴ったりすることを嫌っていたことを示すと指摘している。

1.3 本研究の目的

本研究では、テニスの傷害事例やフットワークの問題点を探り、直立二足歩行ロボットを用いた実験も併用して、エネルギー消費が少なく、摩擦や凹凸の大小など地面の状態に影響されにくく、滑ったり転倒したりしにくい俊敏な身体操法について考察し、フットワークの改善策を探る。

テニスでも多用される鞭の原理は、相当な威力を発するが、鞭がしななって順々に力を伝えるまでに距離と時間がかかり、瞬間的な対応が難しく、強い踏ん張りが必要なために、身体を痛めやすい。身体全体をうまく組み合わせてタイミングよく使うことにより、身体の各部位にかかる負担が少なくて、速さと頑健性を生む動きを探る。

2. 鞭の身体操法から同時並列的な身体操法へ

甲野によると、普通、人間は力を発しようとした時、足を踏ん張り、そこを最初の基地として膝、股関節、腰、背、胸、肩、肘、手といった具合に順次体勢を整えて対応しようとする。つまり、ある方向に力を発するためには、できるだけ早く準備をするわけであるが、どうしてもその動きは鞭がうねるように、あるいはドミノ倒しのようにパタパタと体の中に力の波が形成されていく。これはいわゆる溜めをつくるという状態で、鞭がうねるように体を使うことによって必要な力はあるが、問題点は時間がかかってしまうことである。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⁽⁹⁾。陸上の短距離走で世界記録を持つボルト選手の走りには、「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」身体操法に近い動きが見られるが、それでも腰を痛めて欠場することがある。

関節に負担が少ない動きのイメージとして「ナンバ」⁽⁹⁾という用語を象徴的に使い、江戸時代、江戸—仙台間 300 kmを1日で走ったと言われる伝説の飛脚にちなんで「源兵衛」と名付けた二足歩行ロボット「源兵衛」は腰をねじる関節がないが、腰をねじらなくても甲野式・極短距離走（スタート・ダッシュ）が実現できる。ボルト選手の走りさえ、まだ改良の余地があるように見える。二足歩行ロボット「源兵衛」のねじらない・うねらない・踏ん張らない「ナンバ走り」は、極力、地面を蹴らないで足裏を浮かせて、転倒力を利用して移動するのが特長であり、関節への負担が少ない。

脚部 10 関節の二足歩行ロボットによる右方向への横移動（サイド・ステップ）の場合、支持足で地面を蹴る横移動は、図 1 の状態 1 から状態 2 への状態遷移により生成される。支持足で地面をほとんど蹴らない横移動は、図 2 の状態 1（不安定）から状態 2（安定）への状態遷移により生成される。右へ横移動するときは、右膝を少しだけ曲げて、右脚を上げながら右脚を横に開くと、身体の重心が右へ倒れ込む。体重をできるだけ支点（左足）に残さないで転倒力を利用して右横へ移動することができる。すべての関節が同時並列的に動き始め、同時に動き終わって、状態 1 あるいは状態 2 の姿勢を瞬時に形成する。どちらも右方向への横移動であるが、上体の傾きが逆になるのが大きな違いである。

図 3 は、昔のテニスプレーヤー・ローズウォール選手のバックハンド・ストロークにおける横移動（サイド・ステップ）のスタート直後の挙動を示す⁽¹⁰⁾。動物のような動きの美しさに魅せられる。図 3 とは移動方向が逆であるが、図 2 によると、ロボットの動きからローズウォール選手の動きの美しさの秘密が理解できる。

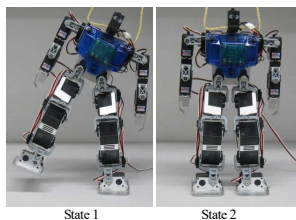


Fig.1 Two states of right side step with kick of ground

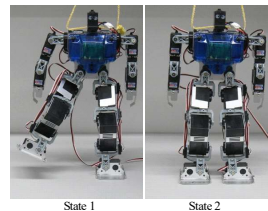


Fig.2 Two states of right side step without kick of ground

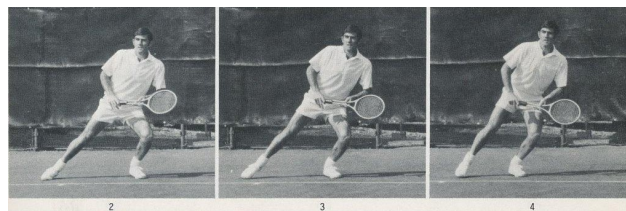


Fig.3 Side step without kick during backhand stroke by K. Rosewall¹⁵⁾

3. 過剰駆動力の制御と不安定利用状態遷移による地面を蹴らない歩き・走り

図 4 は、我々の提案する不安定を利用する状態遷移による非線形制御の基本原理解である。図 4(a)のように、糸で吊り下げられた質量 M の振動性 2 次要素を例にして説明すると以下になる。質量 M を吊るす支点 A を B の位置へ AB だけステップ状に移す。そうすると質量 M は振子となって B の真下を通過し他端で一瞬停止する。その瞬間に支点を B から D へ BD だけステップ状に移せば、質量 M は再び振子となって、振動を繰り返しながら前進する。一種のリミットサイクル（自励振動）であり、エネルギー源は支点のステップ状の移動である。操作量の切換は、図 4(b)のように、質量 M の速度 dx/dt がゼロの瞬間に行う。急停止の場合は、図 5 のように、オルデンバーガーの非線形最適制御の原理を使って目標値突変への応答を最短時間内に終結させる^{(11),(12)}。ステップ AB , BD あるいは糸の長さを変えることにより、自在の速度で移動する。質量 M が停止する C 点で設定した待ち時間後に移動すれば、ゆっくりした速度の前進移動も実現できる。

図 6 は、図 1～図 4 のロボットのモータ配置と地面を蹴らない場合の状態 1（不安定）の姿勢である。①の股関節モータの他に②～④のモータを同時並列に動かして状態（姿勢：形）を形成する。それぞれのモータ相対角

変位を同一の時間で同時に回転させる．図 2 では，不安定な状態 1 : 0.40 s から安定な状態 2 : 0.70 s へ約 0.3 秒で遷移する．図 7 は，ナンバ歩き・ナンバ走りと呼ばれる状態図である．ロボットの前傾角度を大きくしてピッチを速くすると歩きから走りに転じる．状態 1 (不安定) は前傾姿勢で体をやや右にシフトし左脚を上げた状態，状態 2 (安定) は左脚が前で着地した状態，状態 3 (不安定)，4 (安定) はそれぞれ状態 1，状態 2 の逆である．状態から状態へ 4 つの状態を順次遷移することにより前進する．状態 2 から状態 3 への遷移を実行すると，ロボットは前方に倒れていく．転倒する前に安定な平衡状態 4 に移行することにより転倒しないで歩く．各関節の角度 (姿勢) と動作時間を与えることにより自在の速度で前進する．

図 8 は，図 7 の安定平衡状態 2 から不安定平衡状態 3 (状態 1 と逆脚) に遷移する部分のプログラムのみを実行したときの二足ロボットの挙動を示す．状態 3 は不安定な平衡状態だから前方に倒れていく．このままでは転倒するが，転倒する前に安定な平衡状態 4 に遷移することにより転倒しないで歩く．

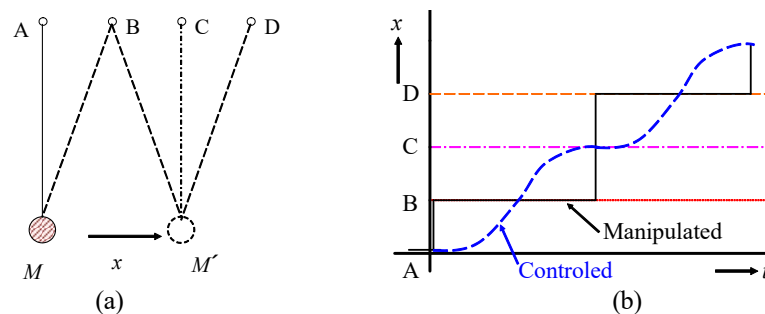


Fig. 4 Proposed nonlinear optimal control applied to humanoid biped robot walking.

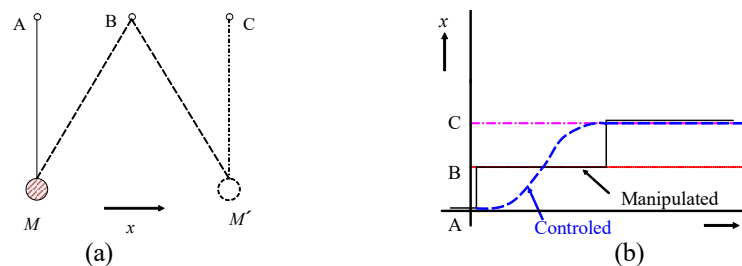


Fig. 5 Example of nonlinear optimal control by Rufus Oldenburger.

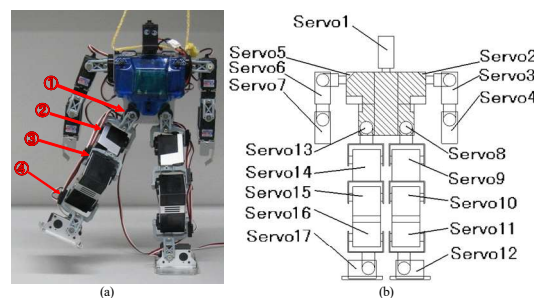


Fig. 6 Servomotors configuration and the State of right side step using instability without kick of ground

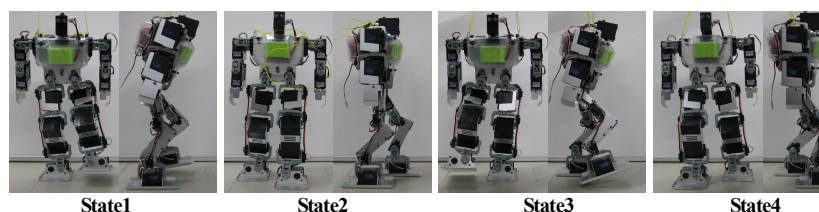


Fig.7 Four States of NANBA Walk and Run of biped robot with 10 freedom legs (GENBE - No.4-2007)

図9は、図7の状態図において、サーボモータ動作特性を用い、状態1,3を動作時間3、状態2,4を動作時間4に設定した場合のロボット（全高340 mm、重量1.3 kg）の走行結果（約2歩のコマ写真）である。走行のピッチ速度は6.58 steps/s、前進速度は36.5 cm/sである。

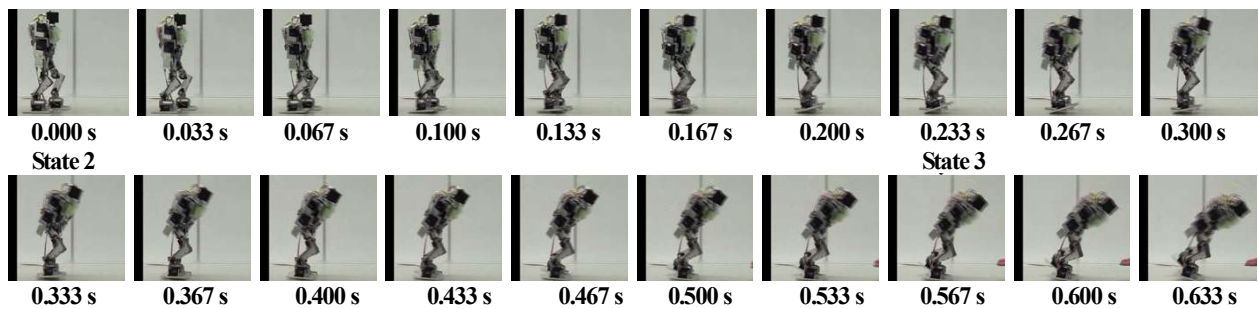


Fig.8 State transition from State 2 (Statically stable) to State 3 (Statically unstable), falling down to the ground.

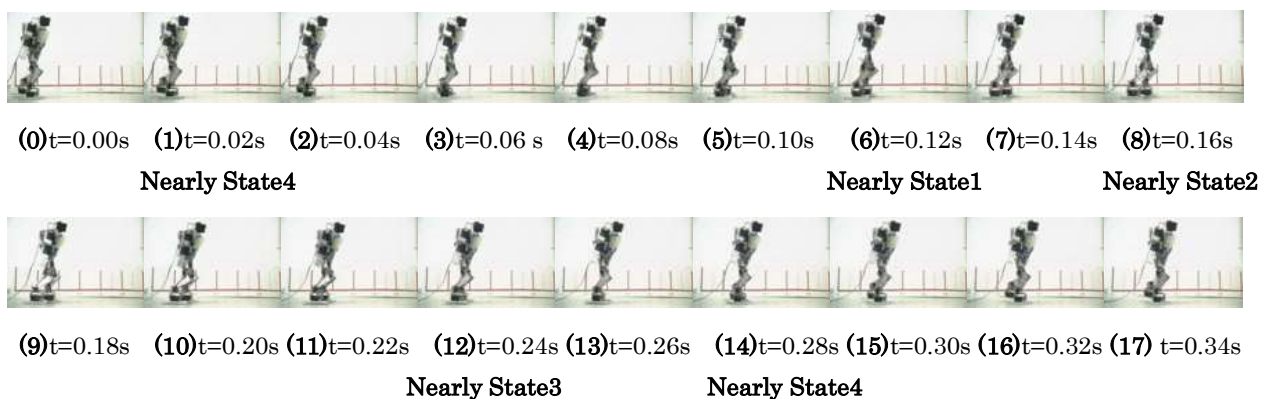


Fig.9 NANBA dash (36.5 cm/s, 6.58 steps/s) of biped robot (GENBE No.4-2007). It takes only 0.3 seconds for 2 steps.

図10は、横軸が歩行ピッチ速度（歩数/秒）、縦軸が前進速度の実測値である。同じ姿勢角度データ（状態）で動作時間の設定値を変えた（サーボモータの速度を変えた）場合の結果である。ピッチ速度に比例して前進速度が増している。図11は、(a) プログラムで与えられた状態2の姿勢と(b) 図9における実際の走りにおける状態2に相当する姿勢を比較している。実際の動きでは、サーボモータ速度の速い動作時間3、動作時間4ではトルク不足のため足が十分上がらず、歩幅が狭くなり、プログラム通りの動きにはなっていないが、転倒しないで走ることを示している。図12は、サーボモータ動作時間に対する前傾姿勢角度の実測値である。動作時間が5よりも短くなると、動作時間が短いほど前傾姿勢が大きくなっている。また、図13は、サーボモータ動作時間に対する歩幅(Stride)であり、前進移動距離の実測値から算出したものである（3回の平均と標準誤差を示す）。動作時間がかなり短くなっても歩幅が減少しておらず、動作時間の長短にかかわらず、ほぼ同一の歩幅になっている。トルク不足のために脚が十分上がらなくても、歩幅が実質的には減少しないで、ピッチ速度に比例して前進する。しかも、同じ状態図（姿勢）データでピッチ速度だけを変えるだけで広範囲の前進速度で歩き・走る。ただし、これらのロボスタな動きに到達するまでには状態図（姿勢角度）の決定に試行錯誤と経験とセンスを必要とする。

図9と同じプログラムでロボットは氷雪の榛名湖上を自在の速度で走った⁽¹³⁾。摩擦に依存しない地面を蹴らない歩き・走りであり、関節の負担も少ない。このように地面を蹴らないで自然な転倒力を利用する状態遷移によると、種々の建物の床、廊下、室内、あるいは屋外などの多様な環境でロボスタに歩行・走行する⁽¹⁴⁾。摩擦の大きな環境（カーペット）では、ロボットは歩行中の慣性力やトルク不足のために後ろ足のつま先が床に接触して引っかかって大きく回転したり、後方に傾斜して転倒したりすることが多い。このような場合は、後ろ足先が床に接触しないように、State2とState3の間に、State2の姿勢で後ろ足先を少し上げた状態を新しく追加することにより、つまずきやすい凹凸・摩擦の大きいカーペット上を巧みに歩くことができる。摩擦が大きくて引っかかりやすいカーペット上での歩行摩擦が小さくて滑りやすい床での歩行は、ほぼ同じ速度で前進する⁽¹⁵⁾。

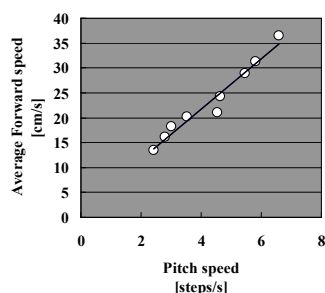


Fig.10 Forward speed vs pitch speed of biped robot.



(a) State 2 in program



(b) Nearly State 2 in reality

Fig.11 Difference between States of program and actual movement.

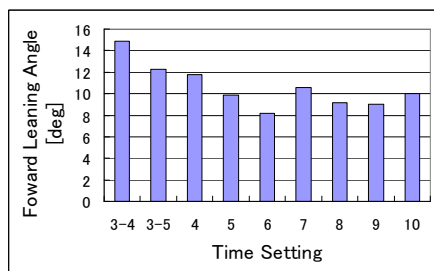


Fig.12 Forward leaning angle vs Time setting

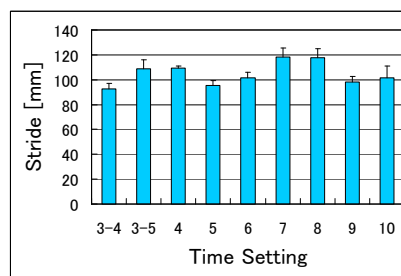


Fig.13 Stride vs. Time setting

4. 過剰駆動力の制御と状態遷移による地面を蹴らない多様な動き

不意に後方から押された二足歩行ロボットが、転倒を知覚し、転倒時の衝撃を最小限にするように受け身をし、転倒した後に素早く立ち上がる。ロボットのすべての関節を同時並列に動かして、動きを阻害する過剰駆動力を制御して状態（姿勢）を形成することにより巧みな動きが発現する⁽¹⁶⁾。

図 14 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）に遷移することにより、図 15 のように、その場で瞬間的に右回りに 180 度方向転換する⁽¹⁸⁾。

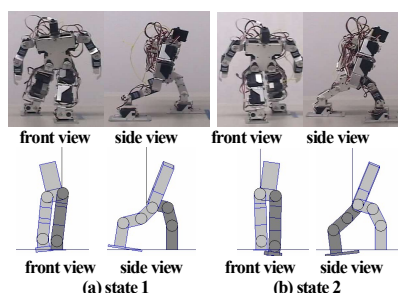


Fig.14 Two states of 180 degrees NANBA TURN.

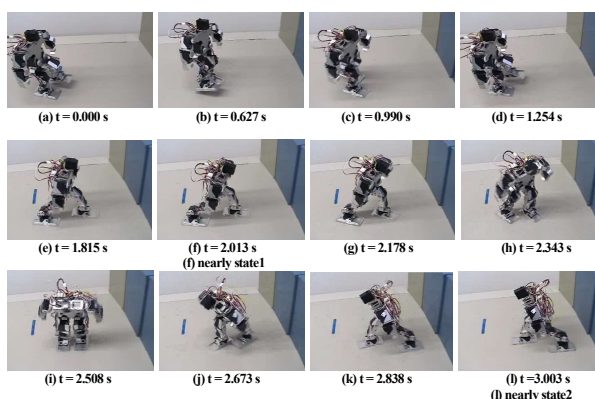
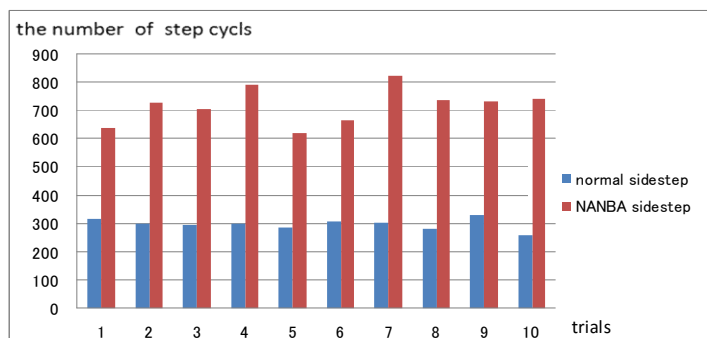
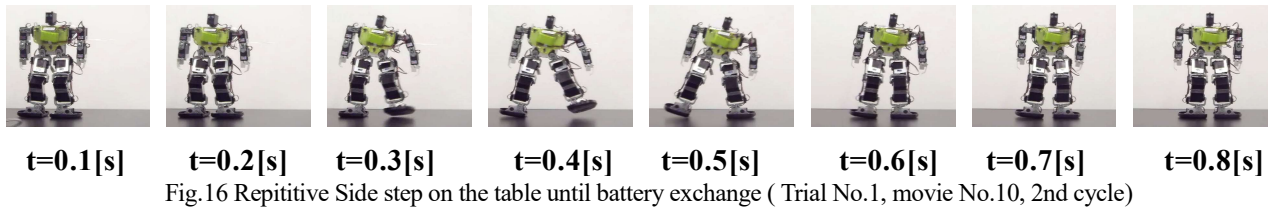


Fig.15 NANBA TURN based on distributed control of physical body. It turns instantaneously 180 degrees per second.

5. 平衡点安定の動きと平衡点不安定の動きのエネルギー消費量の比較

常時バランスをとりながら動く平衡点安定の（一般的）動きとバランスを崩して動く平衡点不安定の動き（ナンバと称する）の消費エネルギーを繰り返しサイドステップを行わせて比較してみた。機体として Kondo 科学社製の KHR-2HV（脚部 10 自由度、腕部 6 自由度、頭部 1 自由度、全高約 350 mm、総重量 1.3 kgf、マイコンボード RCB-3HV、内臓バッテリー Ni - MH、10.8V-300mAh）を使用した。サイドステップの移動距離を 10 cm に調整し、

繰り返しサイドステップ動作を行わせ、バッテリーが消耗して転倒するまでの連続回数と連続時間を測定した。図 16 は、平衡点不安定の動き（ナンバと称する）のコマ写真の例である。テーブル上での結果が図 17、カーペット上での結果が図 18 である。ナンバ的ステップは動作が速く、連続動作回数が多く、長い時間動作できる。バッテリーが消耗しかかってくると、平衡点安定の（バランスをとりながらの）動きは動作が不完全で転倒しやすい。

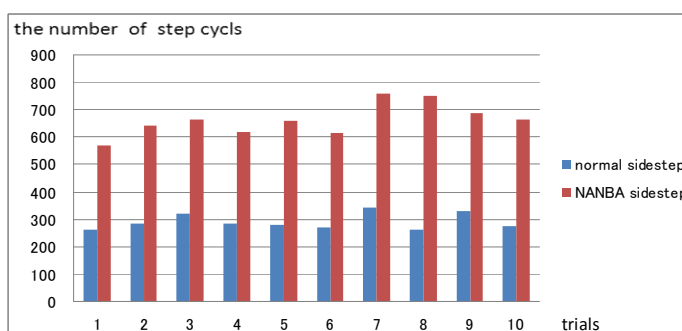


(a) Side step repetition number

trials	normal	NANBA
1	10:50	10:56
2	9:36	12:18
3	9:50	11:45
4	9:54	13:25
5	9:25	10:21
6	10:50	11:07
7	10:30	13:27
8	9:41	12:05
9	11:06	12:14
10	8:53	12:22
AverageM	10:03	12:00

(b) Side step repetition times (minutes)

Fig.17 Repetition number and times in the side step on the table until battery exchange.



(a) Side step repetition number

trials	normal	NANBA
1	9:12	9:36
2	9:51	10:59
3	10:58	11:03
4	9:59	10:26
5	9:26	10:56
6	9:03	9:58
7	11:30	12:31
8	8:25	12:28
9	11:13	11:14
10	9:21	10:40
AverageM	9:53	10:59

(b) Side step repetition times (minutes)

Fig.18 Repetition number and times in the side step on the carpet until battery exchange.

6. テニスへの展開

図 19 は、図 14、図 15（瞬間的ナンバ・ターン）の応用である。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鋭いテニスのスイング（バックハンド・ストローク、0.3 秒）が生まれる。腰を捻らないで足裏のすべりを利用するので、腰への負担がかからない⁽¹⁸⁾。

図 20 は、テニスコート右サイドに走ら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。

図 21 は、テニスのレシーブにおいて鈴木貴男選手がノータッチ・エースを取られたときの右への横移動の様子を示す。動き始めるときに左足で蹴る動作が残っており、スタートが少し遅れている。

図 22 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 23 は 2 つの状態図である⁽¹⁸⁾。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にくく、非力でもスイングが鋭く速く、安定しやすい。状態

1 は相手プレー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。図 24 はオープンスタンスからのフォアハンドの提案である。テークバックは身体をねじっているのではなく、足裏を浮かせて関節角度を変えることにより、身体の向きを変えているだけである。インパクトでは、足裏を浮かせて身体の向きを元に戻すだけである。

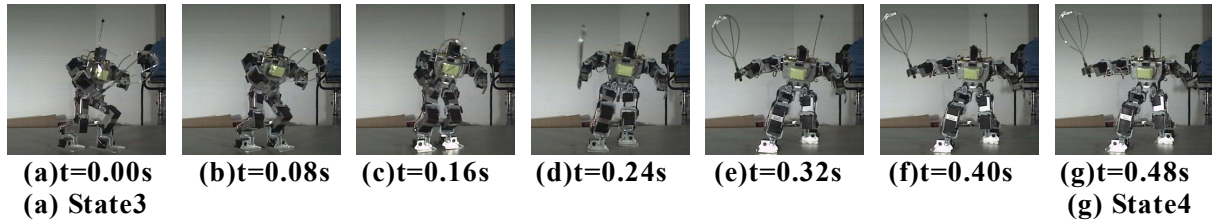


Fig.19 Robust NANBA backhand-stroke of biped robot , which uses only small active power. (250 fps)

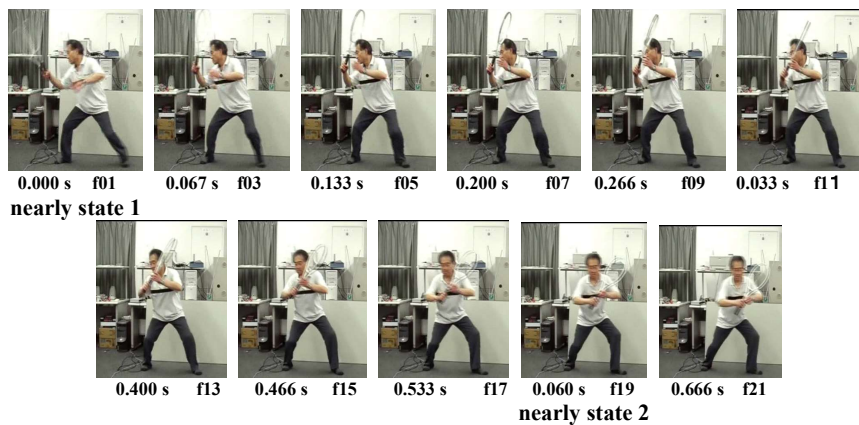


Fig.20 Robust instantaneous NANBA TURN utilizing instability, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees in 0.7 seconds.

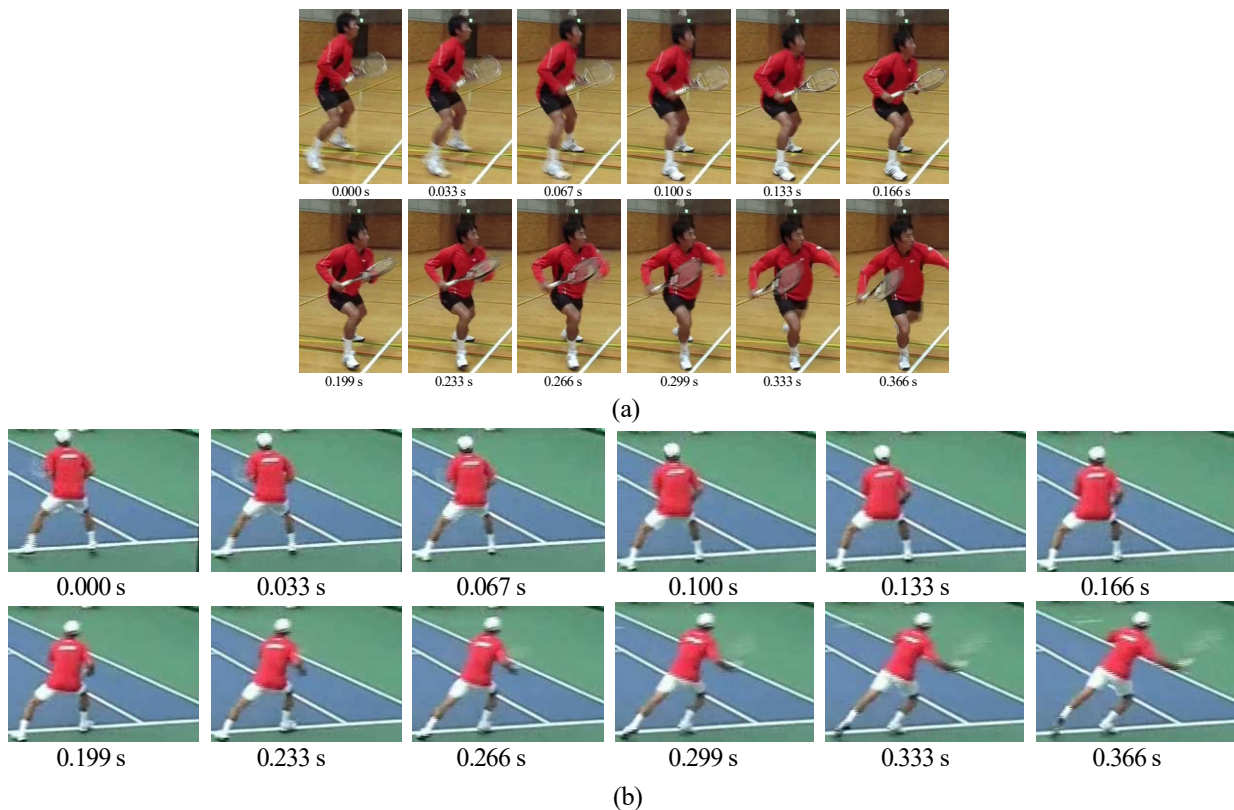
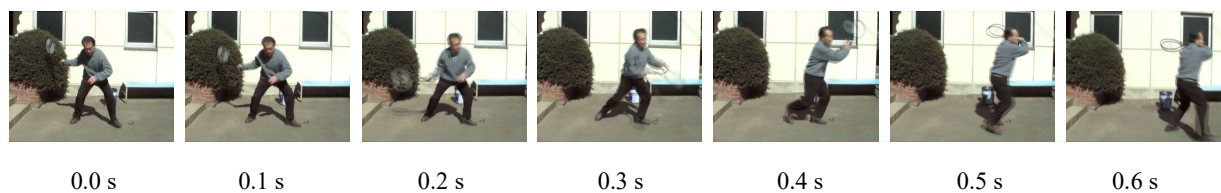


Fig.21 Side step during receive a served ball by T. Suzuki.

図 25 は、最近のクルム伊達公子選手のレシーブにおいてリターン・エースを取ったときのフォアハンドである。足裏を浮かせて、身体と重いラケットをうまく利用したインパクトであり、図 22～図 24 のナンバ・フォアハンドに近いように見える。最近のテニスの現場では、足裏を浮かせて空中で仕事をする選手が多く見られる。



(a) NANBA forehand stroke proposed by Kawazoe (Proto-type1)



(b) NANBA forehand stroke proposed by Kawazoe (Proto-type 2)

Fig.22 Robust instantaneous NANBA forehand-stroke utilizing instability, which uses only small active power.



(a) (Proto-type1)

(b) (Proto-type 2)

Fig.23 Two states of NANBA Forehand strokes proposed by Kawazoe.

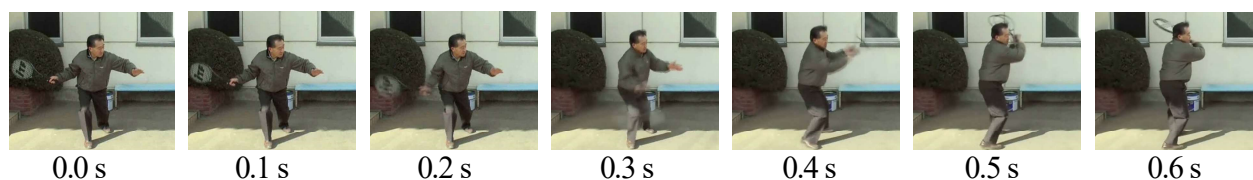


Fig.24 Open stance NANBA forehand-stroke proposed by Kawazoe, which uses only small active power.



Fig.25 Forehand-stroke during receive a served ball by K. Date Krumm.

7. おわりに

テニスのウィンブルドン選手権 2013 では、パワーあふれる好ゲームが展開されたが、滑って転倒したり、怪我で棄権する選手が続出した。一歩間違えたら惨事になるような転び方が目立ち、パワーテニスのフットワークの問題点が残された。

平衡点不安定を利用して地面を蹴らない二足ロボットのナンバ歩き・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トな「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る。身体全体に滞りがないようにすべての関節角度を、同時に、瞬時に動かして、状態（姿勢）を形成して、状態から状態に一気に遷移することにより速さとロバスト性を生む。インパクトについても、点ではなく状態から状態への領域として捉えるので、ボールに当てるという意識が少なく、プレッ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。

おわりに、ローズウォールの写真の掲載を快諾いただいた故・川廷栄一氏と講談社、および写真を掲載させていただいた鈴木貴男選手、クルム伊達公子選手、日本テニス協会に厚くお礼申し上げる。また、埼玉工業大学・工学部の卒業研究として実験にご助力いただいた歴代の4年生諸氏に深く感謝する。

文 献

- (1) Meyers, N. J., “Many Slips, but Federer Takes the Biggest Fall”, The New York Times, June 26, 2013, (2013),
<http://www.nytimes.com/2013/06/27/sports/tennis/injuries-force-flurry-of-withdrawals-at-wimbledon.html?pagewanted=all>
 (2013年9月20日確認)
- (2) “「暗黒の日」7選手が棄権、フェデラー、シャラポワ敗退「まれにみる異常事態」”, 産経ニュース 2013.6.27, (2013),
<http://sankei.jp.msn.com/sports/news/130627/oth13062711170010-n1.htm> (2013年9月20日確認)
- (3) “ソングは途中棄権「膝に問題」”, 産経ニュース 2013.6.27, (2013),
<http://sankei.jp.msn.com/sports/news/130627/oth13062710150005-n1.htm> (2013年9月20日確認)
- (4) “全英王者マレーが手術決断で今季絶望、復帰は来季かく男子テニス”, tennis365.net, (2013),
<http://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20130920-00010000-tennisnet-spo> (2013年9月20日確認)
- (5) Dunn, M., Goodwill, S., Wheat, J. and Haake, S., “Assessing Tennis Player Interactions with Tennis Courts”, Portuguese Journal of Sport Sciences 11 (Suppl. 2) (2011), pp. 859 – 862.
- (6) 小林一敏, “スポーツの達人になる方法”, オーム社, (1999), pp.64-69.
- (7) 小林一敏, “スポーツの熟達と筋肉の力学的制御”, スポーツ工学, No.6 (2011), pp.33-38.
- (8) 甲野善紀, “古武術からの発想”, PHP 研究所, (2003), pp.97-104.
- (9) 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, Vol.12, No.1 (2008), pp.23-33.
- (10) ケン・ローズウォール (構成・写真: 川廷栄一), “ローズウォールのテニス”, 講談社 (1975), pp.65-68.
- (11) オルデンバーガー, “自動制御”, Vol.3, No.2 (1956), p.69.
- (12) 高橋安人, “自動制御工学”, 岩波書店 (1965), pp.139-140.
- (13) 川副嘉彦, 伊倉良明, 興水裕矢, 筋野駿介, 原 昌彦, “氷雪を走る人間型二足ロボット「源兵衛」のロバスト性のメカニズム”, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, No.08-1(5) (2008), pp.165-166.
- (14) 川副嘉彦, 伊倉良明, “人間型二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」のロバスト性のメカニズム, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, No.08-23 (2008), pp.165-170.
- (15) 川副嘉彦, 中川慎理, 高野悠人, “二足歩行ロボット源兵衛に学ぶ硬柔自在の身体操法とつまずきにくい・転びにくい歩行”, 日本機械学会福祉工学シンポジウム 2010 講演論文集, No.10-52(CD-Rom) (2010), pp.91-94.
- (16) 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・Dynamics and Design Conference 2006 CD-ROM 論文集 (2006), 550: pp.1-6.
- (17) 川副嘉彦, “人間型二足ロボット源兵衛のナンバ歩きから階段昇降・超高速ナンバ走りへの展開”, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, No.07-24 (2007), pp.391-396.
- (18) 川副嘉彦, 伊倉良明, 武田幸宏, 中川慎理, “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)”, 日本機械学会ジョイントシンポジウム 2009(スポーツ工学& ヒューマン・ダイナミクス)講演論文集, No.09-45 (2009), pp.136-141.