

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

JIZAI Movement and Walking that Doesn't Stumble and Doesn't Fall Down Easily Based on Distributed Control of Physical Body of Humanoid Biped Robot GENBE

正 川副嘉彦(埼玉工大)

中川 慎理(埼玉工大)

高野 悠人(埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama
Masamichi NAKAGAWA, Saitama Institute of Technology
Yuto TAKANO, Saitama Institute of Technology

In the previous paper, 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, further developing into autonomous walking, running, instantaneous turn and the simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising up. Instability makes the natural movement. This paper introduced the walking and running that doesn't stumble and doesn't fall down easily based on the the robust JIZAI movement of humanoid biped robot.

Key Words: Welfare Engineering, Robotics, Humanoid Biped Robot, Robustness, NANBA Walk, Nonlinear Optimal Control

1. 研究の背景と目的

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。必然的に疲れにくく精度の高い体の運用が求められた。「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ができるようになれば、大変な速さを生み、同時に威力も出る」(筆者要約)と武術研究者・甲野善紀が指摘している⁽¹⁾⁽²⁾。

本研究では、「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」という関節に負担が軽く、省エネの動きのイメージとして象徴的に「ナンバ」という用語を定義し、不安定が動きをつくるという原理を利用して「歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」という二足歩行ロボット「源兵衛」の歩行・走行を基本にして、つまずきにくい・転びにくい歩行法を考察する。

2. 不安定を利用する非線形最適制御の適用

不安定を利用する状態遷移によるシンプルな非線形最適制御を動きの生成に適用する。図 1(a)のように、糸で吊り下げられた質量 M の振動性 2 次要素を例にして以下に説明する。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 は振り子となって 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 は再び振り子となって、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 1(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 2 のように、目標値突変への応答を最短時間内に終結させる。たとえば、図 3(a)(b)の二足歩行ロボットの横移動で説明すると、不安定な平衡状態 1 を形成すると、横方向の転倒力が自然に発生して安定な平衡状態 2 へと受動的に遷移する。支点となる足関節の負担が少なく、動き始めが早く、支点側の足裏が滑りにくいので真横に移動する。凹凸が激しくて摩擦が大小変化する種々の建物の床、廊下、室内、あるいは屋外での歩行・走行も、自然な転倒力を利用して支持脚で蹴らないで移動すると、転倒制御なしでもロボストである⁽³⁾。

3. つまずきにくい・転びにくい歩行・走行

図 4 は古武術研究者・甲野善紀のナンバの走りの原理を示す動きである。

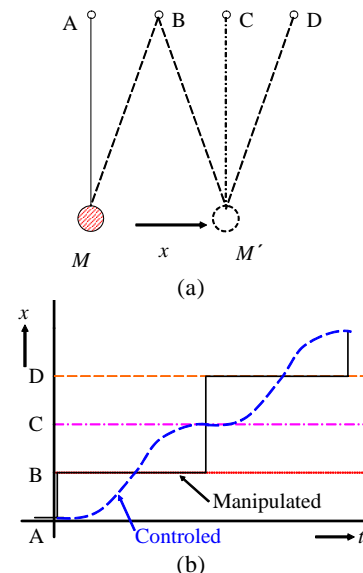


Fig.1 Proposed nonlinear optimal control applied to humanoid biped robot walking.

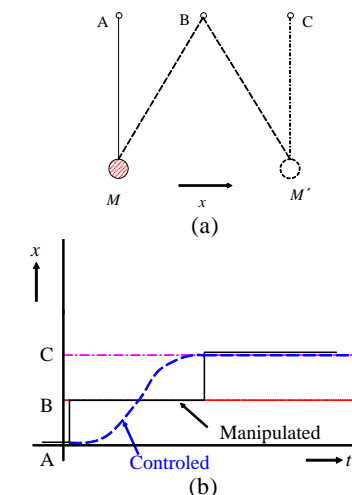


Fig.2 Nonlinear optimal control applied to the emergent stop for humanoid biped robot walking.

図5は、図4をイメージした二足歩行ロボットの不安定な平衡状態1と安定な平衡状態2を示す。図6は、図5の安定な平衡状態2から不安定な平衡状態3(状態1と逆脚)に移る部分のプログラムのみを実行したときの二足ロボ

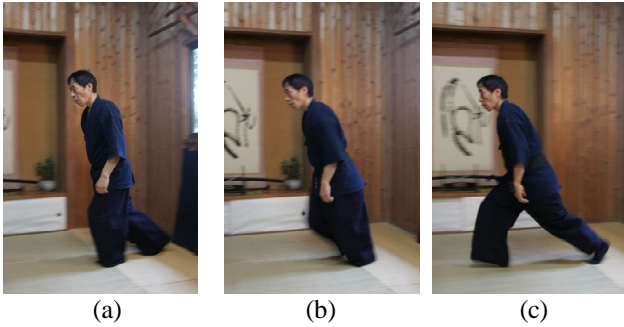


Fig.4 NANBA walk and NANBA run presented by Y. KOHNO.

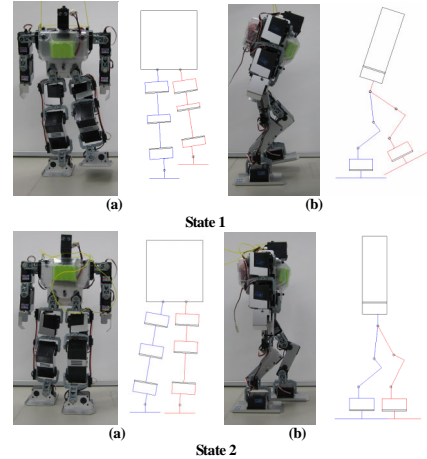


Fig.5 States of NANBA Walk and Run of biped robot GENBE No.4-2007.

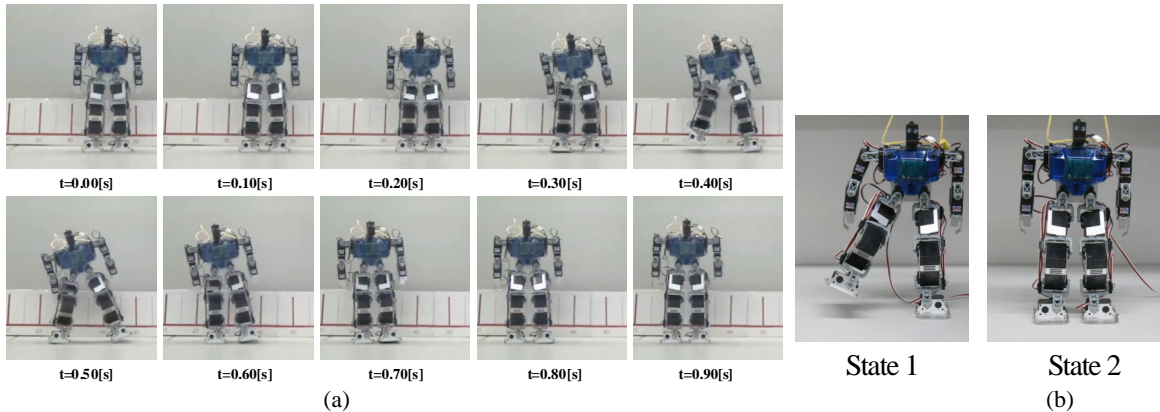


Fig.3 Robust instantaneous NANBA side-step of humanoid biped robot GENBE No.4-2 utilizing instability, which uses only small active power. Right side step using instability without kick of ground. (250 fps)

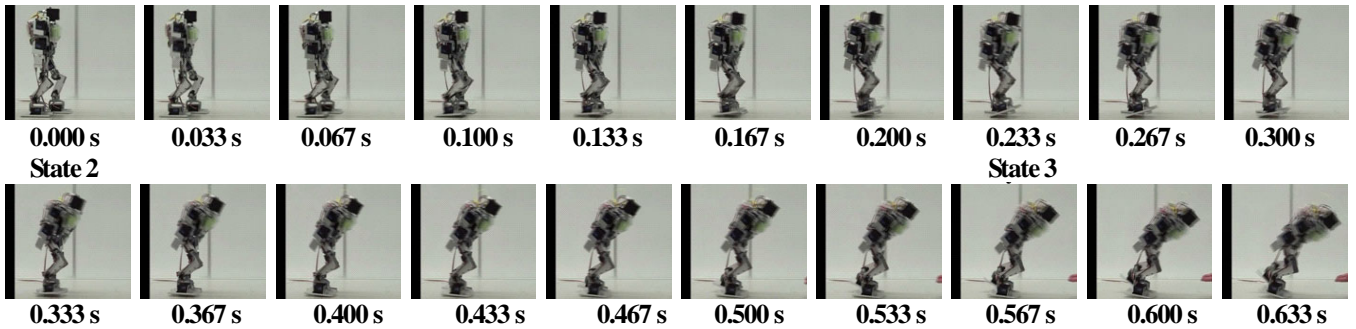


Fig.6 State transition from State 2 (Statically stable) to State 3 (Statically unstable), falling down to the ground.

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に移ることにより転倒しないで歩く。図7、図8および図9は、図5の同じ状態図(姿勢角度データ)を用いて、サーボモータの動作時間10(0.22s)、動作時間7(0.20s)、状態1,3を動作時間3(0.10s)および状態2,4を動作時間4(0.13s)に設定して実行した結果である(約2歩のコマ写真)図9が最も速く、ピッチ速度は約7 steps/s、前進速度は約37cm/sである。各設定動作時間での歩き・走り进行分析すると、設定動作時間が短くなるとトルク不足のため脚が十分には上がらないが、前傾姿勢により前方へすべっている。脚が十分上がらなくても、ピッチ速度に比例して前進し、しかも、同じ状態図(姿勢角度)でピッチ速度に比例して広範囲の前進速度で歩き・走る。ただし、ロバスタな動きを実現する状態図作成には試行錯誤と経験が必要とする⁽³⁾。

図10は、摩擦が極めて小さな氷上という環境においても

ロバスタな歩行の様子を示す。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、図11のように、90 [deg]近く回転したり、後ろ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、図12(a)のように、後ろ足先が床に接触しないように、State2とState3の

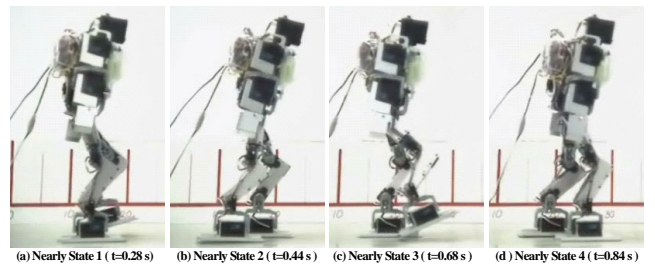
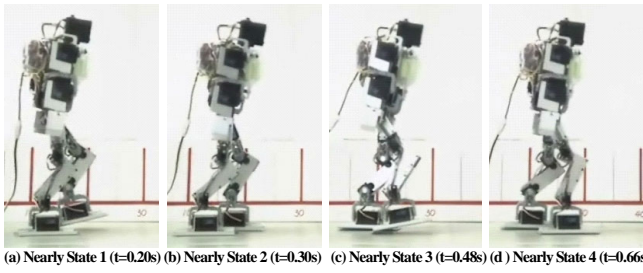
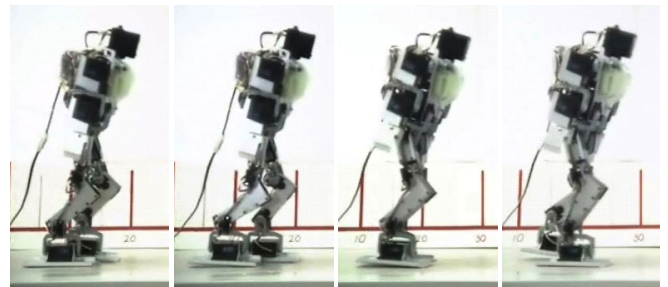


Fig.7 Biped robot movement based on state transitions with Operating Time (Speed) : 10 (250 fps).



(a) Nearly State 1 (t=0.20s) (b) Nearly State 2 (t=0.30s) (c) Nearly State 3 (t=0.48s) (d) Nearly State 4 (t=0.66s)

Fig.8 Biped robot movement based on state transitions with Operating Time (Speed) : 7 (250 fps).



(a) Nearly State 1 (t=0.12s) (b) Nearly State 2 (t=0.16s) (c) Nearly State 3 (t=0.24s) (d) Nearly State 4 (t=0.28s)

Fig.9 Biped robot movement based on state transitions with Operating Time (Speed): 3- 4 (250 fps).

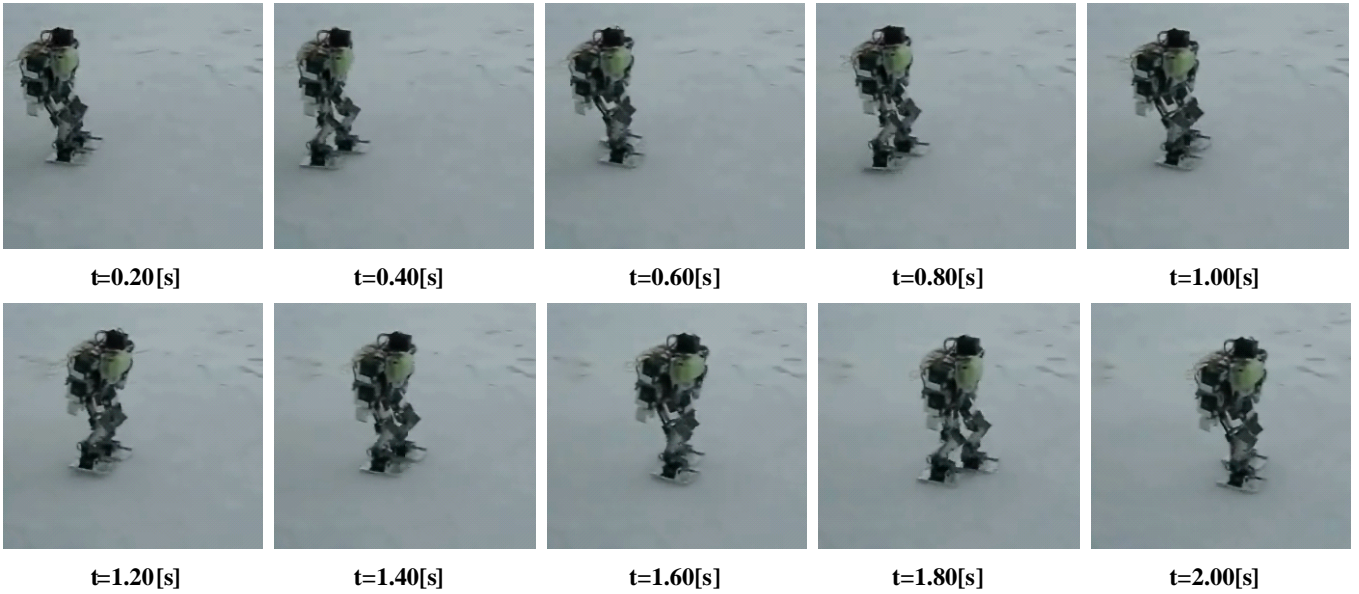


Fig.10 Robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs even on the ice and snow.

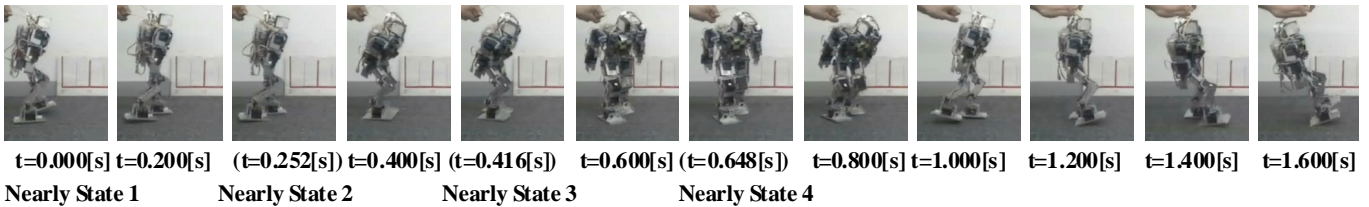


Fig.11 Stumbling and falling down behavior of humanoid biped robot when the toes were caught on the floor with frictional rough carpet.

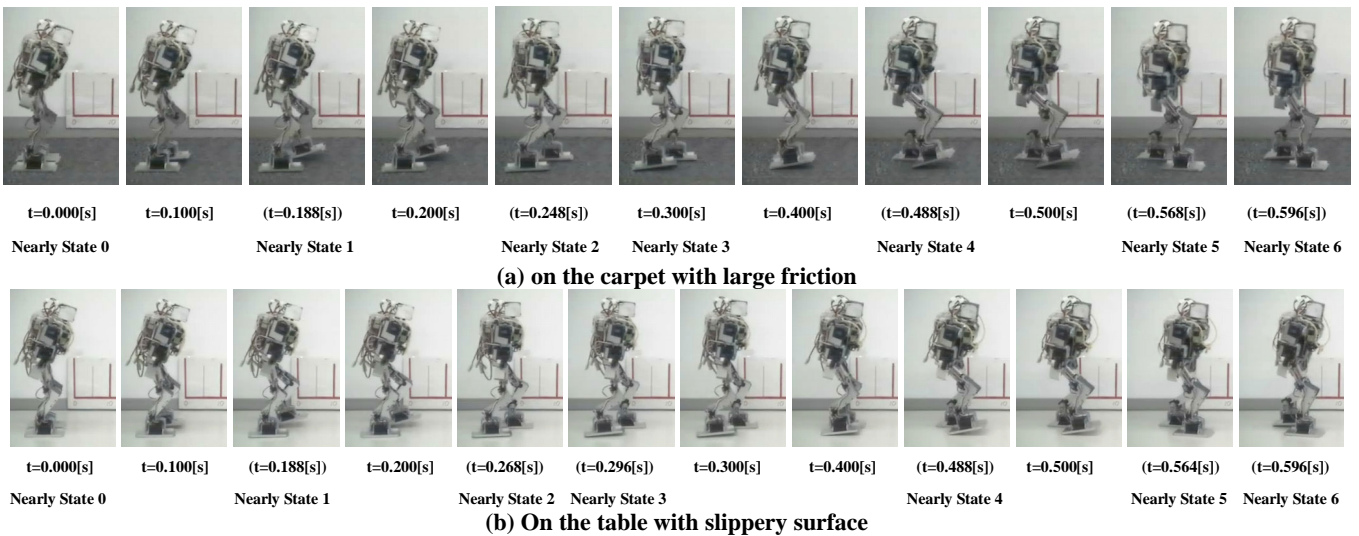
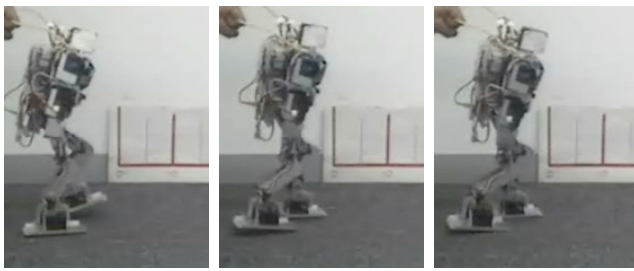
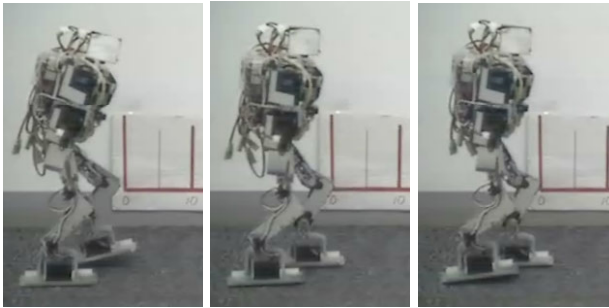


Fig.12 Robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywhere.



Nearly State 1 **Nearly State 2**

Fig.13 Walking behavior that is easy to stumble and fall down because the toes are caught on the floor with frictional rough surface.



Nearly State 2 **Nearly State 3**

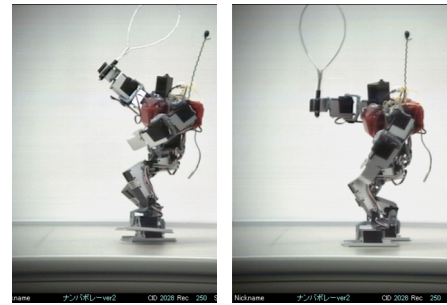
Fig.14 Walking behavior that doesn't stumble and doesn't fall down easily because the toes are difficult to catch on the floor with frictional rough surface.

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。図12(a)と同じ状態図を用いて、摩擦が小さくて滑りやすい床での歩行が図12(b)であり、滑りにくいカーペット上でも、滑りやすい床でも、ほぼ同じ前進速度で歩行する。図13および図14は、それぞれ図11（カーペットでつまずきやすい歩行）および図12（カーペットでもつまずきにくい歩行）の一部を拡大したものである。

4. 硬柔自在の身体操法

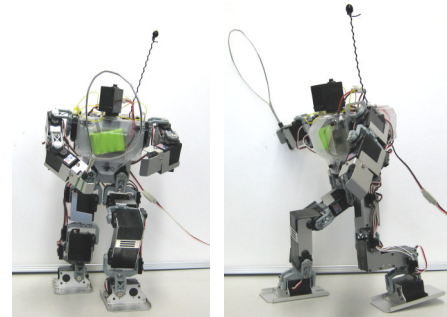
森⁽⁴⁾は、以下のことを30年前に指摘している。多自由度のバイオメカニズムでは、常にその自由度のすべてを使っているのではない。筋肉は動かすためだけに存在しているのではなく、自由度を固定し、一時的に自由度を減らすためにも動いている。任意の形をとり、ついでその任意の形を保持する。この時、同時に重心の移動が生じる。力学的に動的な運動 - これさえも現在なかなか行い得ないのだが、 - だけでなく、このような硬柔自在な高次の柔らかさを活用する努力が必要である。

不安定を利用するシンプルな非線形最適制御を適用すると、俊敏自在のロバスタな動きが生まれる。図15は、テニスへの展開であり、筆者が提案する「ナンバ・フォアボレー」の2つの状態図である。「打ちたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」ので、実際のプレーでも威力と速さがあり、最後の瞬間まで打つ方向が相手に読まれず、ラケット面がぶれないので、緊張する場面でもミスが起こりにくい。両脚を入れ替えることによる転倒力を利用して図16の状態図3から状態図4へ一気に遷移すると速くて威力のあるバックハンドストロークが生まれる(0.3秒)腰を捻らないで足裏のすべりを利用するので、腰の負担がほとんどない。図17は、筆者が提案する「ナンバ・フォアハンド」のプロトタイプの一つである。身体全体を同時並列的に動かすことにより緊張した場面でも手打ちになりにくく、非力でもスイングが速く、ラケット面が安定しやすい。すでに世界のトッププロにはこのようなスイングの傾向



nearly state 1 **nearly state 2**

Fig.15 Proposed two states of NANBA Volley of GENBE-No.4 with 10 freedom degrees legs.



state3 **state4**

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



nearly state 1 **nearly state 2**

Fig.17 Proposed fundamental two states of NANBA Forehand strokes (Proto-type1).

が見られる。

5. 結論

不安定が自然な動きをつくるという原理を利用して「歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」という二足歩行ロボットの歩行・走行を基本として、凹凸が激しくて摩擦が大小変化する種々の建物の床、廊下、室内、屋外、あるいは摩擦の極端に少ない氷雪上でも摩擦が極端に大きいカーペット上でも、自然な転倒力を利用して支持脚で蹴らないで移動すると、つまずきにくく・転びにくく、さらに関節の負担が少ない自在のロバスタな動きが可能であることを示した。

おわりに、動きの解析のための撮影を長年にわたって快く許可いただいている松聲館・甲野善紀氏および西武池袋コミュニティ・カレッジ・若杉泰介氏および図4の写真提供をいただいた学研編集部・椎原豊氏に厚くお礼申し上げます。熱心な協力を頂いた年々の学生諸君にも深謝する。

文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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, 12-1, (2008), pp.23-33.
- (4) 森政弘, バイオメカニクス学会10周年: ロボット工学の立場から, バイオメカニクス学会誌, Vol.3, No.1, (1979), pp.50-51.