

古の身体操法に学ぶ人間とロボットの動きの原理
(人間型二足歩行ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」
から階段登り降りへの展開)

川副 嘉彦

埼玉工業大学工学部ヒューマンロボット学科

kawazoe@sit.ac.jp

Development of JIZAI Movement of Humanoid Biped Robot GENBE Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art with Instability
(From NANBA Walk Toward Going Up and Down the Stairs)

Yoshihiko KAWAZOE

Department of Human-Robotics, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

Abstract

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 a machine working in the arena of offices, homes, and disaster sites, etc. outside the factories and also continue the present conventional research and development (R&D) style in robot projects. We proposed the concept of 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 with Subsumption Architecture (SA) in the previous paper. We showed as the case studies the simple self-sustained humanlike robust walking & running & instantaneous turn NANBA of humanoid biped robot GENBE based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability without ZMP (Zero Moment Point) control, which uses only small active power with simple chaotic limit cycle utilizing instability, further developing into autonomous shock avoidance during falling down owing to being pushed from backside and instantaneous rising. Instability makes the natural movement and can be applied to walking of a physically handicapped person, rehabilitation, sports, and so on. We also showed the case study of an autonomous robot without SMPA (Sense- Model- Plan- Act) framework. In this paper, we realized the JIZAI movement of humanoid biped robot based on the distributed control of physical body in a martial art going up and down the stairs making full use of instability as a source of driving force.

Key Word: Robotics, Humanoid Biped Robot, Ascent and Descent, Stairs, Martial Art, NANBA

1. 逆風を利用して走るヨットの原理

「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づ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⁾。

現代日本人の心身にある問題を武術研究者・甲野善紀^{2),3)}が鋭く指摘している。

「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、本来まだまだ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からである。そして、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。」

武術とスポーツの身体操法の違いについて次のように述べている。「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（逆風を利用して走るヨットの原理のように）、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。（川副・要約）」「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思う^{2)。}」

従来の二足歩行ロボットは、「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、外乱に弱い。本研究は、ZMP制御とは逆に、不安定な姿勢が動きを作るという新しい歩行原理（Anti-ZMP）により、直立二足歩行ロボットの「ナンバ歩き・ナンバ走り」、瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」を発現し、さらに後方から外乱により突然押されて倒されたときの衝撃回避と転倒してからの起き上がりを自律的に発現した⁴⁾⁻¹⁴⁾。

本報では、不安定を利用した状態遷移による二足歩行ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」⁴⁾⁻¹⁴⁾を基にして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」軽快な階段の昇降動作¹⁵⁾へと展開する。

人間に比べてロボットの自由度は少ないので、動きの原理がわかりやすい。身体操法に関する「ナンバ」という用語は一般的な定義があるわけではなく、本研究では、「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「ナンバ」という表現を象徴的に使う。「歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」という二足歩行ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りが基本である。「源兵衛」は、江戸一仙台間 300 km を1日で走ったといわれる飛脚の名前にちなんだものである。

2. 古の身体操法に学ぶ二足歩行ロボット 「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走り

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（「源兵衛 2 号」：身長 300mm、体重 550g、Fig.1, Fig.2），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。Fig.3は、前進速度（縦軸）と両脚のピッチ速度（横軸）の関係を示す。サーボの回転角速度と傾き角の組み合わせにより、転倒しないで自在の前進速度を獲得する。脚を引き上げるのに十分なトルクがあれば、両脚交互のピッチ速度に比例して前進速度が増す。

二足歩行ロボットの脚部が10自由度の場合（「源兵衛4号」：筐体KHR-1近藤科学（株）製、身長34cm、バッテリーなどを搭載して1.2kg、Fig.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ことができる^{4), 5)}。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。Fig.5のナンバ的走

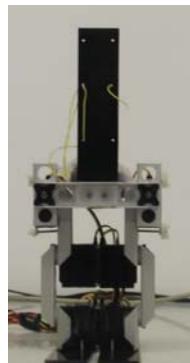


Fig.1 Humanoid biped robot GENBE No.2 with legs of 6joints

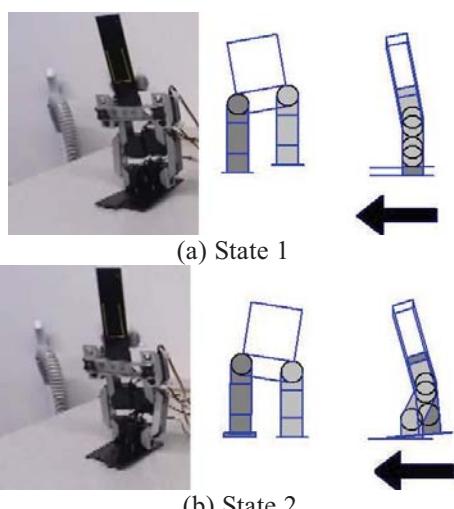
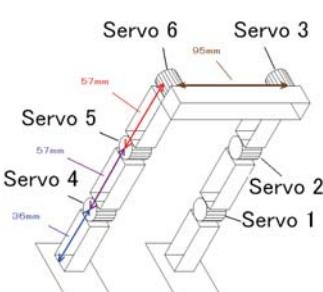


Fig.2 Fundamental States of GENBE-No.2 NANBA Walking with 6 freedom legs.

りに対応する二足ロボット源兵衛4号の走り（「ナンバ・ダッシュ」、18cm/s、）がFig.6であり、約0.3秒間を表示している。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¹⁶⁾。二足歩行ロボット「源兵衛」は、Fig.7のように不安定を利用して状態1から状態2へ遷移することにより速さと威力を生む。

Fig.8は歩行・走行速度と両脚のピッチ速度の関係である。ピッチ速度が6steps/sになると進行速度の伸びが鈍くなっている。Fig.7の動きをみると、状態図に比べて脚が十分には上がっていない。これについてはトルク特性との関連で別報¹⁸⁾に述べる。

重心とZMP（Zero Moment Point）の制御を基本とする従来の二足歩行ロボットは、足裏が

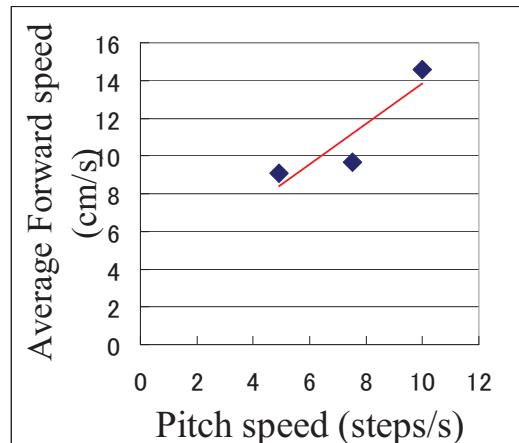


Fig.3 Forward speed vs pitch speed of biped robot GENBE No.2 with legs of 6 joints.

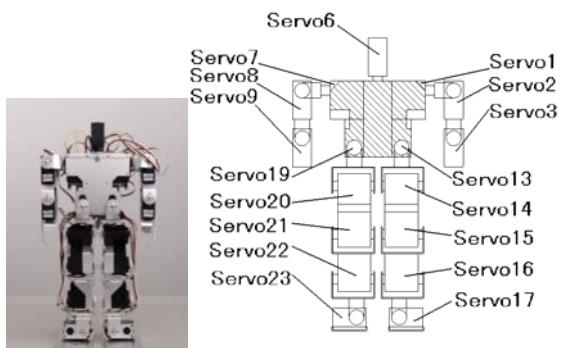


Fig.4 Humanoid biped robot GENBE No.4 with legs of 10joints.

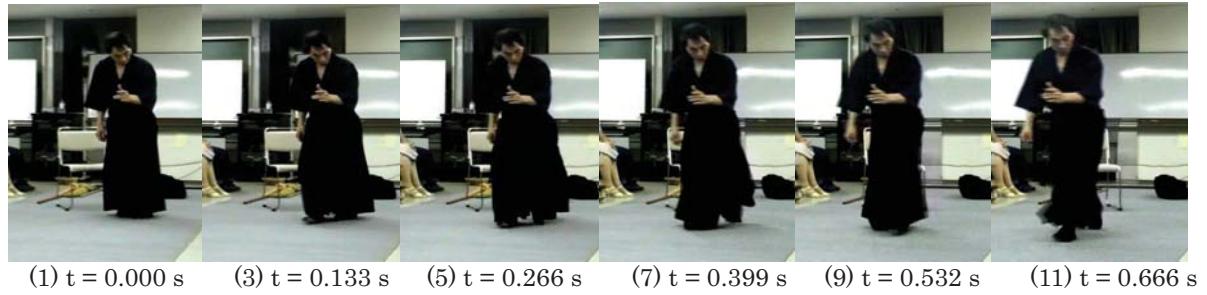


Fig.5 NANBA walking & running of Yoshinori KOHNO

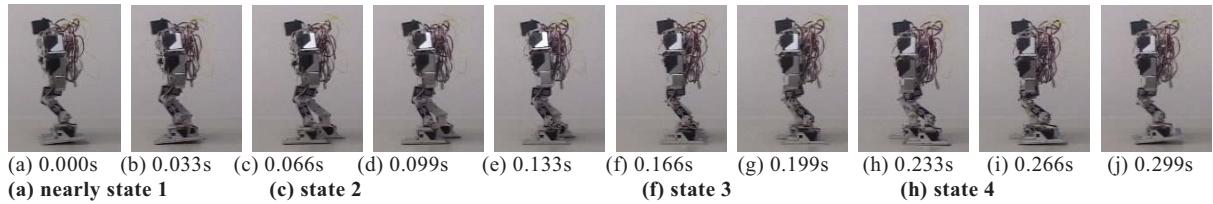


Fig.6 Emergence of simple self-sustained humanlike robust running NANBA of humanoid biped robot GENBE No.4. Height: 34 cm, running speed: 18 cm/s(6 steps/s).

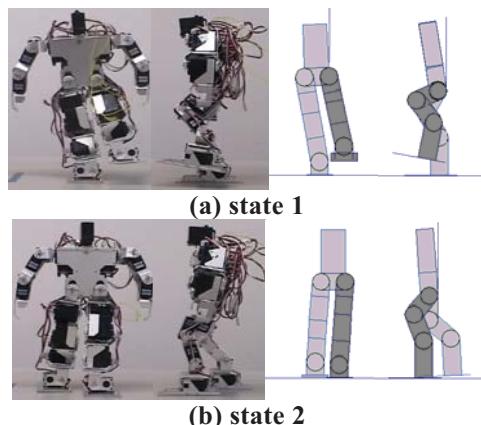


Fig.7 Fundamental States of GENBE-No.4
NANBA Walking with 10 freedom legs

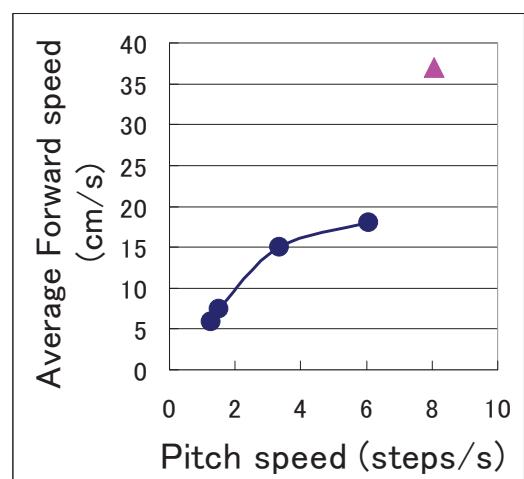


Fig.8 Forward speed vs pitch speed of biped robot GENBE No.4 (▲ : with small-soles).

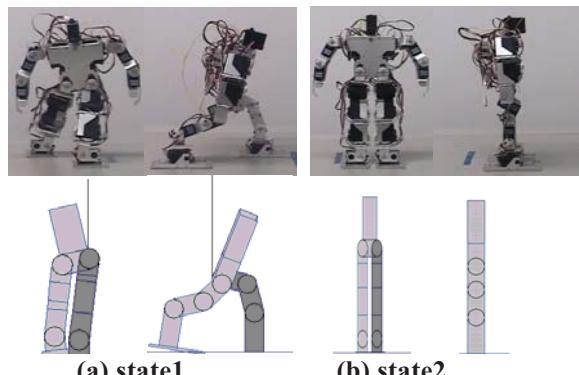


Fig.9 Fundamental two states of 90 degrees NANBA Turn.

大きいほど歩行が容易である。しかし、硬くて大きい足裏は ZMP 制御の安定化は容易になつても、速い走りや階段を駆け上る場合には、地面や階段に衝突しやすくて動きの邪魔になる。スモール・ソール（足裏面積が小さい）による超高速ナンバ走り（記号▲）は、最速^{4), 5)}の約 2 倍の速さになっている。スモール・ソールによる超高速ナンバ走り^{16), 17)}については別報¹⁸⁾に述べる。

3. 古の身体操法に学ぶ二足歩行ロボット 「源兵衛」のナンバ・ターン

転倒力による不安定と状態の遷移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）を前報^{5), 13)}で実現した。Fig.10のナンバ的方向転換に対応して、不安定を利用してFig.9の状態1から状態2へ遷移させた二足歩行ロボット源兵衛4号の瞬間的方転換「ナンバ・ターン」（90度）がFig.11である。Fig.9(a)の状態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)の状態2は直立の状態である。教示により



(1) $t = 0.000 \text{ s}$ (3) $t = 0.133 \text{ s}$ (5) $t = 0.266 \text{ s}$ (7) $t = 0.399 \text{ s}$ (9) $t = 0.532 \text{ s}$ (11) $t = 0.666 \text{ s}$

Fig.10 NANBA Turn of Yoshinori KOHNO. It turns instantaneously 90 degrees in 0.5 seconds.

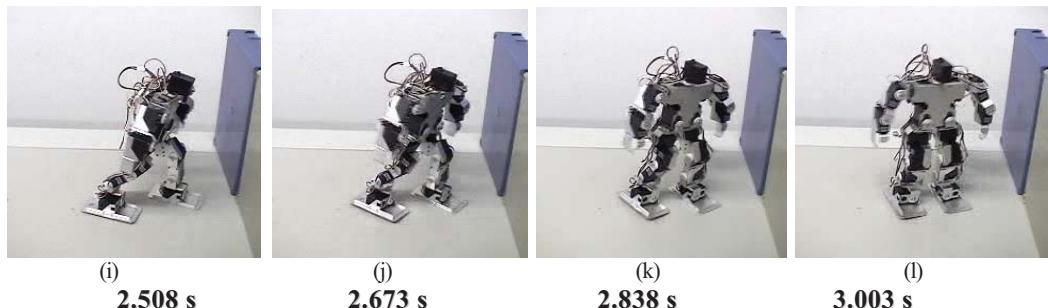


Fig.11 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously 90 degrees in 0.5 seconds.

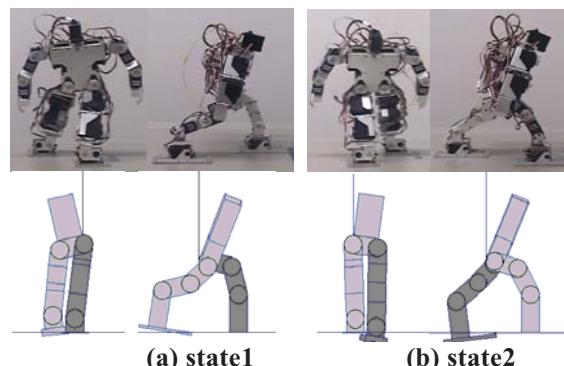


Fig.12 Fundamental two states of 180 degrees NANBA Turn.



Fig.13 NANBA Turn of Yoshinori KOHNO. It turns instantaneously 180 degrees in 0.5 seconds.

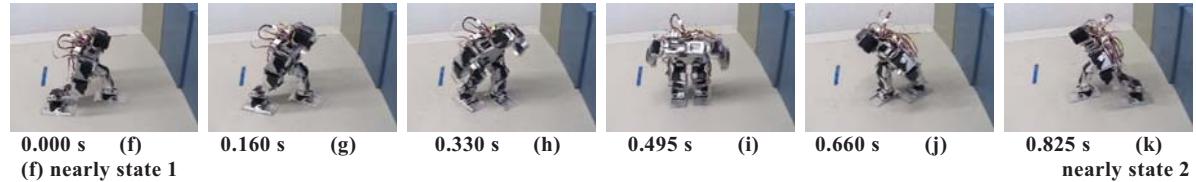


Fig.14 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees in 0.7 seconds.

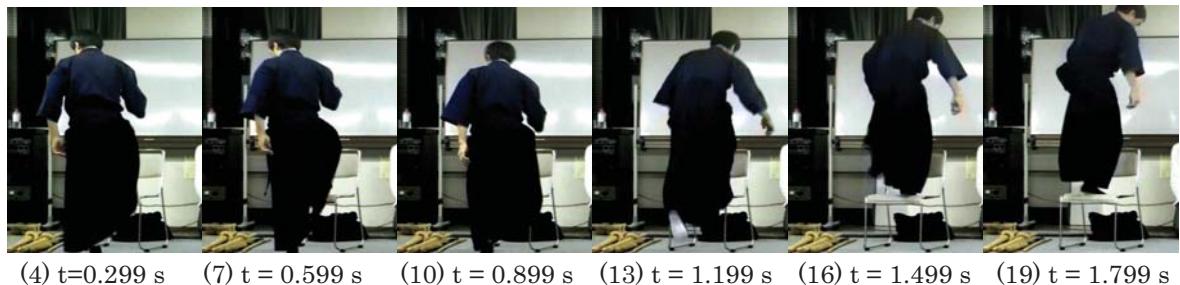


Fig.15 Going up the stairs by Yoshinori KOHNO.

0.7秒で) 方向転換している。

4. 不安定を利用する二足歩行ロボット「源兵衛」の階段昇降

Fig.15 の椅子上がりに対応する二足ロボット「源兵衛」の階段昇り(5段)が Fig.16 である。サーボのトルク不足など気にしないかのごとく1段を約1秒で軽やかに登りきる。Fig.17は、左右一段ずつのさらに詳細な動きを示す。Fig.18

は、状態図であり、状態1において状態2の姿勢をつくると、転倒力をを利用して前方に倒れていき左脚が上の段に接地する。状態2において状態3の姿勢を作ると、右脚が浮くと同時に左脚が段に上がる。ナンバ歩きを基にして、足を高く上げ、前傾姿勢を深くし、階段に足が衝突しないように状態の数を一つだけ増やすことにより転倒力を利用してサーボのトルク不足を補った無駄の少ない自然な階段昇りを実現した。

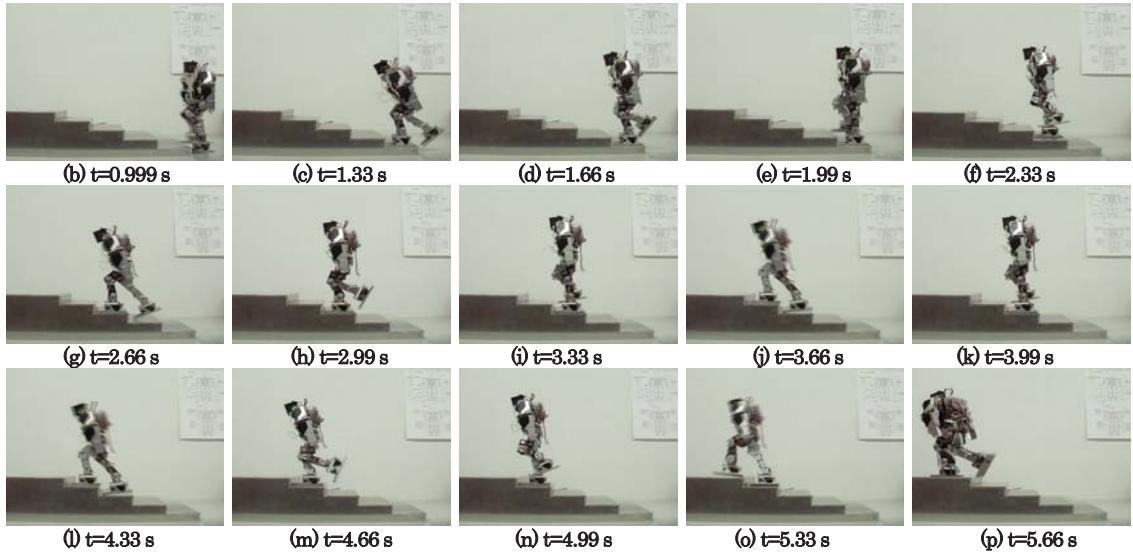


Fig.16 Going up the stairs of GENBE-No.4 with 10 freedom legs with instability.

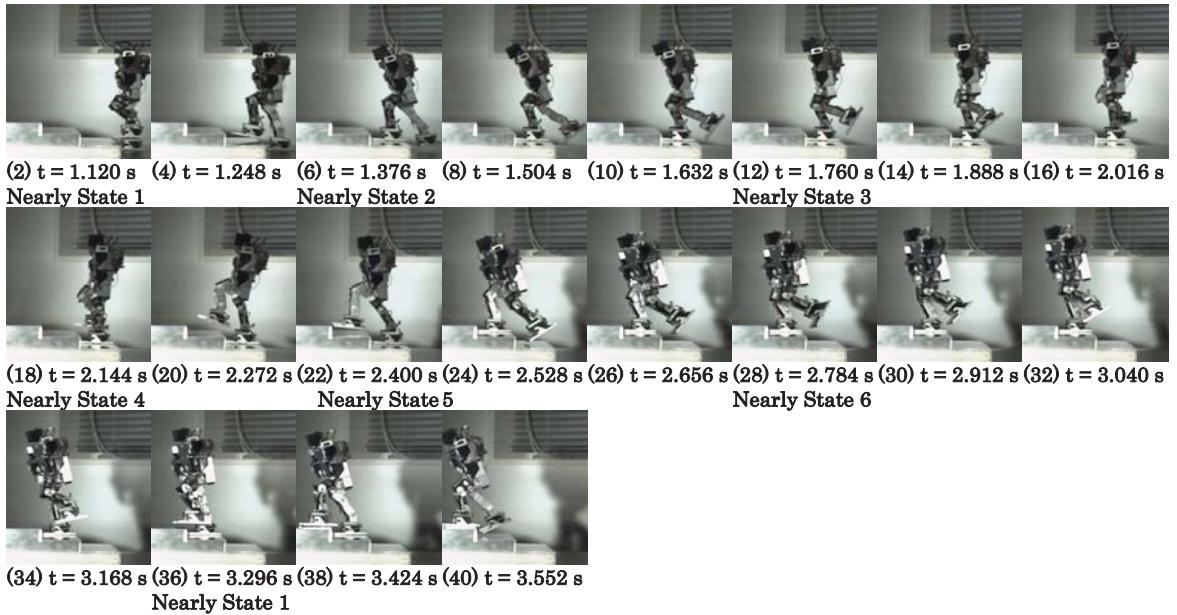


Fig.17 Going up the stairs of GENBE-No.4 with 10 freedom legs with instability (every 32/250 s)

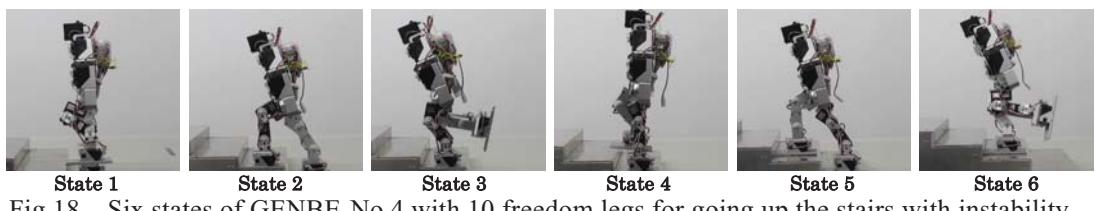


Fig.18 Six states of GENBE-No.4 with 10 freedom legs for going up the stairs with instability.

Fig.19, Fig.20 は、Fig.16, Fig.17 の階段登りに対応する階段下りのコマ写真画像であり、

Fig.21 の 6 つの状態遷移からなる。状態 1：両膝を曲げて前傾姿勢をとり、同時に体を右側に

寄せることにより重心を中心から右側へと移動させ、左脚を上げる。状態 2：右膝を深く曲げつつ左脚を前方へ伸ばす。状態 3：上体を後ろに倒しつつ左脚を真っ直ぐ下方に動かすことにより 1 段下の段に着地し、右膝はそのままに右足全体を後方に引き寄せるにより右脚が浮く。状態 4、状態 5、状態 6 は、それぞれ状態 1、状態 2、状態 3 と逆脚であり、右足を上げ

て右足が 1 段下の段に着地し、着地した瞬間に左脚が浮く。6 つの状態遷移を繰り返すことにより階段を下りることができる。ロボットの場合は、階段登りに比べて、階段降りははるかに容易である。

なお、本実験の階段昇降では、できるだけ動きの邪魔にならないようにやや小さめの足裏 (45.7×93 mm) を使用している。転倒力に

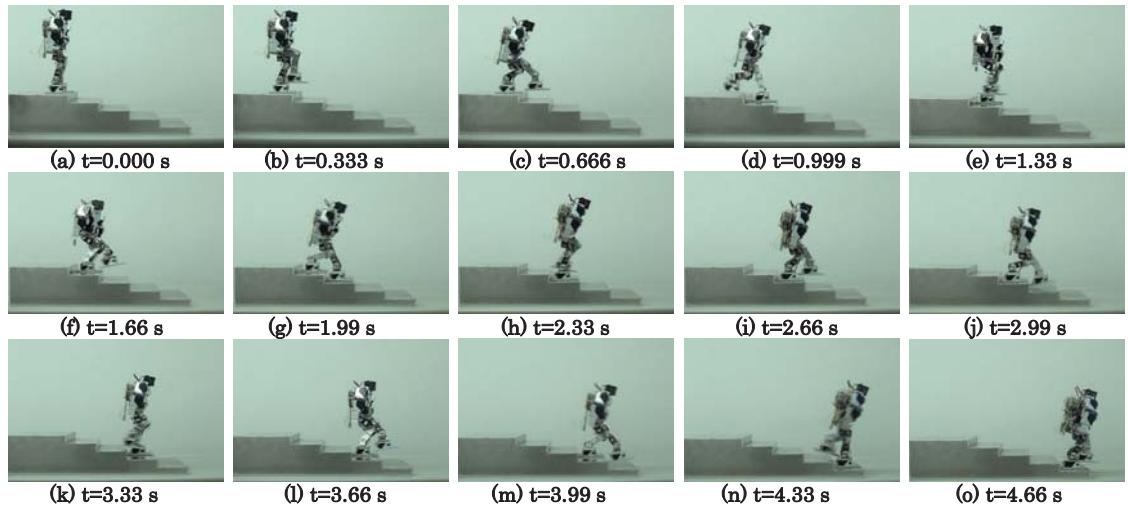


Fig.19 Going down the stairs of GENBE-No.4 with 10 freedom legs with instability.

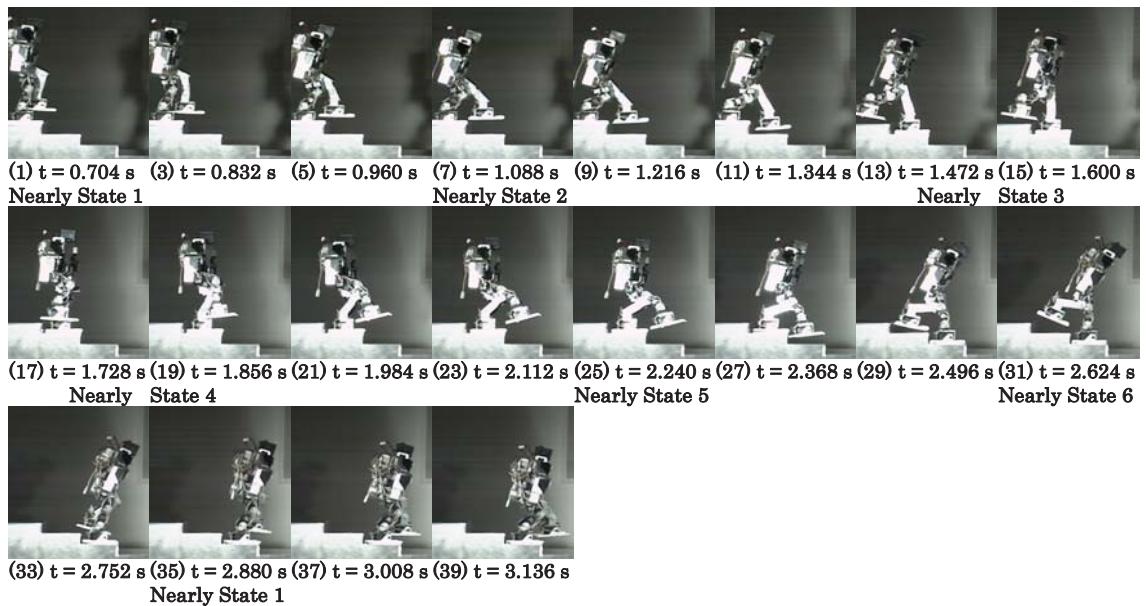


Fig.20 Going down the stairs of GENBE-No.4 with 10 freedom legs with instability (every 32/250 s)



Fig.21 Six states of GENBE-No.4 with 10 freedom legs for going down the stairs with instability

逆らって重心と ZMP の制御を基本とする従来の二足歩行ロボットでは、足裏が大きいほど静バランス的に歩行が容易であるが、硬くて大きい足裏は階段を駆け上る場合や速い走りでは、衝突しやすくて動きの邪魔になるのである。

6. 結 論

転倒力に逆らって重心と ZMP を制御する従来の二足歩行ロボットの歩行原理とは逆に、不安定な姿勢が動きを作るという転倒力と状態遷移を利用するナンバ歩きの歩行原理に基づいて、足を高く上げ、前傾姿勢を深くし、階段に足が衝突しないように状態の数を一つ増やすだけでサーボのトルク不足を補った無駄の少ない自然な階段昇降を実現した。サーボのトルク不足など気にしないかのごとく 1 段を約 1 秒で 5 段を軽やかに登り降りした。

「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」という転倒力を利用した身体操法により、ある状態から別の状態に一気に変化することにより、二足歩行ロボットも速さと強さのある動きを実現することができる。

スマール・ソールによる二足ロボット「源兵衛」の超高速ナンバ走りについては別報¹⁸⁾に述べる。

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神戸女学院客員教授・甲野善紀氏および西武池袋コミュニティ・カレッジ・若杉泰介氏に厚くお礼申し上げる。また、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。卒業研究として熱心な協力を頂

いた平成 16 年度・南雲貴志・伊能新一・鈴木一彰・池田光雄、17 年度・須永智文・桃井孝昌・原田一臣・清水祐一、18 年度・森山真太朗・田口準・発生川純一・小嶋賢一、平成 19 年度・伊倉良明・筋野駿介・輿水裕矢・原昌彦の諸君にも深く感謝する。

なお、本研究の一部は平成 17 年度中山隼雄科学技術文化財団助成研究費の援助によって行われたことを付記する。

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・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.
- 5) 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
- 6) 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.
- 7) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共に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, pp.11-23 ,(2005)
- 8) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共に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, pp.25-32. (2005)
- 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, 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, 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)講論集, (2006), pp.296-301.
- 12) 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 ー科学技術と人間ー論文集, (2006), pp.23-26.
- 13) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共に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), 埼玉工業大学工学部紀要, 第 16 号, pp.3-11 ,(2006)
- 14) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共に存するロボットのありかた (不安定を利用した自律型二足ロボット源兵衛の瞬間的転倒衝撃回避と起き上がり), 埼玉工業大学工学部紀要, 第 16 号, pp.13-20 ,(2006)
- 15) 川副嘉彦・森山真太朗・田口準, 古(いにしえ)の身体操法に学ぶ二足歩行ロボット「源兵衛」の自在な動きの発現 (不安定を利用する階段の登り降り), 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, Vol.7, pp.27-28, (2007)
- 16) 甲野善紀監修, 甲野善紀の驚異のカラダ革命, pp.58-61, 学習研究社, (2006)
- 17) 川副嘉彦・田口準・発生川純一, スモール・ソールによる二足ロボット「源兵衛」の不安定を利用するナンバ走りの進展, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, Vol.7, pp.29-30, (2007)
- 18) 川副嘉彦, 人間型二足歩行ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」から「超高速ナンバ走り」への展開, 埼玉工業大学工学部紀要, 第 17 号, (2007), pp.19-29.