

# 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

## Development of ZIZAI Movement of Humanoid Biped Robot GENBE in a Martial Art (Going Up and Down the Stairs and High-Speed NANBA Run)

○川副嘉彦 (埼玉工大) 森山真太朗 (埼玉工大) 田口 準 (埼玉工大)  
癸生川純一 (埼玉工大) 伊倉良明 (埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama  
Shintaro MORIYAMA, Saitama Institute of Technology  
Jun TAGUCHI, Saitama Institute of Technology  
Junichi KEBUKAWA, Saitama Institute of Technology  
Yoshiaki IKURA, Saitama Institute of Technology

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 an autonomous machine working in the arena of offices, homes, and disaster sites, etc. outside the factories and continue the present conventional research and development (R&D) style in robot projects. It seems that the emergence of intellectuality in an autonomous robot exists in the dexterity of human or creatures as complex systems. The previous paper proposed the approach for realization of a real intellectual robot. We call this 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. 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 JIZAI-NANBA making full use of instability as a source of driving force.

**Key Words:** Robotics, Human-Robotics, Humanoid Biped Robot, NANBA Walking, NANBA Run, Dexterity, Martial Art, Human-Robotics, Subsumption Architecture, 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作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、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。(著者要約)」「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。」

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」動き[5]-[7]を直立二足ロボットの軽快な階段の昇降動作や超高速ナンバ走りへと展開する。

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。身体操作法に関する「ナンバ」という用語は一般的な定義があるわけではない。ここでは、「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. 二足ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの進展

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.2 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 (Fig.3), 足首関節を使って上体(頭)が左右に傾かないように歩く。

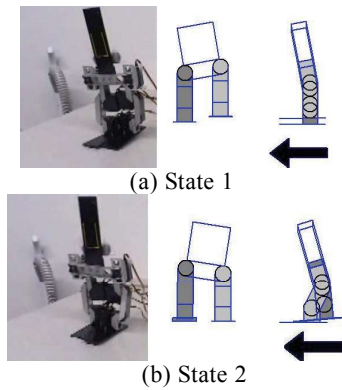


Fig.1 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.2 with 6 freedom legs

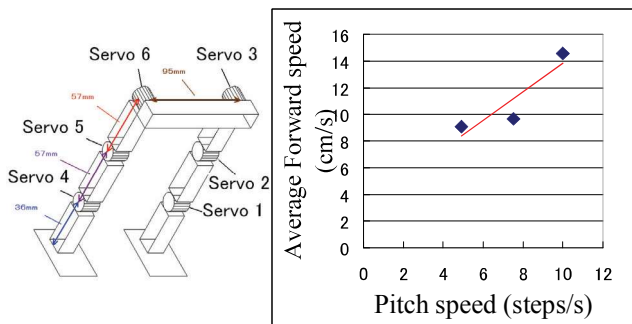


Fig.2 Forward speed vs pitch speed of NANBA dash of biped robot GENBE No.2 with legs of 6 joints.

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.4は歩行・走行速度と両脚のピッチ速度の関係である。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っても、速い走りや階段を駆け上る場合においては、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[5]-[7]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については改めて後述する。

Fig.5のナンバ走りに対応する走りがFig.6の二足ロボット源兵衛4号の走り (18cm/s, 「ナンバ・ダッシュ」) であり、約0.3秒間を表示している。状態図と比べると

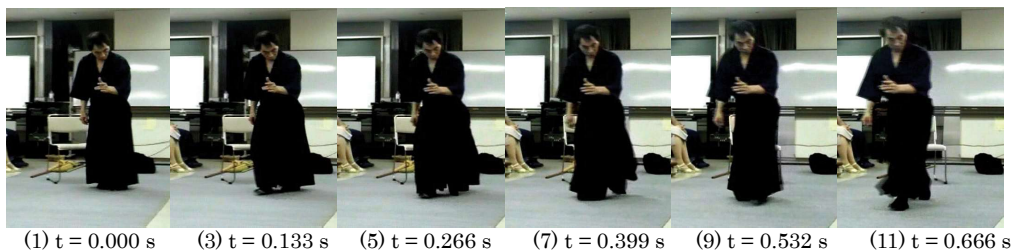


Fig.5 NANBA running of Yoshinori KOHNO

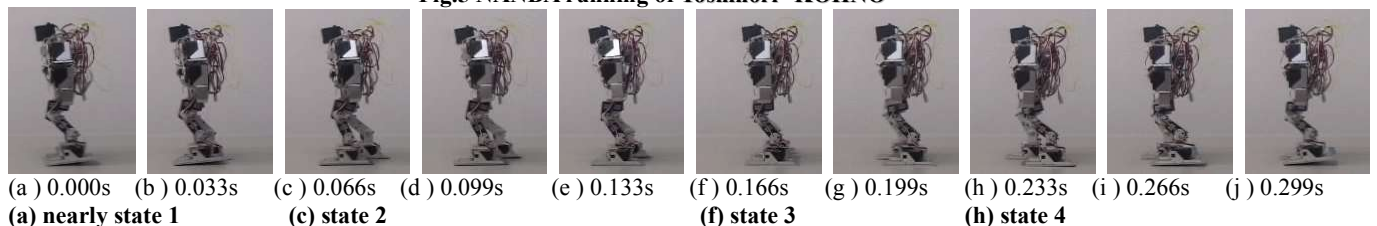


Fig.6 Emergence of simple self-sustained humanlike robust running NANBA of humanoid biped robot GENBE No.4. Height: 34 cm, running speed: 18 cm/s (6 steps/s).

脚が十分には上がっていない。これについてもトルク特性との関連で改めて後述する。

Fig.7のナンバのターンに対応するターンがFig.8の不安定を利用する二足ロボット源兵衛4号の瞬間的な方向転換である。Fig.9に示すように、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、その場で瞬間的に180度方向転換する。歩行してきた流れのまま一気に方向転換する。この場合、180度の方向転換に要した時間は約0.7秒である。

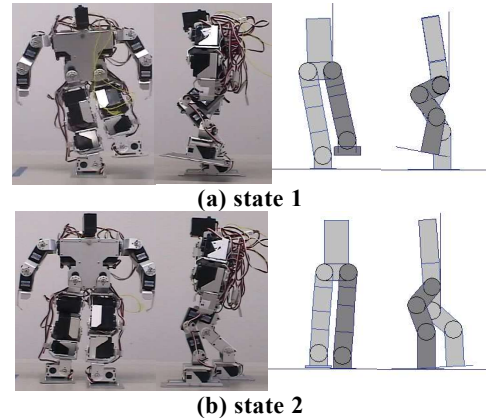


Fig.3 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.4 with 10 freedom legs

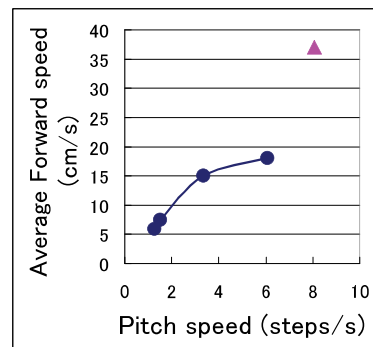
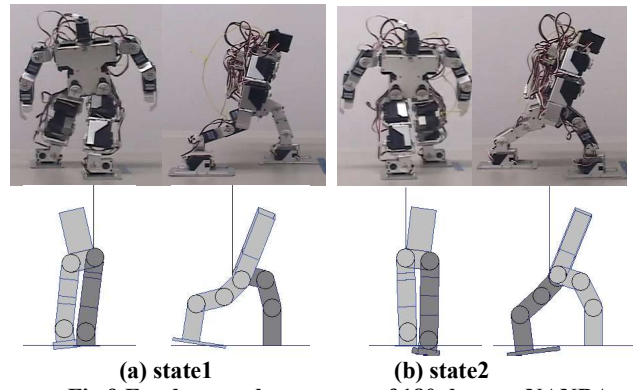


Fig.4 Forward speed vs pitch speed of NANBA dash of biped robot GENBE No.4 with small soles (▲ : with small-soles).

Fig.10 の椅子上がりに対応する二足ロボットの階段昇降の状態図が Fig.11 と Fig.12 である。Fig.11 において、状態 1 において状態 2 の姿勢をつくると、転倒力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。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(本実験では 5 段)軽やかに登りきる。Fig.13 と Fig.14 は、それぞれ階段昇降の実行例である。なんば歩きを基にして、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降を実現した。



(a) state1 (b) state2  
Fig.9 Fundamental two states of 180 degrees NANBA



(1)  $t = 0.000$  s (3)  $t = 0.133$  s (5)  $t = 0.266$  s (7)  $t = 0.399$  s (9)  $t = .532$  s (11)  $t = 0.666$  s

Fig.7 NANBA Turn of Yoshinori KOHNO

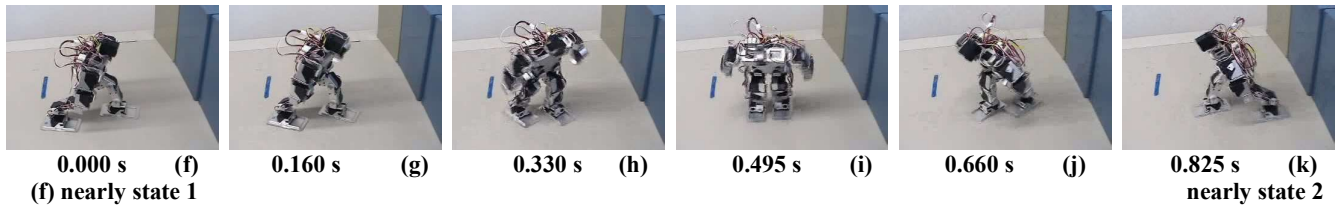
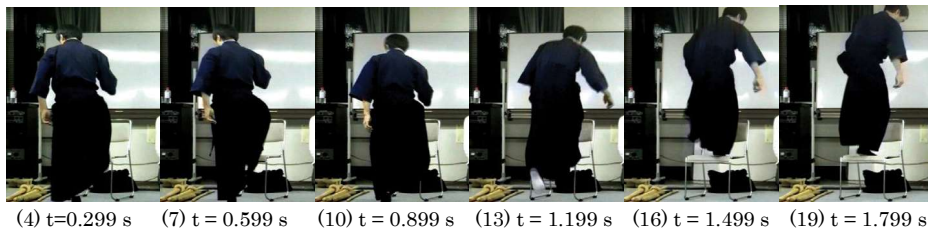


Fig.8 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees in 0.7 seconds.



(4)  $t = 0.299$  s (7)  $t = 0.599$  s (10)  $t = 0.899$  s (13)  $t = 1.199$  s (16)  $t = 1.499$  s (19)  $t = 1.799$  s

Fig.10 Going up the stairs of Yoshirori KOHNO.

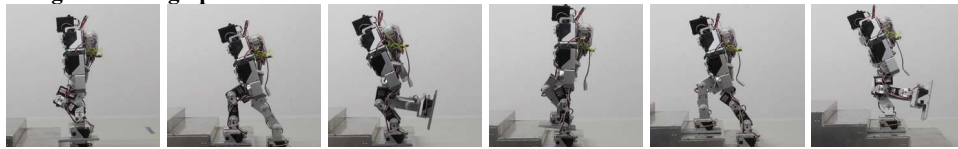


Fig.11 Six states of GENBE-No.4 with 10 freedom legs for going up the stairs with instability.



Fig.12 Six states of GENBE-No.4 with 10 freedom legs for going down the stairs with instability

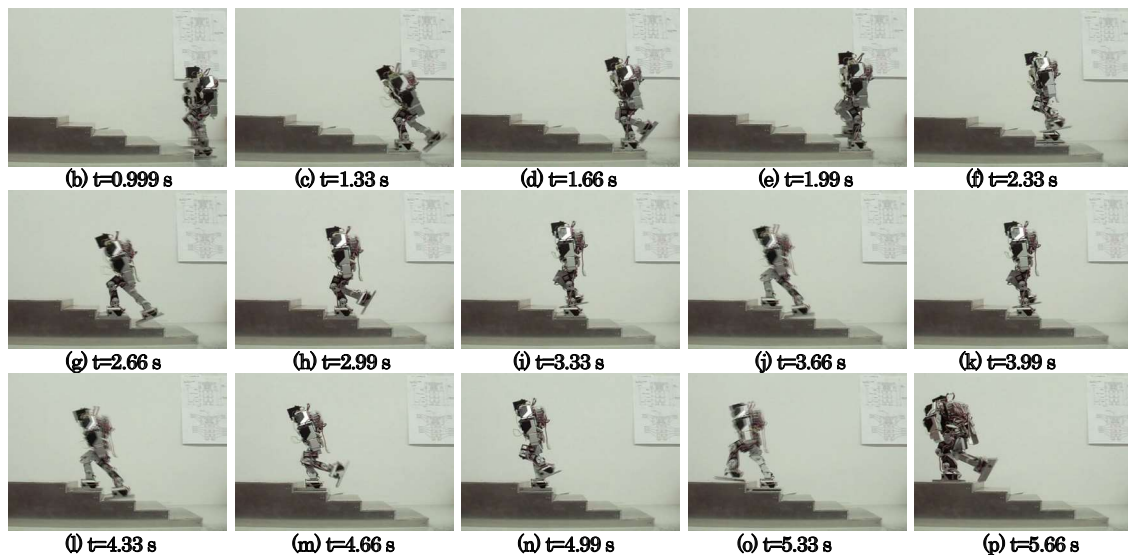


Fig.13 Going up the stairs of GENBE-No.4 with 10 freedom legs with instability.

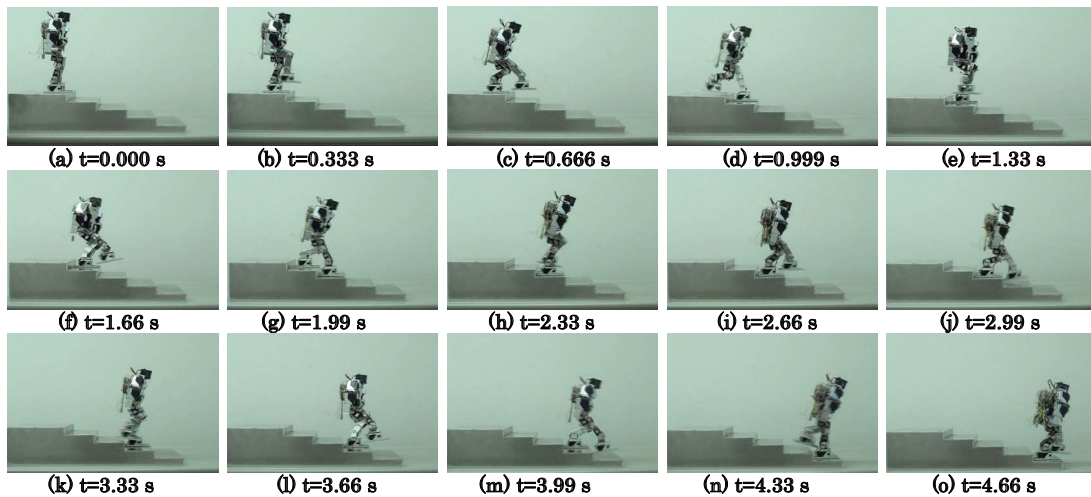


Fig.14 Going down the stairs of GENBE-No.4 with 10 freedom legs with instability.)

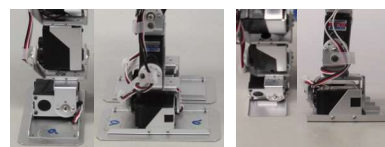
重心と ZMP (Zero Moment Point) の制御を基本とする従来の二足歩行ロボットは、足裏が大きいほど歩行が容易である。しかし、硬くて大きい足裏は ZMP 制御の安定化は容易になっても、速い走りや階段を駆け上る場合においては、衝突しやすく動きの邪魔になる。

Fig.15 はスモール・ソール, Fig.16 は、スモール・ソールによる二足ロボットの超高速ナンバ走りの状態図, Fig.17 は実行結果である。ピッチ速度が増すとサーボのトルク不足により前脚の角度が十分形成されず歩幅が小さくなり前進しない。Table 1 は、各時間設定におけるサーボモータ (関節) の実際の動作時間, 最大動作角度を高速ビデオにより調べ

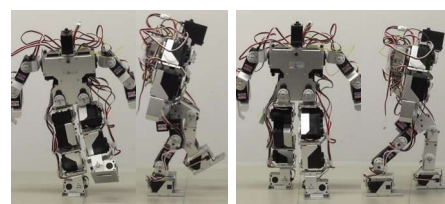
た結果である。遅めの時間設定 5~7 では、設定した時間で 180 度まで回転させることができるが、速めの設定 1~4 では設定時間で 180 deg まで回転させることができない。したがって、速いナンバ走り (ダッシュ) は、ピッチを上げても状態図の目標の関節角度まで至らないまま次の動作に移る。多少の時間をかけて前脚の角度をある程度形成するほうが、結果とし

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



(a) Large sole(59×113 mm)(b) Small sole(46×66 mm)  
Fig.15 Soles of biped robot GENBEs



State 1 State 2  
Fig.16 Two States of GENBE No.4 with small soles for 37cm/s, 8 steps/s NANBA dash.

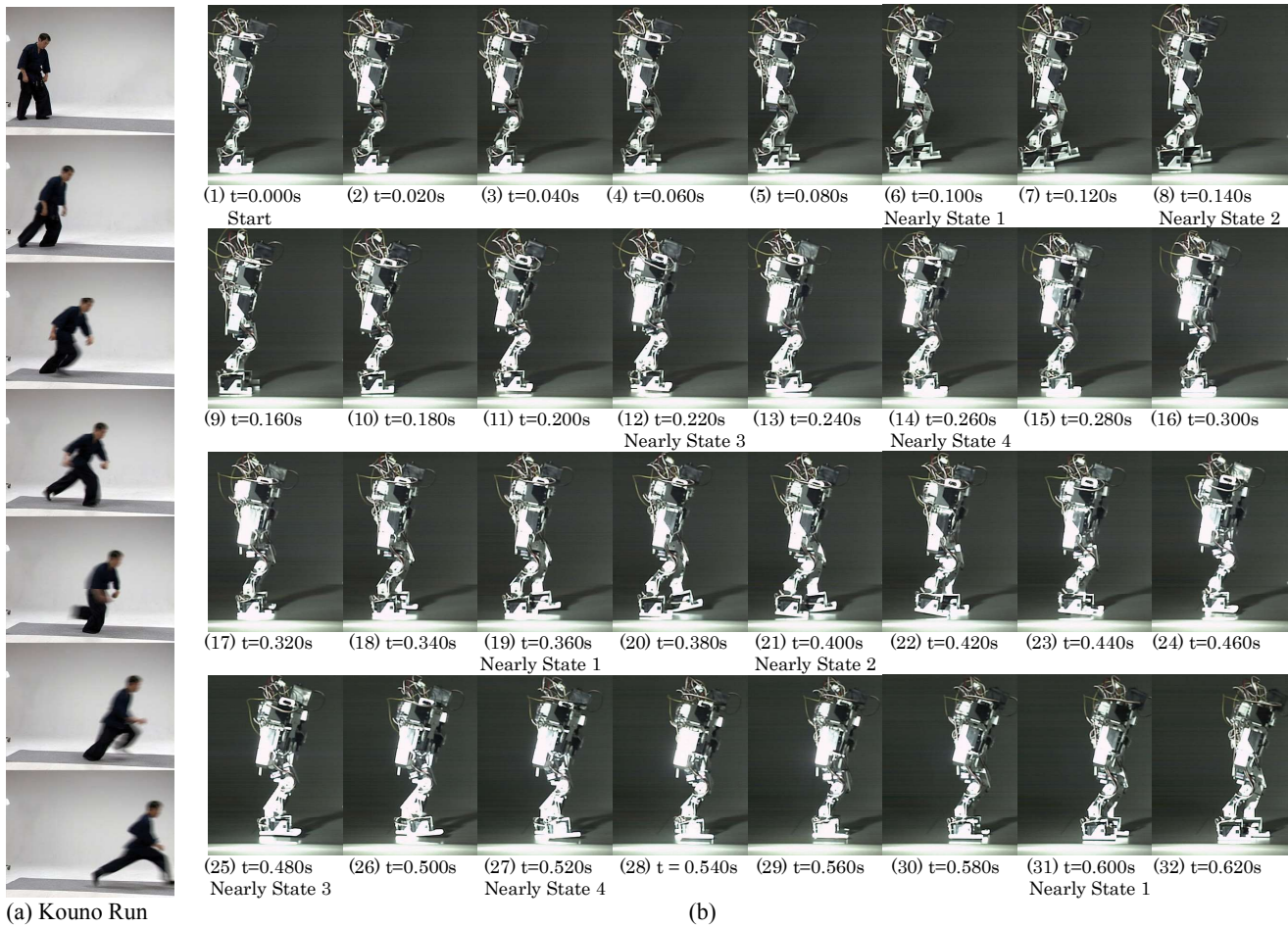


Fig.17 Emergence of NANBA dash 37cm/s, 8 steps/s of GENBE No.4 with small soles. It takes only 0.6s from standstill to 2 step runs.

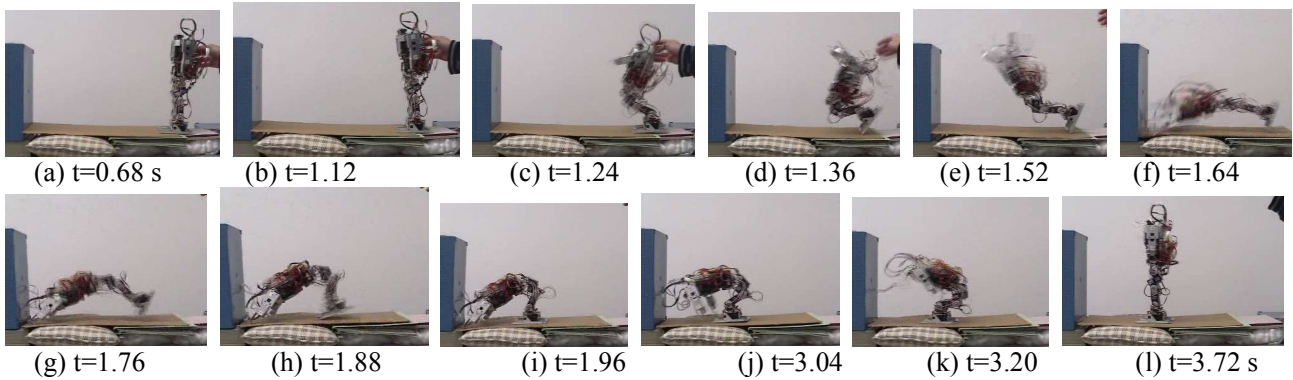


Fig.18 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE No.5 with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability. It takes only 2.5 seconds.

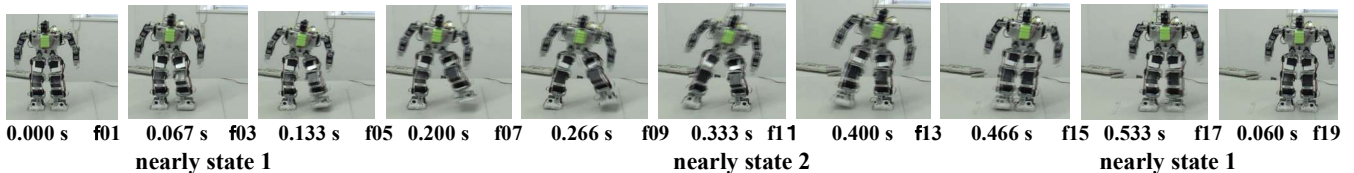


Fig.19 Emergence of a simple self-sustained robust instantaneous NANBA side-step of humanoid biped robot GENBE No.4-2 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power.

ては不安定を利用して速く走る。

この走法は、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]。

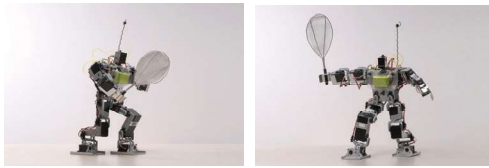
Fig.18 は、前方への転倒を検出して転倒時の衝撃を最小

にするような受け身的な動きと転倒から素早く立ち上がる動きの自律的発現であり、前報[9]-[11]に述べた。

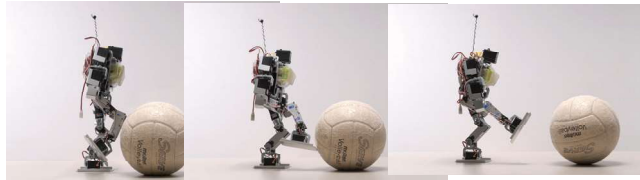
Fig.19 は、横方向の転倒力を利用する「ナンバ・サイドステップ」である。状態 1(f03)から状態 2(f11)まで一瞬(この場合は約 0.27 秒以内)で遷移し、約 0.2 秒で状態 1 に遷移する。

ねじらない・うねらない・踏ん張らない身体操作による

「ナンバ・テニス」(Fig.20), 「ナンバ・キック」(Fig.21)への展開も見えてくる。



(a) State 1 → (b) State 2  
Fig.20 NANBA tennis of GENBE



(a) State 1 (b) State 2 (c) State 3  
Fig.21 NANBA kick of GENBE

### 3. 結論

不安定を利用する直立二足ロボットのナンバ歩き・ナンバ走り (Anti-ZMP) の原理を、小さい足裏 (スモール・ソール) を用いて、関節に負担の少ない軽快な階段の昇降動作や超高速ナンバ走りへと展開した。

ねじらない・うねらない・踏ん張らないという不安定を利用して身体を上手に使う、ある状態から別の状態に一気に変化することにより、速さと威力のある動きを実現することができる。

おわりに、長年にわたって快く撮影をご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、一部画像の提供をいただいた(株)学習研究社・椎原豊氏に厚くお礼申し上げます。また、映像撮影にご助力いただいている埼玉工業大学・平成 19 年度 4 年生・輿水・筋野の諸君にも深く感謝する。

### 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, 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 - 科学技術と人間 - 論文集, (2006), pp.23-26.  
 [13] 川副嘉彦・森山真太郎・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, pp.  
 [14] 川副嘉彦・田口準・癸生川純一, 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, pp.  
 [15] 川副嘉彦, 人間型二足ロボット「源兵衛」の身体操法に学ぶ「ナンバ・テニス」の研究, 福祉工学シンポジウム 2007 講論集, (2007), pp.185-188.