

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

Mechanism of Robustness of Humanoid Biped Robot GENBE with NANBA-Walking and NANBA-Running Based on the Distributed Control of Physical Body

正 川副嘉彦(埼玉工大)

伊倉良明(埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama

Yoshiaki IKURA, 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 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 walking, running, instantaneous turn and the simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising up. Instability makes the natural movement. This paper made clear experimentally by using high-speed video camera the mechanism of robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywhere even on the ice and snow.

Key Words: Robotics, Humanoid Biped Robot, Robustness, Limit Cycle, Instability, NANBA Walk, NANBA Run, Martial Art, Nonlinear Control

1. 研究の背景と目的

ホンダの ASIMO の歩行が滑らかであるために、ZMP 制御に基づく歩行は安定だと誤解されやすい⁽¹⁾。ZMP は、目標軌道からの微小変位の制御だから、たとえば転倒時のように周囲の状況により目標軌道が急変したり、予測外の外乱などにより目標軌道が未知の場合には、無力である。

従来の 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によると、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」、軽快な階段の昇降動作などへと展開することができる。転倒力を利用して「歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」というのが「源兵衛」と名づけた二足ロボットのナンバ歩き・ナンバ走りであり、江戸・仙台間を1日で走ったといわれる伝説の飛脚の名前にちなんでいる。ロボットは人間に比べて自由度が少ないので、動きの基本原則がわかりやすい。本研究における「ナンバ」という用語は、「ねじらない・うねらない・踏ん張らない（蹴らない）」という関節に負担が少ない動きのイメージとして象徴的に使っている（定義）⁽²⁾。

一般に、人間も二足歩行ロボットも、歩行・走行のピッチ速度が増すと、サーボのトルク不足により脚が上がらず、関節の運動速度もサーボモータの速度も飽和し、歩幅も小さくなって転倒しやすい。しかし、人間型二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」は、ピッチ速度に比例して前進速度が増す。姿勢角度データを同じにして両脚のピッチ速度を6種類変えたときの歩き・走りの挙動を高速ビデオで分析し、氷上でも転倒しないで走るロバスト性（環境や外乱に影響されにくい頑健さと柔軟自在の速度）とそのメカニズムについて明らかにする。

2. 不安定な平衡状態が動きをつくる

本研究の二足ロボット「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、図1、図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。

図3は、ロボットの前進速度（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上体および膝関節角度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。両脚交互のピッチ速度に比例して前進速度が増している。

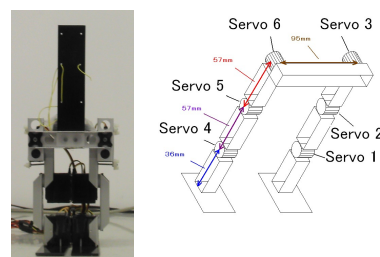


Fig.1 Biped walking robot GENBE-No.2 with 6 freedom legs

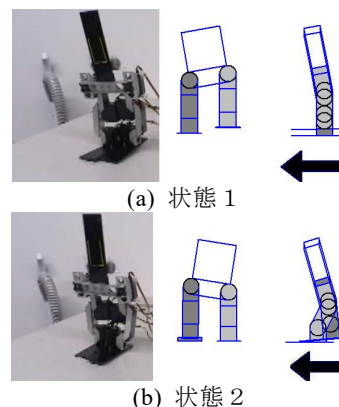


Fig.1 Fundamental States of NANBA Walking of GENBE-No.2 with 6 freedom legs

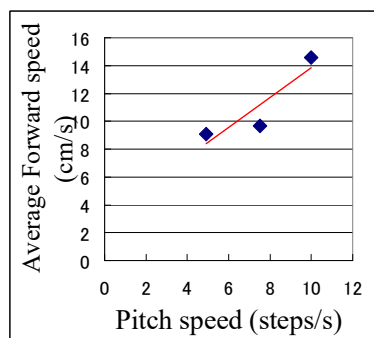


Fig.3 Forward speed vs pitch speed of biped robot GENBE No.2 with legs of 6 joints.

二足ロボットの脚部が 10 自由度の場合（「源兵衛 4 号」：図 4 および自律型「源兵衛 5 号」），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，ロボットの前後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．

振動学的には不安定な平衡状態から不安定を利用して安定な平衡状態へ素早い遷移を繰り返すリミットサイクル・アトラクターである．歩行の周期も振幅（歩幅）もほぼ周期的であるが，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し，複雑系・カオスの挙動を示す．予期せぬ外乱に対して頑健であり，状況の変化に応じた柔軟性がある⁽²⁾⁻⁽⁴⁾．

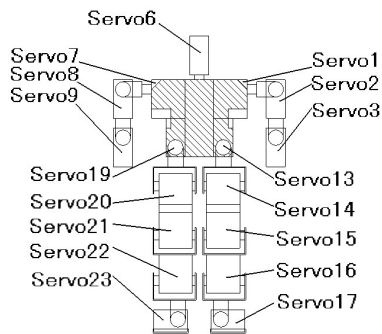


Fig.4 Humanoid biped robot GENBE No.4.with legs of 10joints.

3. サーボモータの動特性と負担の少ない歩行・走行のメカニズム

図 5 は，ロボットに使用するサーボモータの角変位をプログラム上で 0 deg → 90 deg → 0 deg と与えて無負荷で動作させた結果を高速ビデオで解析したものである．横軸の動作時間 Time Setting (Speed) の数値が小さいほど，理論的にはサーボの動作時間 Operating Time は短く，回転角速度は大きくなるはずであるが，Time Setting (Speed) が 12 より短い（速い）と理論通りにならない．

たとえば，動作時間 Time Setting (Speed) 3 では，90 deg の回転角をプログラムしても 25 deg までしか回転しない．歩行・走行などの負荷が掛かる場合はさらに稼動範囲が狭く，回転角速度も低くなる．これが一般に研究用の二足歩行ロボットが静的バランスによる静的歩行しかできない大きな理由のひとつである．動バランスと称しても最終的には試行錯誤により調整しないと歩行できない場合が多い．

一般に二足ロボットにおいて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（図 5），歩幅が小さくなり，前進しないで転倒しやすくなる．二足ロボット「源兵衛 4 号 2007」（筐体：近藤科学 KHR-2HV）を用いて，同一の状態図（姿勢）で動作時間のみを変更して歩行・走行実験を行った．

図 6 は古武術研究者・甲野善紀のナンバ的走りの原理であり，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．

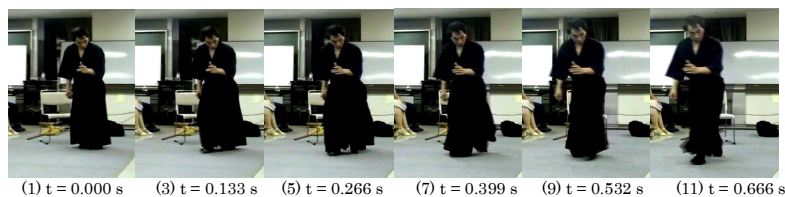


Fig.6 NANBA walking & running of Yoshinori KOHNO

図 7 は，二足ロボット（全高 340mm，重量 1.3 kg）の姿勢角度データ（状態図）を同じにして両脚のピッチ速度を 6 種類変えたときの歩き・走りの挙動を高速ビデオカメラ（250 fps）で撮影した例である．図 7(a)，図 7(b)，図 7(c) とサーボの速度を増している．図 5 のサーボモータ動作特性を用いて，図 7(a)は動作時間 10 に設定，図 7(b)は動作時間 7 に設定，図 7(c)は状態 1,3 を動作時間 3，状態 2,4 を動作時間 4 に設定した結果である（約 2 歩のコマ写真）．図 7(c)が最も速く，画像解析よりピッチ速度は 6.58 steps/s，前進速度は 36.5cm/s である．

図 8 は，ナンバ歩き・ナンバ走りの 4 つの状態図である．

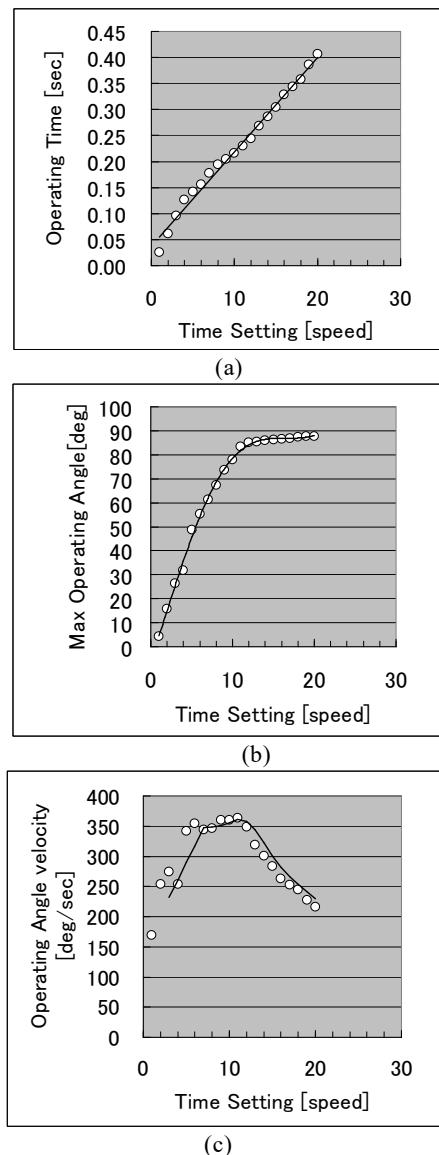


Fig.5 Measured operating characteristics vs. operating time setting for objective operating angle of 90 degrees.

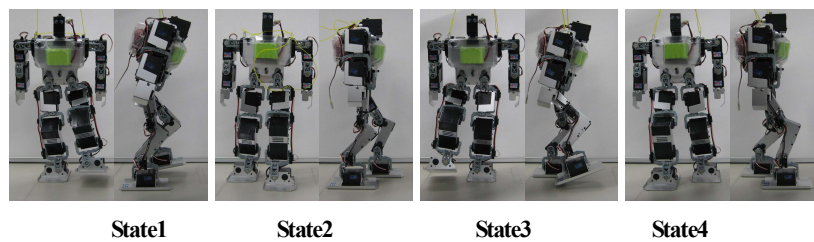
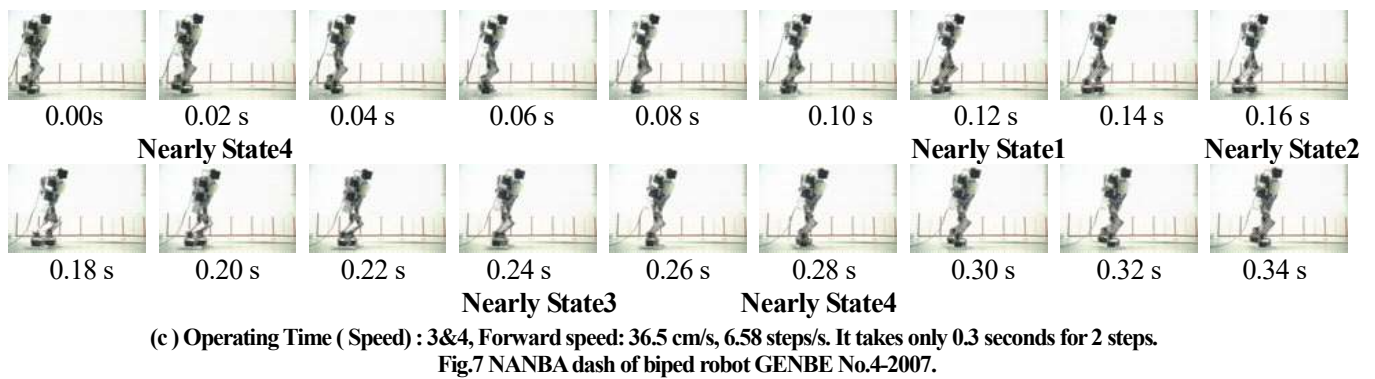
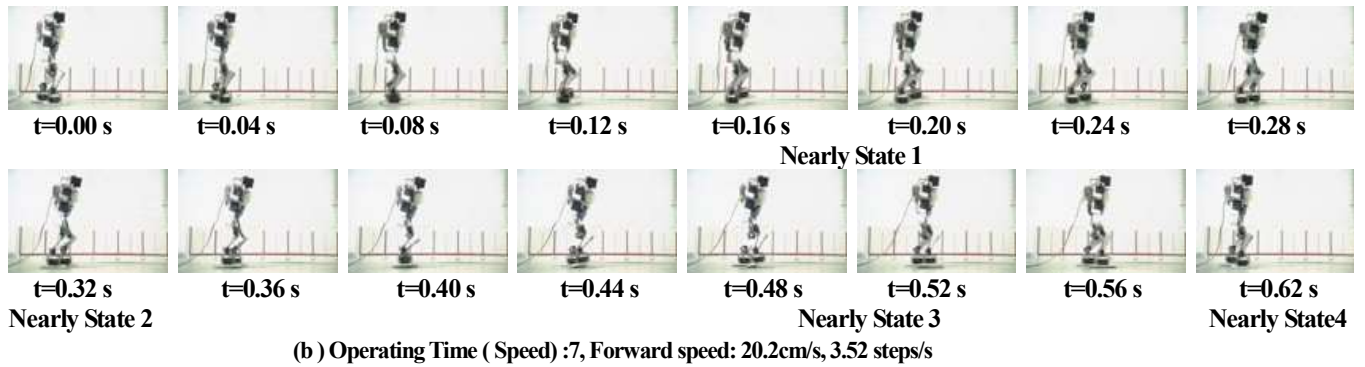
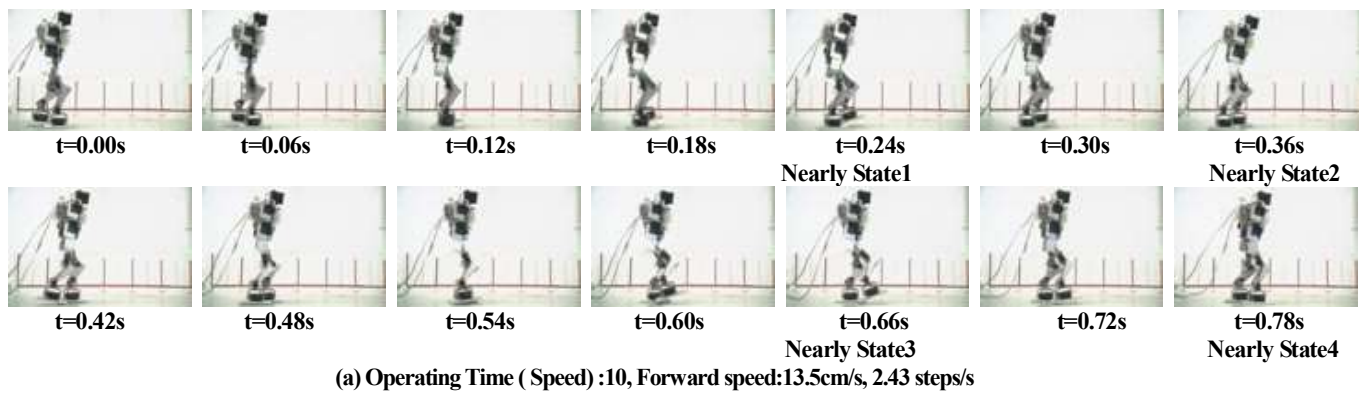


Fig.8 Four States of NANBA Wal and NANBA Run of biped robot GENBE No.4-2007.

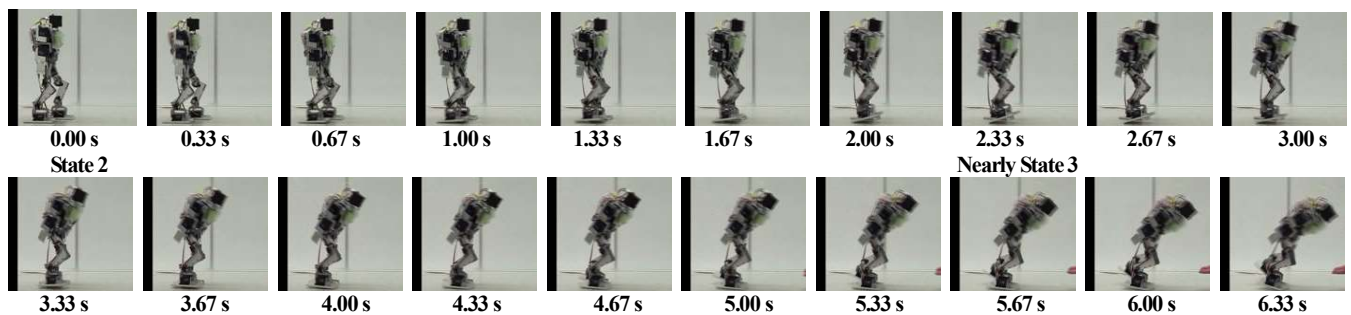


Fig.9 State transition from State 2 (Statically stable) to State 3 (Statically unstable)

同一の状態（姿勢）図で動作時間 Time Setting（speed）のみ変更して歩行・走行実験を行った。状態 1 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 は左脚が前で着地した状態，状態 3，4 はそれぞれ状態 1，状態 2 の

逆であり、4つの状態を繰り返す。状態1は左前に、状態3は右前に倒れてしまうので、紐で支えて写真を撮っている。

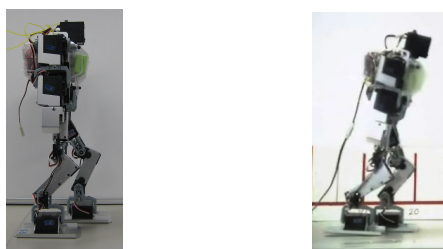
図9は、状態2から状態3に移行させるプログラムを実行したときの動きをコマ写真で示している。状態2から状態3に移行すると、状態3は不安定な平衡状態だから、二足ロボットが前方に倒れていく様子を示している。このままでは転倒するが、転倒する前に安定な平衡状態4に移行することにより転倒しないで歩くことが出来る。

図10は、プログラムで与えられた状態2の姿勢と図7(c)の実際の動きにおける状態2に相当する姿勢を示している。両者は明らかに異なっており、実際の動きでは常に前傾姿勢で走っている。

図11は、横軸が歩行ピッチ速度（歩数/秒）、縦軸が歩行速度である。ピッチ速度に比例して前進速度が増す。図12のように、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る。また、図13は、移動距離実測値から算出した歩幅(Stride)であり（3回の平均と標準誤差）、動作時間の長短にかかわらず、ほぼ同一の値であった。

図14は、前傾姿勢角度の測定画面、図15は歩幅（ストライド）の測定画面である。歩幅は右足の元の位置からの移動量を3箇所測定した。図16に測定例を示す。

図11において、前進速度がピッチ速度に比例することは歩幅が変わらないことを意味する。一方、図5によると、



(a) State 2 in program (b) Nearly State 2 in reality($t=0.16$ s)
Fig.10 Difference between States of program and actual movement.

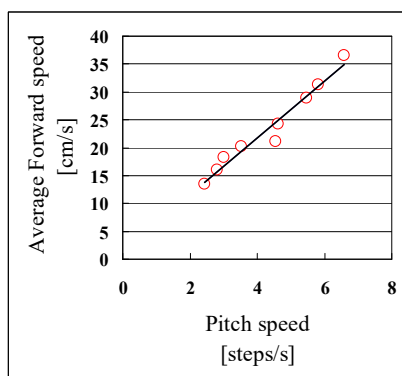


Fig.11 Forward speed vs pitch speed of biped robot GENBE No.4-2007.

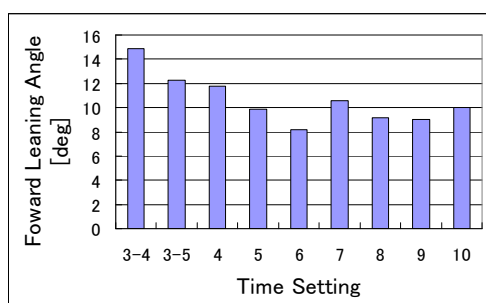


Fig.12 Forward leaning angle vs Time setting

設定動作時間が短くなると、最大動作角度が飽和し、動作速度が遅くなり、プログラムどおり脚があがらなくなる。

各設定動作時間での歩き・走りを分析すると、設定動作時間が短くなると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ことがわかった。トルク不足のために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）でピッチ速度を変えるだけで広範囲の前進速度で歩き・走る。ただし、ロバストな動きに到達するまでには試行錯誤と経験が必要とする。

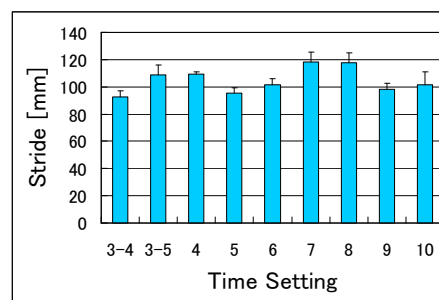


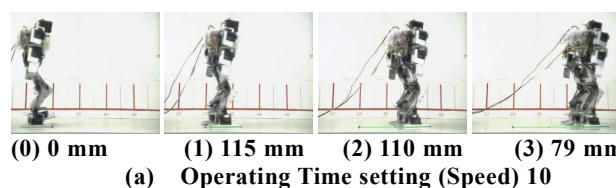
Fig.13 Stride vs. Time setting



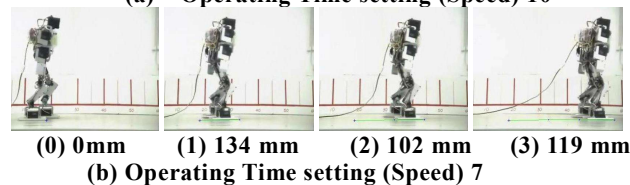
Fig.14 Measurement of Forward Leaning Angle vs. Operating Time Setting of Servomotors.



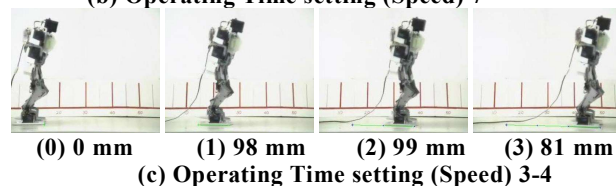
Fig.15 Measurement of Stride vs. Operating Time Setting of Servomotors.



(a) Operating Time setting (Speed) 10



(b) Operating Time setting (Speed) 7



(c) Operating Time setting (Speed) 3-4

Fig.16 Example of measured Strides vs. Operating Time Setting.

4. 地面を蹴らない動き

腰を捻ることのできないロボット「源兵衛」の捻らない・うねらない・蹴らない「ナンバ歩き」は、足裏を浮かせて地面を蹴らないで移動するのが特長であり、蹴らないので関節の負担が少なく、地面を蹴らないで足裏を浮かせて移動する動きは図 17 の横移動（右へのサイドステップ：紙面では左）で見るとわかりやすい。図 17(a)では、体重を支点（左足）に残しながら支点（左足）で蹴って右へ移動している。一方、図 17(b)の蹴らない横移動（ナンバ・サイドステップ）では、体重を支点（左足）に残さないで支点（左足）で蹴らないで転倒力を利用して右へ移動している。す

なわち、身体が移動方向に倒れこんでいる。支点となる足関節の負担が少なく、移動が速い。図 17(a) は一般的な蹴る横移動であり、図 17(b)は、蹴らない横移動（ナンバ・サイドステップ）である。身体の傾きが反対になっている。

5. 多様な環境で歩く・走る

蹴らないで転倒力を利用すると、図 18 のように、種々の建物の床、廊下、室内、あるいは屋外での歩行・走行もロバストである。図 18(d)は、榛名湖の氷雪を自在の速度で走る様子を示す。摩擦を利用しないで床を蹴らない歩き・走りであり、したがって関節の負担も少ない⁽³⁾⁽⁴⁾。

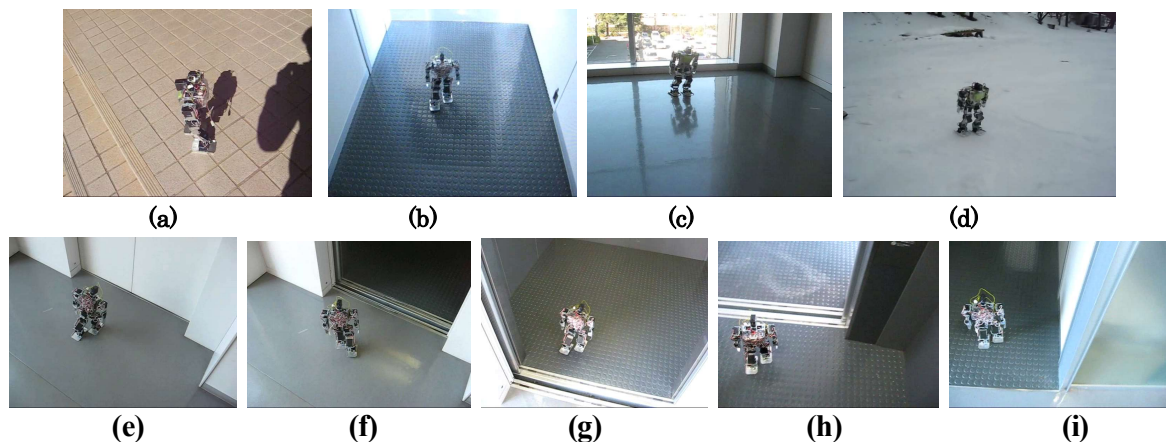
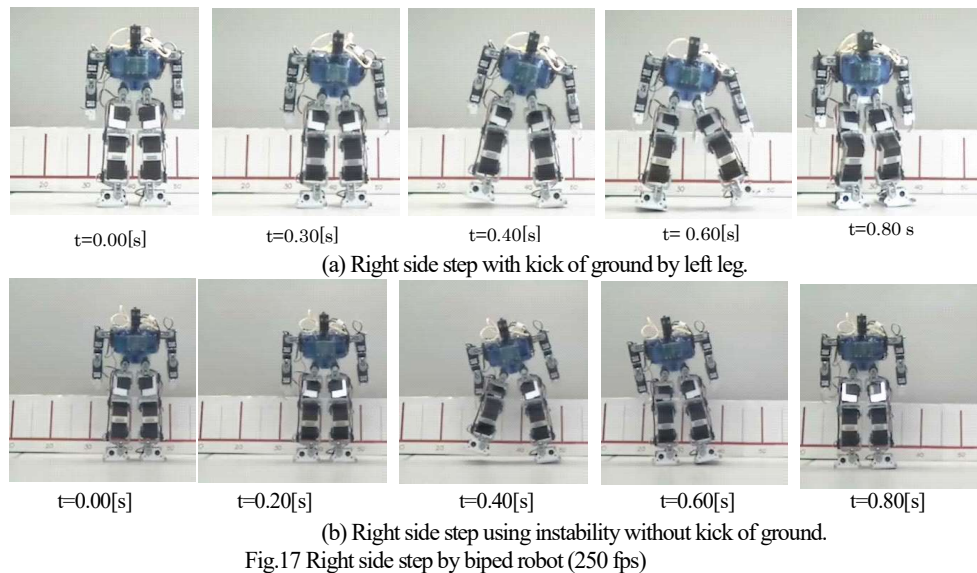


Fig.18 Robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywhere.

6. 自律型「源兵衛5号」の動的障害物に対する反射的回避

自律型「源兵衛5号」（全高：約 350 cm）も同様の動きの原理

により、俊敏に動く。たとえば、不意に後方から押されたときに前方への転倒を検出し、転倒時の衝撃を最小化するように受け身

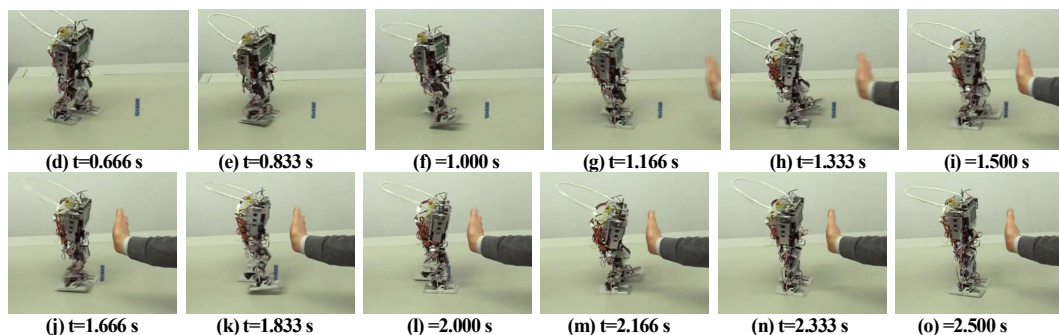


Fig.19 Emergence of simple self-sustained humanlike robust quick stops of humanoid biped robot GENBE No.5-2006 for abrupt disturbance during NANBA walking. It stops quickly during walking in 0.8 seconds (every 5/30 frames).

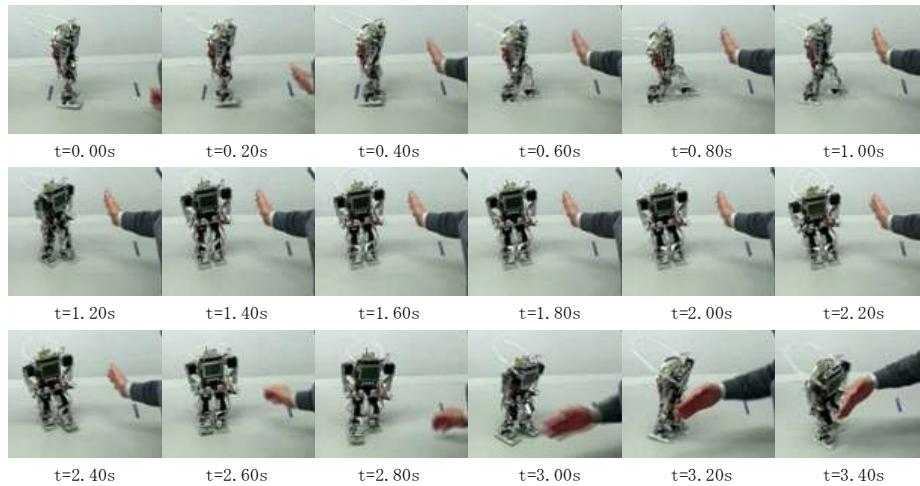


Fig.20 Emergence of simple self-sustained humanlike robust quick stops and instantaneous turns of humanoid biped robot GENBE No.5-2006 for abrupt disturbance during NANBA walking. (every 5/30 frames).

をし、転倒した後に素早く立ち上がる⁽²⁾⁽⁴⁾。

図 19 は、突然の外乱（動的障害物）に対する源兵衛 5 号の応答性の良さを示すビデオ・コマ写真である。ナンバ歩きで歩行しているときに突然に目の前に出現した障害物に対して急停止した例であり、歩行状態から約 0.8 秒で急停止し、次の行動のために身構える。

図 20 は、ナンバ歩きで前進中に、突然に目の前に出現した障害物（人間が手を急に出して歩行を妨害する）に対して急停止し（ $t=0.40$ 秒）、右へ約 90 度のナンバ・ターン（右折）をして再び歩き出す（ $t=1.60$ 秒）。さらに 90 度の左折をしようとした瞬間に再度の突然の妨害（動的障害物）を認識してから約 0.4 秒後に停止している。停止後、即座に「構え」の状態をとることにより障害物が退いた後の歩き出しが安定する。また、この場合の 90 度や 180 度の方向転換ナンバ・ターン 2006 は上体を前に倒しながら前（左）脚に体重を移動し、後（右）脚を後方に伸ばすことにより前（左）脚の位置を変えないでターンする。障害物回避のための実距離は約 30 cm であり、サブサンプリング（包摂）構造的要素行動により、反応が速い。

図 21 は、SA(Subsumption Architecture)による並列処理構造と各要素行動の処理系の例を示す。要素行動 Walk（前進）と要素行動 Avoid（障害物を検知し回避する）からなる簡単な制御構造例であり、障害物を検知すると Avoid（回避）が優先され、停止してから約 90° 右に瞬間的に方向転換し、Avoid（回避）が終了すると Walk（ナンバ歩き）に戻って前進を再開する。

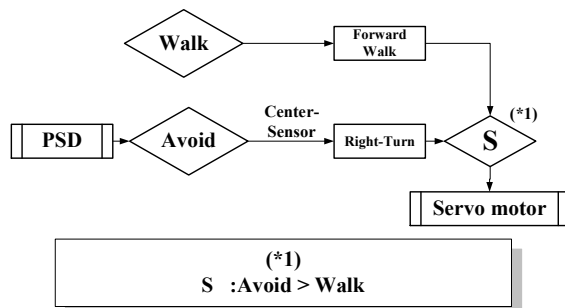


Fig.21 Subsumption Architecture of NANBA walk of GENBE No.5 -2006 for obstacle avoidance and instantaneous NANBA turn (90 degrees).

7. 結 論

一般に、人間も二足歩行ロボットも、歩行・走行のピッチ速度が増すと、サーボモータのトルク不足により脚が上がらず、関節の運動速度もサーボモータの速度も飽和し、歩幅も小さくなって転倒しやすい。しかし、人間型二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」は、ピッチ速度に比例して前進速度が増す。姿勢角度データを同じにして両脚のピッチ速度を 6 種類変えたときの歩き・走りの挙動を高速ビデオで分析し、氷上でも転倒しないで走るロボスタ性（環境や外乱に影響されにくい頑健さと柔軟自在の速度）とそのメカニズムについて明らかにした。

不安定な平衡状態から、不安定（転倒力）を利用して安定な平衡状態へ素早い遷移を繰り返すリミットサイクル・アトラクターの原理による歩行・走行は、周期も振幅（歩幅）もほぼ周期的であるが、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て微妙に変化し、複雑系・カオスの挙動を示す。これが予期せぬ外乱に対して頑健であり、状況の変化に応じた柔軟性の理由である⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

設定動作時間が短くて（ピッチ速度が速くて）足が上がりにくい場合でも、常に前傾姿勢で足裏が前方に滑るかのように走り、ピッチ速度が速くなっても前傾角度が大きくなって、転倒しない。

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。

卒業研究として熱心な協力を頂いた平成 19 年度・筋野駿介・奥水裕矢・原昌彦の諸君にも深く感謝する。

（文献）

- (1) 小椋優・林憲玉・高西淳夫、2 足ヒューマノイドロボットの膝関節伸展型歩行パターン生成アルゴリズム、機論、70-700(C),(2004), pp.3509-3515.
- (2) 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.
- (3) 川副嘉彦・伊倉良明・奥水裕矢・筋野駿介・原 昌彦、氷雪を走る人間型二足ロボット「源兵衛」のロボスタ性のメカニズム、日本機械学会 2008 年度年次大会講演集、No.08-1, Vol.5, (2008), pp.165-166.
- (4) 川副嘉彦・伊倉良明、人間型二足ロボット「源兵衛」による身体に負担の少ない歩行・走行・起き上がり、福祉工学シンポジウム 2008 講演論文集、No.08-28, 日本機械学会、pp.166-169.