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

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

Mechanism of Robustness of Humanoid Biped Robot GENBE with NANBA–Walk and Run Based on the Distributed Control of Physical Body

Yoshihiko KAWAZOE

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

Abstract

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, 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, NANBA Walk and NANBA Run, Limit Cycle.

1. 研究の背景と目的

日本ロボット学会創立 25 周年にあたってロ ボットの現状が総括されている¹⁾. 要約すると, 「発足当時から 10 年間は,ロボットの可能性を 信じた研究開発がなされてきた. その後の 15 年間は,ロボット能力への疑問とそれを踏まえ たロボット研究のあり方やロボット応用先の模 索が,ロボット研究の推進と並行して続けられ てきた」,「将来の家庭や社会で活躍するロボッ トに,現在の自動車産業と同様の大きな産業分 野を形勢することが期待されている一方で,現 状はまだそのレベルにない」、「いまだ、家庭や 社会で活躍するロボットがまだ大量生産をその 射程に入れられるレベルにはない.その理由と しては、(1)社会で活躍するロボットに必須の 構成要素や構成技能が出尽くしていない(現時 点では能力が非力であったり、実世界で働き続 けられるロバスト性に欠けるなど)、(2)それら の多数の構成要素や機能を有効に統合する手法 が未成熟である、その結果として、(3)キラー アプリが見つからない、という状況にある.」さ らに、「しかしもし自動車が費やした 150 年の研 究開発と同じ時間が許されるなら,ロボットに は、まだあと100年の時間がある.上記の問題 点を自覚しつつ,それらを克服する研究開発, 技術開発がなされれば、ロボットも自動車に匹 敵する産業分野を形成すると信じる.」と続く. しかし,自動車とロボットの時代背景の違いの 大きさを考えると,この展望はあまりにも楽観 的過ぎである.現在の延長線上には未来は見え がたく,質の転換が必要であろう.頭に付いた 知識ではなく,身に付いた知恵が求められる.

たとえば、ホンダの人間型ロボット ASIMO の歩行が滑らかであるために、文献²⁾にも見ら れるように、ZMP (Zero Moment Point)制御に 基づく歩行は安定だと誤解されやすい. ZMP を 基本とする制御は、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.

二足歩行ロボットの歩行原理として従来から 広く使用されている 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,転倒時の衝撃回避の身体操 法などの動作へと展開することができることを 著者らは前報までに示した^{3)-6),11)-16)}.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.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) ^{3-0,11)-10}.

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、関節(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回転角速度も飽和・ 低減し、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. 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1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1(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⁾⁻⁶.



Fig.1 Robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywhere.

3. 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2,図3),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 Biped walking robot GENBE-No.2 with 6 freedom legs



Fig.3 Fundamental States of NANBA Walking of GENBE- No.2 with 6 freedom legs

図4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.

二足ロボットの脚部が 10 自由度の場合(「源 兵衛4号」:図5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







Fig.5 Humanoid biped robot GENBE No.4.with legs of 10joints.

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 オス的挙動を示す.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^{3-6,} 12).

図6は、図5に示した脚部10関節二足ロボット(全高340mm,重量1.3kg)のナンバ歩き・ ナンバ走りの状態図であり、状態1(State1) は前傾姿勢で体をやや右にシフトして左脚を上 げた状態,状態2(State2)は左脚が前で着地 した状態である.状態3,4は、図7のように、



Fig.6 States of NANBA Walk and Run of biped robot GENBE No.4-2007.





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



(1) t = 0.000 s (3) t = 0.133 s (5) t = 0.266 s (7) t = 0.399 s (9) t = 0.532 s (11) t = 0.666 s

Fig.9 NANBA walking & running of Yoshinori KOHNO





それぞれ状態1,状態2の逆であり,ナンバ歩 き・ナンバ走りは4つの基本状態を繰り返す. 状態1は左前に,状態3は右前に倒れてしまうの で,機体を紐で支えた状態での静止画である.

図8は、状態2から状態3に遷移する部分の みのプログラムを実行したときの二足ロボット の動きであり,前方に倒れていく様子を示して いる.状態3は不安定な平衡状態だから,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 ことが出来る.

図9は古武術研究者・甲野善紀のナンバ的走

りの原理を示す動きであり、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^{17),18)}.

図10は、二足ロボットの姿勢角度データ(状 態図)を同じにして両脚のピッチ速度のみを変 えたときの歩き・走りの挙動を高速ビデオカメ ラ(250 fps)で撮影した例であり(約2歩),図 10(a), 図 10(b), 図 10(c)は次第にサーボモータ の動作時間設定を短くしている(回転角速度を 増している). 図 10(c)が最も速く, 画像解析に よるピッチ速度は 6.58 steps/s, 前進速度は 36.5cm/s である. ピッチ速度は、北京オリンピ ック陸上100m金メダリスト・ボルト選手の毎 秒4.96歩,人間の限界と言われる毎秒5歩(NHK, アインシュタインの眼)を超えている.図10 は、図9に示したナンバ的走りの原理を意識し た「ナンバ歩き・ナンバ走り」であり、そのロ バスト性のメカニズムとサーボモータ動特性の 関係は第5章に述べる.

4. 関節角変位・角速度・角加速度制御における サーボモータの動特性

ー般に,現在のモータは,軽負荷・高速回転には 適しているが,ロボットの関節には構造的にトルク 不足である.

図 11 は、本研究で使用したサーボモータ:近 藤科学 KRS-788HV (カタログ値は、質量 47.5g, 電源電圧 9~12V,電圧 10.8V におけるトル ク:10.0 kg·cm)である.図 12 のようにサーボモ ータに回転角度の目盛表示を付け(サーボモー タの動作が分かるように回転軸に針を取り付け ている)、サーボモータの角変位をプログラム上 で 0 deg \rightarrow 90 deg \rightarrow 0 deg と与えて無負荷 で動作させ、図 13 のように高速ビデオカメラを 用いて画像解析した.図 14 は動作時間 Operating Time Setting 0.178 s (Speed-7)で 90 degrees の回転角変位をプログラムした場合, 図 15 は動作時間 Operating Time Setting 0.096 s (Speed-3)で 90 degrees の場合のコマ写真である (撮影 250fps, 0.02 s 毎の表示).図 16 は実験

(報意 2501ps, 0.02 s 毎の衣尓). 因 10 は突厥 結果であり,図 16(a)は、プログラムにおける角





(c) Fig.11 Servo-motor: KRS-788HV



Fig.12 Example of high speed camera measurement, Operating Time setting: 0.096 s (Speed-3), Angle Setting: 90 degrees, Measured actual max. angle: 26 degrees.



Fig.13 High speed camera measurement and analysis of dynamic characteristics of a servo-motor: Example of Setting Operation Time 0.096 s (Speed-3) of servo-motor for running between 0 and 90 degrees .



Fig.14 Example of high speed camera measurement of dynamic characteristics of a servo-motor, Operating Time setting: 0.178 s (Speed-7), Angle Setting: 90 degrees, Measured actual max. angle: 61 degrees.





変位 90 度の動作時間設定パラメータ(Speed) と動作時間実測値の関係,図 16(b)は角変位 90 度の動作時間設定パラメータ(Speed)と最大動 作角実測値の関係,図 16(c)は角変位 90 度の動 作時間設定パラメータ(Speed)と最大動作角速 度実測値の関係を示す.図 16 の横軸の動作時間 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 パラメータ(Speed)が 12 より小さい と理論通りにならない. 通常の速度の動作では Time Setting パラメータ (Speed) は 12 以下を 使用するので,サーボモータの非線形飽和特性 はやっかいである.

たとえば,動作時間 Time Setting 0.096 s (Speed 3)では,90 deg の回転角をプログラムし ても約 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





(b)



(c)

Fig.16 Measured operaring characteristics vs. operating time setting for objective operating angle of 90 degrees.

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.

したがって,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 16),歩幅が 小さくなり,前進しないで転倒しやすくなる. 小型二足ロボット「源兵衛4号 2007」(筐体: 近藤科学 KHR-2HV,身長 340 mm)を用いて, 同一の状態図(姿勢)で動作時間設定のみを変 更して歩行・走行を試みた実験結果について次 章に述べる.

5. 関節に負担の少ない歩行・走行のメカニズム

図16のサーボモータ動作特性と図6の状態図 を用いて,動作時間10に設定した結果が3章の 図10(a),動作時間7に設定した結果が図10(b), 状態1,3を動作時間3,状態2,4を動作時間4に 設定した結果が図10(c)である(約2歩のコマ写 真).図10(c)が最も速く,画像解析よりピッチ 速度は約7 steps/s,前進速度は約37cm/s である.

図 17, 図 18, 図 19 は, それぞれ図 10(a), 図 10(b), 図 10(c)の動きを空中で実行した場合の 左右の脚の動きを示す.

図 20, 図 21, 図 22 は, それぞれ図 10(a), 図 10(b), 図 10(c)の動きにおいて, プログラム で与えた基本状態図に相当するコマ画像を示し たものである.

図 23 はロボットのピッチ速度の測定法であ り,図 24 は動作時間設定値に対するピッチ速度 実測結果を示す.

図 25 は、横軸が歩行ピッチ速度(歩数/秒), 縦軸がロボットの前進速度である.ピッチ速度 に比例して前進速度が増す.

図 26 は、前傾姿勢角度の測定画面例であり、 図 27 は動作時間設定値に対する前傾姿勢角度 の実測結果である.動作時間が5よりも短かく なると、動作時間が短いほど前傾姿勢が大きく なる.

図 28 は歩幅 (ストライド)の測定画面例であ り,図 29 は動作時間設定値に対する歩幅 (スト ライド)の実測結果である.図 29 は,移動距離 実測値から算出した歩幅(Stride)であり(歩幅は 右足の元の位置からの移動量を3箇所で測定し, 3回平均と標準誤差を示す),動作時間の長短に かかわらず,ほぼ同一の値であった.図 30 は, 具体的な測定例を示す.



Fig.17 Moves of legs in the air for NANBA walk of GENBE No.4-2007 with Operating Time (Speed): 10 (2 steps).





Fig.19 Moves of legs in the air for NANBA walk of GENBE No.4-2007 with Operating Time (Speed): 3&4 (2 steps).



Fig.20 Actual biped robot movement based on transions from STATE to STATE in program 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.21 Actual biped robot movement based on transions from STATE to STATE in program with Operating Time (Speed) : 7 (250 fps).



(a) Nearly State 1 (t=0.12 s) (b) Nearly State 2 (t=0.16 s) (c) Nearly State 3 (t=0.24 s) (d) Nearly State 4 (t=0.28 s) Fig.22 Actual biped robot movement based on transions from STATE to STATE in program with Operating Time (Speed): 3-4 (250 fps).

図 24 の実測結果において, ピッチ速度は動 作時間設定値に比例しており, 設定動作時間が 短いほどピッチ速度は増大している.また, 図 25 の実測結果において, ピッチ速度に比例し て前進速度が増大している.したがって, 図 25 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 16 によると, 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 錯誤と経験を必要とする.



Fig.23 Measurement of pitch speed vs Operating Time Setting (Speed 7) of Servo- motors.



Fig.24 Pitch speed vs Operating Time Setting of Servo- motors.



Fig.25 Forward speed vs pitch speed of biped robot GENBE No.4-2007.



Fig.26 Measurement of Forward Leaning Angle vs. Operating Time Setting of Servo-motors.



Fig.27 Forward leaning angle vs Time setting



Fig.28 Measurement of Stride vs. Operating Time Setting of Servomotors.



Fig.29 Stride vs. Time setting



6.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、関節あるいはサー 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した.

本研究における人間型二足ロボット「源兵衛」 の「ナンバ歩き・ナンバ走り」は、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 であり、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・カオス的挙動を 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³⁾⁻¹⁶⁾.

サーボモータの設定動作時間が短くて(ピッ チ速度が速くて)足が上がりきらない場合でも, 前傾角度が大きくなって,常に前傾姿勢で足裏 が前方に滑りながら走り,ピッチ速度が速くな っても転倒しない.

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、および高橋尚子選 手とさかいやスポーツ・酒井孝典氏のご助力に 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) 佐藤知正, 創立 25 周年にあたって-ロボットの現状と日本ロボット学会の役割-, 日本ロボット学会誌, 25 巻 6 号, (2007), pp.800-801.
 2) 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.

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) 川副嘉彦・伊倉良明・輿水裕矢・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 年度年次大会講論集, No.08-1, Vol.5, (2008), pp.165-166.

5) 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,日本機械学会主催ジョ イントシンポジウム 2008 (スポーツ工学& ヒ ューマン・ダイナミクス)講演論文集, No.08-23, (2008), pp.165-170.

6) 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. 7) 川副嘉彦,知能ロボットの知性の創発(第1 報,複雑系としての人間の行為・運動の巧みさ とサブサンプション・アーキテクチャ),埼玉工 業大学紀要,第11&12号,pp.9-19,(2002)

8) 川副嘉彦,知能ロボットの知性の創発(第2 報,SAを用いた行動型移動ロボットの自律走行 の発現),埼玉工業大学紀要,第11&12号, pp.21-31,(2002)

9) 川副嘉彦,知能ロボットの知性の創発(生き物・人間の巧みさと包摂構造からのアプローチ),埼玉工業大学工学部紀要,第13号,pp.13-23, (2003)

10) 川副嘉彦,知能ロボットの知性の創発(学 習の包摂構造化と巧みさの発達)埼玉工業大学 工学部紀要, 第14号, pp.3-16, (2004).

11) 川副嘉彦,自然・生き物・ヒトと共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)

12) 川副嘉彦,自然・生き物・ヒトと共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)

13) 川副嘉彦,自然・生き物・ヒトと共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,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.9-18.

16) 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.

17) 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.
18) 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.