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

Light-Load Walking, Running and Rising-up of Humanoid Biped Robot GENBE 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 introduced experimentally the robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywher even on the ice and snow, developing to the rising up with light load.

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

1. 研究の背景と目的

一般に二足ロボットの歩行・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プログラムどおり上がらず、サーボ速度も飽和し、歩幅も小さくなって転倒しやすい、本研究では、「捻らない・うねらない・踏ん張らない」という身体に負担の少ない身体操法を「ナンバ」と定義し、二足ロボット「源兵衛」を用いたナンバ歩き・ナンバ走りのロバスト性(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、高速度ビデオカメラと映像解析により明らかにする。本研究の「ナンバ歩き・ナンバ走り・起き上がり」は極めてロバストで俊敏自在である。

2. 不安定が動きをつくる

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(i). 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⁽²⁾. 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、江戸一仙台間を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。人間に比べてロボットは自由度が少ないので、動きの基本原理がわかりやすい.

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、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。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

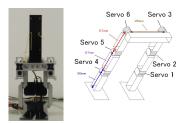


Fig.1 Biped walking robot GENBE-No.2 with 6 freedom legs

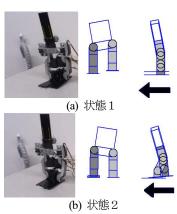


Fig.1 Fundamental States of NANBA Walking of GENBE- $\mbox{No.2}$ with 6 freedom legs

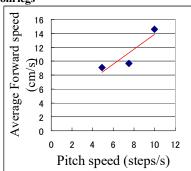


Fig.3 Forward speed vs pitch speed of biped robot GENBE No.2 with legs of 6 joints.

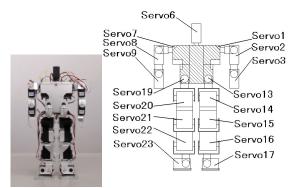


Fig.4 Humanoid biped robot GENBE No.4.with legs of 10 joints.

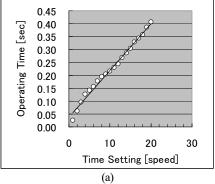
クターである.歩行の周期も振幅(歩幅)もほぼ周期的であるが、サーボモータへの負荷の大きさや足裏のすべりなどが足を上げる時間や歩幅に微妙に影響し、歩行の周期も歩幅も微妙に変化し、複雑系・カオス的挙動を示す.予期せぬ外乱に対して頑健であり、状況の変化に応じた柔軟性がある⁽²⁾⁴⁾.

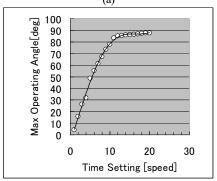
図5は古武術研究者・甲野善紀のナンバ的走りの原理であり、 体を上手に使うことで体全体に滞りがなくなり、ある状態から 別の状態に一気に変化することにより速さを生む.

3. 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

図 6 は、プログラム上でサーボモータ角度を 0 deg $\rightarrow 90$ deg $\rightarrow 0$ 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6)、





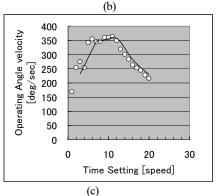


Fig.6 Measured operaring characteristics vs. operating time setting for objective operating angle of 90 degrees.

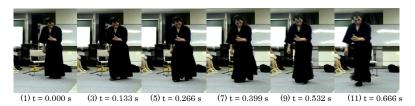
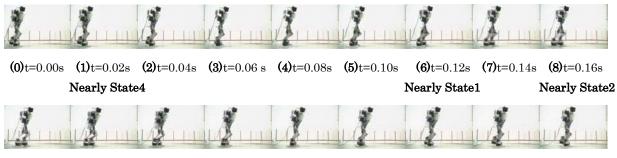


Fig.5 NANBA walking & running of Yoshinori KOHNO



(9)t=0.18s (10)t=0.20s (11)t=0.22s (12)t=0.24s (13)t=0.26s (14)t=0.28s (15)t=0.30s (16)t=0.32s (17) t=0.34s Nearly State3 Nearly State4

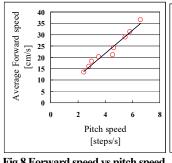
Fig.7 NANBA dash (36.5 cm/s, 6.58 steps/s) of GENBE No.4-2007. It takes only 0.3 seconds for 2 steps.

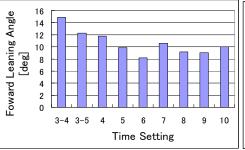
歩幅が小さくなり、前進しないで転倒しやすくなる. 二足ロボット「源兵衛4号2007」を用いて、同一の状態図(姿勢)で動作時間のみを変更して歩行・走行実験を行った.

図 7 は,図 6 のサーボモータ動作特性を用いて,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り $(2 \pm 0 \pi)$, 画像解析よりピッチ速度は $(2 \pm 0 \pi)$ があった。プログラムで与えられた状態図とは異なって,常に前傾姿勢で走っている。

図8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9のように、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.また、図10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8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6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.他の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でめに脚が十分上がらなくても、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.図11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11(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.





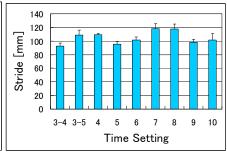


Fig.8 Forward speed vs pitch speed of biped robot GENBE No.4-2007.

Fig.9 Forward leaning angle vs Time setting

Fig.10 Stride vs. Time setting





(b)





Fig.11 Robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywhere.

4. 不安定を利用した状態遷移による人間型二足ロボット「源兵衛」の複雑な動きへの展開

図12は、図13の「添え立ち」と呼ばれる甲野善紀の技術をヒントに作成した二足ロボット「源兵衛」のうつ伏せからの「起き上がり」である。腕立て伏せのように手を広げて支えるのではなく、相手の脇の下へ手を入れ、身体を丸める「添え立ち」をヒントにして、両手を身体の下に滑り込ませてから身体を持ち上げ、起き上がるときに重心(お尻)を後ろに移動させ、慣性力による後方への転倒力を利用している。図14は、「仰向け」から「うつ伏せ」を経ての「起き上がり」の実現である。「仰向け」から「うつ伏せ」への動きは、脚を伸ばして脚の転倒力を利用して身体を横転(仰向けからうつ伏せに)させている。

5. 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350cm)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をし、転倒した後に素早く立ち上がる⁽²⁾⁽⁵⁾.

図15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コマ写真である。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)を認識してからの応答(t=3.20秒)も極めてよく、動的

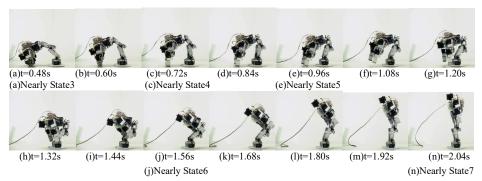


Fig.12 From prone position to rising up using gravitational force.

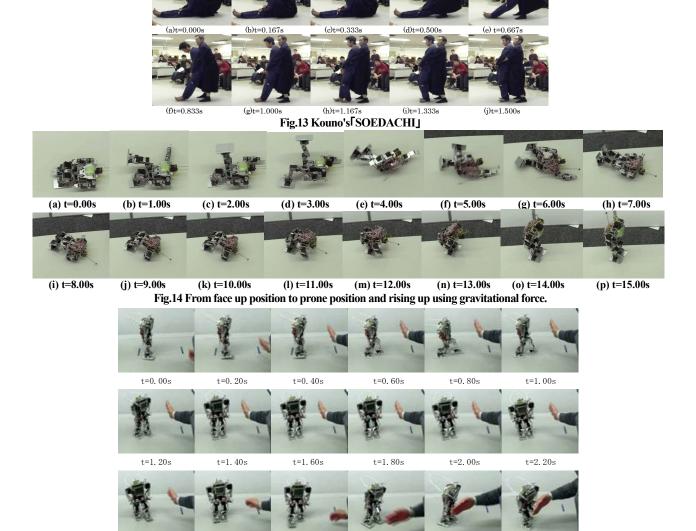


Fig.15 Emergence of simple self-sustained humanlike robust quick stops and instantaneous turns of humanoid biped robot GENBE No.5-2006 for abrupt disturbance during NANBA walking. (every 5/30 frames).

t=3.00s

t=2.80s

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30cmであり、サブサンプション(包摂)構造的要素行動により、反応が速い.図16は、甲野のナンバ的90度方向転換であり、ターンの所要時間は0.5秒である.

t=2.60s

t=2.40s

6. 結 論

歩幅が一定であれば、理論的には、ピッチ速度に比例して 前進速度も増す.しかし、一般にピッチ速度が増すとサー ボのトルク不足により脚がプログラムどおりに上がらず、 サーボ速度も飽和し、歩幅も小さくなって転倒しやすい.

本研究の二足ロボットのナンバ歩き・ナンバ走りは、設定動作時間が短くて足が上がりきらない場合でも、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. 自律型も、同様の原理により俊敏であり、前進あるいはター



t=3.40s

t=3.20s

(1) t=0.000 s (8) t=0.133 s (6) t=0.266 s (7) t=0.399 s (9) t=.532 s (11) t=0.666 Fig.16 NANBA Turn of Yoshinori KOHNO. It turns instantaneously 90 degrees in 0.5 seconds.

ンの途中の突然の障害物に対して約0.40秒で急停止できた. 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・輿水裕矢・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. (ほか省略)