

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

Robust Distributed Control NANBA of Physical Body with Light Joint Load based on Humanoid Biped Robot GENBE Utilizing Instability

正 川副嘉彦(埼玉工大)

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

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. This paper proposed the approach for realization of a real intelligent 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.

Key Words: Robotics, Human-Robotics, Humanoid Biped Robot, Complex System, Dexterity, Development, Martial Art, 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]。

少子・高齢化社会に期待されるサービスロボットや介護ロボットなど、我々の周囲に存在して知的に動く機械は、長年の研究にもかかわらず、残念ながら我々の周りに存在しない[1]-[14]。生活分野、公共分野、医療福祉分野等においてロボット技術の多様な利用が期待されているが、現状のロボット技術は、将来の市場拡大に対応したロボット技術の具体的な用途や技術の実現可能性を明確にできないでいる [2]。

ホンダの ASIMO, ソニーの QRIO, 産官学の HRP-2 などに代表される二足歩行ロボットは、従来の制御技術を極めた高度な機械であるが、「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、近代スポーツの動きに似ている。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、予想外の外乱に弱い[1],[3]。高精度な ZMP 操作の研究も精力的になされているが、俊敏・柔軟な動きが求められる実環境においては精密な測定と計算に頼る ZMP 制御の限界はもはや明かである。既存のヒューマノイドで実現されていないのは、全身を駆使して素早く巧みな運動を多様な姿勢や環境接触と予測困難な外乱やモデル化誤差のもとでロボストに達成することだと言われる。

最近、ナンバといわれる身体操法が話題になっており、現代人は動きに無駄が多く、現代人の身体の使い方の問題

点が指摘されている。現代人だけではなく、最先端と言われる二足歩行ロボットにも同様なことが言えそうである。ロボットは動きに無駄が多く、ロボットの身体の使い方には問題がある。

古武術は命がけの対決を通じて培った適応性のある柔軟な動作が基本であり、「捻らない、うねらない、踏ん張らない」というのが特長である。本研究では、「足の裏で踏ん張らない、転倒力を利用する、着地位置は気にしない」という従来と反対の歩行原理を基本として人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟な歩行・走行・方向転換などを実現し、「捻らない、うねらない、踏ん張らない」という身体に負担をかけない身体操法への質的転換の指針を探る。「動物」は動く物、「働く」は人が動くこと、「動」は重力と書く。動物はロボットのお手本であり、「源兵衛」は江戸・仙台間を1日で走ったと言われる江戸時代の飛脚にちなんで名づけた。重力(不安定)を利用する俊敏・柔軟な動きを紹介し、障害者の歩行やリハビリ、ジョギングやテニスなどのスポーツにおける身体操法などへの応用の可能性を示す。

2. 人間型二足ロボット「源兵衛」の捻らない・うねらない・踏ん張らない身体操法

ナンバ歩きの基本は、最もシンプルな源兵衛2号 (Fig.1, 脚部6自由度, 身長30cm) の場合、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。歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足がでることにより重力を利用して自然に前進する。Fig.2は、「源兵衛4号」(脚部10自由度, 身長34cm) のナンバ歩きである。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.3(e)において右足が着地したときにはすでに左足が浮いており、さらに(f)~(m)において転倒力を利用して自然に左足が右足の横を通過して進行方向に着地する。実環境に必要な歩行を姿勢制御無しで設計者の介助によりロボットが試行錯誤的に学習することにより自在の速度で歩行する[3]。前傾角度、左右の傾き角度を大きくしてピッチを速くする

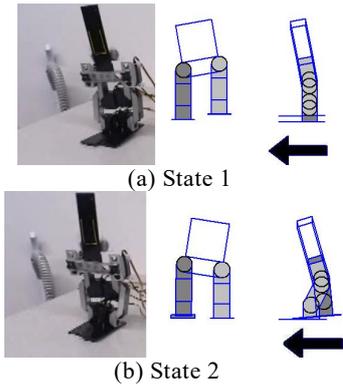


Fig.1 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.2 with 6 freedom legs

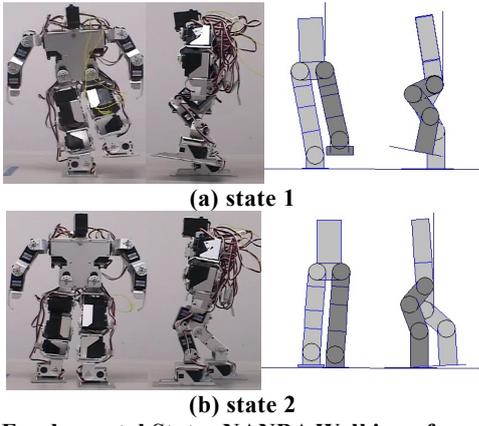


Fig.2 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.4 with 10 freedom legs

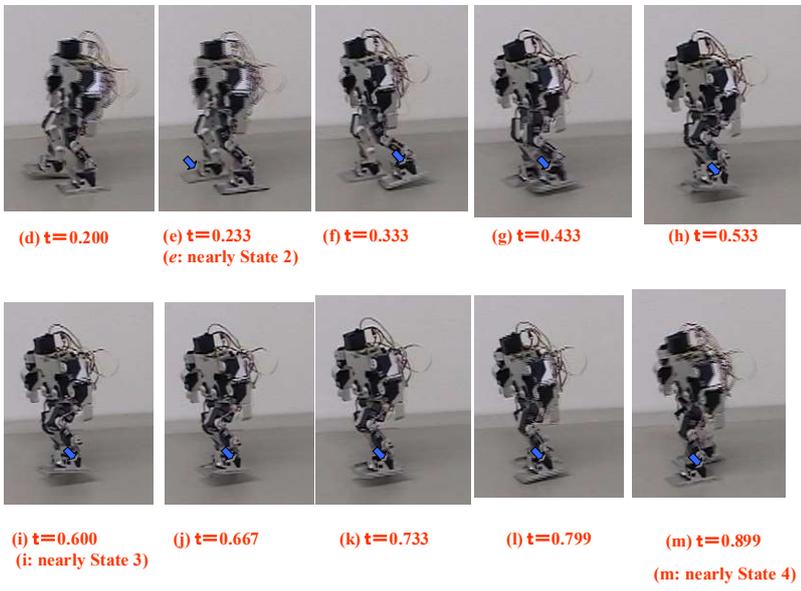


Fig.3 Emergence of simple self-sustained humanlike robust walking NANBA of humanoid biped robot GENBE No.4. Height: 34 cm,

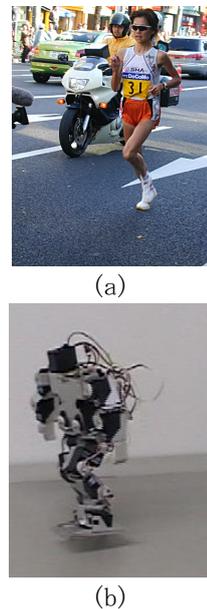


Fig.4 NANBA Run

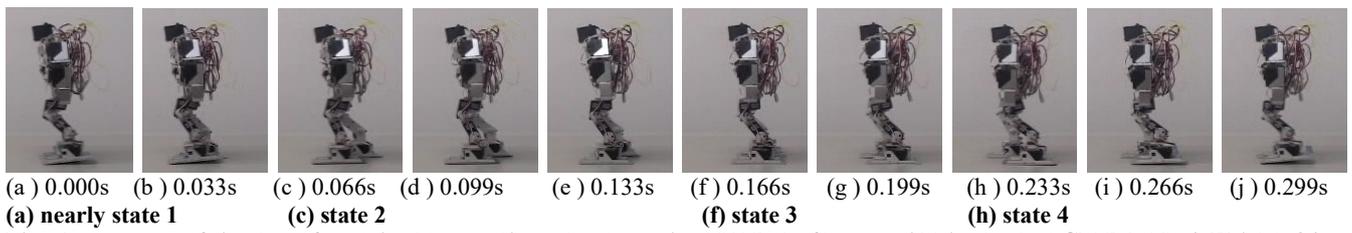


Fig.5 Emergence of simple self-sustained humanlike robust running NANBA of humanoid biped robot GENBE No.4. Height: 34 cm, running speed: 18 cm/s (6 steps/s).

と自然に歩きから走りへ転ずる。これまで毎秒 2cm から毎秒 18cm までの歩行速度を実現している。ナンバ歩きを人間型二足歩行ロボットに生かすと俊敏で柔軟な動きをつくりやすい。関節への負担も軽く、省エネルギーで済む利点もある。Fig.4 の高橋尚子選手の走法は胸を張ってから走っているのではない。大きく前方に上体が倒れ込む以上に左右交互に繰り返す足のピッチが速いので自然に姿勢が起きてくる。ピッチが遅くなると前傾をゆるめないと前方に転倒する。逆に、ピッチが速くなるにつれて前傾を大きくしないと反り返って滑って後に転倒する、動きを外から見た（フォーム）だけでは体の内の関節の動きはわからないことに注意すべきである。Fig.5 は、速い走り（18cm/s、「ナンバ・ダッシュ」）であり、約 0.3 秒間を表示している。状態図と比べて脚があまり上がっていない。図 6 は、横軸に歩行のピッチ速度（歩数/秒）を取って 4 種類の歩行速度をプロットしたものである。4 種類の歩行の状態図はほぼ同じである。ピッチ速度が上がるにつれて、歩行速度もほぼ比例的に上がるが、ピッチ速度が 6 steps/s（歩行速度 18 cm/s）で歩行速度が伸びなくなる。これは、速いサーボ速度レベル speed 0,1,2 ではトルク不足により、設定した時間内に設定した関節角度まで到達しない（足を上げて前足の形を作る速度に限界がある）ためである。状態図の関節角度まで至らないまま、次の動作に移っている。高速ビデオ画像解析による複歩の正確な測定時間は 0.276 秒（1 歩 0.138 秒）とかなり速いが、図 6 のようにサーボのトルク限界がなければ重力を利用してかなり高速の走りができることを意味している。また、高速走行のプログラムで与えた姿勢通りにならなくても十分速い速度で走行し、極めてロバストである。

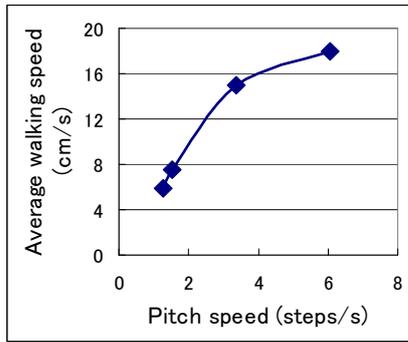


Fig.6 Measured average walking speed vs. pitch speed.

3. 人間型二足ロボット「源兵衛」の赤ちゃん歩きから飛脚走りまでのロボパスト性のメカニズム

Fig.7は、人間の手による倒立棒の安定化制御の習熟過程である。従来の機械やロボットの制御法では目標値あるいは目標軌道に近づけようとする。図7はこのような機械制御に似た人間オペレータ NR の安定化挙動の例であり、試行開始後約 10 秒後に倒立棒は倒れてしまった。練習を繰り返したが、結局、人間オペレータ NR は 60 秒間の安定化制

御の成功には至らなかった。しかし、安定化制御実験における多くの人間オペレータの習熟過程を解析すると、Fig. 8(a) に示すように、倒立棒はほとんど垂直には立っておらず、重力による転倒力により常にゆれており、右と左の方向の切り替えの途中は制御していない。(b)のように、あらゆる転倒状況（倒立棒の傾き角、角速度、台車の位置、速度などの組み合わせ）において転倒しないような切り替えのコツを試行錯誤により獲得する[19]。試行を重ねて習熟していくと次第に動きが滑らかになり、(c)のように倒立棒は静止しているように見える。しかし静止しているのではなく、絶えず細かく動いているのである。これが人間の立位あるいは歩行が外乱に対して強いロボパスト性をもつ理由であり[1]、人間型二足ロボット「源兵衛」の歩行原理である。倒立棒の前方への傾き角度に応じて台車の速度を増すと倒立棒は小さく揺れながらほぼ垂直の姿勢で前方に走る。倒立棒が左右二本になったのが時速30キロで走ったと言われる江戸時代の飛脚「源兵衛」の「ナンバ走り」、あるいは陸上競技の高橋尚子選手や末続慎吾選手に見える走りの原理と考えることができる。速度の遅い赤ちゃん歩きから飛脚走りまで進展するメカニズムである[1][20][21]。

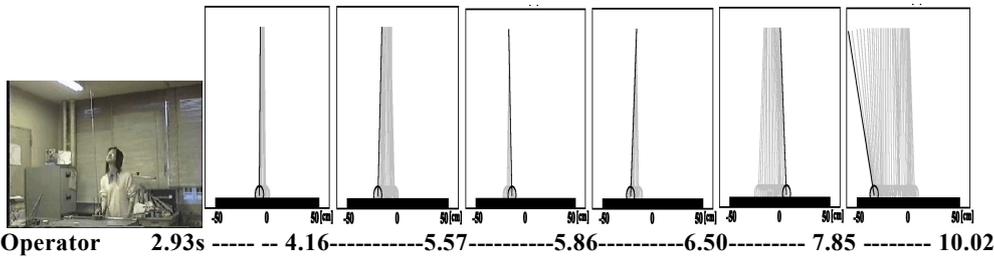


Fig.7 Stick pictures of stabilizing behavior of human operator similar to conventional Zero Moment Point (ZMP) control falling down after 10 seconds from start of trial (NR01).

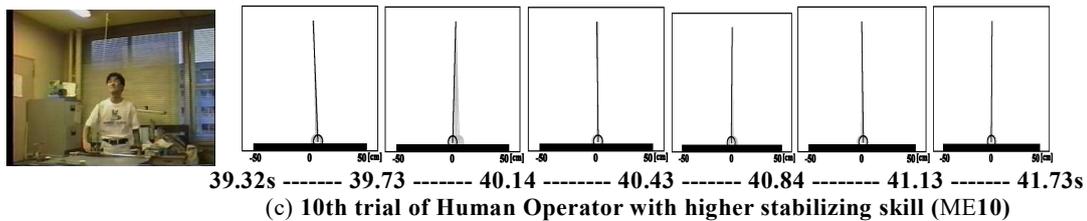
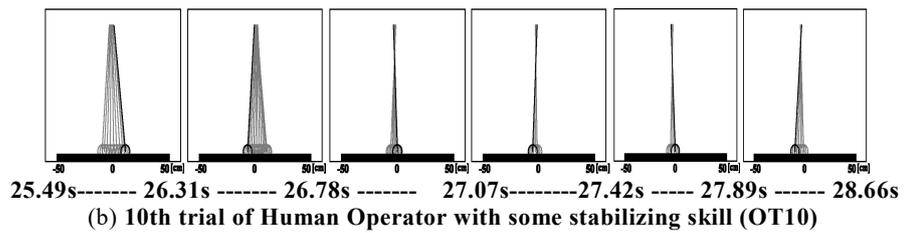
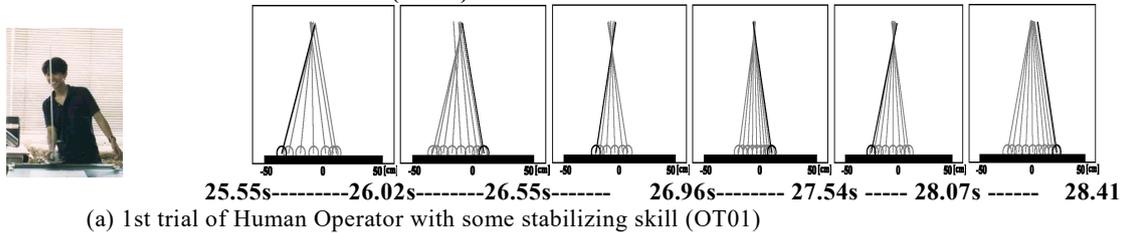


Fig.8 Stick pictures of stabilizing behaviors of human operators showing the mechanism developing from baby walk to Japanese express messenger.

4. 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

転倒力による不安定と状態の遷移（切換）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）の発現を試みた。

Fig.9は、不安定を利用する瞬間的な方向転換の例であり、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（1秒で）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。

Fig.10 は回転角度の実測時系列である。Fig.11 はロボットの前後方向の歩幅と方向転換角度の関係を示す実測値で

あり、平均値とバラツキを示す。方向転換角度は歩幅 60 mm 以上でよく回転し、歩幅にほぼ比例している。Fig.12 は前傾角度と実測回転角度を示す。前傾角度が大きい方が回転角度も大きい。

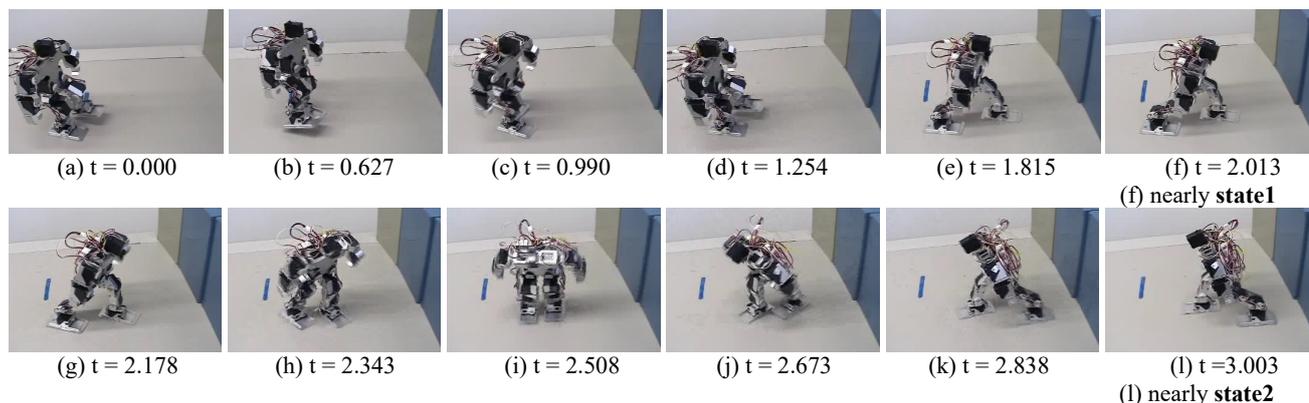


Fig.9 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees per second.

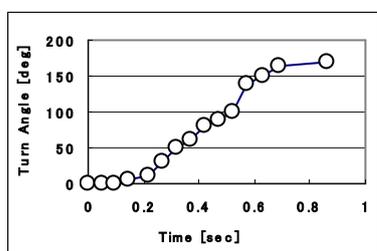


Fig.10 Time historical turn angle during instantaneous 180 degrees NANBA TURN

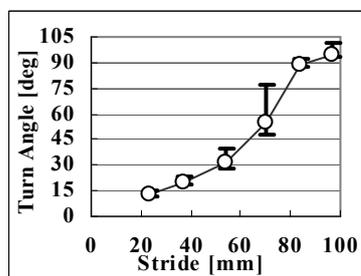


Fig.11 Turn angle vs. stride (○:average of 10 trials, Upper: Standard deviation, Lower: Standard error)

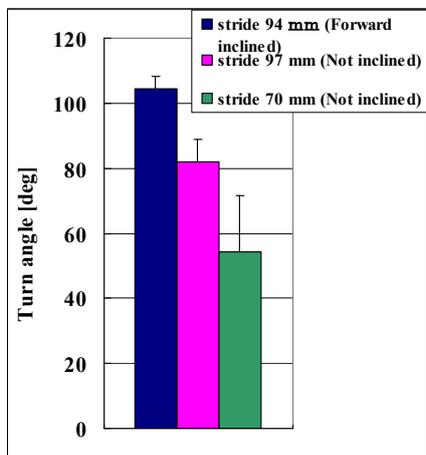


Fig.12 Effect of forward inclination on the turn angle of NANBA TURN (right turn).

5. 結論

(1)従来の目標軌道追従型の ZMP (Zero Moment Point) 制御とは質の異なる人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟・ロバスタな自在な速度の歩き・走りを実現した。

(2)①足の裏で踏ん張らない②転倒力を利用する③着地位置を気にしないという歩行原理は、省エネの利点がある。

(3) 筐体、サーボ速度、関節の自由度数、床の状況などの違いがあっても柔軟に対応できる。

(4) 重力による転倒力と加速力と地面との間に形成されたリミットサイクル・アトラクターを利用したきわめてシンプルな二足歩行であり、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。

(5)必要とされる歩行・走行を姿勢制御無しで設計者の介助により試行錯誤的に学習することにより始動・停止・方向転換を含めて実用的な自在な速度で歩行・走行する。

(6) 関節の負担が軽いので、障害者の歩行やりハビリの指導、短距離走やマラソン、テニスのボレーなどのスポーツにおける身体操法に広範囲の応用が期待できる。

(7)約 1 秒間で 180 度まで一瞬で向きを変えるその場での瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」は、不安定を利用して状態を一つ遷移する（切替える）だけで瞬間的に身体の向きを変えることができる。シンプルな大変動の非線形力学による大胆・複雑な動きの生成例であり、従来の二足歩行ロボットには見られない新しい動きの発現である。

おわりに、写真の提供をいただいた(有)さかいやすポーツ・酒井孝典氏、ご助力いただいた埼玉工業大学・平成 16 年度 4 年生・南雲・伊能・鈴木・池田および 17 年度 4 年生・須永・桃井・原田・清水の諸君に感謝する。

文献

[1] 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.

[2] 山本哲也, 次世代ロボット実用化プロジェクト, 日本ロボット学会誌, 24-2, (2006), pp.169-170.

[3]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

(他は省略)