

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

Autonomous Shock Avoidance during Falling Down and Instantaneous Rising of Biped Robot GENBE with Anti-ZMP

川副嘉彦(埼玉工大) 原田一臣(埼玉工大) 清水祐一(埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama
Kazuomi HARADA, Saitama Institute of Technology.
Yuichi SHIMIZU, Saitama Institute of Technology.

It seems that the emergence of intelligence in an autonomous robot exists in the dexterity of human or creatures as complex systems and the research style and the development procedure along this approach should be necessary for realization of a real intelligent robot. This paper realized the simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability.

Key Words: Humanoid Biped Robot, Dynamic Walking, Autonomous Shock Avoidance, Falling Down, Instantaneous Rising, Anti-ZMP, Human's Dexterity, Nonlinear Control, Martial Art, Emergence, Complex System

不意にうしろから押されたり衝突したりして倒れたときに壊れないというのは二足ロボットにとっては大前提であり、倒れても壊れないで手をつけて自分で立ち上がるというのはヒューマノイド・ロボットの夢であった。

本研究では、突然うしろから押されて前方へ転倒した場合に、転倒をすばやく自律的に検知して、転倒時の衝撃を最小限にするような受け身的な動きを瞬間的に発現し、手をつけて身体を支えた後に素早く(2~3秒で)転倒から立ち上がる動きを発現した。Fig.A1は、SA(Subsumption Architecture)による最も簡単な処理系を示す。要素行動 Upright posture(直立)と Shock-Avoid(転倒時の衝撃回避と起き上がり行動)を積み上げた。転倒時は Shock-Avoid が優先する。Fig.A2は、ロボットがうしろから不意に押されて転倒するときに、転倒を認識して、受身と起き上がりを発現した結果である。シンプルで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。

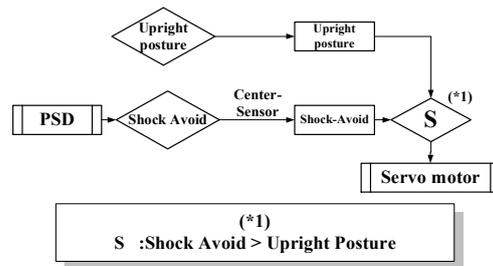


Fig.A1 Subsumption Architecture of GENBE No.5 with shock avoidance and instantaneous rising.

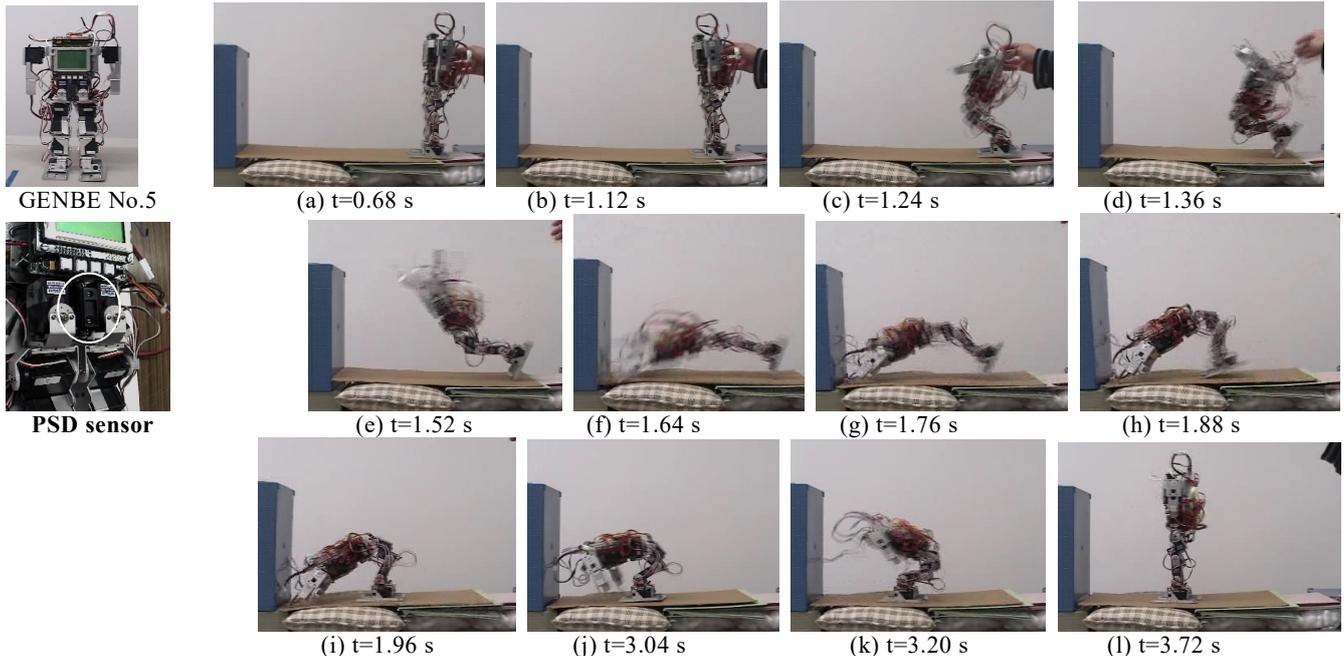


Fig.A2 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability - Part 2. It takes only 2.5 seconds.

1. 研究の背景と目的

二足歩行ロボットとして知られているホンダの ASIMO, ソニーの QRIO, 産官学の HRP-2 などは, 従来の制御技術を極めた高度な機械であるが, 絶妙な制御ゆえに, スペックをひとつ変えるだけでバランスが簡単に崩れてしまう. これらのロボットは, 重心と ZMP (Zero Moment Point) の制御を歩行の基本とし, 重力や慣性力に逆らう歩行法だから, 前方への推進力のブレーキとなり, エネルギー的にも無駄が多く, サーボモータの負担も大きく, 複雑精妙な制御を必要とし, しかも, 実環境における外乱に弱い[1].

杉原・中村らにより高精度な ZMP 操作の研究も精力的になされているが[2], 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. 実世界に必要な行動能力のうち, 既存のヒューマノイドで実現されていないのは, (1)全身を駆使して素早く巧みな運動を, (2)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であると國吉らが指摘している[3][4].

人間を含め二足歩行する身体の転倒問題は最も重要であるが, ヒューマノイドロボットが, 予測できない外乱により (たとえば, 急に後から押されて) 転倒したときに, 衝撃を最小限にとどめるような受け身的動きと転倒後の起きあがりの自律的発現に関する研究は見あたらない.

本報では, 人間型二足ロボットの動作設計の観点から高速ビデオ解析により瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」の方向転換角度と諸変数の関係を明らかにしたうえで, 人間型二足ロボットが突然うしろから押されて前方へ転倒した

場合に, 転倒をすばやく自律的に探知して, 転倒時に衝撃を最小限にするような受け身的動きを瞬間的に発現し, さらに素早く転倒から立ち上がる動きの発現を試みる.

2. 人間型二足ロボット「源兵衛」の瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」の高速ビデオ解析

2.1 瞬間的方向転換 90 度「ナンバ・ターン」

図 1 は「源兵衛 4 号」の「ナンバ・ターン」[5][6]約 90 度の方向転換の例である. 高速ビデオカメラで撮影し, 方向転換開始から方向転換終了までを静止画にしたものである. 図 2 は図 1 をもとに回転角度の時系列的变化を図示したものである. 図 1(a)は, 「ナンバ・ターン」の状態 1 に近く, 図 1(e)に近い状態 2 をロボットに与えると, 図 1(a)~(b)で加速して 0.494 秒後に約 30deg に達し, 図 1(b)~(e)は, ほぼ一定の回転速度で方向転換し, 0.414 秒後に約 60deg に達している. 図 1(e)は状態 2 に近い形であり, (e)(f)間で

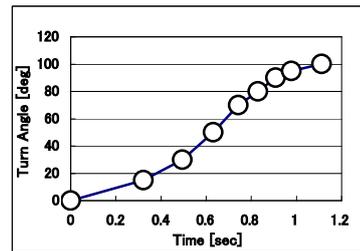


Fig.2 Time historical turn angle during instantaneous 90 degrees NANBA TURN

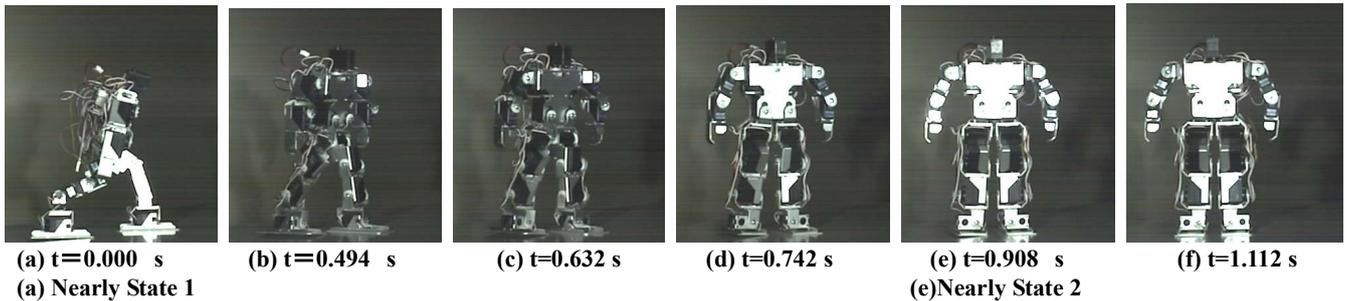


Fig.1 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously about 90 degrees per second.

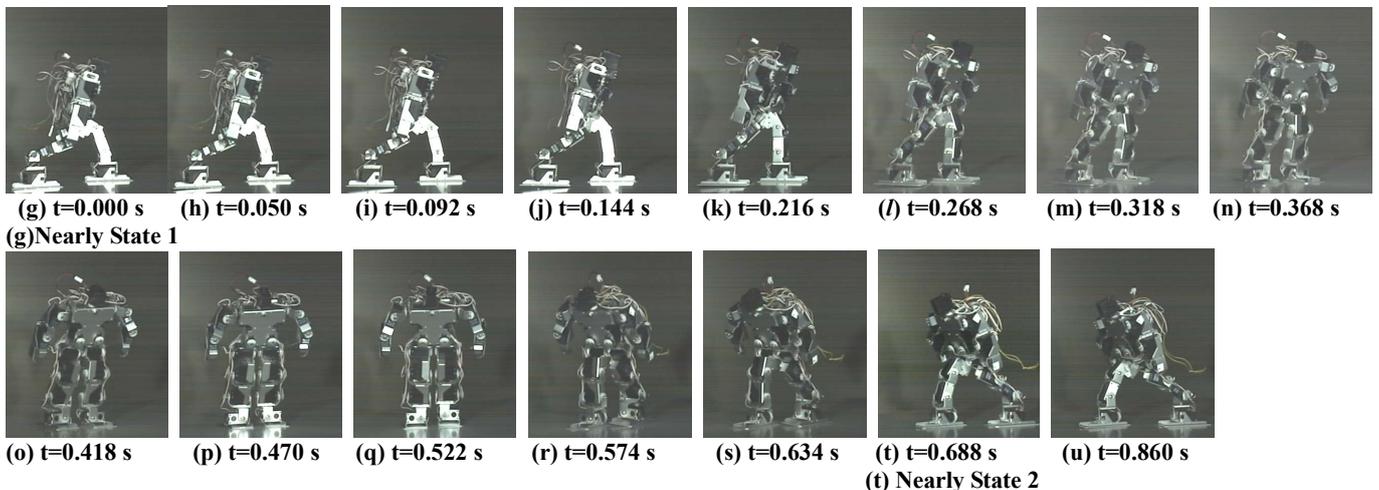


Fig.3 Emergence of a simple self-sustained humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously about 180 degrees per second.

は状態 2 に近い形のまま方向転換しており、0.204 秒でさらに約 10deg 方向転換している。1.112 秒の時間で約 100 度の方向転換を発現した。

2.2 瞬間的方向転換 180 度「ナンバ・ターン」

図 3 は「源兵衛 4 号」の「ナンバ・ターン」約 180 度の方向転換の例である。図 4 は図 3 から算出した回転角度の時系列である。図 3(a)は、「ナンバ・ターン」の状態 1 に近く、図 3(t)に近い状態 2 をロボットに与えると、(g)~(u)まで図 3 のように回転する。(i)~(k)は後ろ足が若干浮く。(k)~(q)は前足を回転軸としてほぼ一定の速度で方向転換している。(p)で足の形は直立とほぼ同じ形になり、0.306 秒の間に約 85deg 方向転換している。(q)~(s)は後ろ足(左足裏)が地面から離れ、最も高速で方向転換し、0.114 秒間に約 50deg 方向転換している。(s)で後ろ足(左足裏)が地面に着く。(q)~(t)は(k)~(q)間とほぼ同じ角速度で方向転換している。(t)は状態 2 に近い。(t)~(u)は状態 2 に近い形のまま 0.172 秒で約 10 度方向転換している。(g)~(u)まで

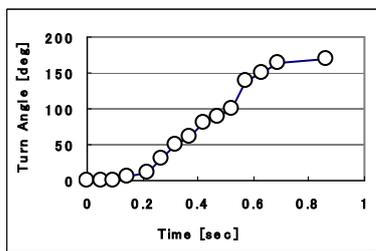


Fig.4 Time historical turn angle during instantaneous 180 degrees NANBA TURN

0.860 秒で約 170 度の方向転換を発現した。

2.3 前後の歩幅 (Stride) と方向転換角度の関係

上体の前傾姿勢角度を小さく設定して、時間設定はすべて 5 (239 deg/s, 最大角度 180deg) として前後方向の歩幅(前足と後ろ足の距離, Stride)のみを変更して同じ床で各 10 回の方向転換を試行し、歩幅と回転角度の関係を調べた。方向転換角度と歩幅は画像解析ソフトで測定した。図 5 の歩幅 70mm で約 50 度回転した例が図 7 であり、図 6 の歩幅 97 mm で約 100 度回転した例が図 8 である。図 9 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

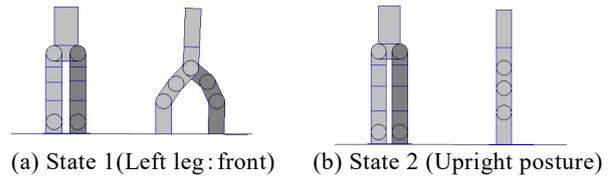


Fig.5 Fundamental two States of Right NANBA TURN of small forward inclination with stride 70mm.

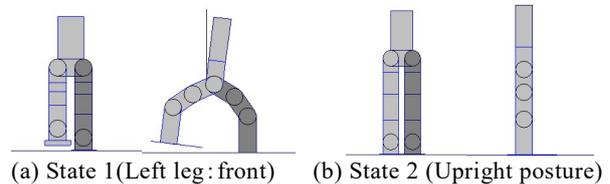


Fig.6 Fundamental two States of Right NANBA TURN of small forward inclination with stride 97 mm.

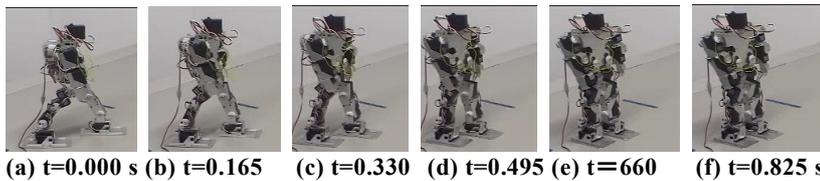


Fig.7 Effect of stride on the turn angle: NANBA TURN (right turn) of small forward inclination with stride 70mm.

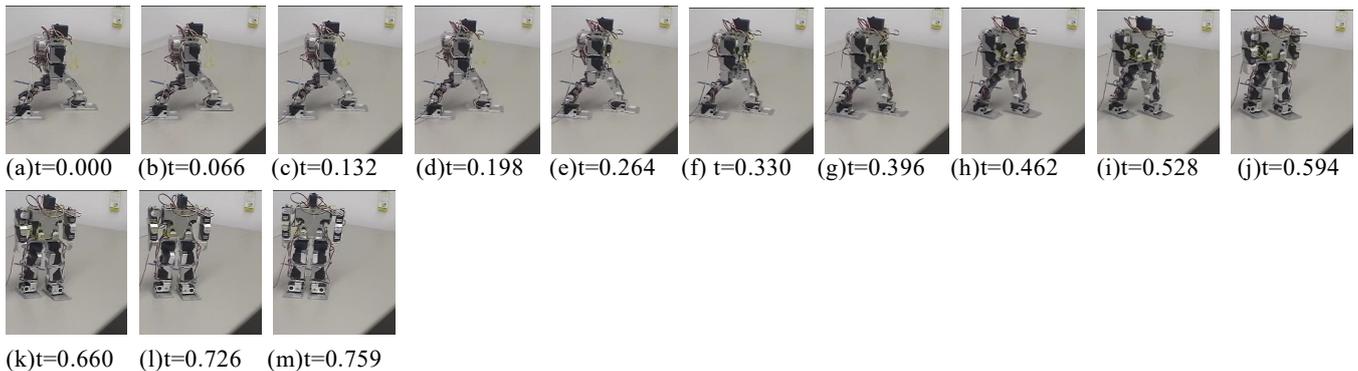


Fig.8 Effect of stride on the turn angle: NANBA TURN (right turn) of small forward inclination with stride 97mm.

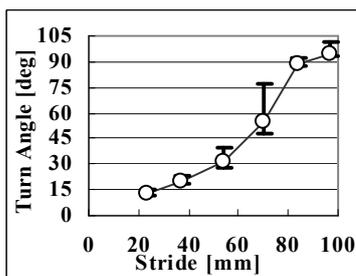


Fig.9 Turn angle vs. stride (○:average of 10 trials, Upper: Standard deviation, Lower: Standard error)

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。

2.4 前傾姿勢と方向転換角度の関係

図 10 は瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」において前傾角度の大きい場合の状態図であり、図 11 は前傾角度の小さい場合と比べた実測回転角度を示す。前傾角度が大きい方が回転角度が大きいことを示している。

図 12 は、状態遷移による動きのいくつかを組み合わせた「源兵衛 4 号」の自在の動きの例である。

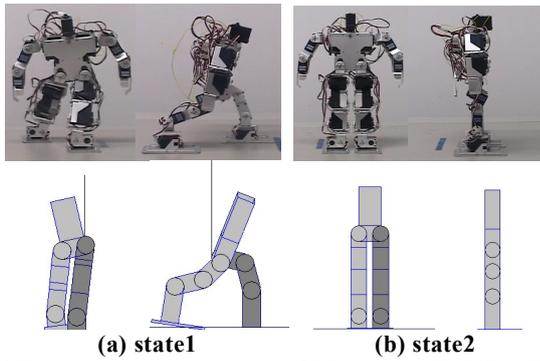


Fig.10 Fundamental two states of 90 degrees NANBA TURN (right turn) of large forward inclination.

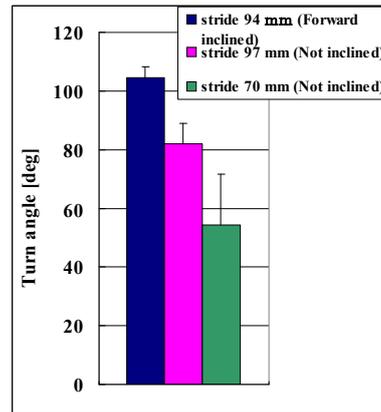


Fig.11 Effect of forward inclination on the turn angle of NANBA TURN (right turn).

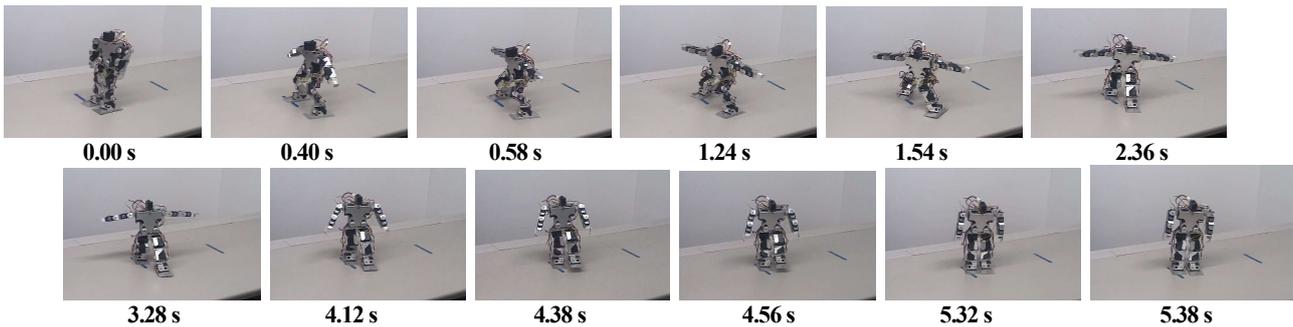


Fig.12 Example of unrestricted various movement including NANBA TURN of humanoid biped robot GENBE No.4 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability.

3. 瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」による自律的障害物回避の自律的発現

図 13 は「源兵衛 5 号」の全体図と前方の障害物回避のために胴体中央部に取り付けた距離センサー (PSD) を示す。パラメータ (1) 状態数, (2) 各状態におけるサーボモータの角度および, (3) 回転速度, (4) 状態間の待ち時間を組み合わせることにより 1 つの歩行動作が作成される。状態とは, 各サーボモータに角度データを与えた後のロボットの形 (姿勢) である。図 14 は, 前方の壁を検出して歩きながらの従来の方向転換による右折挙動であり, 90 度の方向転換に要

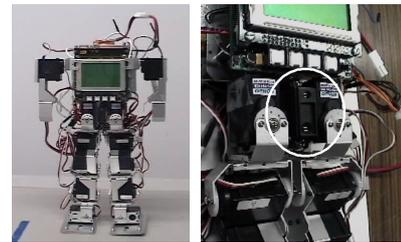


Fig.13 GENBE No.5 (Left) and Position Sensitive Detector (Right).

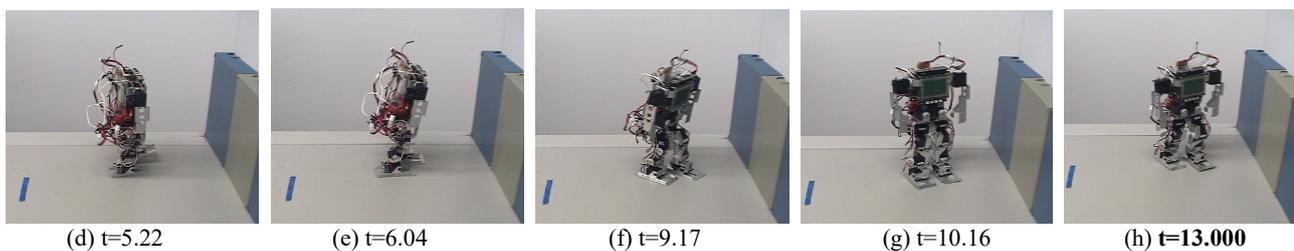


Fig.14 Obstacle (front wall) avoidance of humanoid biped robot GENBE No.5 using a conventional walking TURN. It turns about 90 degrees in 4~5 seconds.

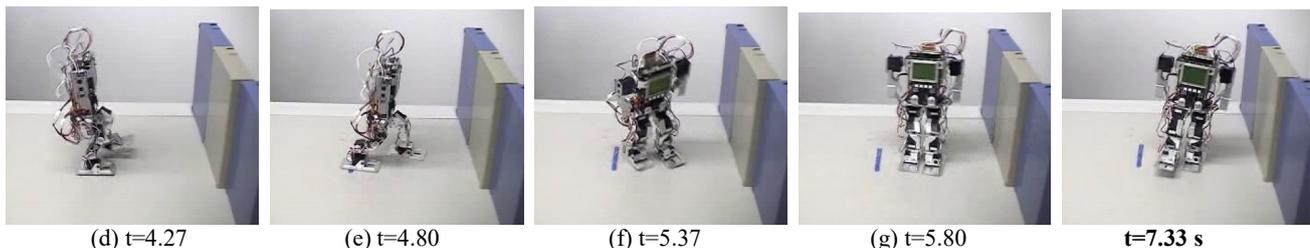


Fig.15 Obstacle (front wall) avoidance of humanoid biped robot GENBE No.5 using a simple humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously about 90 degrees per second.

する時間は4~5秒である。図15は、前方の壁を検出し、その場での瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」による右折挙動を示す。90度方向転換に要する時間は約1秒であり、軽快・巧みである。

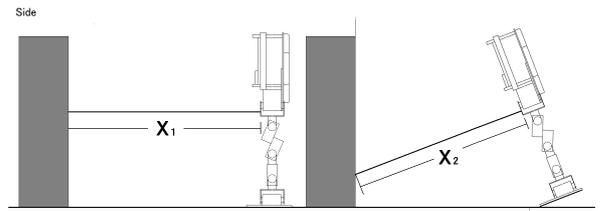
**4. 予測困難な外乱により転倒するときの瞬間的衝撃回避
動作・起き上がりの自発的発現**

転倒時にロボットに求められるのは転倒をすばやく探知することであるが、転倒の判断は非常に難しい。転倒検知用の適切なセンサを持ち合わせていないので、ここでは距離検出センサ PSD を利用した。

図16は PSD センサを使用した転倒判断法である。PSD の探知距離精度が悪いので、今回は対地ではなく対壁距離を利用した。ロボットの直立状態での探知距離 x_1 と転倒時の探知距離 x_2 の距離差($x_1 - x_2$)を設定値として転倒衝撃回避行動の作動条件とした。図17と図18は、それぞれ SA(Subsumption Architecture)による並列処理構造と各要素行動の処理系を示す。要素行動 Upright posture(直立)と Shock -Avoid(転倒時の衝撃回避と起き上がり行動)を積み上げた。転倒時は Shock -Avoid が優先する。

図19はナンバ的動きに基づく転倒時の衝撃回避と転倒からの起き上がり行動の基本状態である。状態1：両脚と

腰を使い、できるだけ重心を後ろに倒す。状態2：腰を曲げて手と脚の位置を近づけ、頭を護るために手を伸ばして



(a) Before falling down (b) after falling down
Fig.16 Detection of falling down using Position Sensitive Detector (PSD).

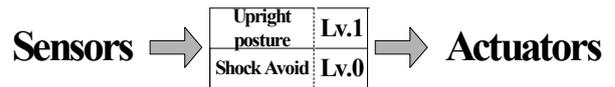
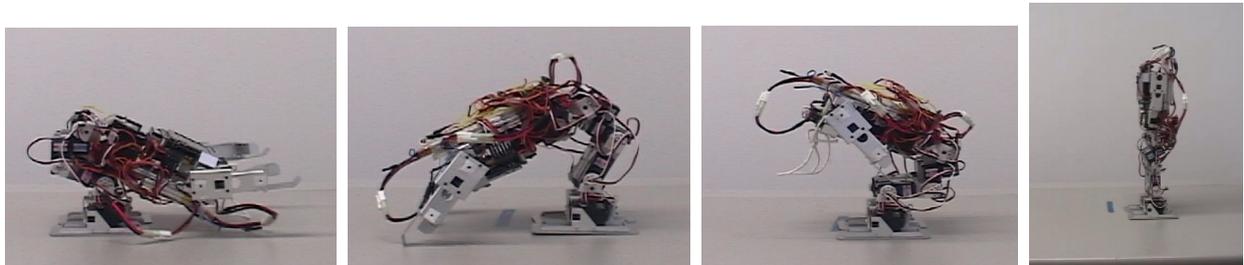


Fig.17 Subsumption Architecture of GENBE No.5 with parallel modules of agents.



(a) State 1 (throw back the head) (b) State 2 (crouching posture) (c) State 3 (rising posture) (d) State 4 (Upright)

Fig.19 Four states for realizing autonomous shock avoidance during falling down owing to being pushed from backside and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability.

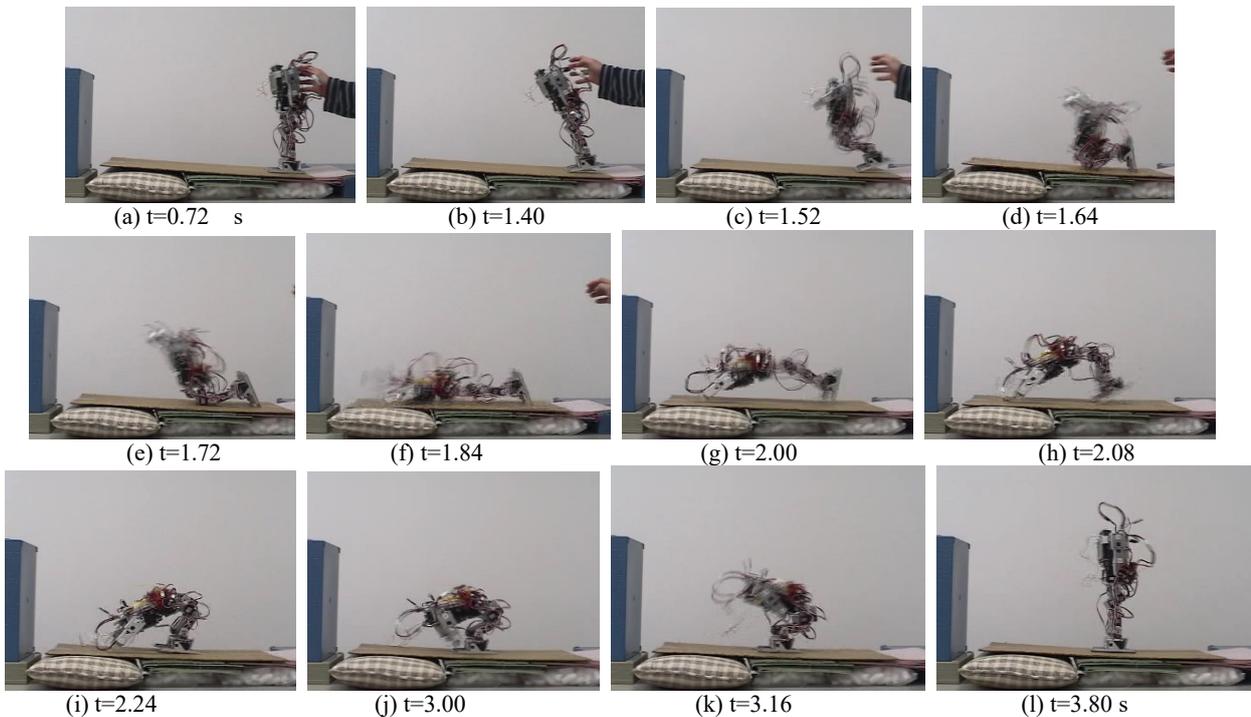


Fig.20 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability - Part 1. It takes only 2.5 seconds.

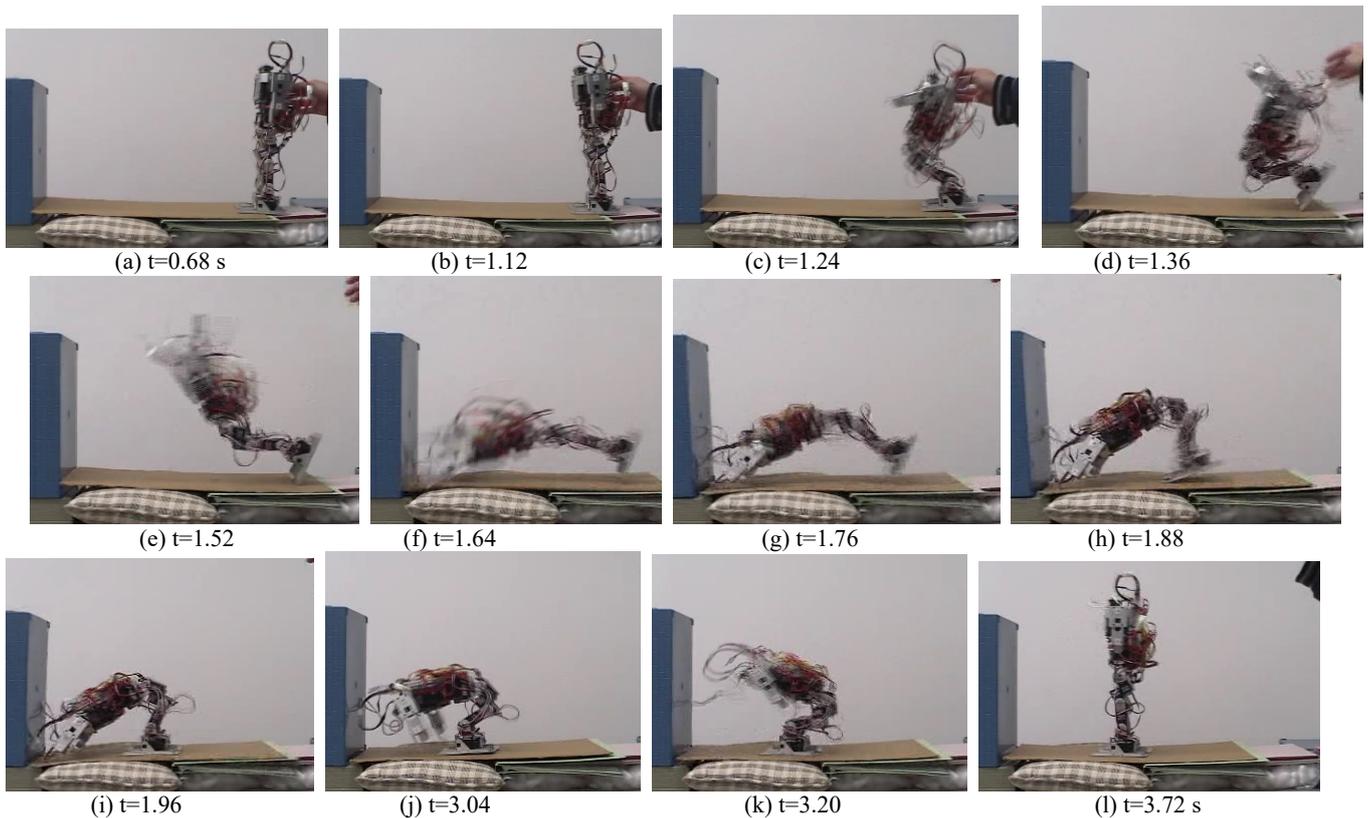


Fig.21 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability - Part 2. It takes only 2.5 seconds.

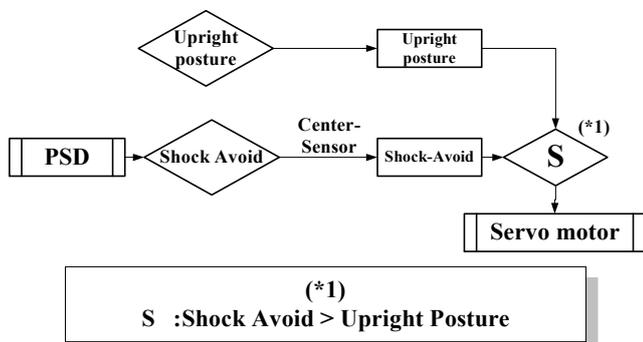


Fig.18 Subsumption Architecture of GENBE No.5 with shock avoidance and instantaneous rising.

手をつく。状態3：前かがみの形で重心を後方に持っていく。状態4：直立である。図20は、ロボットがうしろから不意に押されて転倒するとき、転倒を認識して図19の状態を遷移させて、受身と起き上がりを発現した結果である。(a) $t=0.72s$ ：後から押し始める。(b) $t=1.40s$ で転倒を検出し Shock Avoid を開始。(c)~(d)：膝を曲げ上体を後ろにそらす状態1の姿勢で転倒速度を遅くし、頭部(液晶モニターやCPU)の破損を防ぐために身体を沈めて膝から落ちる。(e) $t=1.72s$ ~(f) $t=1.84$ ：膝が軽く接地するとともに手を前方に突いて倒れる。(g) $t=2.00$ ：手が着くとすぐに状態2の手と足の距離を縮めて膝を浮かしてそのまま一気に起き上がる。転倒することを認識し、受け身をして転倒し、転倒してから起きあがるまでの時間は合計約2.5秒である。図21では、膝が接地しないうちに手をついて一気に起きあがる。巧みな身体の使い方である。転倒を検出してから起きあがるまでの時間は約2.5秒である。

5. 結論

不意にうしろから押されたり衝突したりして倒れたときに壊れないというのは二足ロボットにとっては大前提であり、倒れても壊れないで手をつけて自分で立ち上がるというのはヒューマノイド・ロボットの夢であった。

本研究では、突然うしろから押されて前方へ転倒した場合に、転倒をすばやく自律的に検知して、転倒時の衝撃を最小限にするような受け身的な動きを瞬間的に発現し、手をつけて身体を支えた後に素早く転倒から立ち上がる動きを発現した。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。

将来的には各種センサーが使えれば、もっとさまざまな状況への対応が期待できる。

おわりに、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。

文献

- [1] 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・機械力学・計測制御部門講演会 CD-ROM 論文集, pp.1-6, (2006).
- [2] 杉原知道・中村仁彦, 非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作, 日本ロボット学会誌, 24-2, (2006), pp.222-231.
- [3] 國吉康夫・大村吉幸・寺田耕志・長久保晶彦, 等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起き上がり行動の実現, 日本ロボット学会誌, 23-6, (2005), pp.706-717.
- [4] 國吉康夫, ヒューマノイドの身体性, 現代思想, 33-8, (2005), pp.114-120.