

自律型二足ロボット「源兵衛」に学ぶ 俊敏な転倒時・衝撃回避受け身と起き上がり

Autonomous Shock Avoidance during Falling Down and Instantaneous Rising of 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

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. We proposed in the previous paper the concept of 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 showed in this paper as the case studies the humanlike robust NANBA walking & running & instantaneous turn 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. Furthermore, the simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability was shown.

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

1. 研究の背景と目的

不意にうしろから押され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いて自分で立ち上がるというのはヒューマノイド・ロボットの夢である。

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ろう。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]。

本報では、人間型二足ロボットの動作設計の観点から、障害物を検出して自律的にその場で歩行の向きを瞬間的に変える瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」を実現し、さらに、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の動きを瞬間的に発現し、手をつい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実現した。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である。自律型二足ロボット「源兵衛5号」に学び、転倒しても身体が受ける衝撃を最小限にする身体操法を考察する。

2. 不安定を利用する瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」による自律的障害物回避

図1は、脚部左右各3自由度ロボット「源兵衛1号」に上体を模擬して脚部の上に重量を付加した「源兵衛2号」

であり、歩行原理がわかりやすい。「ナンバ歩き」の基本は、Fig.1のように、前傾姿勢を取り、(1)状態1：身体を右に傾けると左脚が宙に浮く。(2)状態2：左脚を前脚の形にすると、自然に自重で左前方に倒れていき、左足が接地する。(3)(4)は(1)(2)と反対の動きであり、この四つの状態を繰り返す[1]。サーボの回転角度と角速度の組み合わせにより、自在の速度での歩行が可能である。Fig.2は脚部10関節を持つ「源兵衛4号」の状態図であり、管体は軽量でトルクの大きいサーボを備えた KHR-1 (近藤科学製)を採用した。17個のサーボモータ(脚部10関節)を制御し、身長340mm、バッテリー搭載重量は1.2kgである。「源兵衛4号」の歩行原理は「源兵衛2号」と同じであるが、足首の関節を使うことにより上体が左右に揺れるのを防ぐ。「源兵衛5号」(図3)は、上体に拡張性のあるマイコン(Eye-bot, CPU 32ビット)を実装し、「源兵衛4号」で獲得した歩行の教示データをベースにして、自律的動きへ展開していく[1][5]。

ナンバ・ターンと呼ぶ瞬間的な方向転換は、歩行してきた流れのまま一気に方向転換する[1][5]。

Fig.4は、瞬間的に90度の方角転換するための源兵衛4号の(a)状態1と(b)状態2である。(a)状態1から(b)に遷移することにより瞬間的に90度の方角転換ができる。(a)状態1は、左脚を前に出して前傾で左脚に重心を乗せた状態、(b)状態2は直立の状態である。教示により前脚を作り、前脚の形に合わせて自然に後脚を地面に下ろすと後脚の形ができる。サーボ speed 5 (任意の関節角度を作るのに 0.752 s) で約90度の方角転換に要した時間は約1秒である。

Fig.5は、瞬間的に180度の方角転換をするための源兵衛4号の(a)状態1と(b)状態2である。(a)状態1から(b)に遷移することにより瞬間的な180度の方角転換ができる。サーボの speed 5 (任意の関節角度を作るのに 0.752 s) で約180度の方角転換に要した時間は約1秒である。

Fig.6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。

Fig.6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。

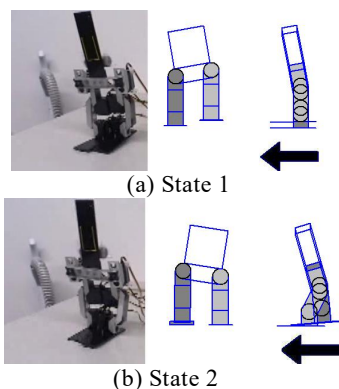


Fig.1 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.2 with 6 freedom legs

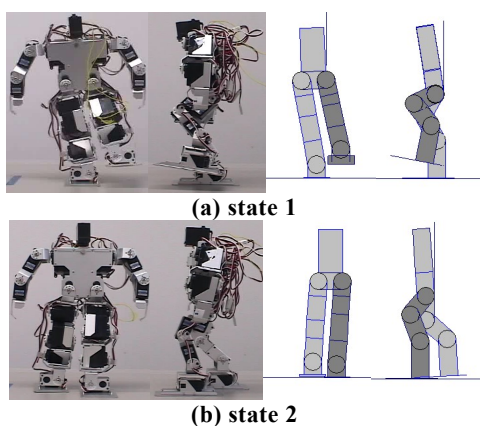


Fig.2 Fundamental States NANBA Walking of GENBE-No.4 with 10 freedom legs

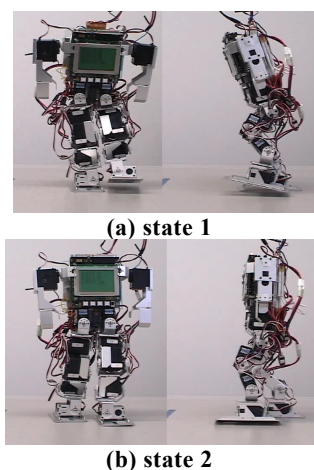


Fig.3 Fundamental States NANBA Walking of Autonomous GENBE-No.5 with 10 freedom legs

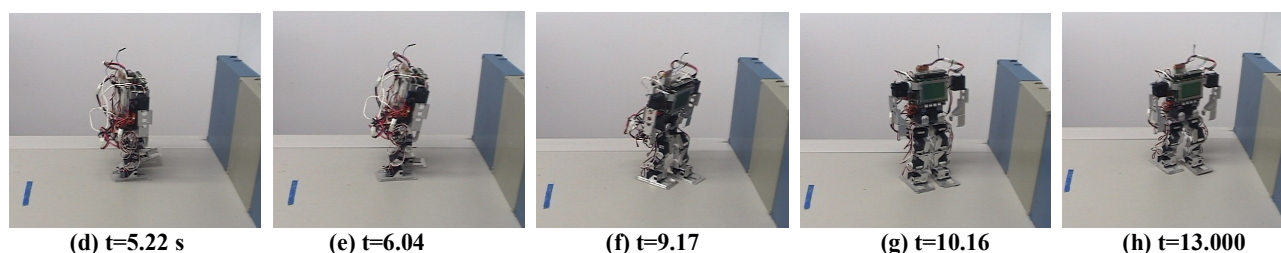


Fig.7 Obstacle (front wall) avoidance of humanoid biped robot GENBE No.5 using a conventional walking TURN. It turns about 90 degrees in 4~5 seconds.

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.

Fig.7 は, 前方の壁を検出して歩きながらの従来の足踏みしながらの方向転換による右折挙動であり, 90 度の方向転換に要する時間は 4~5 秒である.

Fig.8 は, 前方の壁を検出して瞬間的方向転換「ナンバ・

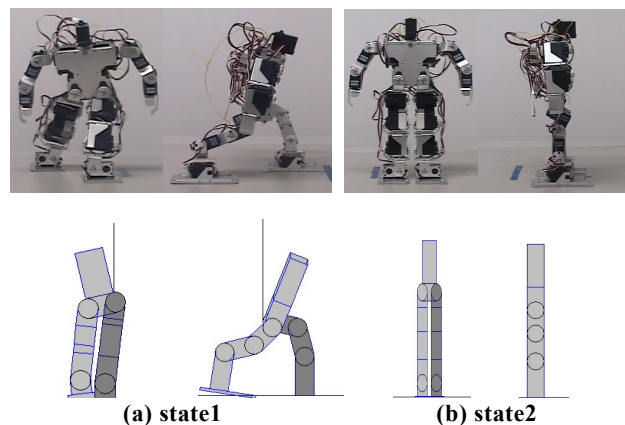


Fig.4 Fundamental two states of 90 degrees NANBA TURN.

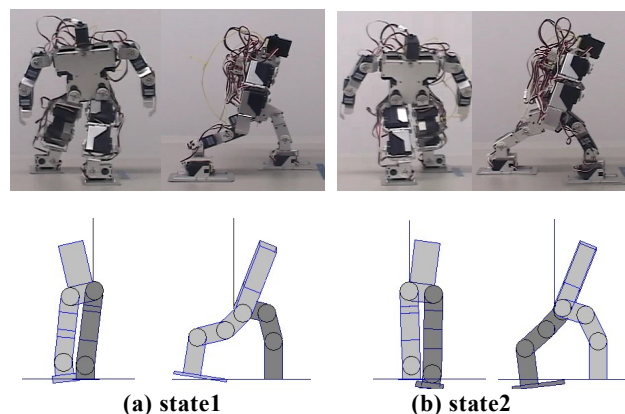


Fig.5 Fundamental two states of 180 degrees NANBA TURN.

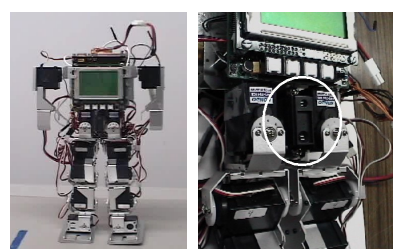


Fig.6 GENBE No.5 (Left) and Position Sensitive Detector (Right).

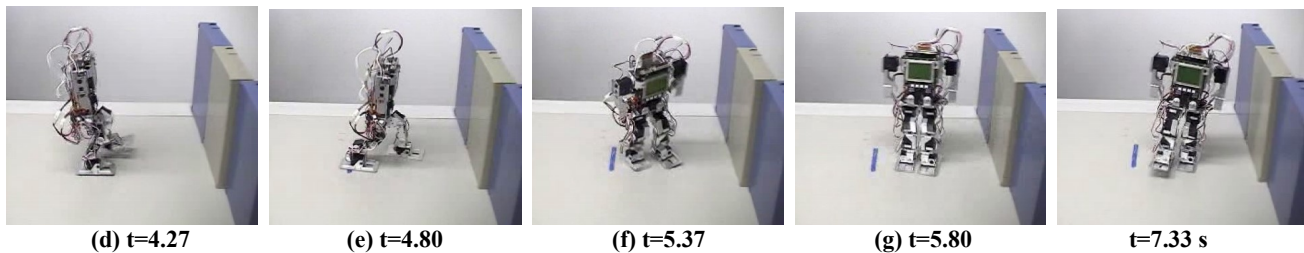


Fig.8 Obstacle (front wall) avoidance of humanoid biped robot GENBE No.5 using a simple humanlike robust instantaneous NANBA TURN about body axis based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability with Anti-ZMP, which uses only small active power. It turns instantaneously about 90 degrees in a second.

ターン」により右折した挙動を示す。PSD が障害物を検知してロボットは立ち止まり、(d)～(g)で瞬間的に約 90 度右に向きを変える。角度 90 度の方向転換に要する時間は約 1 秒であり、軽快・巧みである。

3. 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・起き上がりの自律的発現

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。

Fig.9 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。Fig.10 と Fig.11 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。

Fig.12 はナンバの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手をつく。状態 3：前かがみの形で重心を後方に持つていく。状態 4：直立である。Fig.13, Fig.14 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 Fig.12 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。Fig.13 では、(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、転倒してから起き上がるまでの時間は合

計約 2.5 秒である。Fig.14 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。巧みな身体の使用方である。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。

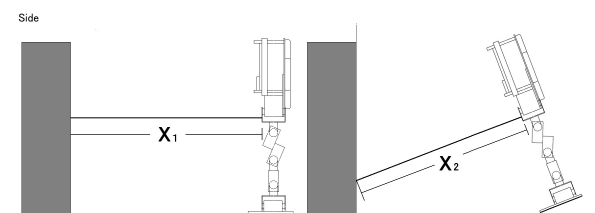


Fig.9 Detection of falling down using Position Sensitive Detector (PSD).

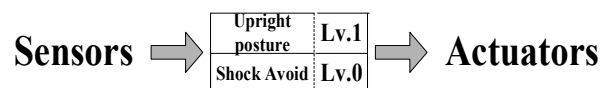


Fig.10 Subsumption Architecture of GENBE No.5 with parallel modules of agents.

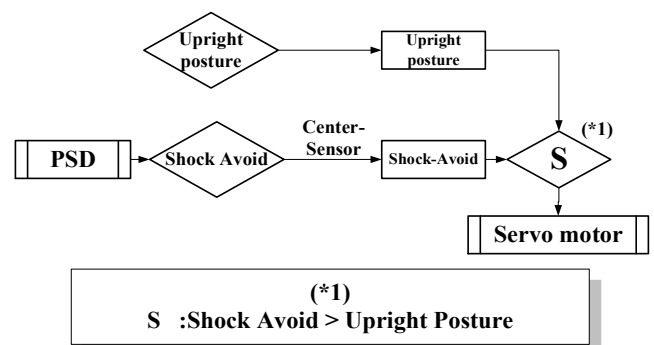


Fig.11 Subsumption Architecture of GENBE No.5 with shock avoidance and instantaneous rising.

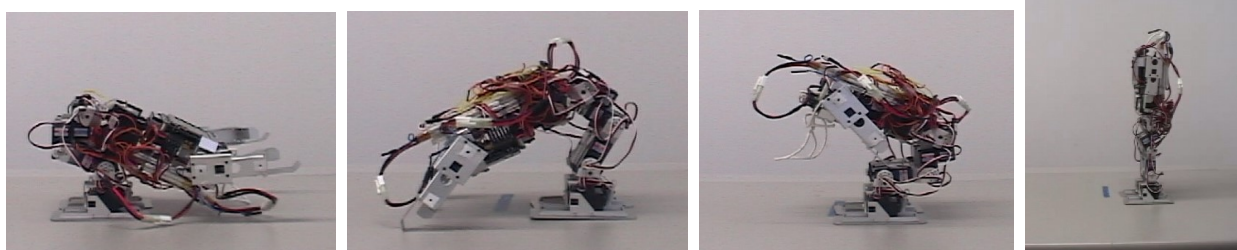


Fig.12 Four states for realizing autonomous shock avoidance during falling down owing to being pushed from backside and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability.

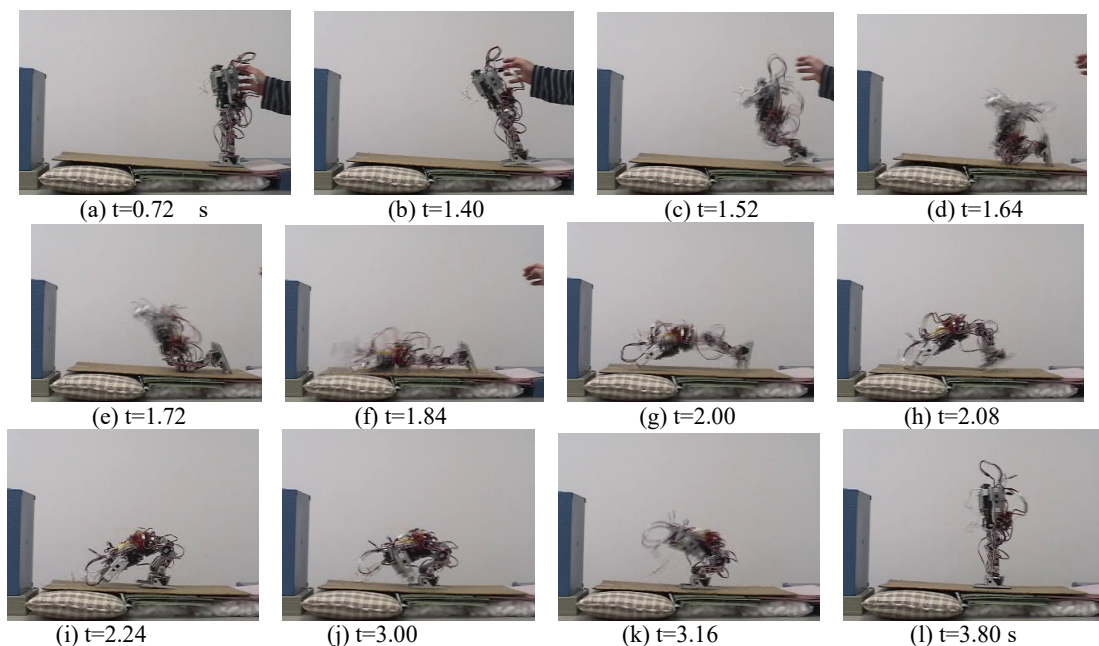


Fig.13 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability - Part 1. It takes only 2.5 seconds.

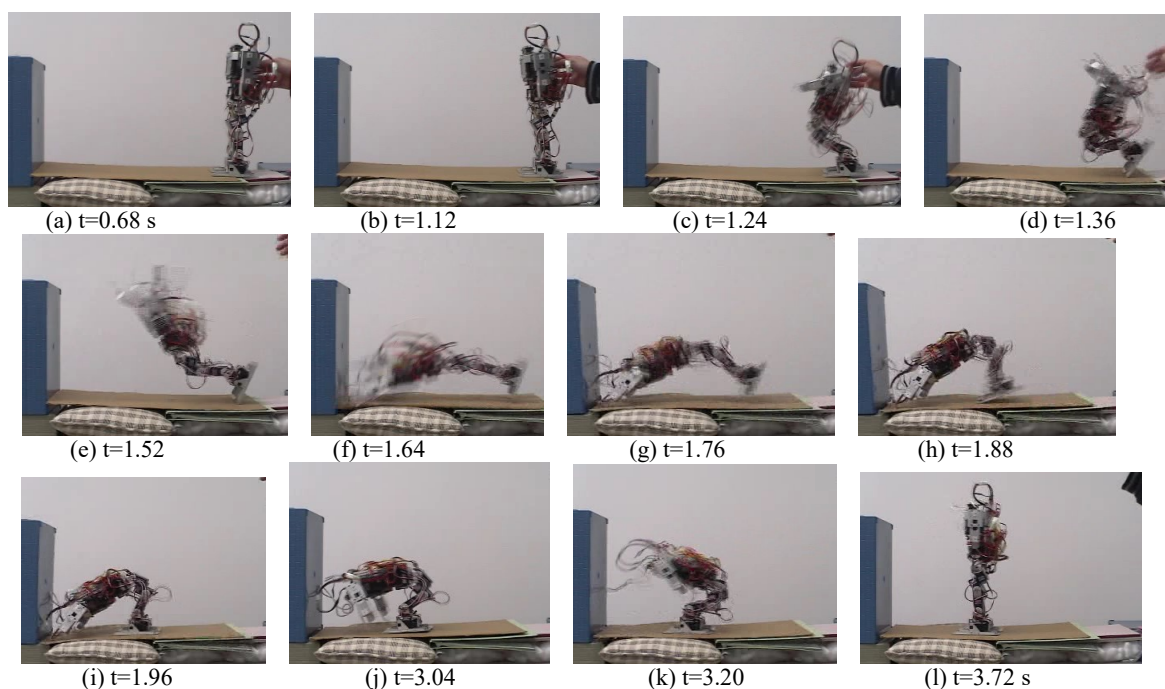


Fig.14 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE with Anti-ZMP based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability - Part 2. It takes only 2.5 seconds.

4. 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い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の動きを瞬間的に発現し、手をつい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、転倒時に身体の衝撃を最小にする身体操法を考察した。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である。おわりに、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・

清水の諸君のご助力に感謝する。

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. (他は省略)