

総説：

ナンバ歩きロボット (不安定を利用した状態遷移による身体の自在な動き)

川副嘉彦

NANBA Walking Robot (JIZAI Movement of Physical Body Using State Transition with Instability) Yoshihiko Kawazoe^{*1}

^{*1}Kawazoe Laboratory, 2-3-1-904, Kaga, Itabashi, Tokyo, 371-003, Japan

E-mail: kawazoe.yoshihiko@gmail.com

[Received, October16, 2014; accepted October 20, 2014]

うねって力を伝えることの有効性はよく知られており、鞭の先端は音速を超えるほどの威力を発するが、鞭がしななって順々に力を伝えるまでに時間がかかる。さらに、鞭の原理の場合は強い踏ん張りが必要なために身体を痛めることが多いが、身体全体をうまく組み合わせて使えるようになると身体の各部位にかかる負担が少なくてすむ。本稿では、「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」という関節に負担が少ない動きのイメージとして「ナンバ」という用語を象徴的に使い、不安定を利用する状態遷移による二足歩行ロボットの動きを展開する。体全体に滞りがないように瞬時に状態(姿勢)を形成して、状態から状態に一気に遷移することにより速さとロバスト性を生む。

Key words: 二足歩行ロボット, 身体操法, 非線形最適制御, 状態遷移, ロバスト性, Subsumption Architecture, Perception and Action

1. はじめに

現状のロボット技術は、生活分野、公共分野、医療福祉分野などにおいて多様な利用が期待されているが、将来の市場拡大に対応した具体的用途や技術の実現可能性を明確にできないでいる[1]。作業の精度、速度、効率を追求する従来のロボットは、外界を認識し、そのモデルを内部に構築し、行動計画を立て、そして実際に行動を起こす。しかし、このような直列方式のロボットは、どこかに誤りがあると、最終行動は失敗してしまう。また、新たな機能を付加しようとすると、結局すべてを一から作り直すことになる[2]-[5]。

最先端と言われるヒューマノイドロボットも、転倒力を重力に逆らって制御する歩行だから、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、外乱に弱くて転倒しやすい[6]。

従来の二足歩行ロボットは、「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ている(たとえば, [7])。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、外乱に弱い。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。また、後方から外乱により突然押されて倒されたときの転倒衝撃回避と転倒してからの起き上がり、突然現れた動的障害物に対する俊敏な回避を自律的に発現することができる[6],[8-12]。ただし、俊敏自在の動きは、力づくで制御する従来の線形力学・線形制御では不可能である。前方に倒れるときには、尻餅をついて後にひっくり返るぐらいの大胆な動きが求められる。受身の出来ないロボットや自分で起き上がれないロボットは、ブレーキのない自動車のようなものである。

転倒力(不安定)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」と名づけた二足歩行ロボットのナンバ歩き・ナンバ走りであり、江戸-仙台間 300 km を 1 日で走ったといわれる伝説の飛脚「源兵衛」にちなんでいる。

本研究では、身体操法に関する「ナンバ」という用語は、狭い意味の定義ではなく、「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」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。

2. 古の身体操法に学ぶ二足歩行ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走り

二足歩行ロボット「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。

二足歩行ロボットの脚部が 10 自由度の場合（「源兵衛 4 号」：身長 34 cm, バッテリーなどを搭載して 1.2 kg, 図 4），足首関節を使って上体（頭）が左右に傾かないように歩くことができる[6][8].

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．

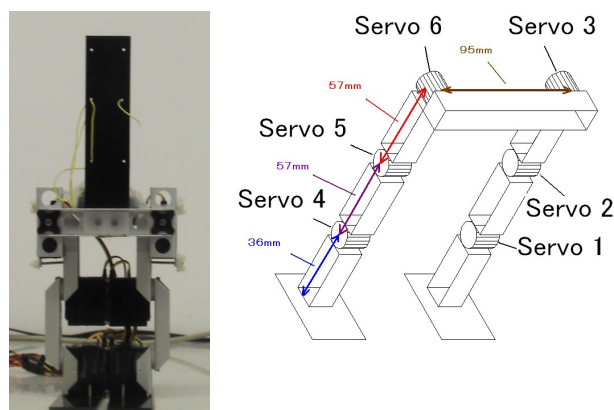
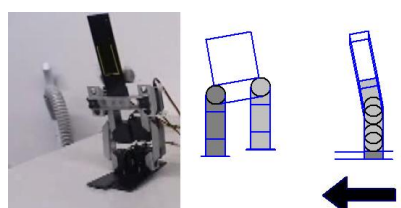
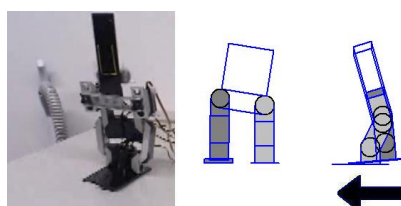


図 1 人間型二足ロボット「源兵衛 2 号」
（脚部 6 自由度）



(a) 状態 1



(b) 状態 2

図 2 二足ロボット「源兵衛 2 号」（脚部 6 関節）の
ナンバ歩きの基本状態図

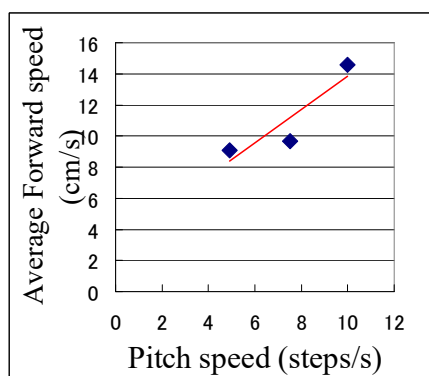


図 3 二足ロボット「源兵衛 2 号」（脚部 6 関節）の前
進速度とピッチ速度の関係

図 5 は甲野のナンバ的走りであり，これに対応する人間型二足ロボット源兵衛 4 号の走り（「ナンバ・ダ

ッシュ」, 18cm/s) が図 6 であり，約 0.3 秒間（左右各 1 歩）を表示している．ピッチ速度は毎秒 6 歩（ステップ）である．ナンバ走りは，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[13]．二足ロボット「源兵衛 4 号」は，図 2 の歩行原理と同様に，図 7 のように不安定を利用して状態 1 から状態 2 へ遷移することにより速さと威力を生む．

「源兵衛」の「ナンバ歩き」は，転倒力により二足ロボットと地面との間に形成されるリミットサイクル・アトラクターを利用したシンプルな二足歩行である．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，いわゆる複雑系・カオスの挙動を示す．リミットサイクルは，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[6]．

図 8 は，ロボットの階段昇りの状態図である．状態 1 において状態 2 の姿勢をつくると，転倒力を利用して前方に倒れていき左脚が上の段に接地する．状態 2 において状態 3 の姿勢を作ると，右脚が浮くと同時に左脚が段に上がる．サーボのトルク不足など気にしないかのごとく 1 段を約 1 秒で（本実験では 5 段）軽やかに登りきる．図 9 は実行例である．足を高く上げ，前傾姿勢を深くし，身体全体を使った大胆な動きである．階段降りも同様にして実現できるが紙面の都合で省略する．ロボットの場合は，階段昇りに比べると，階段降りははるかに容易である[14]．

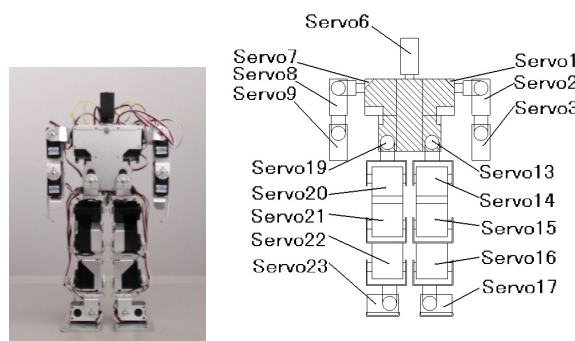
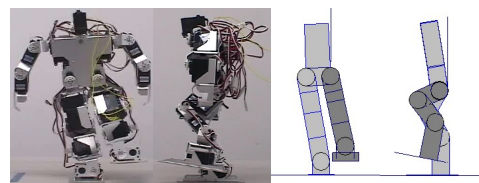
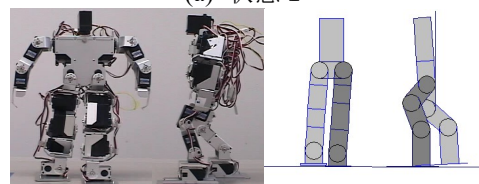


図 4 人間型二足ロボット「源兵衛 4 号」（脚部 10
関節）のサーボモータ（関節）配置図



(a) 状態 1



(b) 状態 2

図 7 人間型二足ロボット「源兵衛 4 号」（脚部 10 関
節）のナンバ歩き・ナンバ走りの基本状態図

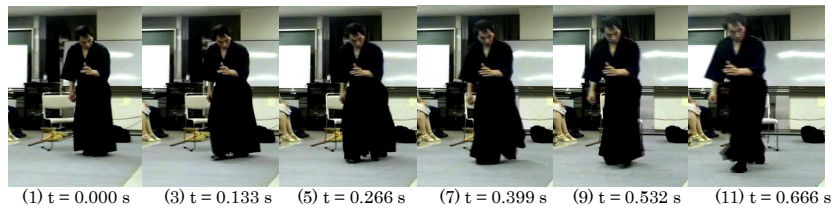


図5 甲野善紀のナンバ的歩行・走行

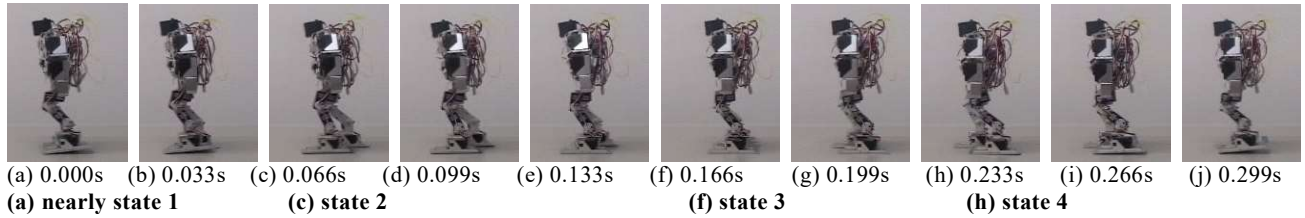


図6 人間型二足ロボット「源兵衛4号」(全高34cm)のロバストなナンバ走りの発現(前進速度:18cm/s, ピッチ速度:毎秒6歩).

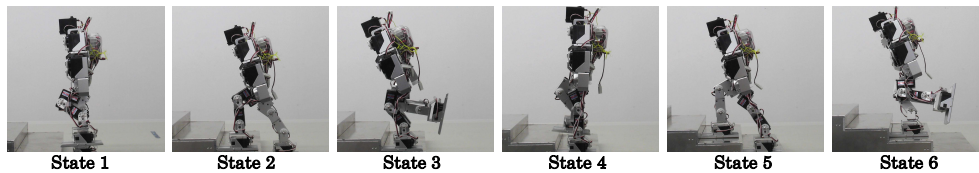


図8 脚部10関節の二足歩行ロボットの階段昇りのための6個の状態図 (GENBE-No.4-2006)

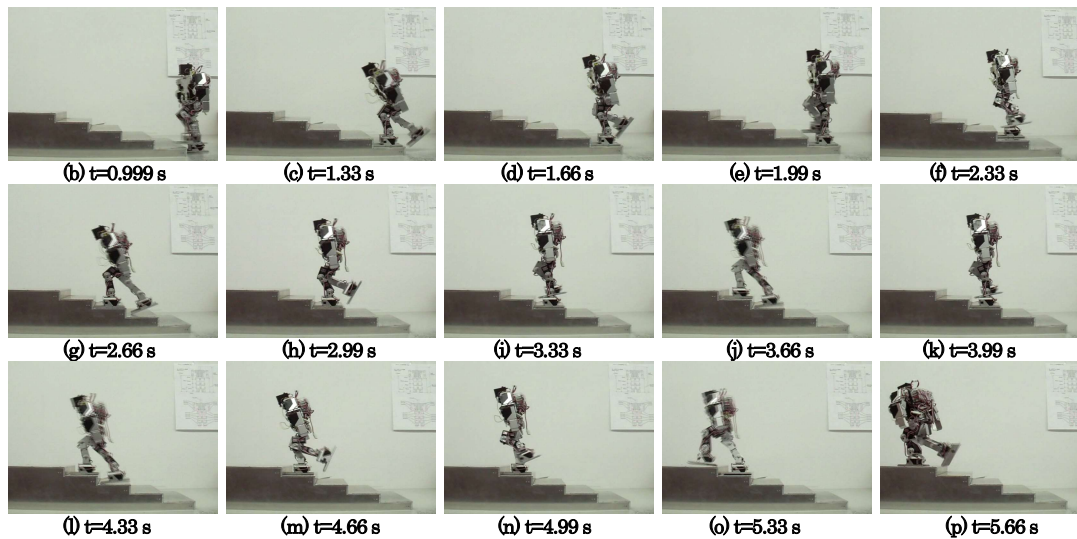


図9 脚部10関節の二足歩行ロボットの階段昇り (GENBE-No.4-2006)

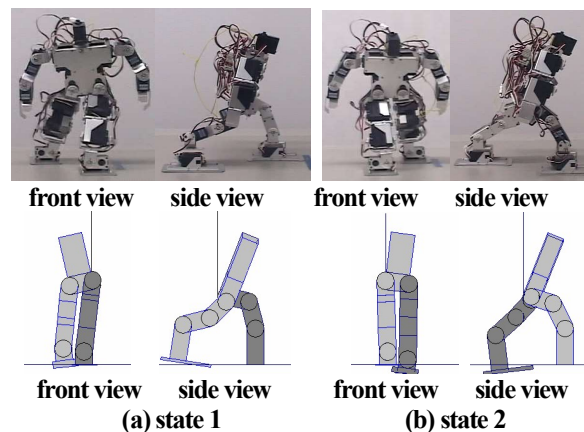


Fig.10 Two states of 180 degrees NANBA TURN.

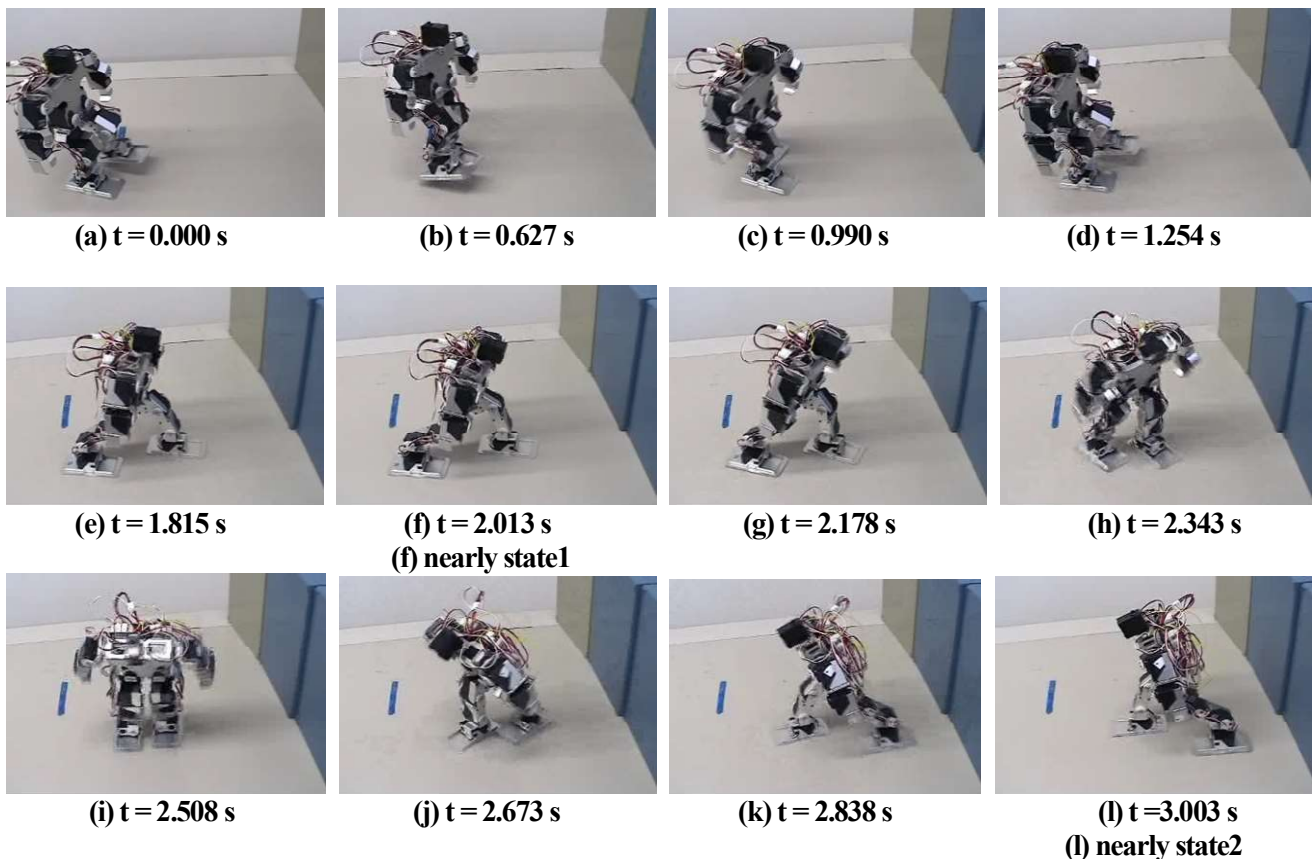


Fig.11 NANBA TURN based on distributed control of physical body. It turns instantaneously 180 degrees per second

図 10 は、不安定を利用する瞬間的な方向転換の原理であり、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、図 11 のように、その場で瞬間的に右回りに 180 度方向転換する[15].

3. 鞭の身体操法から同時並列的な身体操法へ

甲野によると、普通、人間は力を発しようとした時、足を踏ん張り、そこを最初の基地として膝、股関節、腰、背、胸、肩、肘、手といった具合に順次体勢を整えて対応しようとする。つまり、ある方向に力を発するためには、できるだけ早く準備をするわけであるが、どうしてもその動きは鞭がうねるように、あるいはドミノ倒しのようにパタパタと体の中に力の波が形成されていく。これはいわゆる溜めをつくるという状態で、鞭がうねるように体を使うことによって必要な力はあるが、問題点は時間がかかってしまうことである。甲野式「ナンバ走り」は、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「13」[16]。陸上の短距離走で世界記録を持つボルト選手の走りには、「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」身体操法に近い動きが見られるが、それでも腰を痛めて欠場することがある。

関節に負担が少ない動きのイメージとして「ナン

バ」[16]という用語を象徴的に使う。

図 13 と図 14 は、脚部 10 関節の二足歩行ロボットによる右方向への横移動（サイド・ステップ）である。図 12 は、支持足で地面を蹴る横移動であり、図 14 の状態 1 から状態 2 への状態遷移により生成された動きである。

図 13 は、支持足で地面をほとんど蹴らない横移動であり、図 15 の状態 1（不安定）から状態 2（安定）への状態遷移により生成された動きである。右へ横移動するときは、右膝を少しだけ曲げて、右脚を上げながら右脚を横に開くと、身体の重心が右へ倒れ込む。体重をできるだけ支点（左足）に残さないで転倒力を利用して右横へ移動することができる。すべての関節が同時並列的に動き始め、同時に動き終わって、状態 1 あるいは状態 2 の姿勢を瞬時に形成する。図 12 と図 13 は、どちらも右方向への横移動であるが、上体の傾きが逆になっているのが大きな違いである。

図 16 は、過去のテニスプレーヤー・K. Rosewall 選手のバックハンド・ストロークにおける流れるような横移動（サイド・ステップ）のスタート直後の挙動を示す[17]。動物のような動きの美しさに魅せられる。図 13 におけるロボットの動きからローズウォール選手の動きの美しさの秘密が理解できる。

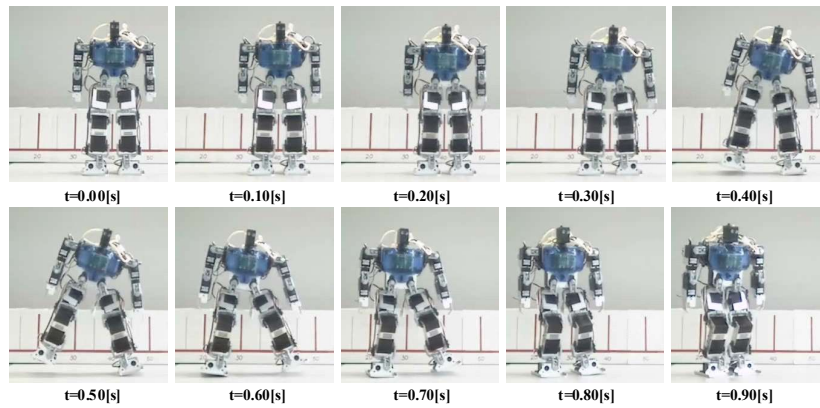


Fig.12 Right side step with kick of ground by left leg.(250 fps)

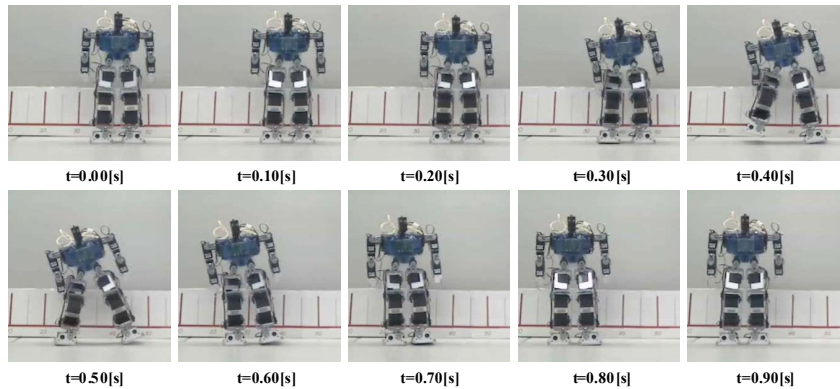


Fig.13 NANBA side-step of humanoid biped robot, which uses only small active power.
Right side step without kick of ground. (250 fps)

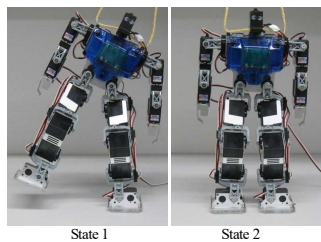


Fig.14 Two states of right side step with kick of ground

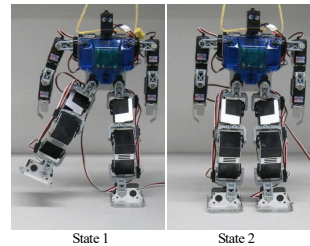


Fig.15 Two states of right side step without kick of ground

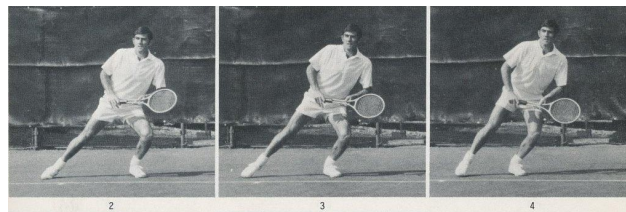


Fig.16 Side step without kick during backhand stroke by K. Rosewall [17]

4. 過剰駆動力の制御と不安定を利用する状態遷移

図 17 は、我々の提案する不安定を利用する状態遷移による非線形制御の原理の例であり、図 13 の動きも図 17 の応用・展開例である。図 17(a)のように、糸で吊り下げられた質量 M の振動性 2 次要素を例にして説明すると以下ようになる。質量 M を吊るす支点 A を B の位置へ AB だけステップ状に移す。そうすると質量 M は振子となって B の真下を通過し他端

で一瞬停止する。その瞬間に支点を B から D へ BD だけステップ状に移せば、質量 M は再び振子となって、振動を繰り返しながら前進する。一種のリミットサイクル（自励振動）であり、エネルギー源は支点のステップ状の移動である。操作量の切換は、図 17(b)のように、質量 M の速度 dx/dt がゼロの瞬間に行う。急停止の場合は、図 18 のように、非線形最適制御の原理を使って目標値突変への応答を最短時間内に終

結させる[18][19].

ステップ AB, BD あるいは糸の長さを変えることにより, 自在の速度で移動できる. 質量 M が停止する C 点で設定した待ち時間後に移動すれば, ゆっくりした速度での前進移動も実現できる.

図 19 は, 図 12~図 15 のロボットのモータ配置と地面を蹴らない場合の状態 1(不安定)の姿勢である. ①の股関節モータの他に②~④のモータを同時並列に動かして状態(姿勢:形)を形成する. それぞれのモータ相対角変位を同一の時間で同時に回転させる. 図 13 では, 不安定な状態 1:0.40 s から安定な状態 2:0.70 s へ約 0.3 秒で遷移する.

図 20 は, 使用したサーボモータ:KRS-788HV の動特性の実測値である. 無負荷状態において相対目標角変位遷移(設定) 90 deg と目標(設定)動作時間 Time Setting (Speed)(横軸)とを与えたときの実測値であり, (a)動作時間, (b)最大動作角変位, (c)動作角速度を示す. 目標動作時間が 12 (約 0.25 s) より長ければ, 任意の時間で 90 deg まで回転する. しかし, それより短い目標動作時間では 90 deg まで回転することは

できない. 例えば, プログラム上で 90 deg を動作時間 3 (約 0.1 s) で設定しても, 実際にはトルク不足のため 25 deg までしか回転しない. 図 21 は, 図 19 において腕を上下させる肩関節 Servo2 を, 任意の設定動作時間で真下から真上まで相対角変位 180 deg 回転させるプログラムの実行例である. 動作時間が 0.8 s より長ければ, 任意の設定動作時間で相対角変位 180 deg まで回転する.

図 22 は, ナンバ歩き・ナンバ走りと呼ばれる状態図である. ロボットの傾角度を大きくしてピッチを速くすると歩きから走りに転じる. 状態 1(不安定)は前傾姿勢で体をやや右にシフトし左脚を上げた状態, 状態 2(安定)は左脚が前で着地した状態, 状態 3(不安定), 4(安定)はそれぞれ状態 1, 状態 2 の逆である. 状態から状態へ 4 つの状態を順次遷移することにより前進する. 状態 2 から状態 3 への遷移を実行すると, ロボットは前方に倒れていく. 転倒する前に安定な平衡状態 4 に移行することにより転倒しないで歩く. 各関節の角度(姿勢)と動作時間を与えることにより自在の速度で前進する.

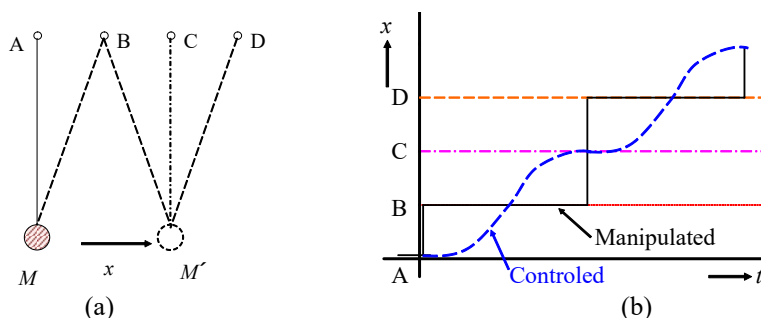


Fig.17 Proposed nonlinear optimal control applied to humanoid biped robot walking.

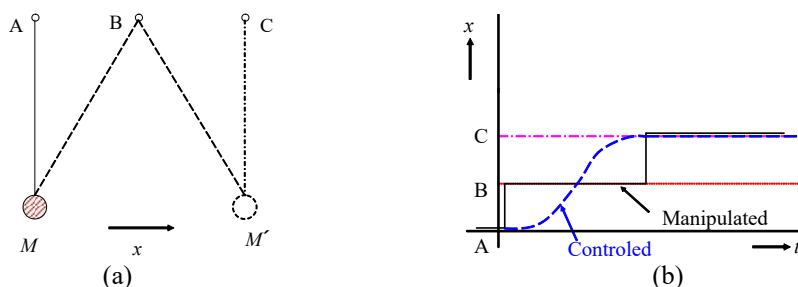


Fig.18 Example of nonlinear optimal control by Rufus Oldenburger.

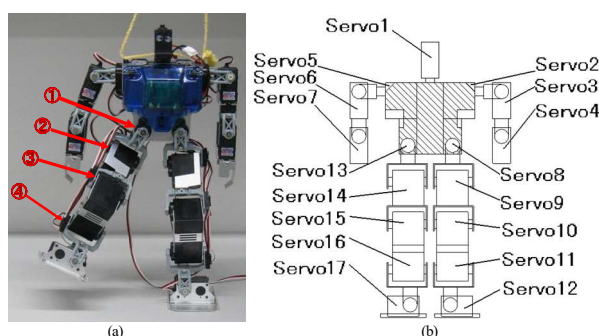


Fig.19 Servomotors configuration and the State of right side step using instability without kick of ground

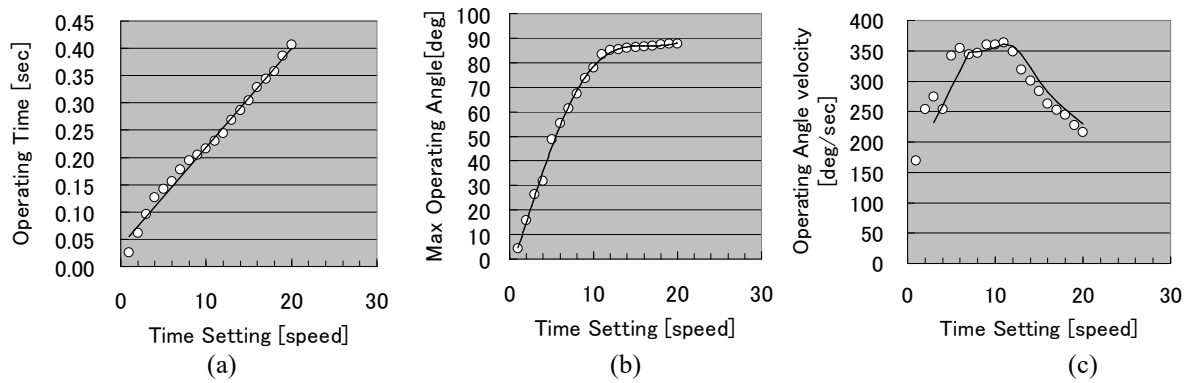


Fig.20 Measured operating characteristics vs. operating time setting for objective operating angle of 90 de-grees.

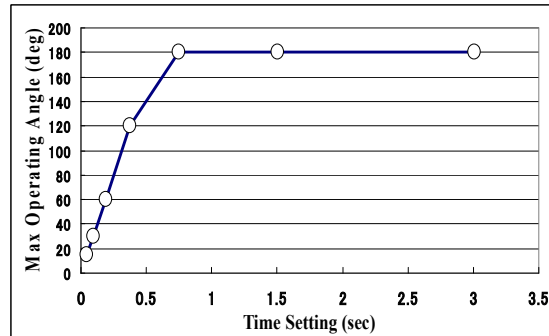


Fig.21 Measured operating characteristics vs. operating time setting for objective operating angle of 180 degrees.

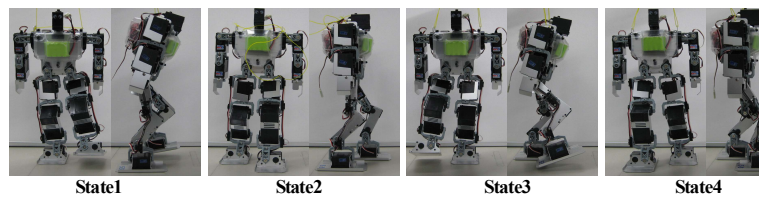


Fig.22 Four States of NANBA Walk and Run of biped robot with 10 freedom legs (GENBE - No.4-2007)

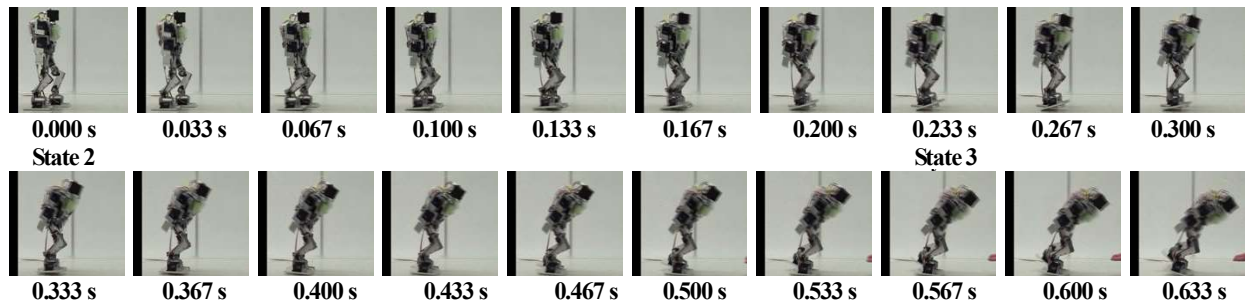


Fig.23 State transition from State 2 (Statically stable) to State 3 (Statically unstable), falling down to the ground.

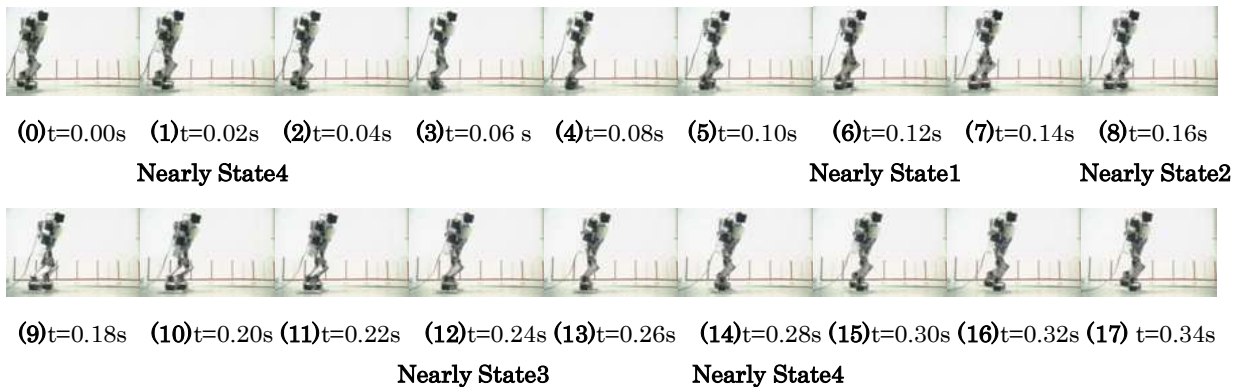


Fig.24 NANBA dash (36.5 cm/s, 6.58 steps/s) of biped robot (GENBE No.4-2007). It takes only 0.3 seconds for 2 steps.

図 23 は、図 22 の安定平衡状態 2 から不安定平衡状態 3（状態 1 と逆脚）に遷移する部分のプログラムのみを実行したときの二足ロボットの挙動を示す。状態 3 は不安定な平衡状態だから前方に倒れていく。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。

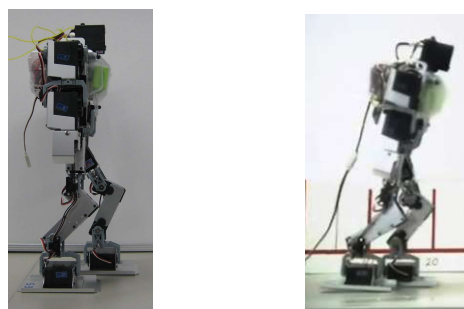
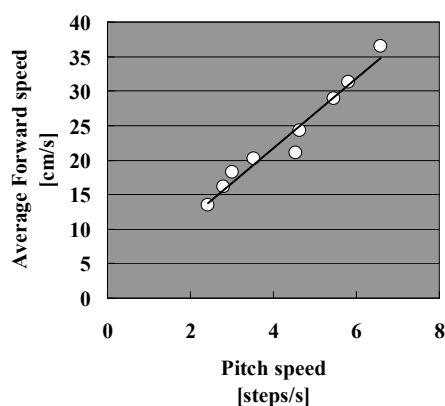
図 22 の状態図において、図 20 のサーボモータ動作特性を用い、状態 1,3 を動作時間 3、状態 2,4 を動作時間 4 に設定した場合のロボット（全高 340 mm、重量 1.3 kg）の走行結果（約 2 歩のコマ写真）が図 24 である。走行のピッチ速度は 6.58 steps/s、前進速度は 36.5cm/s である。

図 25 は、横軸が歩行ピッチ速度（歩数/秒）、縦軸が前進速度の実測値である。同じ姿勢角度データ（状態）で動作時間の設定値を変えた（サーボモータの速度を変えた）場合の結果である。ピッチ速度に比例して前進速度が増している。

図 26 は、(a) プログラムで与えられた状態 2 の姿勢と (b) 図 27 における実際の走りにおける状態 2 に相当する姿勢を比較している。実際の動きでは、サーボモータ速度の速い動作時間 3、動作時間 4 ではトルク不足のため足が十分上がらず、歩幅が狭くなり、プログラム通りの動きにはなっていないが、転倒しない

で走ることを示している。

図 27 は、サーボモータ動作時間に対する前傾姿勢角度の実測値である。動作時間が 5 よりも短くなると、動作時間が短いほど前傾姿勢が大きくなっている。また、図 28 は、サーボモータ動作時間に対する歩幅 (Stride) であり、前進移動距離の実測値から算出したものである（3 回の平均と標準誤差を示す）。動作時間がかかなり短くなっても歩幅が減少しておらず、動作時間の長短にかかわらず、ほぼ同一の歩幅になっている。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 21 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はずである。各設定動作時間での歩き・走りのビデオ画像分析によると、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、歩幅が実質的には減少しないで、ピッチ速度に比例して前進する。しかも、同じ状態図（姿勢）データでピッチ速度だけを変えるだけで広範囲の前進速度で歩き・走る。ただし、これらのロボастな動きに到達するまでには状態図（姿勢角度）の決定に試行錯誤と経験とセンスを必要とする。



(a) State 2 in program (b) Nearly State 2 in reality

Fig.25 Forward speed vs pitch speed of biped robot. Fig.26 Difference between States of program and actual movement.

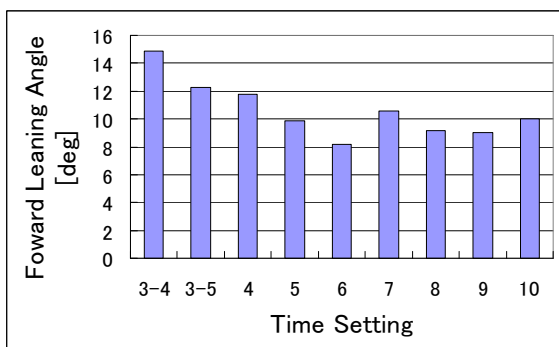


Fig.27 Forward leaning angle vs Time setting

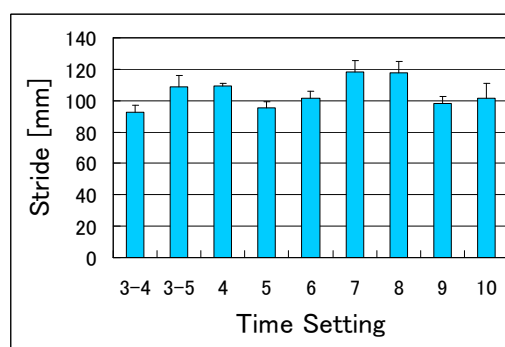


Fig.28 Stride vs. Time setting

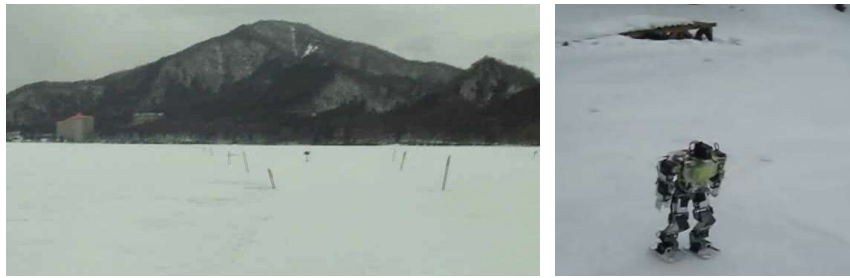


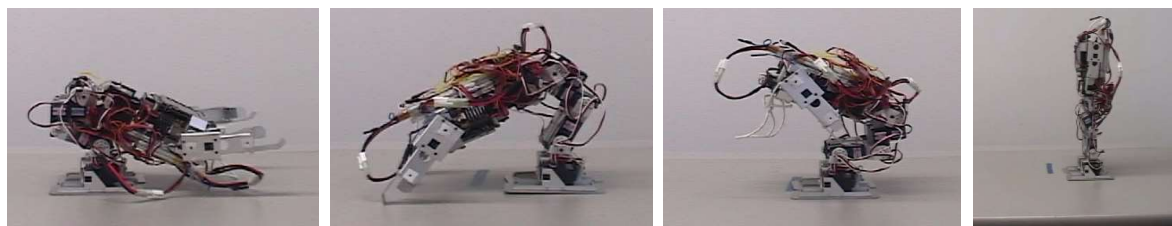
Fig.29 Robustness of humanoid biped robot GENBE who runs on the ice and snow 9 steps during 1.50 seconds.

図 29 は、ロボットが図 24 と同じプログラムで氷雪の榛名湖上を自在の速度で走る様子を示す[20]. 摩擦力に依存しない地面を蹴らない歩き・走りであり、関節の負担も少ない. このように蹴らないで自然な転倒力を利用する状態遷移によると、種々の建物の床、廊下、室内、あるいは屋外などの多様な環境でロボストに歩行・走行する[21].

トが、転倒を知覚し、転倒時の衝撃を最小限にするように受け身をし、転倒した後に素早く立ち上がる動作の状態図である. ロボットのすべての関節を同時並列に動かして、動きを阻害する過剰駆動力を制御して状態（姿勢）を形成することにより図 31 のような巧みな動きが発現する. この場合は、腹部に取り付けた測距センサー(e)で前方壁との距離の時間微分値を検出し(f), 転倒の判断をしている. プログラムはサブサンプシヨンの構造(e)を採用している[9].

5. 過剰駆動力の制御と状態遷移による巧みな動きの発現

図 30 は、不意に後方から押された二足歩行ロボッ



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

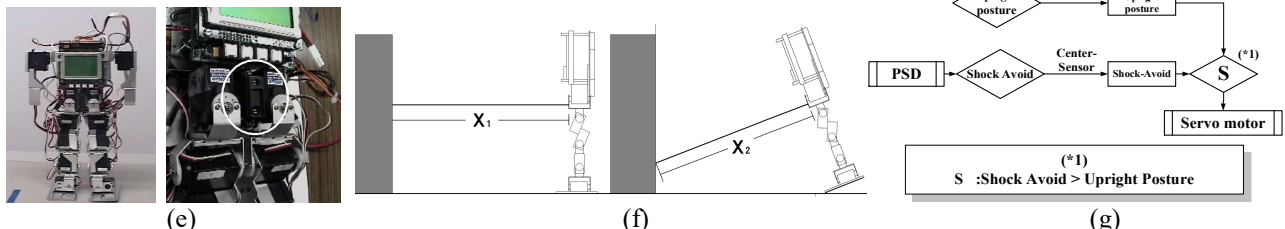


Fig.30 Four states (a)–(d) for realizing autonomous shock avoidance during falling down owing to being pushed from backside and instantaneous rising of biped robot based on distributed control of physical body. (g): Subsumption Architecture.

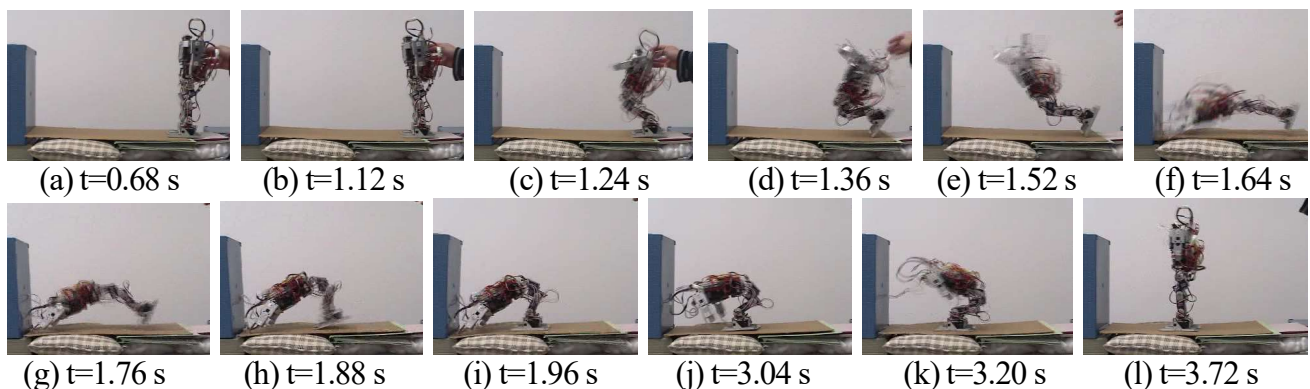


Fig.31 Simple autonomous shock avoidance during falling down and instantaneous rising of biped robot GENBE-No.5-2005 utilizing instability. It takes only 2.5 seconds.

6. おわりに

構成論的なアプローチによる巧みな動きの生成法の提案といくつかの事例を示した。体全体に滞りがないように瞬時に状態（姿勢）を形成して、状態から状態に一気に遷移することにより速さとロバスト性を生む。

ロドニ・ブルックスが提唱した包摂構造を持つロボットは誤解されることも多かったが[22][23]、最近では、掃除ロボットの「ルンバ」や福島原発事故現場に送られた米国アイロボット社製の「パックボット」により一般にも知られるようになった。しかし、日本では実践している研究者は少数であり、地震の災害現場で日本のロボットが活躍できない大きな理由のひとつではないだろうか。「真理は作ることそのものにおいてある」という、イタリアの哲学者ヴィーコの言葉[24]は、ロボットに最も当てはまる。「能書きを並べる（体系化）」よりも「ロボットはいかに動くか」が命である。「動いてみなくちゃわからない」のが自然・生き物・ヒトと共存するロボットである。デカルトの「我思う故に我あり」から「我あり故に我思う」への非デカルト的展開が求められる[25]。

おわりに、本研究に大変興味をもってくださり、等身大のヒューマノイドで、走り高跳びやフィギア・スケートのジャンプのような、筋力ではなく慣性力などを活用したダイナミックな動きを実現したいという希望を持ち、共同研究のご提案をいただいた産業技術総合研究所・三浦郁奈子博士が、その直後の2013年5月に、留学先の米国ボストンにおいて交通事故で亡くなられた。極めて残念である。心からご冥福をお祈りいたします。

文 献

- [1] T. Yamamoto, "Project for the Practical Application of Next-Generation Robots: Project for Supporting the Development of Prototypes," Journal of the Robotics Society of Japan, 24(2), pp.169-170, 2006 (in Japanese).
- [2] Brooks, R. A., A robust layered control system for a mobile robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.2, No.1, 14 -23, 1986.
- [3] R.A. Brooks, "Intelligence without representation," Artificial Intelligence, 47, pp.139 -159, 1991.
- [4] T. Gomi, "Impact of Non-Cartesianism on Software Engineering," AAI Books, Ontario, Canada, pp.487-519, 1998.
- [5] Y. Kawazoe, "Emergence of the Human's Dexterity and the Intelligence of Autonomous Robot as a Complex System," JSME annual meeting 2002(6), pp.171-172, 2002 (in Japanese).
- [6] Y. Kawazoe, T. Nagumo, S. Inou, and K.Suzuki, "Emergence of Adaptive Dynamic Walking NANBA of Humanoid Biped Robot GENBE Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art", Proc. of the 9th Symposium on Motion and Vibration Control, (2005), pp.514 - 519.(in Japanese)
- [7] T. Sugihara and Y. Nakamura, "Whole-body Cooperative Reaction Force Manipulation on Legged Robots with COG Jacobian involving Implicit Representation of Unactuated Coordinates," Journal of Robotics Society of Japan 24(2), 222-231, 2006-03-15
- [8] Y. Kawazoe, T. Sunaga and T. Momoi, "Emergence of Instantaneous NANBA TURN of Humanoid Biped Robot GENBE Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art with Anti-ZMP," Dynamics & Design Conference 2006 CD-ROM, pp."560-1"- "560-6", 2006 (in Japanese).
- [9] Y. Kawazoe, K. Harada and Y. Shimizu, "Autonomous Shock Avoidance during Falling Down and Instantaneous Rising of Biped Robot GENBE with Anti- ZMP," Dynamics & Design Conference 2006 CD-ROM, pp."550-1 " -"550-6", 2006 (in Japanese).
- [10] Y. Kawazoe, "Emergence of JIZAI Movement of Humanoid Biped Robot GENBE Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art Utilizing Instability", Symposium on sports engineering : symposium on human dynamics 2006, pp.296-301, 2006 (in Japanese).
- [11] Y. Kawazoe, S. Moriyama and J. Taguchi, "Emergence of JIZAI Movement of Humanoid Biped Robot Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art : Going Up and Down the Stairs with Instability," JSME annual meeting 2007(7), pp.27-28, 2007 (in Japanese).
- [12] Y. Kawazoe, J. Taguchi and J. Kebukawa, "Development of NANBA Run of Humanoid Biped Robot GENBE with Small-Soles Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art," JSME annual meeting 2007(7), pp.29-30, 2007 (in Japanese).
- [13] 甲野善紀監修 (2006b): 甲野善紀の驚異のカラダ革命, 58-61, 学習研究社,
- [14] Y. Kawazoe, S. Moriyama, J. Taguchi, J. Kebukawa and Y. Ikura, "Development of ZIZAI Movement of Humanoid Biped Robot GENBE in a Martial Art (Going Up and Down the Stairs and High-Speed NANBA Run)," Symposium on Sports Engineering: Symposium on Human Dynamics 2007, pp.391-396, 2007 (in Japanese).
- [15] Y. Kawazoe, Y. Ikura, Y. Takeda and M. Nakagawa, "NANBA TENNIS with Powerful and Injury-free Robust Movement Utilizing Equilibrium Instability without Kick of Ground," symposium on sports engineering : symposium on human dynamics 2009, pp.136-141, 2009 (in Japanese).
- [16] Kawazoe Y, Reappearance from NANBA Walk to NANBA Run of Humanoid Biped Robot GENBE, Japanese Journal of Biomechanics in Sports & Exercise, Japanese Society of Biomechanics, Vol.12, No.1,(2008), pp.23-33. (in Japanese)
- [17] ケン・ローズウォール (構成・写真: 川廷栄一), "ローズウォールのテニス," pp.65-68, 講談社, (1975).
- [18] オルデンバーガー, "自動制御", Vol.3, No.2 (1956), p.69.
- [19] 高橋安人, "自動制御工学", 岩波書店 (1965), pp.139-140.
- [20] Y. Kawazoe, Y. Ikura, Y. Koshimizu, S. Sujino and M. Hara, "Mechanism of Robustness of Humanoid Biped Robot GENBE who Runs on the Ice and Snow Based on the Distributed Control of Physical Body in a Martial Art", JSME annual meeting 2008(5), pp.165-166, 2008 (in Japanese).
- [21] Y. Kawazoe and Y. Ikura, "Mechanism of Robustness of Humanoid Biped Robot GENBE with NANBA-Walking and NANBA-Running Based on the Distributed Control of Physical Body," Symposium on sports engineering : symposium on human dynamics 2008, 165-170, 2008 (in Japanese).
- [22] Y. Kawazoe, M. Mitsuoka and S. Masada, "Practical Education Curriculum for Autonomous Mobile Robot : Project Learning Program in a Class Based on Subsumption Architecture," Journal of Robotics & Mechatronics, Vol.23, No.5, pp. pp.684-700, 2011.
- [23] Y. Kawazoe, K. Harada, T. Sunaga, T. Momoi and Y. Shimizu, "Case Study of Human-Robotics : Autonomous Mobile Robots and Humanoid Biped Robots," JSME annual meeting 2006(5), 31-32, 2006.(in Japanese).
- [24] T. Tachibana, "RSJ 20th Anniversary : Special Lecture 1: Robotics and Society in 21st Century," Journal of Robotics Society of Japan 21(3), pp. 222-231, 2006. (in Japanese).
- [25] 川副嘉彦, "武道の可能性を探る — ロボットから見た武道の原点 —", 月刊武道, 534 巻, pp.34-37, 2011.

**Name:**

Yoshihiko Kawazoe

Affiliation:

Dr. Eng., Kawazoe Laboratory

Address:

2-1-3-904, Kaga, Itabashi, Tokyo, 173-0003,
Japan

Brief Biographical History:

1976-1986 Assistant Professor, Saitama Institute of Technology

1985 Received Dr. Eng. degree from The University of Tokyo

1986-1990 Associate Professor, Saitama Institute of Technology

1990- 2011 Professor, Saitama Institute of Technology

2012- Kawazoe Laboratory

Main Works:

- Fuzzy Controllers, Theory and Applications, Edited by: Lucian Grigorie, ISBN 978-953-307-543-3, InTech Publishing, 2010.

- Y. Kawazoe et al., Chaos-Entropy Analysis and Acquisition of Individuality and Proficiency of Human Operator's Skill Using a Neural Controller, Journal of System Design and Dynamics, Vol.2, No.6, pp.1351-1363, 2008.

- Y. Kawazoe et al., Prediction of Impact Shock Vibrations at Tennis Player's Wrist Joint, Journal of System Design and Dynamics, Vol.4, No.2, pp.331-347, 2010.

Membership in Learned Societies:

- The Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) Fellow
 - The Robotics Society of Japan (RSJ)
 - Japan Society on Tennis Science
-