

解 説

ロボットの動きを阻害する過剰駆動力の制御

川 副 嘉 彦^{1†}

¹ 埼玉工業大学 大学院工学系研究科 システム工学専攻

要旨 運動には限りない多様性がある。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、鞭がしなって順々に力を伝えるまでに距離と時間がかかり、気配がでる。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という指摘がある。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し、運動がどのように獲得されるのかについて議論する。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。

キーワード：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、運動機能

1. はじめに

生きている状態を最も明白に表す現象の一つが運動である。われわれが日常何気なく行っている動作からスポーツ選手や音楽家が見せる超人的な動きまで、運動には限りない多様性がある¹⁻⁵⁾。運動はどのように獲得されるのだろうか。

「秩序からの秩序」と「無秩序からの秩序」というテーマを物理学者シュレーディンガーが著書「生命とは何か」⁶⁾で指摘してから50年の間に、分子生物学の驚くべき成功として「秩序からの秩序」の方はその謎（遺伝子）が解明された。生物は無秩序から創出された驚くほど高いレベルの秩序を示しており、無秩序状態を表現するエントロピーを外部へ放出することが内部に秩序を保つ条件であり、外部から取り込んだエネルギーを消費することにより生じた不要なエントロピーを排出して生命体としての状態を保つというのが、「無秩序からの秩序」についての彼の主張であった。「無秩序からの秩序」（たとえば、テニスの技術はどのようにして獲得されるか）は、21世紀の重要なテーマであると言われている^{7, 8)}。

図1は人間オペレータによる台車上の倒立棒の安定化制御の例であり、手で台車を移動させて倒立棒が倒れないように制御する。図2はその習熟過程を示す。倒れないという意味の安定化制御が練習により可能になる。人間オペレータによる安定化制御挙動には、カオス性（最大リアプノフ数が正）と無秩序さ（エントロピーの割合が大きいこと）が見られ、試行回数を重ねて習熟していくと運動の自由度

が増大し、無秩序さの程度が低減する³⁻⁵⁾。倒立棒を常に垂直に立てようとする傾向のあるオペレータは長時間の安定化操作に習熟しない。

図3(a)と図3(b)は、古武術研究者・甲野善紀によるパテシェ（菓子職人）の混ぜ方の提示例⁹⁾であり、(a)身体全体の関節を使った自由度の高い動き、(b)腕の動きが目立つ自由度の低い動きを示す。ただし、森⁹⁾はすでに30年前にロボットの視点から次のように問題点を指摘している。「多自由度のバイオメカニズムでは、常にその自由度のすべてを使っているのではない。筋肉は動かすためだけに存在しているのではなく、自由度を固定し、一時的に自由度を減らすためにも動いている。任意の形をとり、ついでその任意の形を保持する。この時、同時に重心の移動が生じる。力学的に動的な運動（これさえも現在なかなか行い得ないのだが、）だけでなく、このような硬柔自在な高次の柔らか



図1 人間による台車上の倒立棒の安定化制御

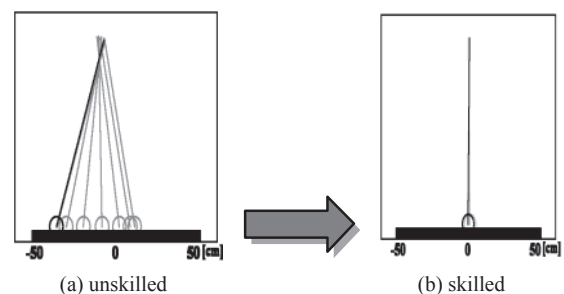


図2 人間による倒立棒の安定化制御における習熟過程

2011年5月6日受付

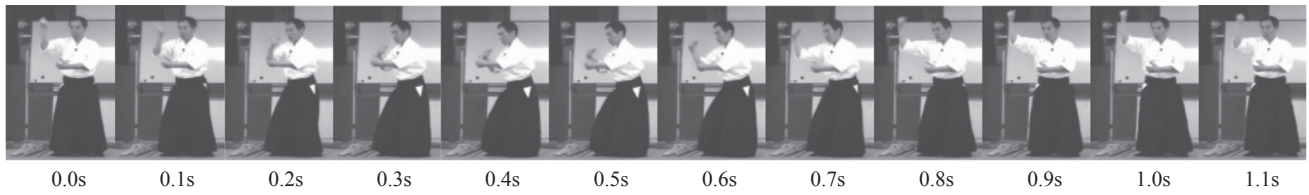
[†] 〒369-0293 埼玉県深谷市普濟寺 1690

埼玉工業大学 大学院工学系研究科 システム工学専攻

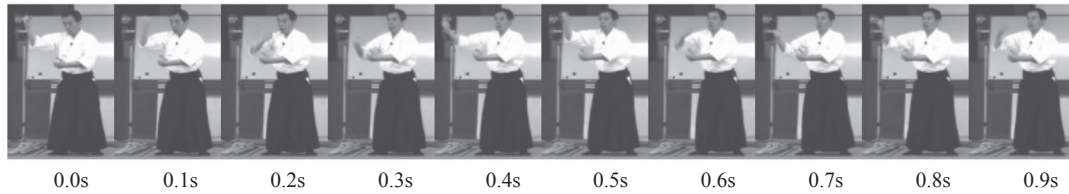
川副 嘉彦

Tel: 048-585-6824 Fax: 048-585-6717

E-mail: kawazoe@sit.ac.jp

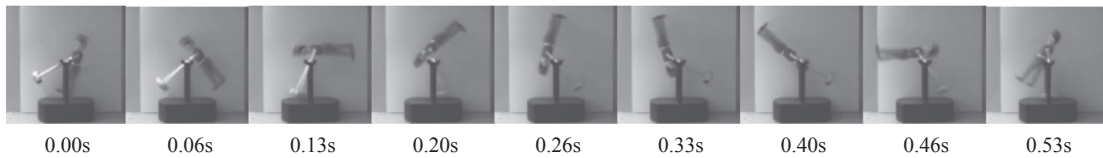


(a) with large degrees of freedom

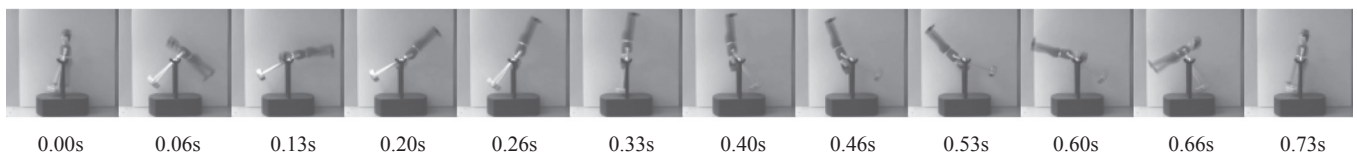


(b) with small degrees of freedom

図3 パテシェ (菓子職人) の混ぜ方の提示例



(a) An example of rotational Period: 0.51 s



(b) An example of rotational Period: 0.70s

図4 二重振り子の強制振動 (模型の鉄棒人形の大車輪) におけるカオスと無秩序さ

さを, もっと活用する努力がいるのではなかろうか。

ゲゼル (Gesell, 1945) は, 子供の発達過程の膨大な観察から, 運動の発達には全体に統合された状態から個々の部分のはたらきが特殊化するように進むこと, すなわち, 運動の自由度は発達が進むにつれて増大していくこと, 不安定化と安定化を繰り返しながらゆらぎをうまく使って進んでいくこと, すなわち, カオスが重要な役割を果たしていることを経験則として指摘している。また, ヒトの運動学習過程でも自由度に注目した研究がなされており, 右利きの人に左で字を書かせると, はじめ関節の自由度を固定して字を書いているが, 熟練すると特異的な位相関係で各関節を動かすようになる¹⁾。すなわち, われわれが, 慣れない運動を行うときには体を硬くしてぎこちないが, 慣れてくると余分な力を入れずに動作が可能になる。スポーツで「力を抜け」という指示は自由度を解放することに相当するが, 初期の段階で動作の目的自体を達成するには体を硬くする (自由度を凍結する) ことも不可欠といわれている¹⁻³⁾。

図4(a), (b) は, 大きい初期角度と初期角速度を与えられた模型の鉄棒人形が大車輪を行うときのほぼ1回転の間のコマ写真であり, 電磁石と永久磁石の反発により強制力を与えた2自由度・二重振り子の強制振動の実測例である。強制力 (磁石の反発力) が一定であるのに, 周期は (a) では

0.51 秒, (b) では 0.70 秒であり, 振幅も毎回微妙に異なり, 周期性と無秩序さが同居する複雑系 (カオス挙動) であることを示している⁵⁾。鉄棒運動の力学と制御について2リンク・モデルでの最近の研究があるが, 計算機シミュレーションの段階であり, まだ実験との対照はない¹⁰⁾。理論と実応用のギャップを埋めるために頑健なロボットの制御の研究が20年余り盛んに行われてきたが, 非線形性が線形モデル集合で取り扱われているための限界があり, 物理的な特性を十分考慮した超ロボットの展開が期待されている¹¹⁾。

2. 二重振り子から鞭への身体操法

陸上競技の走り, ゴルフのスイング, 野球の投球動作などにおいて, 上手な人は二重振り子, 下手な人は三重 (多重) 振り子として身体を使っていると小林¹²⁾が指摘している。第一の振り子の根元を握ってゆっくり振り動かすと, 第二の振り子は勢いよく回転する。根元の動きは遅いので, 強い力が出せる。人間の身体も含めれば三重, 四重振り子となる。三重振り子にして, 第一の振り子の根元を振ってみると, 第三の振り子は不規則な弱い動きになってしまう。骨格と関節からなる多重振り子の構造になっている身体を二重振り子の構造として使うには, 主たる回転軸となる関節が次々と移動しながら, 全体としては二重振り子の構造を保持していることが

必要である。また、サッカーのインステップキックや野球の投球動作のように、関節にねじりを加えて外力の作用する方向と関連の軸の向きを適切に変えると、関節固定の働きが自然に生じ、脱力した状態で振子の一部を一体化できる場合があると述べている。

この考え方に従うと、図4の鉄棒人形の大車輪は、複雑な身体構造の二重振子モデル化とも言える。

一方、甲野¹³⁾は、うねって力を伝えるのは有効であり、振った鞭の先端は音速を超えるほどで相当な威力を発するが、鞭がしななって順々に力を伝えるまでに距離と時間がかかり、気配がでることを指摘している。スポーツにおいて体をつなげて鞭の原理で動かそうとするのに対して、武術としての使い方は、体を割り、その割ったそれぞれが、群泳する魚が一齐に方向転換するようにして、総和的に動くのではないかと推測している。鞭の原理の場合は強い踏ん張りが要るが、体が割れてくると、身体の各部位は、それほど速く動かなくても、トータルとしては速くなるので、身体保全上も重要であり、武術が準備運動をしないのは、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すむことも大きな理由ではないかと述べている。現代剣道の体の使い方が床を強く蹴って攻撃するため足首やアキレス腱を痛めることが多いこと、手首のスナップを利かせるため稽古量の多い人は腱鞘炎に悩まされること、一方、伝書「願立剣術物語」の「足下薄氷を踏むが如し」という一条は床を踏みしめたり蹴ったりすることを嫌っていたことを示すと指摘している。

3. 「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」身体操法

関節に負担が少ない動きのイメージとして「ナンバ」¹⁴⁾という用語を象徴的に使い、江戸時代、江戸—仙台間 300km を1日で走ったと言われる伝説の飛脚にちなんで「源兵衛」と名付けた二足歩行ロボットの動きの研究について以下に紹介したい。

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¹⁴⁾。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。二足歩行ロボット「源兵衛」は腰をねじる関節がない。腰をねじらなくても甲野式・極短距離走（スタート・ダッシュ）が実現できる。ボルト選手の走りさえ、まだ改良の余地がありそうである。二足歩行ロボット「源兵衛」のねじらない・うねらない・踏ん張らない「ナンバ走り」は、地面を蹴らないで足裏を浮かせて転倒力を利用して移動するのが特長であり、関節への負担が少ない。

図5は、昔のテニスプレーヤー・ローズウォール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¹⁵⁾。動物のような動きの美しさに魅せられる。

図6と図7は、図5の移動（左）方向と逆であるが、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6は、支持足で地面を蹴る横移動であり、図8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7は、支持足で地面をほとんど蹴らない横移動であり、図9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）

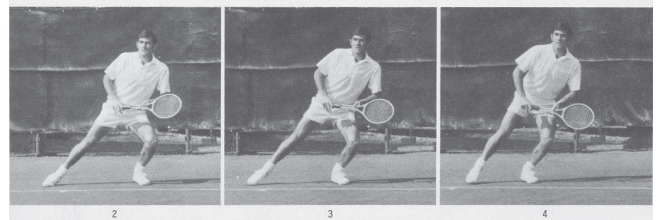


図5 ローズウォールのバックハンド・ストロークにおける地面を蹴らない横移動¹⁵⁾

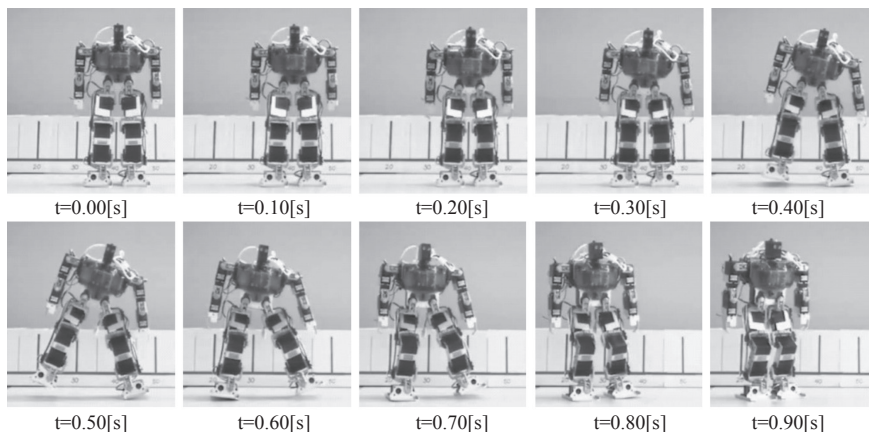


図6 地面を蹴る横移動：左足を開こうとする（左股関節モータのみ動かす）と、地面を蹴ることになり、その反作用で右に移動。体重を支点（左足）に残しながら右へ横移動している。（表示 0.1 s 毎、撮影：250fps）

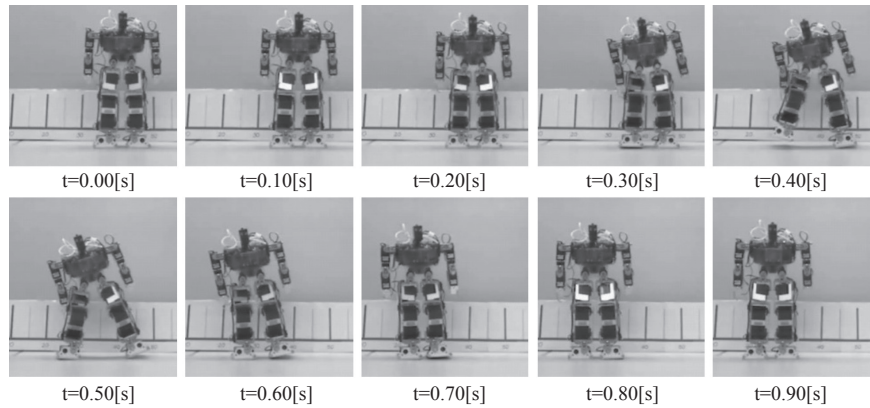


図7 地面を蹴らない横移動（ナンバ・サイドステップ）：右膝を曲げて右脚を上げながら右に開くと、身体の重心が右へ倒れ込むことになり、右へ横移動する．支点（左足）で蹴らずに転倒力を利用して右へ横移動．支点となる足関節の負担が少なく、動き始めが早く、支点側の足裏が滑らずに自然に真横に移動する．（表示 0.1 s 毎，撮影：250fps）

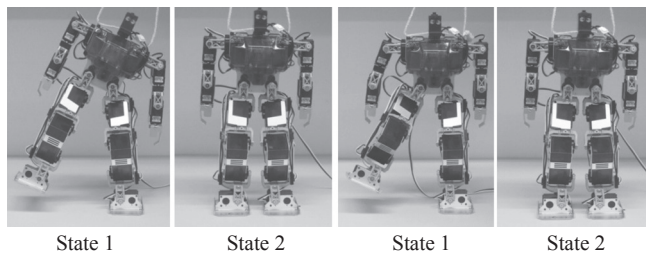


図8 蹴る横移動の状態図 図9 蹴らない横移動の状態図

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6と図7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ことに着目してほしい．図5におけるローズウォール選手の動きの美しさの秘密が図7におけるロボットの動きから理解できる．

4. ロボットの動きを阻害する過剰駆動力の制御

人間や動物の複雑精妙な運動は、非線形で自由度の多い身体や四肢を巧みに制御して実現される．一方、ロボティクスは、人間や動物の運動機能を機械的に実現しようとするものにほかならない．様々なロボット制御法が次々と提案される一方で、長きにわたりロボット制御技術の研究やロボットの開発に携わって来た人々の多くに混乱と疑問が生じている¹⁶⁾．

例えば、二足歩行ロボットでは、単一質点の倒立振子やテーブル・台車モデルとして近似する ZMP（Zero Moment Point）制御が一般的という認識があるが、実際のロボット制御では教科書どおりにいかないことが多く¹⁷⁾、速い動きの生成やロバスト性の実現への限界が指摘されている¹⁸⁾．俊敏・柔軟な動きを期待すればするほど、制御すべきパラメータと計算量が爆発的に増えることになる．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¹⁹⁾が、ASIMO は ZMP 制御

だけに依存しないで試行錯誤による多くの経験を生かしているから比較的安定なのである．

ロボットダイナミクスは必然的に非線形であり、数学的に展開される一般的制御理論がロボット作業に役に立つことはあまりないと有本²⁰⁾が指摘するように、従来とは質の異なる新しいロボット制御が求められる¹⁶⁻¹⁸⁾．

図10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であり、図7の動きは、その応用・展開である．図10(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

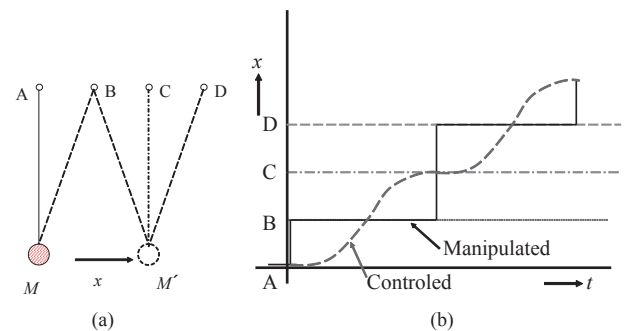


図10 不安定を利用する状態遷移による非線形制御の原理

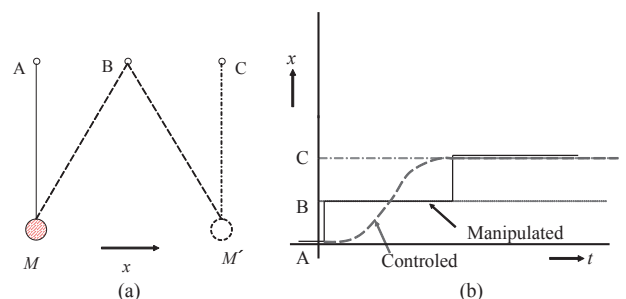


図11 オルデンバーガーの非線形最短時間応答制御の原理

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 10(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 11 のように、オルデンバーガーの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²⁰⁻²¹⁾。

図 12 は、図 6～図 9 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 7 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 13 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 14 は、図 12 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 15 は、ナンバ歩き・ナンバ走りの 4 つの状態図である。ロボットの前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

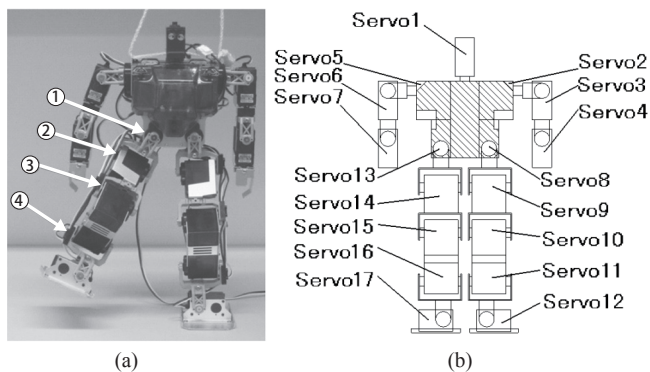
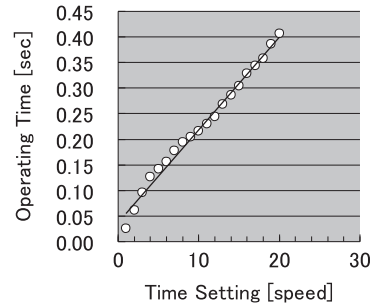


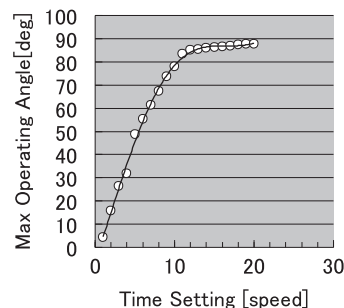
図 12 脚部 10 関節の 2 足歩行ロボットのサーボモータ配置と地面を蹴らない状態図

自在の速度で前進する。

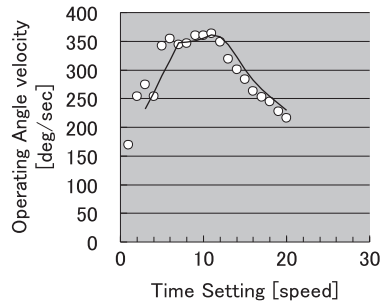
図 13 のサーボモータ動作特性を用い、図 15 の状態図において、状態 1、3 を動作時間 3、状態 2、4 を動作時間 4 に設定した場合のロボット（全高 340mm、重量 1.3 kg）の走



(a) 動作時間実測値



(b) 最大動作角度実測値



(c) 動作角速度実測値

図 13 サーボモータの設定動作時間 Time Setting (Speed) と実際の動作時間測定値

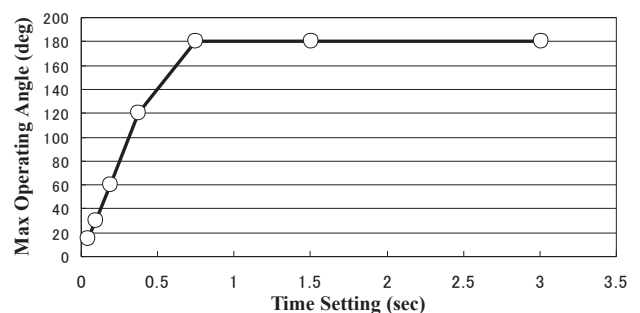


図 14 相対回転角度 180 deg を任意の動作時間 (s) で回転させるプログラムの実測結果例。0.8 s 以上であれば、任意の設定動作時間で 180 deg 回転させる。

行結果（約2歩のコマ写真）が図16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17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18は、(a) プログラムで与えられた状態2の姿勢

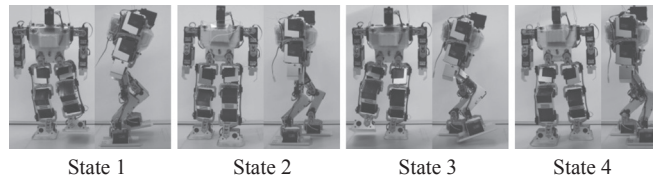


図15 不安定を利用した遷移によるナンバ歩き, ナンバ走りのための4つの状態（源兵衛 No.4-2007）

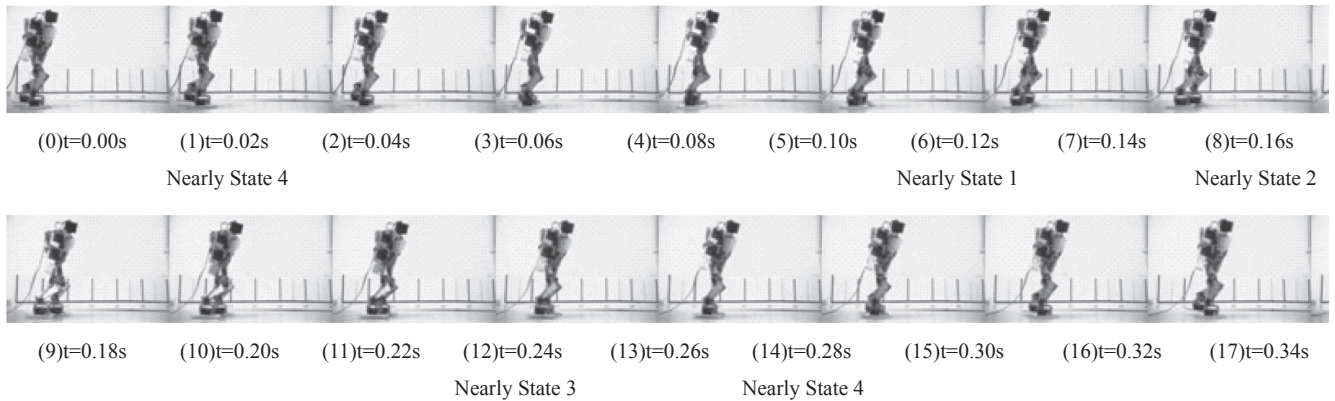


図16 二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」の時系列表示（ほぼ左右各1歩）、設定動作時間（図13：Speed 3 & 4）、前進速度 36.5cm/s, ピッチ速度 6.58 steps/s（ほぼ左右各1歩）

と(b) 図16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、転倒しないで走っていることを示している。

図19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20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17において、前進速度がピッチ速度に比例することは

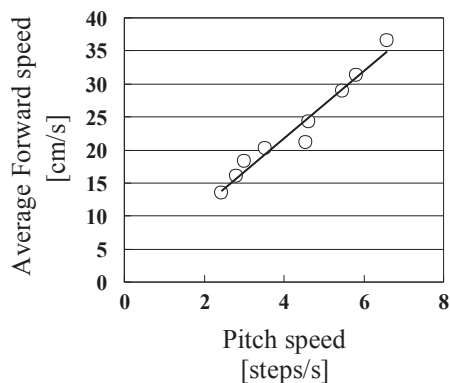
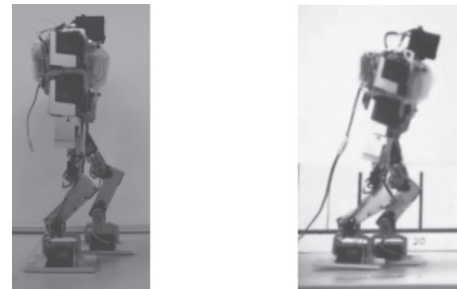


図17 ロボットのピッチ速度に対する前進速度（Robot GENBE No.4-2007）

歩幅が変わらないことを意味する。一方、図13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



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

図18 プログラムで与えられた状態2（安定）の姿勢(a)と実際の走りにおける状態2相当姿勢(b)の比較

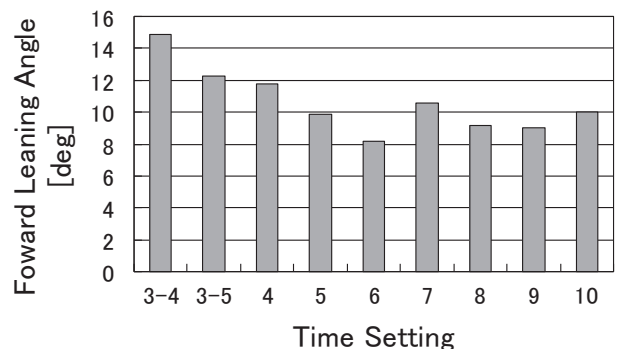


図19 サーボモータ設定動作時間に対するロボットの前傾角度

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、これらのロバスタ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。図 21 は、ロボットが図 16 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²²⁾。摩擦력에 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バスタに歩行・走行する²³⁾。

図 22 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 23 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、階段降りにははるかに容易である²⁴⁾。

テニスなどの多様な動きへの展開²⁵⁾については、紙面の都合で別の機会に紹介したい。転倒力を利用して状態から

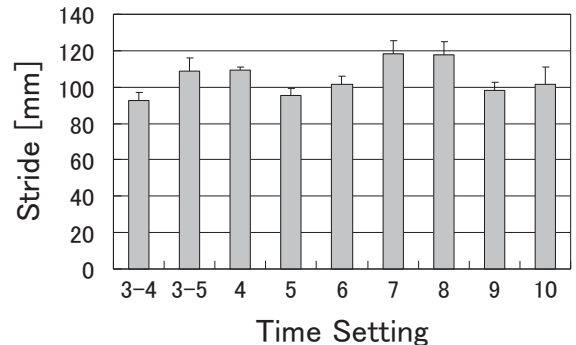


図 20 サーボモータ設定動作時間に対するロボットの歩幅（ストライド）



図 21 榛名湖の氷雪を走る二足歩行ロボット

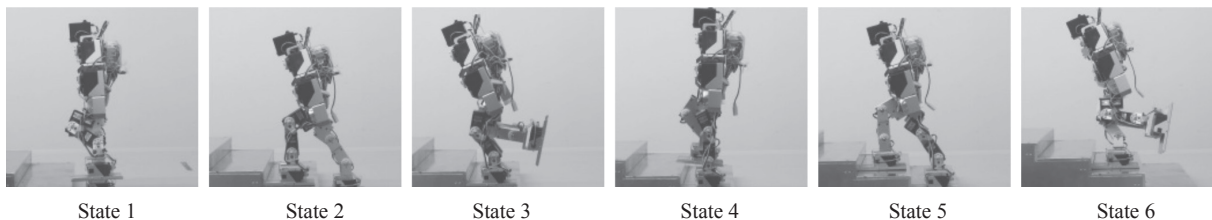


図 22 脚部 10 関節の二足歩行ロボットの階段昇りのための 6 個の状態図（GENBE-No.4-2006）

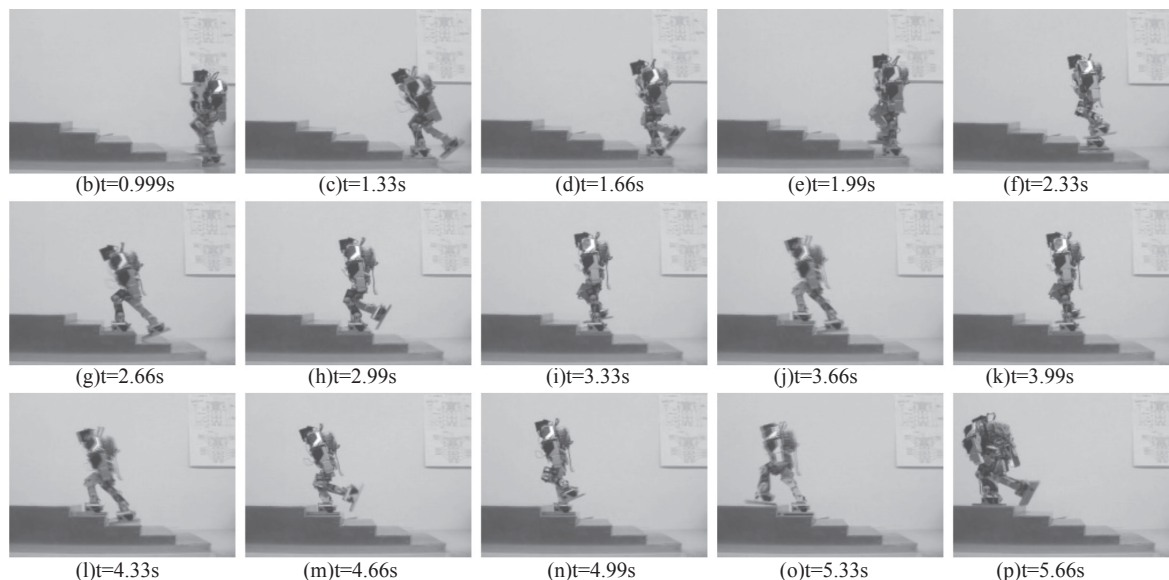


図 23 脚部 10 関節の二足歩行ロボットの階段昇り（GENBE-No.4-2006）

状態へ一気に遷移すると速くて威力のあるスイングが生まれる。腰を捻らないで足裏のすべりを利用するナンバ・ターンの応用である。腰を痛めて若くして引退するテニスの女子チャンピオンが少なくないが、勤めたいスイングである。転倒時の衝撃回避は歩行・走行の大前提である。二足歩行ロボットが不意に後から押されたときの転倒衝撃回避の受け身的な動きについては別報に紹介したが¹⁴⁾、この場合も各関節サーボの動作時間を同一に設定できるようにし、状態（姿勢）を一瞬で形成し、状態から状態へ遷移する²⁶⁾。

5. おわりに

ロドニー・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、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「バックボット」により一般にも知られるようになった。しかし、不思議なことに、日本では実践している研究者は極めて少数であり、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一つだろう。

「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「ロボットがいかに動くか」が優先されるべきである。「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。バイオメカニズム研究においても、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²⁸⁾。

おわりに、ローズウォールの写真の掲載を快諾いただいた日本テニス協会副会長・川廷栄一氏と講談社に感謝する。

参考文献

- 1) Newell, K.M. and van Emmerik, R.E.A.: The acquisition of coordination: preliminary analysis of learning to write, *Hum Mov Sci.*, 8, 17-32, (1989).
- 2) 多賀厳太郎: 脳と身体の動的デザイン, 92-111, 金子書房, (2002).
- 3) 川副嘉彦 他: 人間オペレータの個人差と習熟度のカオス・エントロピー解析とニューラル制御による獲得, 日本機械学会論文集 C 編, 74(741), 1355-1363, (2008).
- 4) 川副嘉彦 他: 人間オペレータの技量のカオス・エントロピー解析とファジィ制御による獲得（倒立振子の安定化制御における時系列データからの個人差の同定）, 日本機械学会論文集 C 編, 75(753), 1412 - 1420, (2009).
- 5) 川副嘉彦 他: 人間オペレータの個人差と習熟度のカオス・エントロピー解析とファジィ制御による獲得, 日本機械学会論文集 C 編, 76(765), 1362-1371, (2010).
- 6) シュレーディンガー（岡小天・鎮目恭夫訳）: 生命とは何か, 岩波書店, (1994, 訳 2008)
- 7) Murphy, M. and O'Neill, L. (堀 裕和 他訳): 生命とは何か それからの 50 年, 培風館, (1995, 訳 2008),
- 8) 川副嘉彦: 私のテニス研究遍歴 5 話一知は現場にありー, スポーツ工学, 6, 21-31, (2011).
- 9) 森政弘: バイオメカニズム学会 10 周年: ロボット工学の立場から, バイオメカニズム学会誌, 3(1), 50-51, (1979).
- 10) 劉 大生, 山浦 弘: 遅延フィードバック制御を用いた 2 リンク鉄棒ロボットの大車輪運動の実現, 日本機械学会論文集 C 編, 76(767), 1700- 1707, (2010).
- 11) 原 辰次: 制御における（超）ロバスト性, 21 世紀 COE 情報科学技術戦略コア: 超ロバスト設計原理プロジェクト WS「超ロバストを探る」, 1-10, (2005).
- 12) 小林一敏: スポーツの達人になる方法, 64-69, オーム社, (1999).
- 13) 甲野善紀: 古武術からの発想, 97-104, PHP 研究所, (2003).
- 14) 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), 23-33, (2008).
- 15) 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, 65-68, 講談社, (1975).
- 16) 島田明・大明準治: 「ロボット制御の理論」特集について, 日本ロボット学会誌, 27(4), 369, (2009).
- 17) 梶田秀司: 倒立振子から 2 足歩行へ ー制御理論と ZMP ー, 日本ロボット学会誌, 27(4), 392-395, (2009).
- 18) 丸山淳一, 松原崇充, J. G. Hale, 森本淳: 強化学習を用いたヒューマノイドロボットによる転倒回避ステップ動作の学習, 日本ロボット学会誌, 27(5), 527-537, (2009).
- 19) 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, 日本機械学会論文集, 70(700)C, 3509-3515, (2004).
- 20) オルデンバーガー: 自動制御, 3(2), p.69, (1956).
- 21) 高橋安人: 自動制御工学, 139-140, 岩波書店, (1965).
- 22) 川副嘉彦 他: 氷雪を走る人間型二足ロボット「源兵衛」のロバスト性のメカニズム, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, No.08-1, Vol.5, 165-166, (2008).
- 23) 川副嘉彦, 伊倉良明: 人間型二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」のロバスト性のメカニズム, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, No.08-23, 165-170, (2008).
- 24) 川副嘉彦 他: 人間型二足ロボット源兵衛のナンバ歩きから階段昇降・超高速ナンバ走りへの展開, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, No.07-24, 391-396, (2007).
- 25) 川副嘉彦 他: 障害予防とパワーアップのためのロバストな「ナンバ・テニス」の提唱（平衡点不安定を利用する地面を蹴らない動きの生成）, 日本機械学会シンポジウム講演論文集, No.09-45, 136-141, (2009).
- 26) 川副嘉彦, 原田一臣, 清水祐一: 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, 日本機械学会・Dynamics and Design Conference 2006 CD-ROM 論文集, 550:1-6, (2006).
- 27) 川副嘉彦 他: 「ヒューマン・ロボット学」事例研究

(移動ロボットと二足歩行ロボットの包摂構造化), 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 (7), No.06-1, 29-30, (2006).

- 28) 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, 53, 34-37, (2011).

川副 嘉彦 (かわぞえ よしひこ)



1974 年東京大学大学院工学系研究科博士課程単位取得退学. 1985 年工学博士 (東京大学). 1976 年埼玉工業大学工学部講師. 現在, 教授. 巧みさのカオス・エントロピー解析とファジィ・ニューロ制御による獲得, ラケットの性能予測, ロボットの運動生成など, 主として機

械工学, スポーツ工学, ロボット学の研究に従事. 日本機械学会 (フェロー), 日本ロボット学会, 日本テニス学会などの会員. (バイオメカニズム学会正会員)