スポーツとロボットにおける巧みな動きの生成原理 への構成論的アプローチ

〇正 川副 嘉彦(埼玉工大), 高野 悠人(埼玉工大院), 満岡 将樹(埼玉工大院), 中川 慎理(埼玉工大)

A Constructive Approach to the Principles of Emergence of Dexterity in Sports and Robot Movement

Yoshihiko KAWAZOE, Yuto TAKANO, Masaki MITSUOKA and Masamichi NAKAGAWA

Saitama Institute of Technology. Graduate School of Engineering Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama, 369-0293 Japan

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 a machine working in the arena of offices, homes, and disaster sites, etc. outside the factories and if we continue the present conventional research and development style in robot projects. Also in sports, moving body parts around a fixed joint is very popular, but it seems to limit one's power, whereas more power can be generated and the strain on the body is lessen by using the entire body without twisting motion and not resorting to just the fixed joint. This paper proposed the approach for realization of robust physical movements based on distributed control of physical body in humanoid biped robots and in sports, which uses only small active power making full use of equilibrium instability as a source of driving force with simple state transition. Making postures simultaneously by using the entire body produces natural movements. It can be applied to movement of physically handicapped person, rehabilitation, sports, and so on.

Key Words : Dexterity, Physical Movement, Humanoid Biped Robot, Sports, Robustness, State Transition, Constructive Approach

1. 緒 言

「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」⁽¹⁾ 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,スポーツ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^{(2),(3)}.

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⁽⁴⁾⁻⁽⁸⁾.

台車上の倒立棒を倒さないように人間オペレータが台車を移動させて安定化制御する場合,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.倒立棒を常に垂直 に立てようとするオペレータは長時間の安定化操作に習熟しない傾向がある⁽⁶⁻⁽⁸⁾.

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⁽⁴⁾.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のには体を硬くする(自由度を凍結する)こ とも不可欠といわれている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾.

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・二重振子の強制振動系に相当する模型の鉄棒人形が 大きい初期角度と初期角速度を与えられて大車輪運動を行うときの実測値によると、強制力(磁石の反発力)が 一定であるのに、1回転の周期は、たとえば0.51秒、0.70秒という具合に、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)であることを示した⁽⁸⁾.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⁽⁹⁾. 理論と実応用のギ ャップを埋めるために頑健なロバスト制御の研究が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バストな展開が期待されている⁽¹⁰⁾.

巧みな運動はどのように獲得されるのだろうか.うねって力を伝えることの有効性はよく知られており^{(11,(12)}, 鞭の尖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⁽¹³⁾.

本稿では、従来のロボット工学とスポーツ科学における運動の生成原理の問題点を指摘し、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、運動がどのように獲得されるのかについて考察 する.

2. 鞭の身体操法と同時並列的な身体操法

2・1 二重振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、上手な人は二重振子、下手な人は三重(多 重)振子として身体を使っていると小林⁽¹¹⁾が指摘している.第一の振子の根元を握ってゆっくり振り動かすと、 第二の振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 子となる.三重振子にして、第一の振子の根元を振ってみると、第三の振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子の構造になっている身体を二重振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、前述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.

また、小林⁽¹²⁾によると、スポーツの熟達とは、あるスポーツ領域の課題について、長期にわたる経験によって多 くの知識や優れた技能を獲得し、非常に優れた問題解決ができるようになることといわれており、ある目的の動作 の技能の向上を目指して反復練習を続けていると、動作技能のある部分が意識を使わなくてもできる無意識化、自 動化が現れてくる.さらに目的の動作部位以外の身体部位にも関連した協調動作が現れ、目的の動作が軽やかでか つ速やかにできるようになることがある.このようなスポーツの熟達に伴う筋の無意識化、自動化操作特性、動作 部位に混在する大筋群と小筋群の筋力発現の特性、骨と関節から構成される二重振子構造等による筋肉の力学的 制御特性等について考察がなされている.二重振子、多重振子、鞭の運動に関して、ゴルフのスイングにおいて も、クラブは最も先にある振子であり、手を豆だらけにしている人、肘を痛めている人、あばら骨を痛めている人、 腰を痛めている人など、傷害を起こす箇所もさまざまであると指摘している.

ランニングでは、優秀な選手は走速度が増大するに伴い、空中期の屈曲中の筋活動が増大し、接地期の活動を大き

く上回つたという測定結果を示したという興味深い記述があり、未鍛錬者と鍛錬者の剣道における面打ち動作の 驚くべき速さの違いが双対動作の面から考察されている.

一方、甲野⁽¹³⁾は、うねって力を伝えるのは有効であり、振った鞭の尖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こ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、群泳する魚が一斉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て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.

2・2 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できるが, 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⁽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.

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 300 km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「源兵衛」は腰 をねじる関節がないが,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 選手の走りでさえ,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,極力,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1と図2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1 は、支持足で地面を蹴る横移動であり、図3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2は、支持足で地面をほとんど蹴らない横移動であり、図4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



Fig.1 Right side step with kick of ground by left leg.(250 fps)



Fig.2 NANBA side-step of humanoid biped robot, which uses only small active power. Right side step without kick of ground. (250 fps)





Fig.3 Two states of right side step with kick of ground

Fig.4 Two states of right side step without kick of ground



Fig.5 Side step without kick during backhand stroke by K. Rosewall¹⁵⁾

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1と図2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5とは移動方向が逆であるが、図7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.

3. ロボットの動きを阻害する過剰駆動力の制御

3・1 ロボットの動きの質とロボット教育についての吟味

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.

ロボット教育の意義については一層の関心が持たれているが、たとえば、二足歩行ロボットの実践経験をした 後でロボット学会誌などの最新の論文を読んだ学部低学年の学生は、論文には非現実的な多くの仮定が設けられ ていることに気づく.たとえば、足裏の滑りを利用した方向転換に関して⁽²⁰⁾、学生のレポートには論文中の仮定 に対して次のような疑問の記述が見られる⁽²¹⁾.

仮定(1):ロボットの動作は十分に遅く、よって慣性力の影響を受けない. 摩擦力の効果が支配的である.

疑問(1): ロボットの特徴はスタート・ストップ、加速・減速の繰り返しである. 論文の仮定では運動とは言 えない. ロバストなスタート・ストップの生成こそロボットの重要な課題である.

仮定(2):動摩擦係数と静摩擦係数は等しいものとして扱う.

疑問(2):実際にはそうならないので、論文の仮定には無理がある。摩擦の大小に依存しないでロバストな動きをするロボットを実現することが重要な課題である.

仮定(3):床面は水平で、足裏にかかる摩擦力は一様かつ不変とする.

疑問(3):現実にはロボットは床面の傾斜や足裏の接触状態の影響を受けやすいので、論文の仮定は非現実的である.多様な傾斜と摩擦のある床面でロバストなロボットの実現こそ重要な課題である.

これらは日常物理学では基本のことであるが、先入観にとらわれない素朴な学部1、2年生だから気づくこと であり、ロボット実現よりも論文作成を優先させる傾向のある研究者や大学院生には気づきにくいことかもしれ ない.このような課題発見と解決法の模索は、ロボットを動かしてみて初めてわかることであり、問題解決能力 の養成には極めて重要である.

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⁽²²⁾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.

3・2 過剰駆動力の制御と不安定を利用する状態遷移

図6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2の動きも図6の応用・展開例である.図6(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のようになる.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、エネルギ源は支点のステップ状の移動である.操作量の切換は、図6(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7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^{(23),(24)}.

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8は、図1~図4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2では、不安定な状態1:0.40sから安定な状態2:0.70sへ約0.3秒で遷移する。

図9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10は、図8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 11 は、ナンバ歩き・ナンバ走りと称している状態図である. 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自在の速度で前進する.



Fig.6 Proposed nonlinear optimal control applied to humanoid biped robot walking.



Fig.7 Example of nonlinear optimal control by Rufus Oldenburger.



Fig.8 Servomotors configuration and the State of right side step using instability without kick of ground



Fig.9 Measured operaring characteristics vs. operating time setting for objective operating angle of 90 de-grees.



Fig.10 Measured operaring characteristics vs. operating time setting for objective operating angle of 180 degrees.



Fig.11 Four States of NANBA Walk and Run of biped robot with 10 freedom legs (GENBE - No.4-2007)



Fig.13 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 12 は、図 11 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 11 の状態図において, 図 9 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 13 である. 走行の ピッチ速度は 6.58 steps/s, 前進速度は 36.5 cm/s である.

図 14 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 15 は、(a) プログラムで与えられた状態 2 の姿勢と (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、転倒しないで走ることを示 している.

図 16 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よりも短かくなると、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17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,これらのロバスト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18は、ロボットが図13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(25). 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バストに歩行・走行す $\mathcal{Z}^{(26)}$.

















摩擦の大きな環境(カーペット)では、ロボットは歩行中の慣性力やトルク不足のために後ろ足のつま先が床 に接触して引っかかって大きく回転したり、後方に傾斜して転倒したりすることが多い.このような場合は、後 ろ足先が床に接触しないように、State2 と State3 の間に、State2 の姿勢で後ろ足先を少し上げた状態を新しく追加 することにより、図 19 のように、つまずきやすい凹凸・摩擦の大きいカーペット上を巧みに歩くことができる., 摩擦が大きくて引っかかりやすいカーペット上での歩行が図 19(a)、摩擦が小さくて滑りやすい床での歩行が図 19(b)であり、ほぼ同じ歩行速度で前進する⁽²⁷⁾.



Fig.18 Robustness of humanoid biped robot GENBE who runs on the ice and snow 9 steps during 1.50 seconds.



Fig.19 Robustness of humanoid biped robot who walks and runs everywhere (GENBE-2008)

4. 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 20 は、不意に後方から押された二足歩行ロボットが、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 21 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ョン的構造(e)を採用している⁽²⁸⁾.

図22は、ロボットの階段昇りの状態図である.図23は実行例である⁽²⁹⁾.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.1段を約1秒で(本実験では5段)軽やかに登りきる.身体全体を使った大胆な動きであり、従来のロボットとは質が異なる.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が紙面の都合で省略する.

図 24 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 25、図 26 のように、その場で瞬間的 に右回りに 180 度方向転換する⁽³⁰⁾.



(e)

(f) Fig.20 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

(g)



Fig.21 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.



Fig.22 Six states of GENBE-No.4 with 10 freedom legs for going up the stairs (GENBE-No.4-2006).





Fig.24 Two states of 180 degrees NANBA TURN.

Fig.25 NANBA TURN based on distributed control of physical body. It turns instantaneously 180 degrees per second.



Fig.26 NANBA TURN based on distributed control of physical body. It turns instantaneously 180 degrees per second.

図 27 は、うつ伏せからの「起き上がり」である(前半の動きは省略). 腕立て伏せのように手を広げて支えるのではなく、両手を身体の下に滑り込ませてから身体を持ち上げ、起き上がるときに重心(お尻)を後ろに移動させ、慣性力による後方への転倒力を利用している.図 28 は、「仰向け」から「うつ伏せ」を経ての「起き上がり」の実現である.「仰向け」から「うつ伏せ」への動きは、脚を伸ばして脚の転倒力を利用して身体を仰向けからうつ伏せに横転させている⁽³¹⁾.



Fig.27 From prone position to rising up using gravitational force.



図 29 は、プロジェクト型授業における小形二足歩行ロボットによるビーチフラッグ競技会(c)におけるアクロ バット的な動きの生成例を示す.これらの自律行動は過剰駆動力の制御と包摂構造化(d)による⁽³²⁾.



Fig.29 Presentation of autonomous robot behavior in the beach flag robot contest in a class.

5. スポーツへの展開

図 30 は、図 24~図 26 (瞬間的ナンバ・ターン)の応用である.状態図 3 から状態図 4 へ一気に遷移すると速 くて威力のある鋭いテニスのスイング (バックハンド・ストローク, 0.3 秒)が生まれる.腰を捻らないで足裏の すべりを利用するので,腰への負担がかからない⁽³⁰⁾.

図 31 は、テニスのレシーブにおいて鈴木貴男選手がノータッチ・エースを取られたときの右への横移動の様子 を示す.動き始めるときに左足で蹴る動作が残っており、スターとが少し遅れている.

図 32 は筆者の従来のフォアハンド、図 33 は(習熟していないが)筆者が提案するナンバ・フォアハンド、図 34は2つの状態図である(30).身体全体を同時並列的に動かすことにより手打ちになりにくく、非力でもスイング が鋭く速く、安定しやすい、状態1は相手プレーヤーのボールの軌道や球質により決まり、状態2はどこに打ち たいかによって決まるので、ボールを呼び込むタイミングだけを意識すればよい. 図 35 はオープンスタンスから のフォアハンドの提案である.



(a)t=0.00s

(e)t=0.32s



(a) State3

(g) State4

Fig.30 Robust NANBA backhand-stroke of biped robot, which uses only small active power. (250 fps)



0.0 s 0.1 s 0.3 s 0.4 s 0.5 s 0.6 s $0.2 \, s$ Fig.32 Conventional forehand-stroke by KAWAZOE.

日本機械学会 (No.11-2) Dynamics and design Conference 2011 CD-ROM 論文集 [2011.9.5-9, 香美市] - 13 -





Fig.36 Forehand-stroke during receive a served ball by K. Date Krumm.

図 36 は,最近のクルム伊達公子選手のレシーブにおいてリターン・エースを取ったときのフォアハンドである. 図 33~図 35 のナンバ・フォアハンドに近いように見える.最近のテニスの現場では,足裏を浮かせて空中で仕 事をする選手が多く見られる.

6. おわりに

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,鞭の尖端は音速を超 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.

本論文では、従来のロボット工学とスポーツ科学における運動の生成原理の問題点を指摘し、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,運動がどのように獲得されるのかについて考察した.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.

ロドニィ・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^{(21),(33)},最近は,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は,ロボットやスポーツに最も当てはまる.「能書きを並べる(体系化)」より も「ロボットや身体がいかに動くか」が優先されるべきである.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⁽³⁴⁾.

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、およ び写真を掲載させていただいた鈴木貴男選手、クルム伊達公子選手、日本テニス協会に厚くお礼申し上げる.ま た、大学院および学部の卒業研究として熱心な協力をいただいた研究室の学生諸氏に深く感謝する.

文 献

- (1) 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)
- (2) Murphy, M. & 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)
- (3) 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, No.6 (2011), pp.21-31.
- (4) Newell, K.M.,van Emmerik, R.E.A., "The acquisition of coordination: preliminary analysis of learning to write", Hum Mov Sci., Vol.8 (1989), pp.17-32.
- (5) 多賀厳太郎, "脳と身体の動的デザイン", 金子書房 (2002), pp.92-111.
- (6) 川副嘉彦, 伊倉良明, 内山敬次, 貝瀬徹, "人間オペレータの個人差と習熟度のカオス・エントロピ解析とニュー ラル制御による獲得", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.741 (2008), pp.1355-1363.
- (7) 川副嘉彦,伊倉良明,貝瀬 徹,松本仁,"人間オペレータの技量のカオス・エントロピ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 巻 753 号 (2009), pp.1412-1420.
- (8) 川副嘉彦,石川恵介,伊倉良明,"人間オペレータの個人差と習熟度のカオス・エントロピ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巻765号 (2010), pp.1362-1371.
- (9) 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, Vol.76, No.767 (2010), pp.1700-1707.
- (10) 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」, (2005), pp.1-10..
- (11) 小林一敏, "スポーツの達人になる方法", オーム社, (1999), pp.64-69.
- (12) 小林一敏, "スポーツの熟達と筋肉の力学的制御", スポーツ工学, No.6 (2011), pp.33-38.
- (13) 甲野善紀, "古武術からの発想", PHP 研究所, (2003), pp.97-104.
- (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, Vol.12, No.1 (2008), pp.23-33.
- (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", 講談社 (1975), pp.65-68.
- (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、vol.27, No.4 (2009), p.369.
- (17) 梶田秀司, "倒立振子から2足歩行へ -制御理論とZMP-", 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.4 (2009), pp.392-395.
- (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, Vol.27, No.5 (2009), pp.527-537.
- (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, Vol.70, No.700, C編(2004), pp.3509-3515.
- (20) 三浦郁奈子,中岡慎一郎,金広文男,原田研介,金子健二,横井一仁,梶田秀司,"足裏の滑りを利用した2足歩

行ロボットの方向転換-滑り現象のモデル化と回転角の予測-",日本ロボット学会誌, Vol.28, No.10 (2010), pp.1232-1242.

- (21) Kawazoe, Y., Mitsuoka, M. and Masada, S., "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(2011), (in print).
- (22) 有本 卓, "ロボットの非線形制御", 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.4 (2005), pp.404-407.
- (23) オルデンバーガー, "自動制御", Vol.3, No.2 (1956), p.69.
- (24) 高橋安人, "自動制御工学", 岩波書店 (1965), pp.139-140.
- (25) 川副嘉彦, 伊倉良明, 輿水裕矢, 筋野駿介, 原 昌彦,"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(5) (2008), pp.165-166.
- (26) 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 (2008), pp.165-170.
- (27) 川副嘉彦,中川慎理,高野悠人, "二足歩行ロボット源兵衛に学ぶ硬柔自在の身体操法とつまずきにくい・転びに くい歩行",日本機械学会福祉工学シンポジウム 2010 講演論文集,No.10-52(CD-Rom) (2010), pp.91-94.
- (28) 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, 日本機械学会・Dynamics and Design Conference 2006 CD-ROM 論文集 (2006), 550: pp.1-6.
- (29) 川副嘉彦, "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 (2007), pp.391-396.
- (30) 川副嘉彦,伊倉良明,武田幸宏,中川慎理,"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)",日本機械学会ジョイントシンポジウム 2009(スポー ツ工学& ヒューマン・ダイナミクス)講演論文集, No.09-45 (2009), pp.136-141.
- (31) 川副嘉彦, 伊倉良明, "人間型二足ロボット「源兵衛」による身体に負担の少ない歩行・走行・起き上がり," 福 祉工学シンポジウム 2008 講演論文集, No.08-28, (2008), pp.166-169.
- (32) 川副嘉彦, "二足歩行から始める実践ロボット感動教育プログラム(第2報, ロボティクス入門としての二足歩行 ロボット学習プログラム)", 第28回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, RSJ2010AC1L3-5, (2010), pp.1-4.
- (33) 川副嘉彦,原田一臣,須永智文,桃井孝昌,清水祐一,"「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 (2006), pp.29-30.
- (34) 川副嘉彦, "武道の可能性を探る ロボットから視た武道の原点 —", 月刊武道, 534 号, (2011), pp.34-37.