

二足歩行から始める実践ロボット教育カリキュラム (第1報, 不安定を利用する状態遷移による非線形最適制御の展開)

川副 嘉彦

埼玉工業大学工学部ヒューマンロボット学科

kawazoe@sit.ac.jp

Practical Education Curriculum Starting from Humanoid Biped Robot — 1st report: Development of Nonlinear Optimal Control Using State Transition with Instability —

Yoshihiko KAWAZOE

Department of Human-Robotics, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

Abstract

Mechatronics, dynamics and robotics involving humans are the world of strong nonlinearity. The previous papers demonstrated the robustness of humanoid biped robot GENBE who walks and runs everywhere even on the ice and snow. The realized simple self-sustained humanlike robust movements use only small active power, with simple chaotic limit cycle using nonlinear optimal control by state transitions with instability. Instability makes the natural movement and can be applied to walking of a physically handicapped person, rehabilitation, sports, and so on. This paper showed the application of the nonlinear optimal control to tennis movements making full use of instability as a source of driving force in order to develop into practical education curriculum as an introduction to Robotics with humanoid biped robot in the subsequent paper.

Key Words: Robotics, Humanoid Biped Robot, NANBA Walking, NANBA-Tennis, Martial Art, Limit Cycle, Nonlinear Optimal Control, State Transition, Instability, Human-Robotics

1. 研究の背景と目的

少子・高齢化社会に期待されるサービスロボットや介護ロボットなど、我々の周囲に存在して知的に動く（従来の機械とは質的に異なる）機械をロボットと定義するならば、長年の研究にもかかわらず、我々の周りには1体のロボットも実在しない¹⁾⁻²²⁾。自動車工場などで活躍している工業用ロボットは、ロボットというよ

り、高級な自動機械と言うべきであって、二十数年前から始まっている国家プロジェクトによるロボットも現在の延長線上では難しい問題が多すぎることが開発に実際に取り組んできた研究者¹⁵⁾⁻¹⁷⁾だけではなく一般にも認識され始めた²³⁾。

作業の精度、速度、効率を追求するモデルベーストと呼ばれる従来の知能ロボットは、外界

をセンサで認識し、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 (SMPA: Sense- Model- Plan-Act)。しかし、このような直列方式のロボットは、実世界では、予想外の障害物が突然現れたような場合に立ち往生してしまう⁴⁾⁻¹⁰⁾。

ロボット研究に必要な「ロボット制御の理論」とは何かが改めて問われている。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という²⁴⁾。

二足歩行ロボットでは、単一質点の倒立振り子やテーブル・台車モデルとして近似する ZMP (Zero Moment Point) 制御が一般的であるが、梶田²⁵⁾が指摘するように、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、いまだに ZMP 制御は制御理論の研究者には親しまれているとはいえない。二足歩行ロボットに代表される不安定な多自由度・非線形系の大振幅・大変位を伴う速い動きの生成や不意の外乱にロバストなオンラインでの安定化制御の実現には ZMP 制御は限界がある^{26) 27)}。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²⁸⁾。しかし、ASIMO の歩行は ZMP 制御だけに依存しないで多くの試行錯誤による経験を生かしているから比較的安定なのであって、刻々変化する未知の実環境はロボットにとっては危険に満ちており、現在の一般的なアプローチをとる限り、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。ロボットに俊敏・柔軟な動きを期待すればするほど、ロボットは非現実的なものになる。従来とは質の異なる新しいロボット制御が求められる²⁴⁾⁻²⁶⁾。

一方、国内外におけるロボット教育の実態調査および、それに基づく教育カリキュラムの確立を目的に日本ロボット学会に設立された「ロボット教育研究専門委員会」により「ロボット教育研究シンポジウム 2009」が開催された。さまざまなロボット教育活動を体系的に収集し、教育手法を確立し、体系的シラバスを作成

し、最終的には全国の大学の講義やロボコン活動が総覧できるホームページ立ち上げを目指すという。ロボットの形と動きは人間にとって分かりやすく、ロボットは人によってミッションが設定できるので人を感動させたり達成感を得ることができること、企画・設計・製作・発表が机の周囲で可能であり、動かしてみるとロボットは本当に動かないことがわかるが、これが課題発見・解決能力を養うことになり、ハードとソフトに精通した人材は即戦力になること、ロボットはものづくりを一貫して学べること、広い範囲の基礎教養を構成論的に学べるので非常に可能性を秘めた分野であることなど、ロボット教育の特徴が挙げられている。また、身の回りの製品はエンジニアリングの産物であるにもかかわらず日本の理科教育は基本的にサイエンスばかりでエンジニアリング教育がないこと、理科教育で学んできたことと身の回りの製品とが一致しない現状では理科離れが起こるのは必然であること、サイエンスは分析的、エンジニアリング・テクノロジーはシンセシス(構成論的)であり、カリキュラムでは両者を互いにキャッチボールしながら進めていくことが重要であり、経験したあとに理論を学ばせると理解しやすいことなどが主張されている。さらに、ロボティクスで重要になる統合化の評価法がまだ確立されておらず、その充実が重要であること、うまく動くものの背景には隠された知恵があるはずであり、それを体系的に評価する方法が必要であることなども強調されている。

ロボコンの人間教育的意義については一層の関心もたれており^{29) 30)}、極論すれば、現時点でロボットが唯一貢献できる分野は教育だけのように見える。

生体(人間・動物)に似た運動機能を持つもの、あるいは運動機能に加えて知的機能を備えているものというのが最も基本的で本質的なロボットの定義であろう。

本論文では、不安定を利用するシンプルな非線形最適制御を二足歩行ロボットの様々な動きに展開し、並行して二足歩行から始める実践ロボット教育カリキュラムへと展開する。本報で

は、関節への負担が少ない「ねじらない、うねらない、踏ん張らない」という動きのイメージとして「ナンバ」という用語を使い、俊敏・ロバスタなテニスの動きへの応用を試みる。

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については続報に述べる。ロボティクス入門を「二足歩行ロボット」から始める理由は、システムとしての制御が難しい多自由度システムであり、巧みな動きを実現するには様々な知恵が要求され、しかも、その良し悪しが誰でも容易に分かり、学習の全体像と具体的な成果が目に見えやすいからである。具体的実践と問題解決の経験を一般的手法に展開できる能力を養うことが目的である。巧みな技術の習熟過程で科学する心が生まれ、科学する心から哲学が生まれる。

2. 不安定を利用する状態遷移による非線形最適制御の原理

「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く省エネの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^{31) - 34)}。「歩きたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」という「源兵衛」と名づけた二足ロボットのシンプルな非線形最適制御を用いた歩き・走りの原理を応用して、関節に負担が少ない「テニス」の動きへの応用を試みる。(図1)。「源兵衛」は、江戸-仙台間350 kmを1日で走ったといわれる伝説の飛脚の名にちなんでいる。

本研究でこれまで^{31) - 43)}二足歩行に適用した不安定を利用する状態遷移によるシンプルな非線形最適制御は、目標値突変への応答を最短時間内に終結させるオルデンバーガーの非線形最適制御の考え方の応用・展開とも言える。このシンプルな非線形最適制御の一般的な応用の可能性を示す意味で、オルデンバーガーにならって糸で吊り下げられた質量 M の振動性 2 次要素 (図2, 図3) を例にして以下に説明する。

図2はオルデンバーガーの非線形最適制御の例である^{44), 45)}。図2(a)において、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 は振り子となって 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 C へ $BC (=AB)$ だけステップ状に移せば、質量 M はそのまま平衡する。この経過は図2(b)のように図示され、ステップ入力変化 (操作量) に対して質量 M は極めてスマートな応答 (制御量) を示す。この例では操作量は 2 段切換で、2 回目の切換は質量 M の速度 dx/dt がゼロの瞬間に行う^{44), 45)}。支点 A を B の位置へ移すことは平衡点が不安定な状態を形成することに相当し、支点を B から C へ移すことは平衡点が安定な状態を形成することに相当する。



Fig.1 Study of NANBA TENNIS

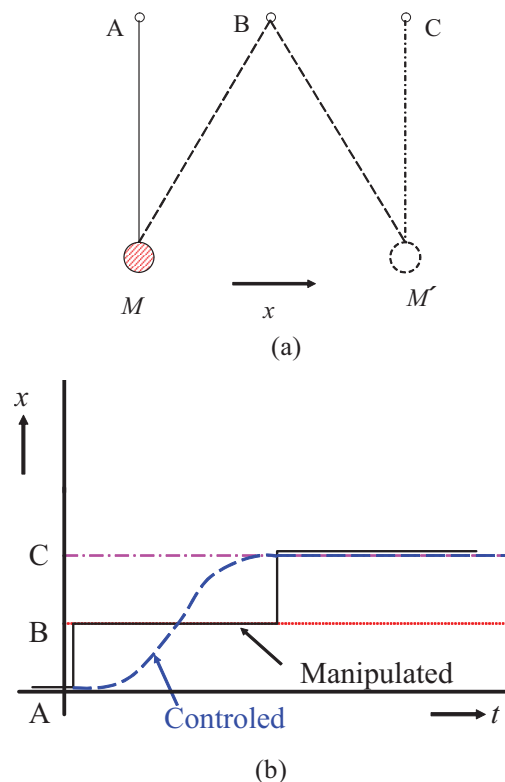


Fig.2 Example of nonlinear optimal control by Rufus Oldenburger.

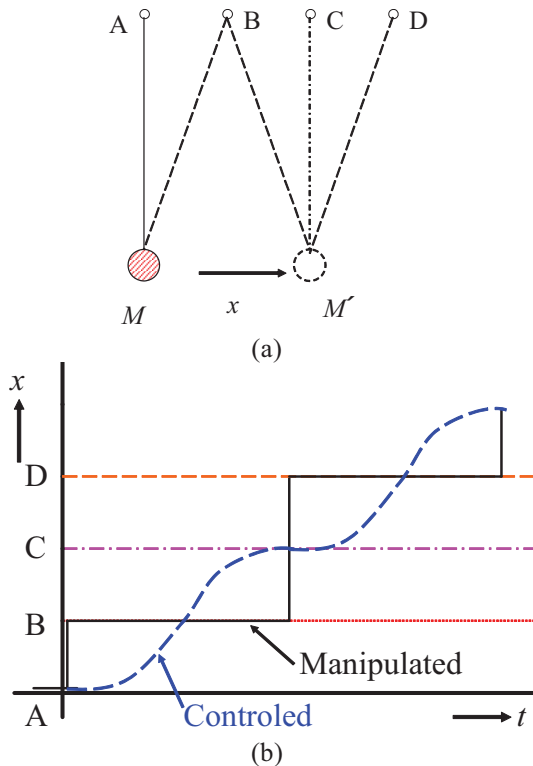


Fig.3 Nonlinear optimal control applied to humanoid biped robot by the author.

質量 M を停止させないで前進させるためには、図 3(a)のように、質量 M が B の真下を通過し他端で一瞬停止する瞬間に支点を B から D へ $BD (= 2 AB)$ 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。二足歩行との対応

については、第 4 章に述べる。

3. 不安定を利用する状態遷移による非線形最適制御の横移動への応用

図 4 と図 5 は、二足ロボットによる横移動（サイドステップ）である。

図 4(a)は一般的な蹴る横移動のコマ写真であり、刻々の動きを示す。図 4(b)は図 4(a)の蹴るサイドステップの動きの原理を示す状態図であり、状態 1 で、状態 2 のプログラムを与え左脚を左に開こうとするが、脚を開く方向に地面により抵抗を受ける。そのためにロボットは足を開いた方向(左)とは逆の方向(右)に移動する。状態 2 で動かしているモータはロボットの左脚の股関節のみである。

図 5(a)は足裏を浮かせて地面を蹴らない横移動（ナンバ・サイドステップ）であり、身体の傾きが図 4(a)と反対になっている。図 5(b)は図 5(a)の蹴らないサイドステップの動きの原理を示す状態図であり、脚を広げると同時に膝を曲げ脚を上げることで地面との反発がなくなり、転倒力により脚を広げた方向と同じ方向に倒れ込む（不安定な状態 2 → 安定な状態 1 へ）。支持足の反発もなく、反作用力も小さい。状態 2 では、①のモータ（股関節）の他に②～④のモータを動かし膝を曲げて脚を上げながら脚を開く。不安定な平衡状態（状態 2）から安定な状態（状態 1）へ一瞬（約 0.3 秒）で遷移する。これを「ナンバ・サイドステップ」と呼ぶ。体重を支脚（左足）に残さず、蹴らないで不安定を利用

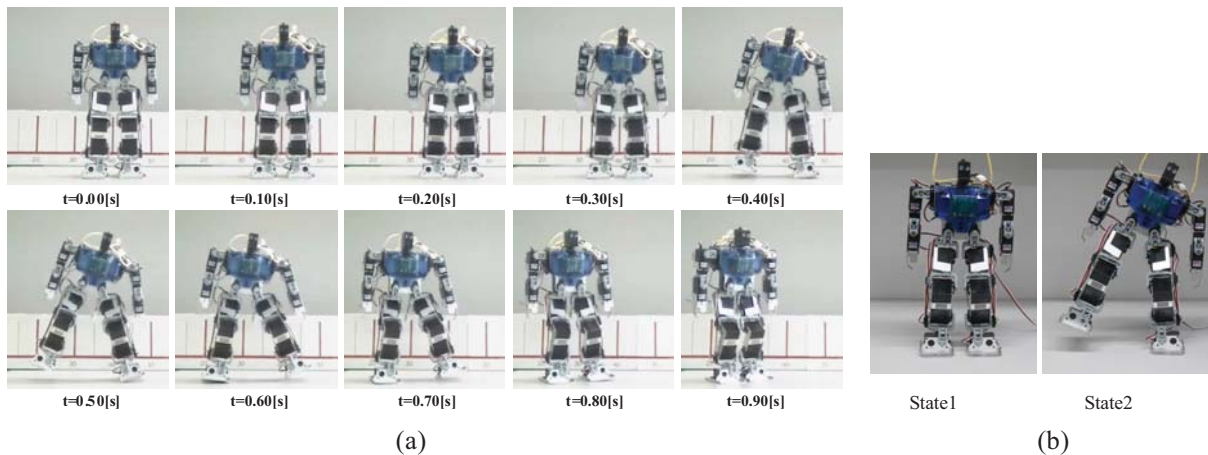


Fig.4 Right side step with kick of ground by left leg.(250 fps)

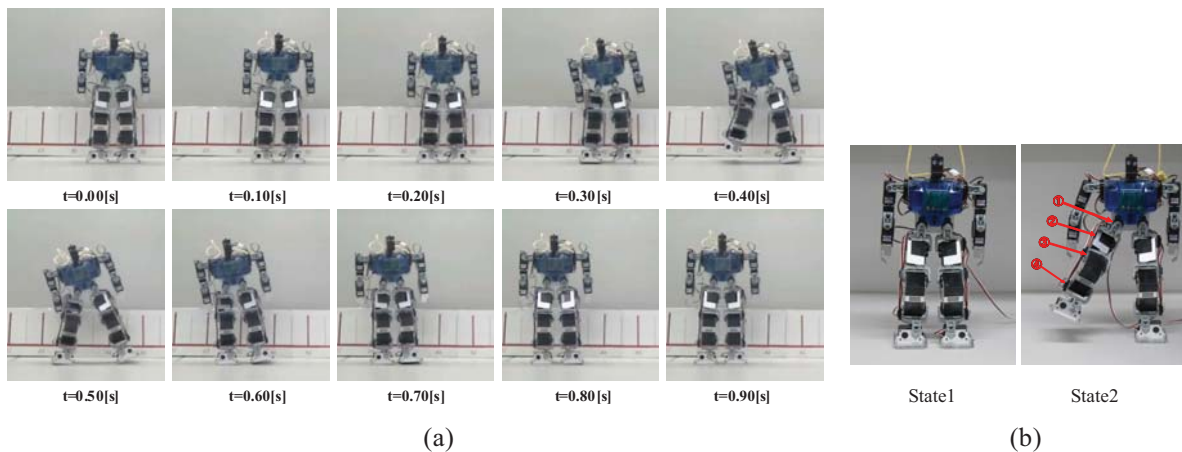


Fig.5 Robust instantaneous NANBA side-step of humanoid biped robot GENBE No.4-2 utilizing instability, which uses only small active power. Right side step using instability without kick of ground. (250 fps)

して横移動するので、図4(a)において足裏が滑って向きが多少変わっているのに対して、図5(a)では真横に移動している。

支持脚で蹴るより蹴らないサイドステップの方が股関節のサーボモータにかかる負荷が小さい。

図2(a)において、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原理を応用して、二足歩行ロボットの片脚を瞬時に横に上げた姿勢をとると不安定な状態が形成され、横移動が始まることになる。横方向に転倒する前に転倒しない着地脚の形を作ると速度がゼロになって停止する。

4. 二足歩行ロボット「源兵衛」のナンバ走りのロバスト性

甲野式「ナンバ走り」⁴⁰⁾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という。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、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³⁵⁾⁻⁴³⁾。

図2(a)において、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(状態1)原理を応用して、二足歩行ロボットの前脚を瞬時に上げた姿勢をとると不安定な状態が形成され(状態1)、歩行・走行が始まる。前方に転倒する前に転倒しない着地脚の形を作るとつかい棒を形成すると速度がゼロになって一瞬停止する。また、支点Dへ遷移する(状態1)原理を応用して、瞬時に反対の脚を上げて前脚を作って不安定な姿勢を形成すると、さらに前進する。

脚部10自由度の場合(図6)、足首関節を使って上体(頭)が左右に傾かないように歩く。ナンバ歩きは、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。

超高速ナンバ走りは、バスケットボールやサッカーなどの瞬間的な加速や極短距離のダッシュに有効であるが、走り出しが非常に速い反面、身体の手操作が従来の走りに比べてあまりに複雑で、最初の二、三步は何とかなっても持続的にこれを行うことは非常に難しいといわれる⁴⁰⁾。前方への転倒を検出して転倒時の衝撃を最小にするような受け身の動きと、転倒から素早く立ち上がる動きの自律的発現については前報^{9), 21), 35)-43)}に述べた。

腰の関節をねじることのできない二足ロボット源兵衛の「ナンバ歩き」の原理は、不安定な平衡状態(姿勢・形)から不安定を利用して安定な平衡状態(姿勢・形)へ速さと威力のある

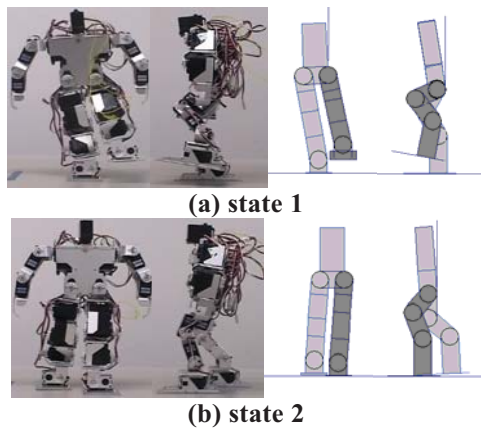


Fig.6 Fundamental States NANBA Walk and Run of GENBE-No.4 with 10 freedom legs

自然な遷移を繰り返す、いわゆる、非線形力学におけるリミットサイクル・アトラクターである。歩行のピッチ周期も振幅（歩幅）もほぼ周期的であるが、関節（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するが、それゆえに、予期せぬ外乱に対してロボスタ（頑健）であり、状況の変化に柔軟であるのが特長である^{42), 43)}。

理論的には、歩幅が一定であればピッチ速度に比例して前進速度も増すが、現実には、ピッチ速度が増すと関節（サーボモータ）のトルク

不足により脚が上がらず、歩幅も小さくなって転倒しやすい。しかし、二足ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りは、ピッチ速度が速くなって足が十分上がりきらない場合でも、常に足裏が前方に滑るかのよう走り、転倒しないでピッチ速度に比例して前方へ走る。足裏を浮かせて地面を蹴らないで移動するのが動きの特長であり、関節の負担が少ない^{42), 43)}。

5. 二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」のボレーへの展開

ナンバボレーは、「打ちたい方向に倒れ、倒れる方向に足を出す」。図7は、二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ・フォアボレー」である。図8は2つの状態図である。図9は、筆者が提案する「ナンバ・フォアボレー」である。状態1(f08)から状態2(f20)まで一瞬（この場合は約0.4秒以内）で遷移する。ボールとのタイミングをとってf18(左足は浮いている)とf20(左足が接地)の間(0.066秒間)にボールを呼び込めば、この間のラケット面の動きは少ないので、転倒力が活かされた自然で身体に負担の少ないロボスタ（頑健）で確実なインパクトになる。

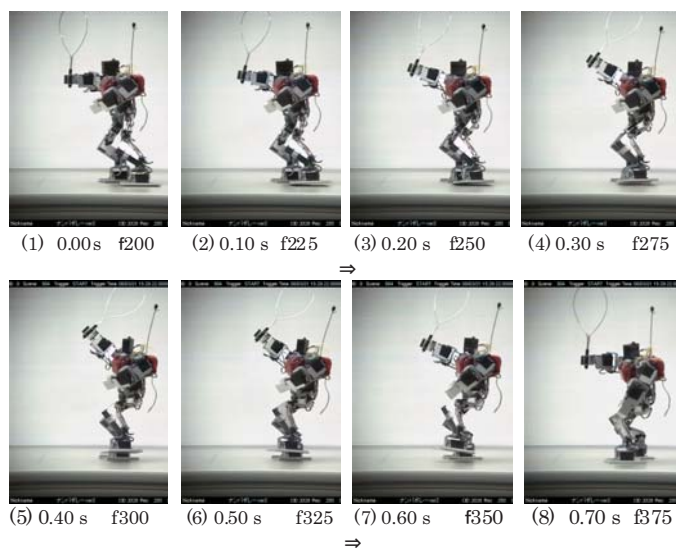


Fig.7 Robust instantaneous NANBA volley of humanoid biped robot GENBE No.4-2 based on distributed control of physical body in a martial art utilizing instability.

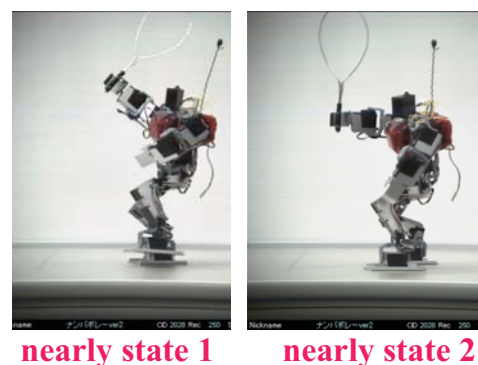


Fig.8 Fundamental two states of NANBA Volley of GENBE-No.4 with 10 freedom degrees legs.

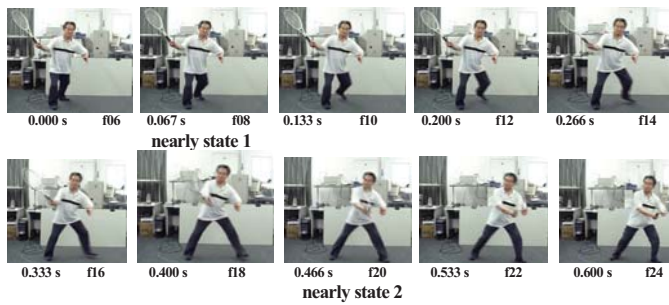


Fig.9 Robust instantaneous NANBA forehand-volley proposed by Kawazoe utilizing instability, which uses only small active power.



Fig.10 Fundamental two states of NANBA Fore-Volley proposed by Kawazoe.

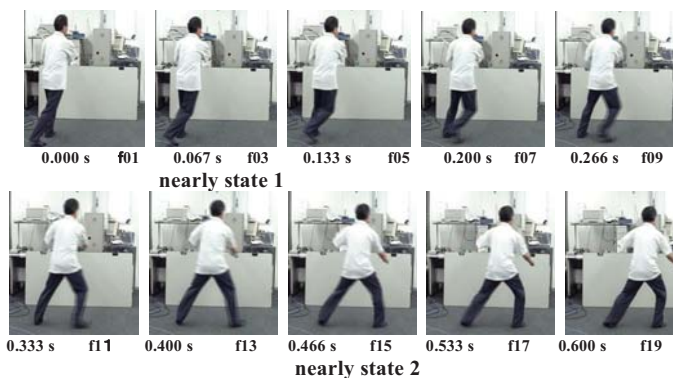


Fig.11 Robust instantaneous NANBA backhand-volley proposed by Kawazoe utilizing instability, which uses only small active power.

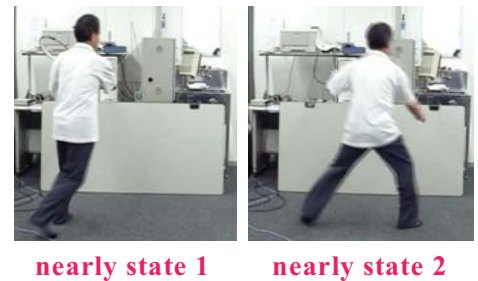


Fig.12 Fundamental two states of NANBA Back-Volley proposed by Kawazoe.

状態1は相手プレイヤーのボールの軌道や球質により決まる.状態2はどこに打ちたいかによって決まり, ボールを呼び込むタイミングだけを意識すればよい.

図11は, 筆者が提唱する「ナンバ・バックボレー」, 図12は, その2つの状態図である.

6. 二足ロボット「源兵衛」の瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」のストロークへの展開

図13は, 甲野善紀による瞬間的180度方向転換(所要時間:約0.5秒)の提示である. 図14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)に移ることにより, その場で瞬間的に右回りに180度方向転換する. 図15は実行例であり, 歩行してきた流れのまま一気に(約0.5秒で)方向転換している. 不安

定(転倒力)と足裏のすべりを利用した二足ロボットの瞬間的ナンバ・ターンである^{33),37)}.

図16は, テニスへの展開である. コート右サイドに走らされてやっとボールにラケットが届いたような状況で, 時間稼ぎにロビングを打つ

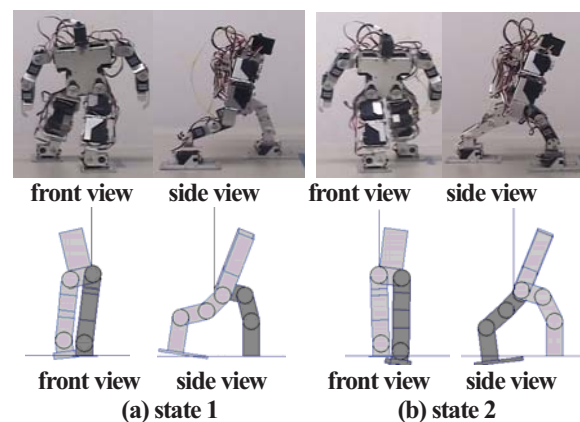


Fig.14 Fundamental two states of 180 degrees NANBA TURN.



Fig.13 NANBA Turn of Yoshinori KOHNO. It turns instantaneously 180 degrees in 0.5 seconds.

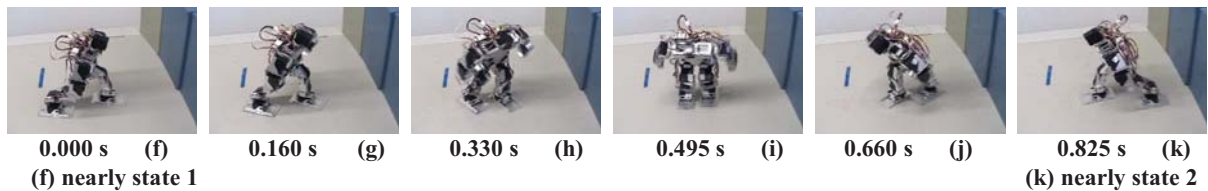


Fig.15 Robust instantaneous NANBA TURN about body axis of humanoid biped robot GENBE No.4 utilizing instability, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees in 0.7 seconds.

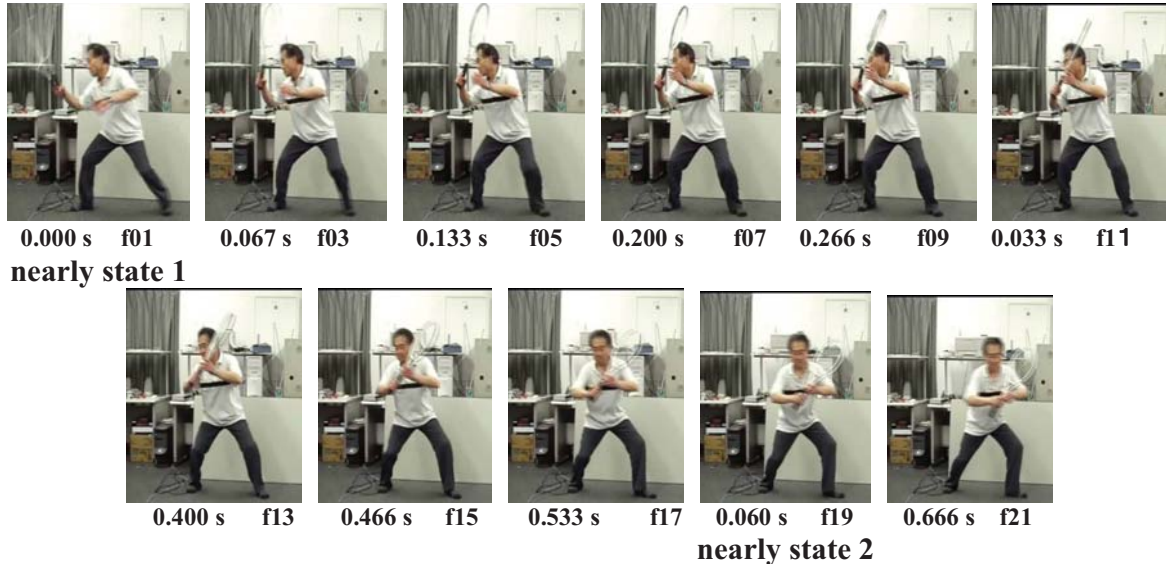


Fig.16 Robust instantaneous NANBA TURN utilizing instability, which uses only small active power. It turns instantaneously 180 degrees in 0.7 seconds.

て(空中高くボールを打つ)コート中央に戻るときに、身体を前傾させながら、両足裏を浮かせて、前右脚を後脚の形に、後左脚を前脚の形に変えると、前脚・右足裏と後脚・左足裏は同時に左に回りながら、状態1(f01)から状態2(f19)まで一瞬(こ

の場合は約0.6秒)で左回りに180度方向が変わる。

7. 速さ・威力・ロバスト性のある「ねじらない・うねらない・踏ん張らない」ストローク
図17のように転倒力を利用して状態図3から

状態図4へ一気に遷移すると速くて威力のあるスイング (0.3秒) が図18のように生まれる. 腰を捻らないで足裏のすべりを利用するナンバ・バックハンド・ストロークであり, ナンバ・ターンの応用である.

図19は, 世界のトッププレーヤー Roger Federer 選手のフォアハンドストロークの3次元映像解析である. 捻らない, 地面を蹴らない動きが見える.

図20は筆者の従来のフォアハンドであり, 図21(a),(b)は (習熟していないが) 筆者が提案するナンバ・フォアハンドの2つのプロトタイプ例である. 図22(a), (b)はそれぞれ図21(a), (b)

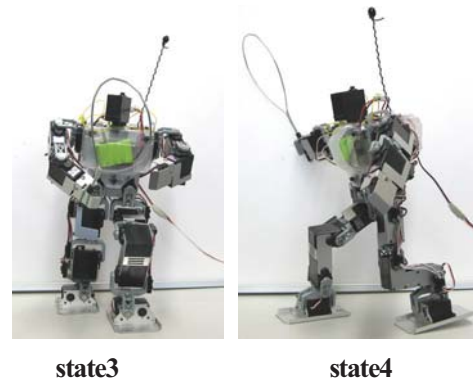


Fig.17 Two states for robust instantaneous NANBA backhand-stroke of humanoid biped robot GENBE utilizing instability, which uses only small active power. (250 fps)

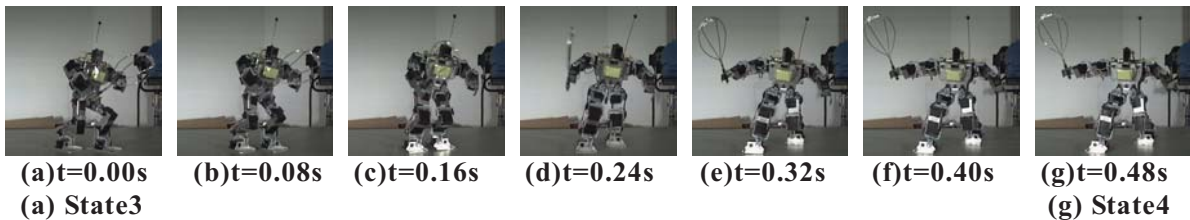
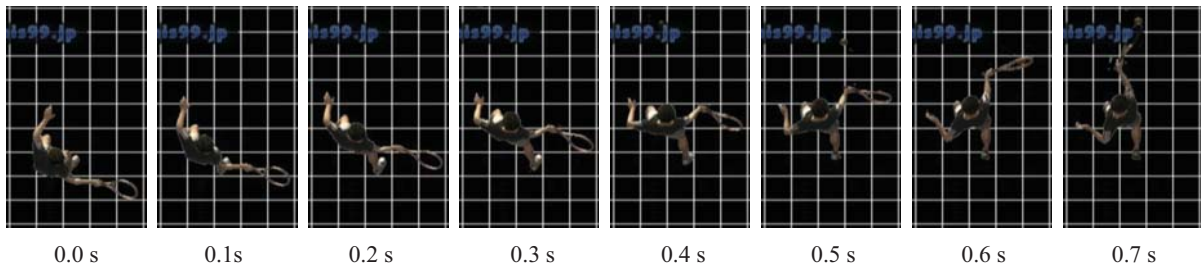
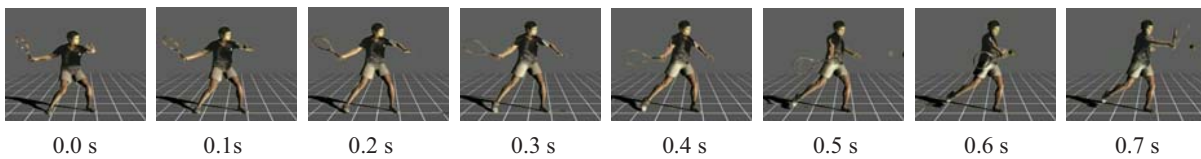


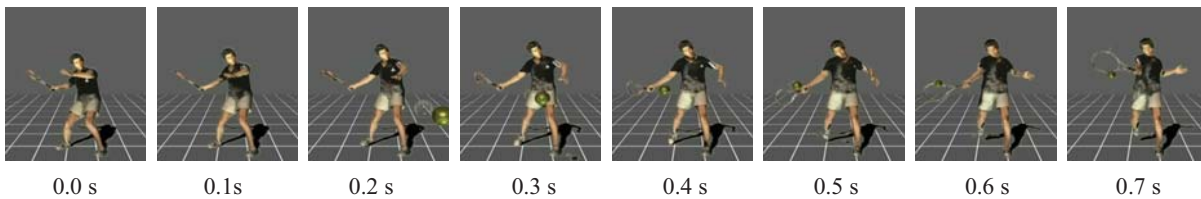
Fig.18 Robust instantaneous NANBA backhand-stroke of humanoid biped robot GENBE utilizing instability, which uses only small active power. (250 fps)



(a) 3Dimensional CG time historical framestop view



(b) 3Dimensional CG time historical frameside view



(c) 3Dimensional CG time historical frames : front view

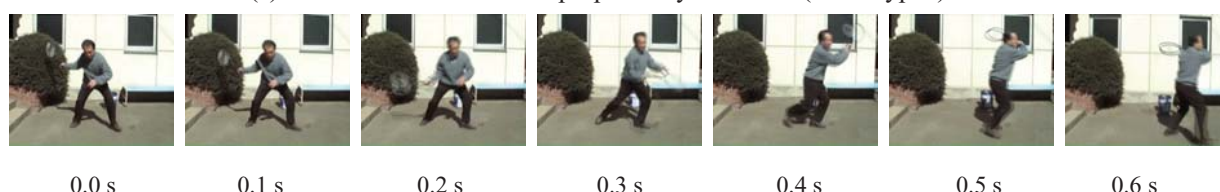
Fig.19 Three dimensional analysis of forehand strokes by top-pro Roger Federer.



Fig.20 Conventional forehand-stroke by KAWAZOE.

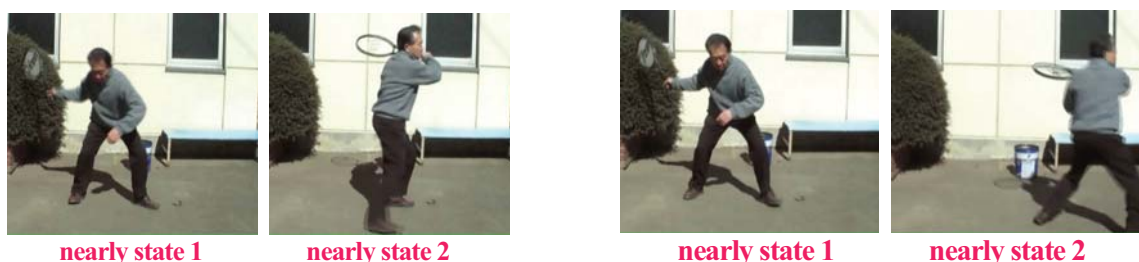


(a) NANBA forehand stroke proposed by Kawazoe (Proto-type1)



(b) NANBA forehand stroke proposed by Kawazoe (Proto-type 2)

Fig.21 Robust instantaneous NANBA forehand-stroke utilizing instability, which uses only small active power.



(a) (Proto-type1)

(b) (Proto-type 2)

Fig.22 Fundamental two states of NANBA Forehand strokes proposed by Kawazoe.

2つの状態図である。プロトタイプ1はラリーなどにおける標準的なショット、プロトタイプ2は、ポイントをとることをねらった時間的余裕があるときのショットを想定している。両者とも身体全体を同時並列的に動かすことにより緊張した場面でも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は相手プレイ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。

8. 結論

生体（人間・動物）に似た運動機能を持つもの、あるいは運動機能に加えて知的機能を備え

ているものというのが最も基本的で本質的なロボットの定義である。

本論文では、不安定を利用するシンプルな非線形最適制御を二足歩行から始める実践ロボット教育カリキュラムに展開するために、関節への負担が少ない「ねじらない、うねらない、踏ん張らない」という動きのイメージとして「ナンバ」という用語を使い、ロボットによる俊敏・ロバストなテニスの動きへの応用を試みた。

ねじらない・うねらない・踏ん張らない「ナンバ・テニス」は、関節に負担が少なく、省エネルギーであり、テニスの経験を重ねる（ボールのはずみや回転などの性質を学ぶ）ことにより誰でも自然に少しずつ習熟していく極めてシンプルな原理であり、インパクトを点ではなく領

域として捉えるので、ボールに当てるという意識が少なく、プレッシャーのかかるような状況で特に威力を発揮するはずである。二足歩行ロボットに適用した不安定を利用する状態遷移による非線形最適制御がロバスタなテニスの動きにも適用できることを示した。

おわりに、動きの解析のための撮影を長年にわたって快く許可いただいている古武術研究者（神戸女学院客員教授）・甲野善紀氏および西武池袋コミュニティ・カレッジ・若杉泰介氏に厚くお礼申し上げる。本研究に動機と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。また、熱心な協力を頂いた研究室の伊倉良明・筋野駿介・興水裕矢・原昌彦・武田幸宏・中川慎理・高橋浩太郎・高橋宏和・石川周作・石川恵介ほかの諸君にも深く感謝する。

文 献

- 1) 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).
- 2) Brooks,R.A.,Intelligence without representation, Artificial Intelligence, Vol.47, (1991), pp.139 -159.
- 3) Gomi, T, Impact of Non-Cartesianism on Software Engineering, Evolutionary Robotics ER'98, AAI Books, Ontario, Canada, 1998, pp.487-519.
- 4) 五味隆志, 知的移動ロボット: 知能の新しい見方, ロボットの新たな役割, Evolutionary Robotics ER'98, AAI Books, Ontario, Canada, 1998, pp.427-454.
- 5) 川副嘉彦, 複雑系としての人間の巧みさと自律ロボットの知性の発現, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集, pp.171-172, (2002).
- 6) 川副嘉彦, 知能ロボットの知性の創発 (第 1 報, 複雑系としての人間の行為・運動の巧みさとサブサンクション・アーキテクチャ), 埼玉工業大学紀要, 第 11&12 号, pp.9-19, (2002)
- 7) 川副嘉彦, 知能ロボットの知性の創発 (第 2 報, SA を用いた行動型移動ロボットの自律走行の発現), 埼玉工業大学紀要, 第 11&12 号, pp.21-31, (2002)
- 8) 川副嘉彦, 人間の巧みさの発現と包摂構造 (スポーツにおける巧みさへのアプローチ), 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, (2003).
- 9) 川副嘉彦, 知能ロボットの知性の創発 (生き物・人間の巧みさと包摂構造からのアプローチ), 埼玉工業大学工学部紀要, 第 13 号, pp.13-23, (2003)
- 10) 川副嘉彦, 学習の包摂構造化による知能ロボットの知性の創発と人間の巧みさの発現, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集, pp.169-170, (2004).
- 11) 梅谷陽二, RSJ-黎明期から今日まで, 日本ロボット学会誌, 20-6, (2002), pp.566- 567.
- 12) 有本卓, ロボティクスは先端科学技術になりうるか, 日本ロボット学会誌, 20-6, (2002), pp.569-570.
- 13) 広瀬茂男, 大衆工学としてのロボット, 日本ロボット学会誌, 21-2, (2003), pp.138-140.
- 14) 國吉康夫, ロボットの知能-創発実体主義の挑戦-, 計測と制御, 42-6, (2003), pp.497-503.
- 15) 井上博允・加賀美 聡, ロボットの知能とシステム統合, 日本ロボット学会誌, 20-5,(2004), pp.4642- 469.
- 16)井上博允, 人間型ロボットが拓く未来社会と新産業の創成, 日本ロボット学会誌, 22-1,(2004), pp.2-5.
- 17)比留川博久, 人間型ロボットの近未来応用, 日本ロボット学会誌, 22-1,(2004), pp.6-9.
- 18) 星野力, 『日本のロボット研究って変ですね』, 情報処理学会誌「情報処理」, 41-3 , (2000)
- 19)ソニー,研究所設立へ:考えるロボット 脳科学で開発, 2004/03/14, 朝日新聞.

- 20) 川副嘉彦, 21世紀のロボットと人間の知性のあり方(学習の包摂構造化による巧みさの発達), 第3回21世紀連合シンポジウム—科学技術と人間—抄録集, pp.15-16. (2004)
- 21) 川副嘉彦, 知能ロボットの知性の創発(学習の包摂構造化と巧みさの発達) 埼玉工業大学工学部紀要, 第14号, pp.3-16, (2004).
- 22) 藤田雅博, 知能ロボットにおける技術統合: 行動制御アーキテクチャとインテリジェンスダイナミクス, 計測と制御, 44-10, (2005), pp.729-734.
- 23) 室山哲也, ロボットシティへの質問, 日本ロボット学会誌, 22-7, (2004), pp.853-855.
- 24) 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巻4号, (2009), pp.369.
- 25) 梶田秀司, 倒立振り子から2足歩行へ—制御理論とZMP—, 日本ロボット学会誌, 27巻4号, (2009), pp.392-395.
- 26) 丸山淳一・松原崇亮・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巻5号, (2009), pp.527-537.
- 27) Napoleon Nazir・中浦茂樹・三平満司, 人間型ロボットのZMPフィードバック制御における制御性能の限界, 日本ロボット学会誌, Vo.22, No.5, (2004), pp.656-665.
- 28) 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中集, 70-700(C), (2004), pp.3509-3515.
- 29) 森政弘, ロボコンの人間教育的意義, 日本ロボット学会誌, Vo.27, No.9, (2009), pp.964-966.
- 30) 森政弘, 談話: ロボット工学の開拓者, 日本ロボット学会誌, Vo.27, No.9, (2009), pp.1001-1004.
- 31) 川副嘉彦, ねじらない・うねらない・ためない「ナンバ・テニス」の研究, テニスの科学, 第16巻, (2008), pp.24-27.
- 32) 川副嘉彦・南雲貴志・伊能新一・鈴木一彰, 古の身体操縦に学ぶ人間型二足歩行ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの発現, 第9回運動と振動の制御シンポジウム論文集, 日本機械学会, (2005), pp.514-519.
- 33) 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, Dynamics and Design Conference 2006 CD-ROM論文集560, 日本機械学会, (2006), pp.1-6.
- 34) 川副嘉彦, 不安定を利用する人間型二足ロボット「源兵衛」に学ぶ関節に負担の少ない身体操法, 福祉工学シンポジウム2006, (2006), pp.301-304.
- 35) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた(第1報, 古の身体操法に学ぶ人間型二足ロボット「源兵衛」のナンバ歩き・ナンバ走りの発現), 埼玉工業大学工学部紀要, 第15号, pp.11-23, (2005)
- 36) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた(第2報, 人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏・柔軟・ロバスト性のメカニズム), 埼玉工業大学工学部紀要, 第15号, pp.25-32. (2005)
- 37) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた(不安定を利用した二足ロボット源兵衛の瞬間的方向転換「ナンバ・ターン」の発現), 埼玉工業大学工学部紀要, 第16号, pp.3-11, (2006)
- 38) 川副嘉彦, 自然・生き物・ヒトと共存するロボットのありかた(不安定を利用した自律型二足ロボット源兵衛の瞬間的転倒衝撃回避と起き上がり), 埼玉工業大学工学部紀要, 第16号, pp.13-20, (2006)
- 39) 川副嘉彦, 古の身体操法に学ぶ人間とロボットの動きの原理(人間型二足歩行ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」から階段登り降りへの展開), 埼玉工業大学工学部紀要, 第17号, (2007), pp.9-18.
- 40) 川副嘉彦, 人間型二足歩行ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」から「超高速ナンバ走り」への展開, 埼玉工業大学工学部紀要, 第17号, (2007), pp.19-29.

- 41) 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, 日本機械学会, pp.166-169.
- 42) 川副嘉彦, 人間型二足歩行ロボット「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, 埼玉工業大学工学部紀要, 第 18 号, (2008), pp.29 - 41.
- 43) 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, (2008), pp.23-33.
- 44) オルデンバーガー, 自動制御, 3, 2 (1956) p.69.
- 45) 高橋安人, 自動制御工学, 岩波書店, (1965), pp.139-140.