

古の身体操縦に学ぶ人間型二足歩行ロボット「源兵衛」の開発 (ナンバ歩き・ナンバ走り・旋回の自立歩行から自律歩行への展開)

川副 嘉彦 (埼玉工業大学・工学部)

1. 研究の背景と目的

1.1 21世紀のロボットと人間の知性のあり方

宇宙や海底や生き物の世界で働くロボットには大量生産時代の産業用ロボットの開発手法は通用しない。ロボットにも設計者にも適応性・柔軟性が求められる。生き物やヒトの巧みさの発達を包摂構造の観点から吟味すると、現在展開されている知能ロボット開発における本質的な欠陥のブレークスルーには、生き物・ヒトの世界で働くロボットは生き物・ヒトの巧みさの発達に学ぶしかない[1]-[21]。

1.2 生き物とヒトの知性はどのように生まれるか

地球の歴史は46億年、単細胞生物が出現したのが35億年前、単細胞から昆虫に進化するのに30億年、昆虫から人類に達するのに5億年。人類が農耕を始めたのが約2万年前、文字を書くようになったのが5千年前、専門的知識を所有するようになったのは数百年前だとブルックスは指摘している[2][10]。

ダーウィンの観察によると、ミミズの穴ふさぎ、モグラの穴掘りは巧みである。モグラは、頭を絶えず左右に動かして石や土の硬さを感じるとその反対側へ、湿っている方向があればその方向に、向きを変える。時々穴掘りを中断して重力感覚で下の方を確かめてもっと深い穴を掘り始める[8][22]。浅いプールで泳ぎを覚えたアザラシは海では溺れてしまう。アザラシの泳ぎと犬かきとは質が異なるのである[20][23]。

上泉新陰流についての前田[24]の考察は鋭い。「スポーツ選手の頂点は、残酷なほど若い時にやってくる」。「ほんとうに上達する技とは、年齢の積み重なりによってのみ少しずつ可能となってくるような技術である」。「深まるものは、量ではなく、質以外にない。最初にその質が植え付けられていない限り、上達の過程は始まりようがない。故に、基本と極意とは、まったく同質のものでなくてはならない」。怖いトンカツ屋のオヤジ、宮大工の棟梁、絵画の巨匠、エンデの童話「モモ」の道路掃除夫ベッポじいさん、ダンサー・山田うん、シンクロ・井村コーチにも同じような構造が見える[20][21]。

野球の達人・イチロー選手は次のように言う。「やるべきことを一つ一つ積みあげていくと、そうしようと思わなくても、結果は出てくる」。日本における1994年の大記録210安打の翌年、彼はさらに本塁打と打点を飛躍的に伸ばした。大リーグ2年目の開幕戦2試合のヒットは、いずれも「追い込まれて」から打った「決して綺麗ではない」ヒットだったという。「一喜一憂はまわりがすること、僕がすることじゃない」。4年目を迎えた開幕1週間前に、「練習でできることはもう終わっている、これから1週間練習しても同じ。あとはゲーム」。結果は歴史を塗り替えるほどの活躍であった。「特別な目的は持たないが、こういう場所に来れば見えてくるものがある」。大リーグ・オールスターで語ったイチロー選手の場の哲学である。21世紀の知性のあり方を極めつつあるように見える[8][20][21]。

1.3 知能ロボットの壁

ホンダのASIMOとソニーのQRIOが知能ロボットとして良く知られている。ASIMOはきわめて高度な機械である。しかし、オペレータによる遠隔操縦であり、自律型ではない[20][21]。QRIOは、産業用ロボットや実装技術の集大成であり、絶妙・複雑なバランス制御で成り立っている。

しかし、たとえば実環境の変化に対応してスペックをひとつ変えるだけで、全体のバランスは簡単に崩れてしまう[20][21]。これらのロボットが、知的に見えても、オペレータなしでは動けないのはこの理由による。

多くの時間と経費を湯水のように費やして産官学の大規模プロジェクトとして展開されつつある最先端の知能ロボットでさえ、現状では、その行動はヨチヨチ歩きの赤ちゃんレベルであり、赤ちゃんに幾何学や物理学の知識を詰め込むような開発スタイルが依然として展開されている。生き物や人間の住む現実世界で本当に知的に動くロボットには生き物のような適応性・柔軟性が求められるが、現在の延長線上では実現しそうなことが開発に実際に取り組んできた研究者だけではなく一般にも次第に認識され始めた[10][25]。小成は大成を妨げる最大の要素でもある。量ではなく質の進展が求められる。

1.4 生き物のように知的に動くロボットはどのようにして生まれるか

作業の精度、速度、効率を追求す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。しかし、このような直列方式の頭でっかちロボットは、人間の住む実世界では、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]。

養老によると[20][21][26]、”システムとは「意識」によってつくられた世界である。(現代は)すべてを「システム」化、すなわち「自動化」しようとする。「自動化」をすすめているのは「意識」である。しかし、ヒトも身体も「自然」である。「自然」のすべてを「意識化」することはできない。”したがって、「自然」は技術者の最も苦しい対象になる。技術者が設計したロボットは、「自然」によって妨害される。ロボットにとって人間社会は未知の環境(自然)である。自然を知らない技術者が設計した回転ドアはいつでも事故が起こりうる。

一方、ブルックスが提唱したサブサンプション・アーキテクチャ(包摂構造)をもつ行動型ロボットは、要素行動と呼ばれる単純なモジュールを並列的に積み上げていき、次第に能力が向上していく。上位レベルの行動が失敗しても、下位レベルの行動が実行され、致命的な失敗を防ぐ[1]-[10]。

前報までに、従来のモデル・ベースト・ロボットの現実環境における本質的な欠陥のブレークスルーのために、ヒトの巧みさと巧みさの発達を包摂構造の観点から吟味し、ロボットにとって刻々変化する危険に満ちた実環境(現場)では、外界のモデル化は非現実的であり、従来のリアルタイムでの学習はすぐに破綻してしまうこと[5]-[9]、実環境(現場)で遭遇した課題を試行錯誤により学習(練習)し、その結果を要素行動として積み上げていくようなロボット開発のスタイルを提案した[10][20][21]。

1.5 本研究の目的

本研究では、これまでに蓄積してきた自律型移動ロボットにおける包摂構造化による知性の創発の技術[5]-[10]を自律型二足歩行ロボットに展開し、ロボットにとって人間や自動車などの動的障害物の存在する危険に満ちた未知の実験環境での俊敏な自律歩行・走行をめざす。本研究の

直立二足歩行ロボットは、ホンダやソニーのロボット、あるいは産官学の大規模プロジェクトによるヒューマノイド HRP-2 の基本であるモデル・ベーストやZMP（ゼロ・モーメント・ポイント）制御とは質の異なる発想によるものであり、これらのロボットとは質の異なる俊敏で柔軟な自律歩行・走行の実現をめざす。

2. 古の身体操縦に学ぶ自立型二足歩行ロボット「源兵衛」の巧みな動きの発現(ナンバ歩き・ナンバ走り)

2.1 生き物のように柔軟に適應する巧みな歩行・走行の原理

ホンダの ASIMO とソニーの QRIO に代表される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。しかし、このように重力に逆らう歩き方は前方への推進力のブレーキとなり無駄の多い歩行法である。

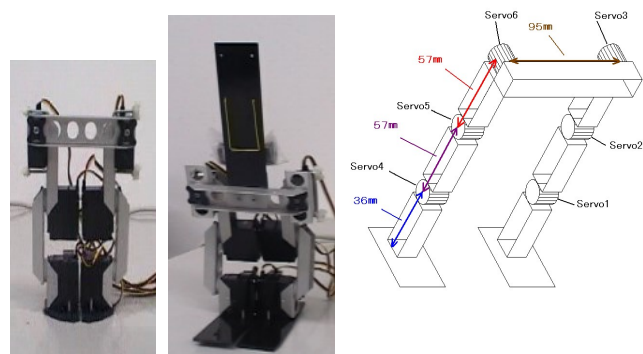
ギブソンは、行動は「姿勢」に依存しており、立位のような平衡姿勢ですら多数の微細な修正の動きからなっており、立つことは止まることではなく、倒れないための「不安定幅」の持続であり、「姿勢」の止まらないという性質が、身体に動きをもたらすと述べている[8]-[9]。従来の機械制御は、たとえば台車上の倒立棒を安定化制御するとき常に目標値に近づけようとする。しかし、人間オペレータは、倒立棒を倒さないように有限振幅の制御をする。不安定で非線形な倒立棒系と非線形な人間系との相互作用により獲得された（発現した）いわゆるリミットサイクルである。倒立棒はほとんど垂直には立っておらず、常にゆれている。コンピュータ制御実験によると、線形的には不安定であるリミットサイクルの揺らぎのある不規則な動きは予期せぬ外乱に対してロボスト（頑健）であった[27]-[29]。リミットサイクルは軌道安定だから過渡的な外乱にロボストであり、構造安定でもあるから、状況の変化に応じた運動の変化が起こりうる[30]-[33]。これが人間の立位あるいは歩行が外乱に対して強いロボスト性をもつ理由であり、柔軟な制御の生成に対応する[27]-[29]。

古武術は古人が命がけの対決を通じて培った適應性のある柔軟な動作が基本であり、「捻らない、うねらない、踏ん張らない」というのが特長である[23]。ナンバ歩きは

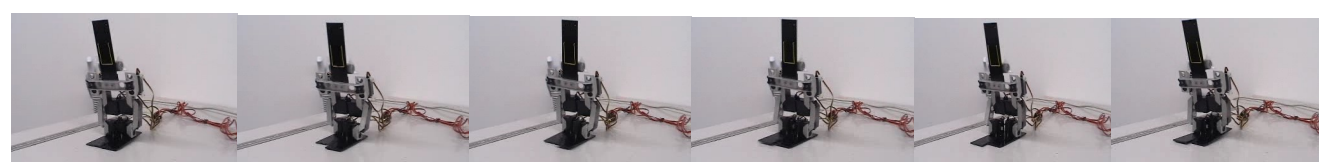
古武術の足の運びに見られる。足を踏ん張らない、体をひねらない、体を前に投げ出す、というのが特長である。「足の裏で踏ん張らない、転倒力を利用する、着地位置は気にしない」という従来とは逆の発想を基本としたロボストで柔軟な動きをする自立型二足歩行ロボットのサブサンプリング的な開発方法を以下に述べる。自立から自律への展開については、第3章に述べる。

2.2 自立型二足歩行ロボット「源兵衛」のサブサンプリング的開発

サーボモータ Hitec 社製 HS-422（トルク 3.3 kg/cm）を用いたアームロボット Rascal (Advanced Design Inc. 製) を転用して簡単な構造の6自由度ロボット「源兵衛1号」(図1(a))を製作し、歩行実験を開始した。付属のサーボコントローラ・ソフトによって、パソコンで作成した命令をサーボモータに転送することにより巧みな歩行の実現を試みた。上体を模擬して脚部の上に重量を付加したのが「源兵衛2号」(図1(b), 身長 300 mm, 体重 550g, 足の幅 36 mm, 長さ 120 mm)である。全体の重心が上へと移行したことにより、「転倒力を利用する」効果が大きく、前進速度が増す。ナンバ歩きの基本は、前傾姿勢を取り、自然と前に倒れていく。状態1：左脚を宙に浮いた形を作る。状態2：左脚を前脚に形作り、左前方に倒れていく体を接地して足で支える。状態3：右脚を宙に浮いた形を



(a) 源兵衛1号 (b) 源兵衛2号 (c) 脚の概略構成
図1 二足ロボット源兵衛1号、源兵衛2号と脚の概略構成



① t=0 秒 ② t=0.07 秒 ③ t=0.13 秒 ④ t=0.2 秒 ⑤ t=0.26 秒 ⑥ t=0.33 秒
図2 源兵衛2号の巧みな「ナンバ歩き」「ナンバ走り」: 身長 30 cm, 秒速 10cm(人間の身長に換算すると 時速 2km)

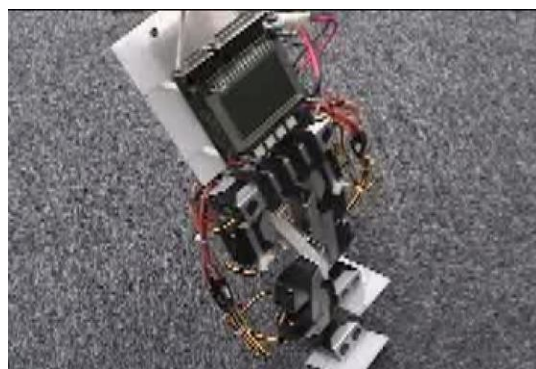


図3 自律型二足歩行ロボット「源兵衛3号」

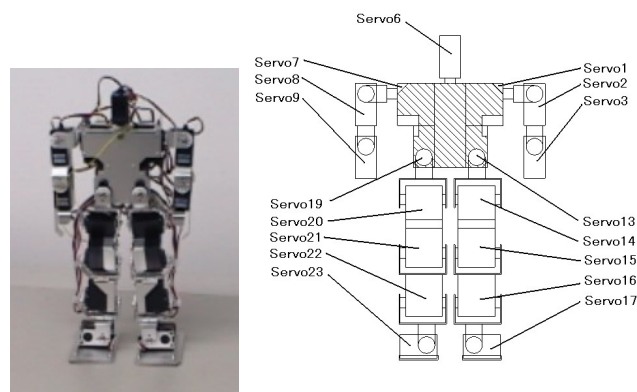
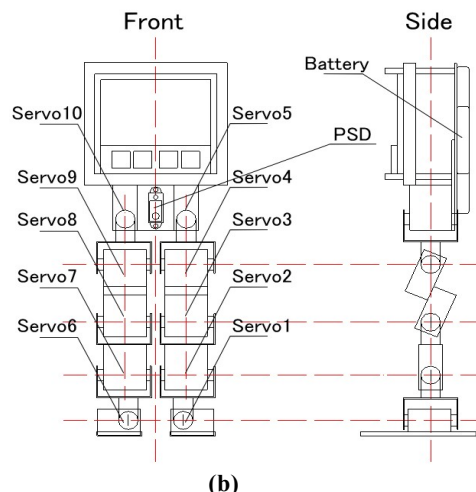
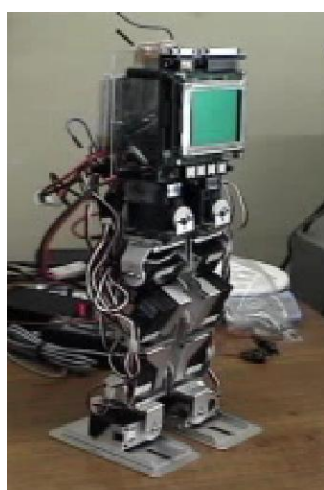


図4「源兵衛4号」(筐体 KHR-1)

作る．状態4：右脚を前脚の形に作り，右前方に倒れていく体を接地した足で支える，という四つの状態が基本である．図2は「源兵衛2号」の俊敏・巧みな「ナンバ歩き」「ナンバ走り」を示す．自在の速度での歩行が可能である．この場合の前進速度は，9.67 cm/s（人間の身長なら 時速 2km）である．「源兵衛2号」の脚部の上に頭脳と上体を兼ねてマイコン（Joker 社製 Eye-bot）を搭載したのが自律型の「源兵衛3号」（図3）である．この「源兵衛3号」は，下半身に比べて上体が重すぎて歩行・走りにおいて脚関節の負担が大きすぎて耐えられなくなった．この教訓から身体を重視して，トルクの大きいサーボを備えた近藤科学（株）製キット KHR-1 を採用したのが「源兵衛4号」（図4，筐体 KHR-1）である．源兵衛4号の脚部の上にマイコン（Eye-bot）を搭載したのが自律型・「源

兵衛5号」（図5）である．教示により学習した源兵衛4号の動きを自律型「源兵衛5号」により展開するという開発方法をとることにした．「源兵衛4号」は，二枚のポートによって17個のサーボモータを制御し，筐体のサイズは $340 \times 180 \text{ mm}$ ，脚部の長さは 210mm, 足裏 $59 \times 113 \times 1.5 \text{ mm}$ ，重量はバッテリー等を搭載して約 1.2 kg である．コントロールソフトをパソコンにインストールし，パソコン上で作成したモーションデータ（サーボ位置を表すポジションデータの集まり）をロボットのコントロールボードにダウンロードして実行させる．サーボの回転速度は8段階で設定できる．ポジションは「源兵衛2号」での“状態”に相当する．「源兵衛2号」で獲得した動きを「源兵衛4号」で展開する．次第に発達していくスタイルである．



(a)

図5 自律型二足歩行ロボット「源兵衛5号」

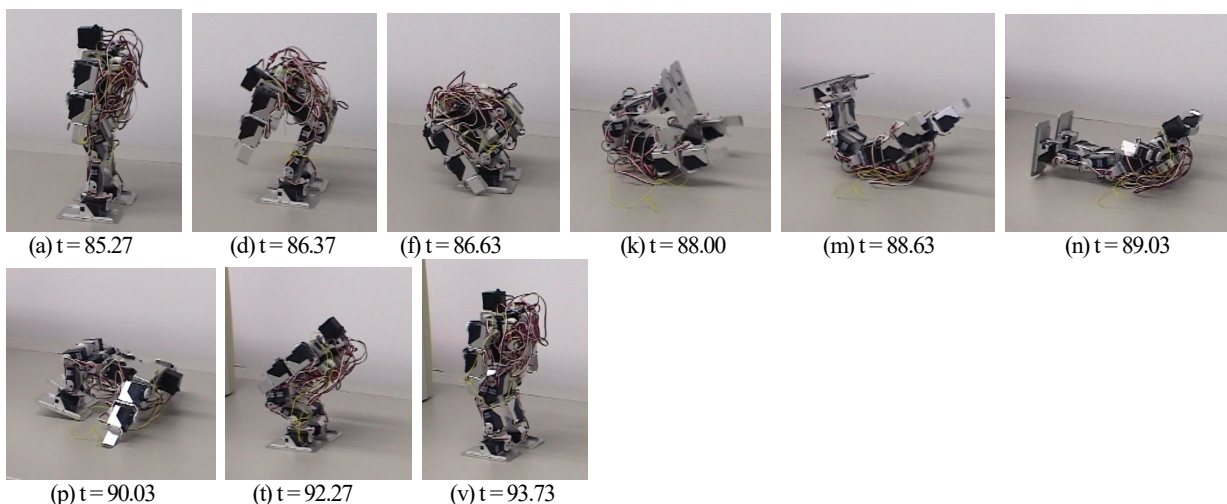


図6 源兵衛4号(筐体 KHR-1)の巧みな「前転運動」: tは経過時間で単位は秒

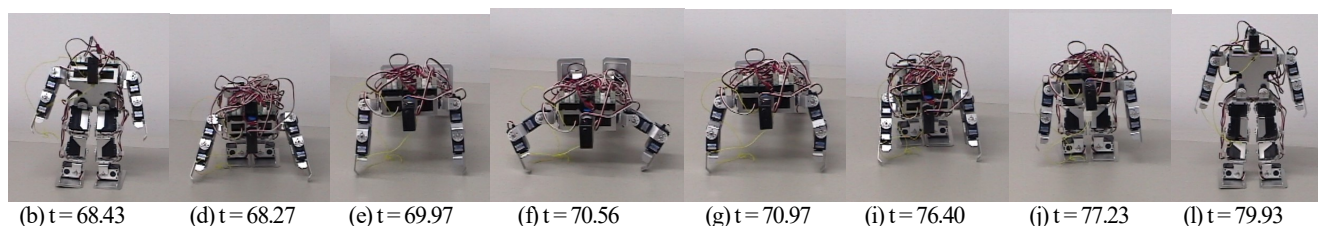


図7 「源兵衛4号」(筐体 KHR-1)の巧みな「腕立て伏せ」: tは経過時間で単位は秒

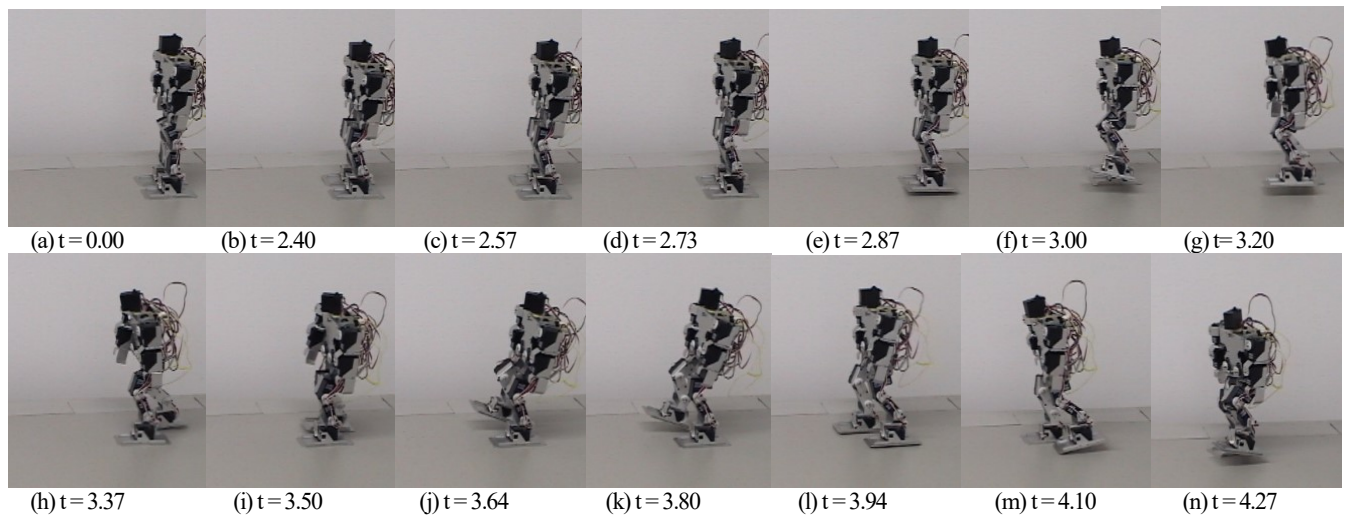


図8 「ナンバ歩き」の発現：tは経過時間で単位は秒，歩行速度は7.9 cm/s（身長170 cmの人間に換算すると1.4 km/h）

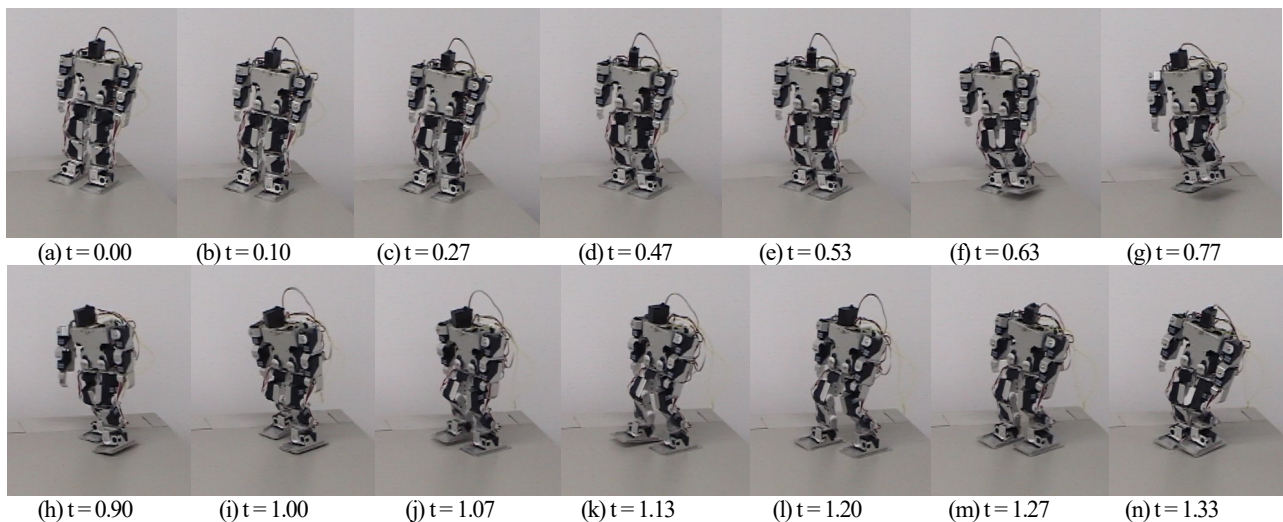


図9 「ナンバ走り」の発現：tは経過時間で単位は秒，走りの速度は15 cm/s（身長170 cmの人間に換算すると2.7 km/h）

2.3 古の身体操縦に学ぶ自立型二足ロボットの巧みな動きの発現

源兵衛4号（筐体 KHR-1）の俊敏・巧みな動きを以下に示す。図6は前転運動，図7は腕立て伏せ，図8はナンバ歩き（歩行速度：7.9cm/s，身長170 cmの人間に換算すると1.4km/h），図9はナンバ走り（14.7cm/s，身長170 cmなら2.7 km/h）である。すべてが「足の裏で踏ん張らない，転倒力を利用する，着地位置は気にしない」という巧みな動きであり，片持はり状態を作らないような関節角度の形成により巧みに体重を移動する。図8，図9は，立位から歩行あるいは走りの左右各1歩までを示すが，立位から歩行開始への移行も定常歩行あるいは定常走りから停止への移行もシンプルである。歩行の詳細は作成した開発支援ソフト Genbe Simulator を使って後述するが，重力という自然を利用したきわめてシンプルな歩行であり，ナンバ走りはありきたりの駆け足より速い。

従来のバランス歩行（ZMP）は，エネルギーを多く必要とし，アクチュエータ等に大きな負担をかけ，外的要因によって転倒しやすく，ロボастであると言い難い。本研究では，従来の歩行原理とは逆の発想により，転倒力を利用して自立型二足ロボットのロボастで巧みな「ナンバ歩き」，「ナンバ走り」を実現した。倒れる前に足を出すだけである。サーボの負担とエネルギーを大幅に低減する。

ナンバ走りの前進速度には西洋式の近代スポーツ理論に

よる腕の振りは不要である。転倒の心配に頭脳を使わなくて済めば，いろいろなタスクへの展開が見えてくる。

自律型二足歩行ロボット源兵衛の動きについては後述する。

3. 生き物のように知的な動きをする自律型二足歩行ロボット「源兵衛」の開発

3.1 ナンバ歩き・ナンバ走り・旋回の自立歩行から自律歩行への展開

従来の二足歩行型ロボットの歩行概念は，「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（ZMP:Zero Moment Point）を基本としている。すなわち慣性力や転倒力といったものを二足歩行型ロボットの制御をする上で邪魔なもの（障害）と位置づけた静バランス的な歩行概念である。しかしこのように重力に逆らうような歩き方は前方への推進力のブレーキとなり無駄の多い歩行法である。さらに，従来の二足歩行ロボットは SMPA（Sense -Model -Plan -Act）フレームに基づいたモデル・ベースト・ロボットであり，ロボастネスの欠如と開発方法が困難であるという二つの問題点を抱えている。知能ロボットとしての自律型二足歩行ロボットに期待されるのは，刻々変化する複雑な実世界での作業環境や人間社会によく適応する自律二足歩行である。このような要求に従来の自律型二足歩行ロボットの開発に採用された方法を適用する

ことは極めて困難であり、現実世界で本当に自律的に動く二足歩行ロボットは、長い間の研究にもかかわらずまだ実現されていない。

本研究では「足の裏で踏ん張らない、転倒力を利用する、着地位置は気にしない」という従来と逆の発想による自立型二足歩行ロボット「源兵衛4号」で獲得した巧みな技をベースにして、マイコンとセンサーを実装した高いロバスト性と拡張性を持つ自律型二足歩行ロボット「源兵衛5号」へとサブサンプシヨンの手法により開発を展開する。

3.2 自律型二足歩行ロボット「源兵衛」の製作

「源兵衛5号」のマイコンとしては、自律型移動ロボットの研究[5]-[10]に使用している制御用コントローラ

(CPUはモトローラ社製MC68332ACF25, 32ビット)を使用し、脚部アクチュエータには10自由度を持たせて10個のサーボモータを使用した。全高約350mm, 重量約1.1kgである。

「源兵衛5号」の二足歩行は以下の4つの要素を設定することで多様な歩行動作を生成する。①状態数, ②各状態におけるサーボモータの角度及び③回転速度, ④状態間の待ち時間。ここで言う状態とは各サーボモータに角度データを与えた後の両足の形のことを指し、この状態を組み合わせることで1つの歩行動作が生成される。

二足歩行ロボットの歩行動作ではすべての動作が一定の角速度で行なわれることはなく、サーボモータごとに違った角速度を設定する必要がある。本研究では状態ごとの角度差の分割を利用して角速度可変プログラムを開発した。分割数を増やしていけば次の状態までの時間は遅くなる。すなわち設定した分割数が実質的な角速度の設定値となる。サーボモータに異なる角速度を設定する場合には各状態の

サーボモータごとにこの分割数の値を設定すればよい。

3.3 自律型二足歩行型ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き」

図10は「駆け足」の例である。右左の各1歩を示す。

「駆け足」は、状態1: 右足を上げる、状態2: 右側に体を傾けると同時に右足を前に踏み出す、状態3: 左足を上げる、状態4: 左側に体を傾けると同時に左足を前に踏み出す、という4つをループさせることで連続的で自立した二足歩行動作を発現した。駆け足速度は約5.7cm/s(身長170cmなら1.0km/hに相当)である。図11は「ナンバ歩き」の例である。重力を意識し前方に倒れ込む力を推進力に利用できるようにした。状態1: 右足を上げる、状態2: 右側に体を傾けると同時に右足を前に踏み出す、状態3: 左足を上げる、状態4: 左側に体を傾けると同時に左足を前に踏み出す、という4つの状態を基本とする。「ナンバ歩き」では、状態1, 3において「駆け足」よりも足を高く上げており、状態2, 4で体を傾けると前方に大きく倒れ込む。また状態2, 4でのサーボモータの回転速度を遅めに設定し時間を掛けて動作しているため、しっかりと体を傾けてから次の状態へ移る。歩行速度は約6.5cm/s(身長170cmなら1.14km/hに相当)である。「ナンバ歩き」は、「駆け足」に比べて、歩行のピッチ(サーボの回転速度)は遅いが歩幅が大きいの(大股歩き)、全体的にサーボモータの回転速度を速くした「駆け足」よりも速い。動きの詳細は後述する。

3.4 自律型二足歩行ロボット「源兵衛」開発支援ソフト「Genbe Simulator」のサブサンプシヨンの開発

「源兵衛」(図12)は多自由度の二足歩行ロボットだか

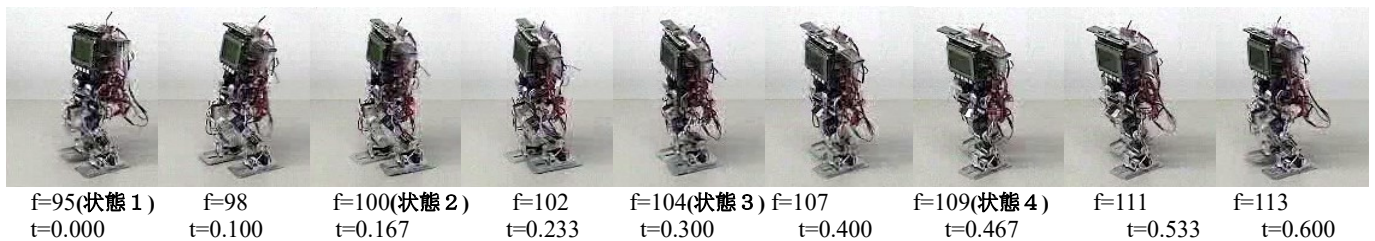


図10 自律型二足歩行型ロボット「源兵衛5号」の「駆け足」連続写真, f=フレームNo., t=経過時間(単位は秒, f=95を基準)

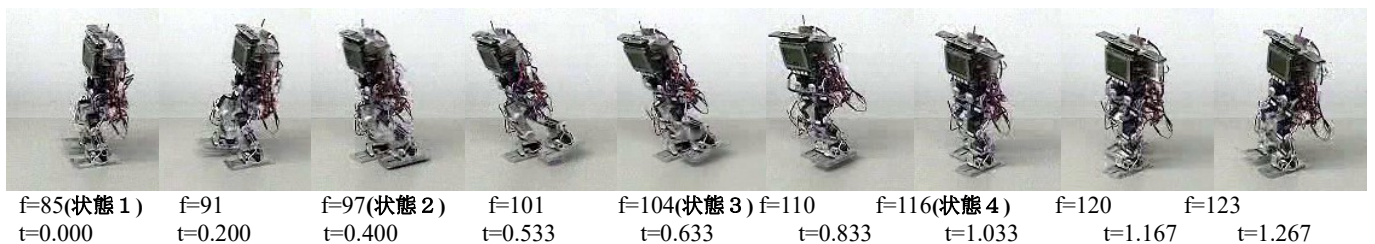


図11 「源兵衛5号」の「ナンバ歩き」連続写真, f=フレームNo., t=経過時間(単位は秒, f=85を基準)

ら動きが複雑であり、動きを直感的に予測して動作を生成したり実際の動きを分析するのは難しい。本研究では実際に源兵衛を動かす前に動作の確認をしたり、実験での動きを確認したりするために、各サーボの動きを分析できる二足歩行ロボット「源兵衛」開発支援ソフト Genbe Simulator を開発した。ロボット自身の変化(実環境)にあわせて変化できるソフトをめざしてサブサンプシヨンの開発する。すなわち、ロボットに実際に使用しながら改良を加え、常に実践に活かせるソフトの開発手法である。ロボットを動かす環境が変化した場合に柔軟に対応することができる。「源兵衛5号」では、ロボットを動かしているマイコン Eyebot のプログラムと、Genbe Simulator を構

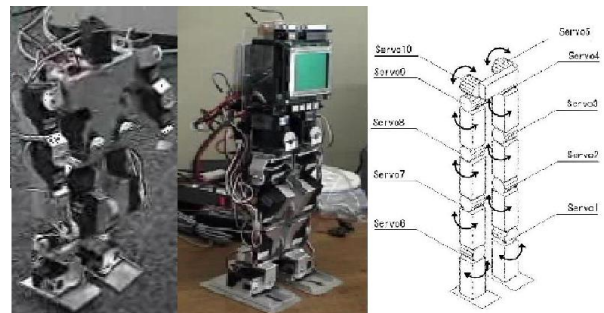


図12 源兵衛4号と源兵衛5号

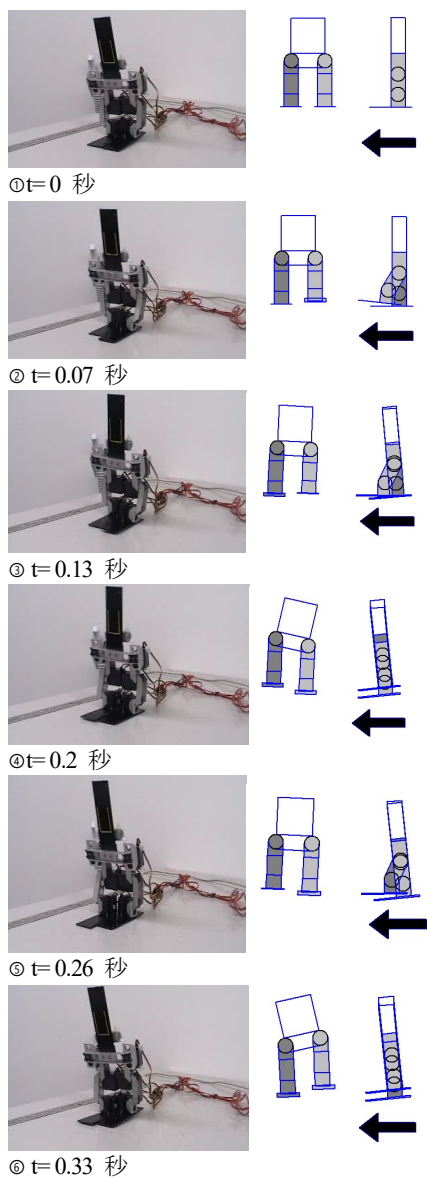


図 13 源兵衛2号の「ナンバ歩き」: 身長 30 cm, 秒速 10cm (人間の身長なら 時速 2km)

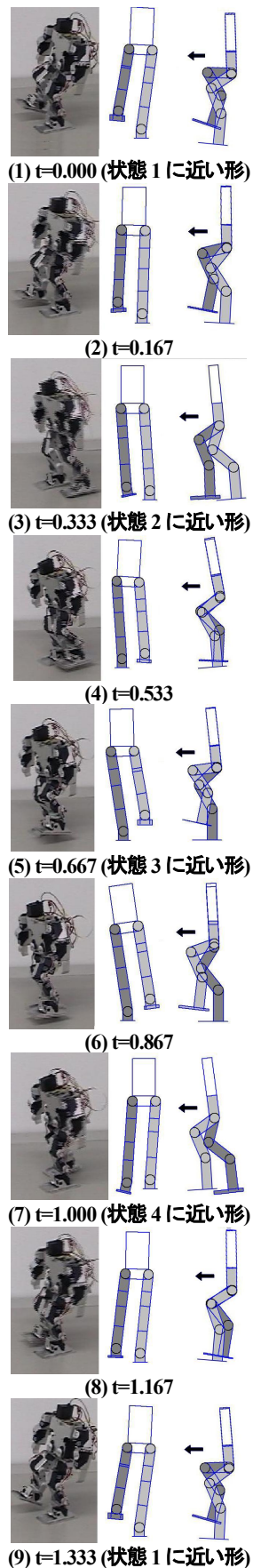


図 14 Genbe Simulator による源兵衛 4 号の「ナンバ歩き」, t は経過時間(秒), 走りの速度は 15 cm/s (人間なら 2.7 km/h)

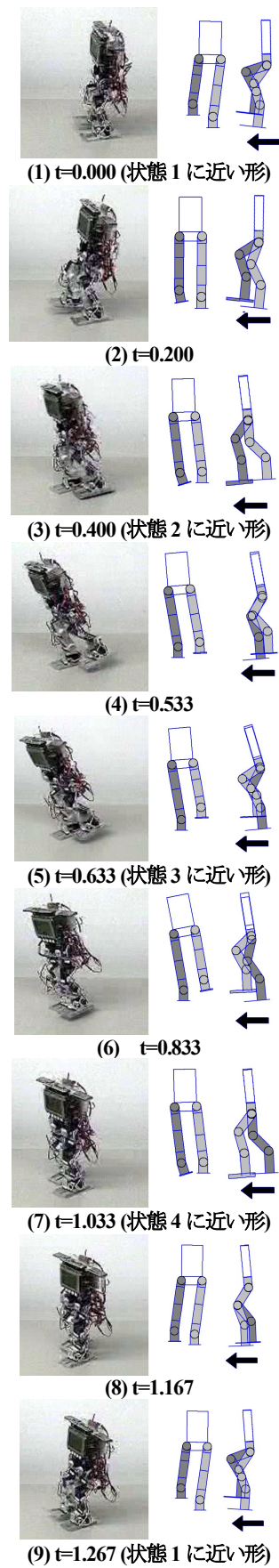


図 15 Genbe Simulator による源兵衛 5 号の「ナンバ歩き」, t は経過時間(秒), 歩行速度は約 6.5 cm/s (身長 170 cm なら 1.14 km/h に相当)

成する Genbe ServoFile Editor の Ugoki というジェネラルプロシージャ内のプログラムは、言語は異なるが、構造をほぼ同じにした。

図13は、「源兵衛 2 号」の巧みな「ナンバ歩き」の分析である。身長 30 cm、歩行速度 10cm/s（人間の身長なら時速2km）である。走るように迅速である。

3.5 Genbe Simulator による「源兵衛 4 号」と「源兵衛 5 号」の「ナンバ歩き・ナンバ走り」の分析と考察

図 14 は「源兵衛 4 号」の「ナンバ走り」、図 15 は「源兵衛 5 号」の「ナンバ歩き」の分析結果である。両図の左からビデオコマ写真、Genbe Simulator で作成した正面図（手前に前進）、側面図（左に進行）である。「ナンバ歩き」と「ナンバ走り」は脚部関節角度と歩行のピッチ（サーボ角速度）が異なるが、歩行原理は同じである。図 14 と図 15 の正面図の(3)～(5)や(7)～(9)において軸足側に体を傾けて体重を寄せ、逆足を上げやすくしている。また、(2)～(3)や(6)～(7)において前方へ出した足に体を傾かせるので、自然と重力による転倒力によって体重が前足に乗り、その足を着地させることで体が前に出ていく。片持はり状態で踏ん張らないのでサーボの負担が少ない。源兵衛 4 号と源兵衛 5 号のように筐体が異なっても巧みに適応できる歩行である。

3.6 「源兵衛 5 号」の「駆け足」と「ナンバ歩き」の分析

図 16 は、Genbe Simulator による「源兵衛 5 号」の「駆け足」の 4 つの基本状態である。各状態は以下の通りである。状態 1：右足を上げる、状態 2：右側に体を傾けると同時に右足を前に踏み出す、状態 3：左足を上げる、状態 4：左側に体を傾けると同時に左足を前に踏み出す。軸足に体重を乗せることにより上げた足を前に出しやすくし、上げた足が前に出たらその足の側に体を傾け着地させている。

「ナンバ歩き」は最初の立位の状態もしくは図 15-(7)（状態 4 に近い形）～(9)（状態 1 に近い形）の動きと(9)もしくは(1)（状態 1 に近い形）～(3)（状態 2 に近い形）の動きの組み合わせで左足を前足の形にして前進し、(3)（状態 2 に近い形）～(5)（状態 3 に近い形）への動きと(5)（状態 3 に近い形）～(7)（状態 4 に近い形）の動きの組み合わせで右足を前足の形にして前進する。

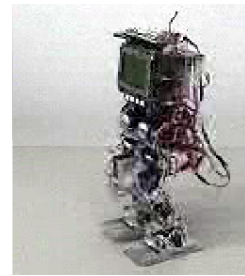
源兵衛 5 号の「駆け足」と「ナンバ歩き」の大きな違いは、「駆け足」ではサーボの角速度は常に一定に設定しているが、「ナンバ歩き」では上げた足を前足の形にする動き（図 15 - (1)～(3), (5)～(7)）の際にサーボの角速度を遅く設定している、そのためしっかりと体を前方へ傾けてから次の状態へ移ることができる。

図 17 左は、源兵衛 5 号の「ナンバ歩き」の図 15-(7)（状態 4 に近い）、図 4-(9)（状態 1 に近い）、図 15-(3)（状態 2 に近い）を重ねた軌跡であり、図 17 右は、「駆け足」の状態 4、状態 1、状態 2 を重ねた軌跡である。側面図の軌跡を比較すると、「ナンバ歩き」の方が状態 1 の時点で足を高く上げ、サーボの角速度をやや遅くしているため、足を前に出す時間が長くなり、結果としてしっかりと体重がかかり“大股”になっている。「駆け足」の軌跡は、サーボ角速度を速くしているため早く足が地に着いている。そのために、「ナンバ歩き」に比べて前方へ倒れ込む時間が短い。正面図では、「ナンバ歩き」の方が体を左右に大きく動かしている。

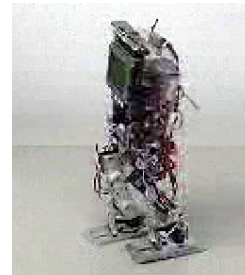
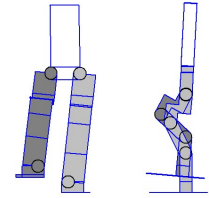
現段階では「駆け足」と「ナンバ歩き」では、大股の「ナンバ歩き」の方が移動速度は速い。「ナンバ歩き」はしっかりと体重をかけて動くため、左右の揺れが大きい、ジャイロセンサや加速度センサによる姿勢制御をしていないにもかかわらず、歩行はきわめてロバストである。

現状の「駆け足」はまだ洗練されていないので左右の揺

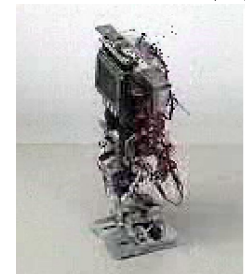
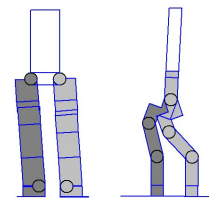
れは小さく、停止するときも姿勢制御していないにもかかわらず歩行が安定である。歩行停止のときの減速の工夫、各状態のサーボ角度の最適化、さらに足と地面の接地状況の判断、姿勢の検出や走行加速度の検出などにより、飛脚「源兵衛」のような速い駆け足や柔軟で自在な歩行・走法が実現できそうである。



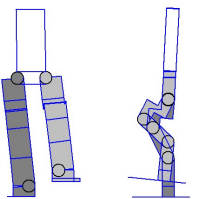
(1) 状態 1



(2) 状態 2



(3) 状態 3



(4) 状態 4

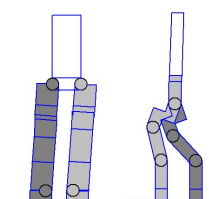
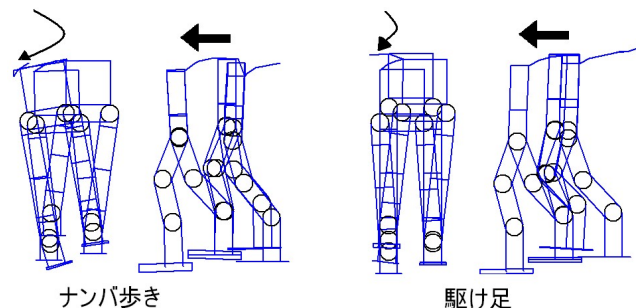


図 16 Genbe Simulator による源兵衛 5 号の「駆け足」の 4 つの基本状態の表示。駆け足速度は約 5.7cm/s（身長 170 cm なら 1.0 km/h に相当）。



ナンバ歩き

駆け足

図 17 Genbe Simulator による源兵衛 5 号の「ナンバ歩き」と「駆け足」の動きの分析

開発した自律型二足歩行ロボット「源兵衛」開発支援ソフト Genbe Simulatorにより、「足の裏で踏ん張らない、転倒力を利用する、着地位置は気にしない」という「ナンバ歩き」や「駆け足」の無駄の無い歩行が確認できた。

環境の変化に柔軟に対応することができるような自律型二足歩行ロボット「源兵衛」の進展とともに、開発支援ソフトも次第に進展できるようなサブサンプシヨの開発スタイルをとっている。

4. 自律型二足歩行ロボットの障害物回避行動の発現

本研究では処理系のロバストネスと今後の拡張性を考慮し、自律型二足歩行ロボットの開発にサブサンプシヨ

ン・アーキテクチャ (SA) を用いることにした。図 18 は、胴体中央部に障害物回避用の距離検出素子(PSD)センサを搭載し、障害物を回避している例である。障害物を検知すると Avoid (障害物回避) が発現し、右旋回を開始する。約 90° 旋回し Avoid が終了すると、また Walk に戻り前進を再開する。障害物を検知、回避しながらの自律的な二足歩行動作である。図 19 に SA による「源兵衛 5 号」の最も簡単な制御構造を示す。Walk は前進、Avoid は PSD センサにより障害物を検知し回避する。障害物を検知すると Avoid が優先され回避行動を取る。

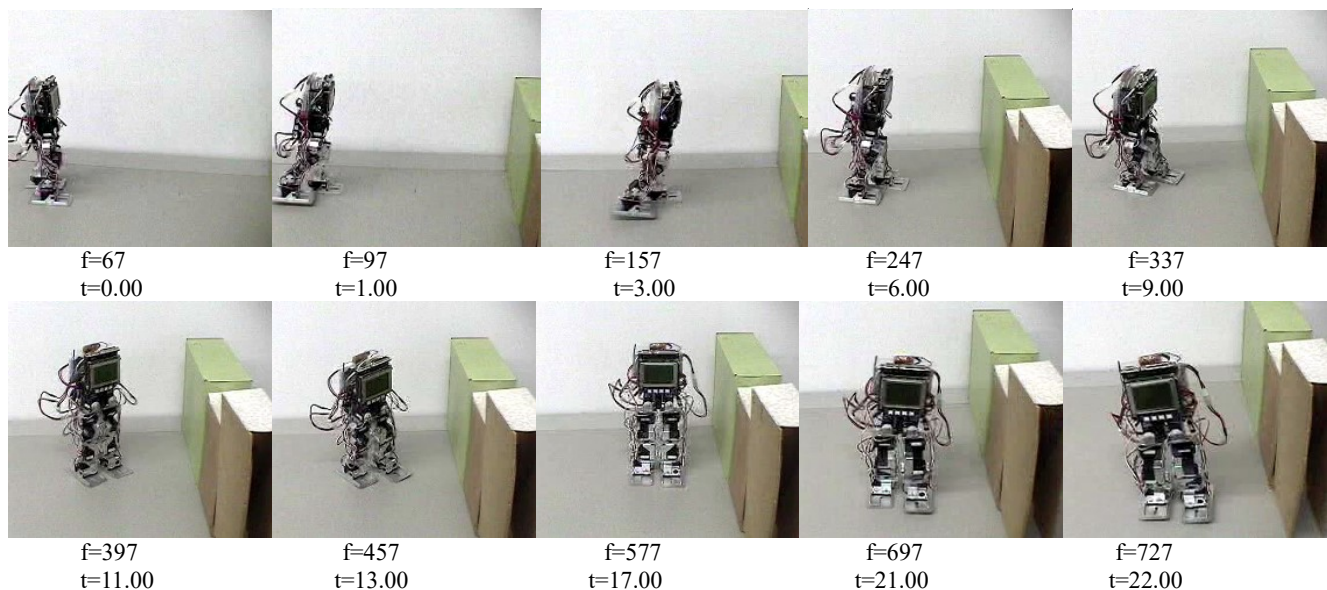


図 18 自律型二足歩行型ロボット「源兵衛 5 号」の「障害物回避」連続写真, f=フレーム No, t=経過時間(単位は秒, f=67 を基準)

5. 末続選手や飛脚の走りのような達人技をめざして

足と地面の接地状況を判断すれば、柔軟で自在な自律歩行が実現できる可能性がある。図 19 は、接地状況検知用

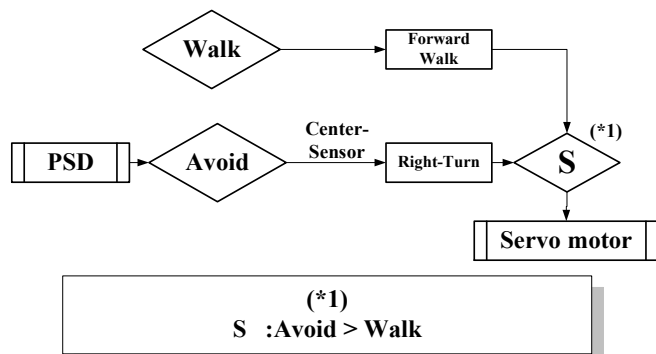


図 19 SA を用いた「源兵衛 5 号」の制御構造

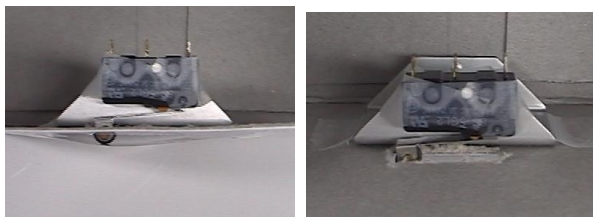


図 19 接地状況検知用に試作したタッチ・センサ (試作品)

に試作したセンサである。足の裏に穴を開けタッチ・センサ (マイクロスイッチ) の突出分を地面側に出し、着地時にセンサに無理な負担が掛からないよう少し浮かせた状態で取り付ける。飛脚のような達人技に達するには、足裏の接触センサなど各種センサを用いた SA 的な技の学習と獲得が必要である。

6. 結 論

開発した自律型二足歩行ロボット「源兵衛 5 号」は障害物を回避しながらの巧みな自律的「ナンバ歩き」を発現した。SA を採用しているので、新たな要素行動を積み上げていく高い拡張性を持ち、センサの追加などハードウェアの変更等にも柔軟に対応できる。自律移動ロボット開発 [5]-[10] の経験で蓄積してきたノウハウを活かして、衝突を検知しての回避行動や坂道や階段などの環境における歩行、転倒防止や転倒時の受け身、CCD カメラを用いた色探索など、次第に能力が向上していく形で巧みな動きの進展が期待できる。

おわりに、実験・作図にご助力いただいた埼玉工大・卒研 生 池田光雄・鈴木一彰・伊能新一・南雲貴志の諸君に厚くお礼申し上げる。なお、本研究の一部は埼玉工業大学ハイテク・リサーチ・センターの援助によって行われたことを付記する。

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プレション・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] 佐々木正人, 知性はどこに生まれるか, 講談社, (1996)
- [23] 甲野善紀, 武術の新・人間学, PHP研究所. (2002)
- [24] 甲野善紀・前田英樹, 剣の思想, 青土社, (2001)
- [25] 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.
- [26] 養老孟司, 唯脳論, 青土社, (1989)
- [27] Kawazoe Y (1992), Manual control and computer control of an inverted pendulum on a cart, Proc. of the 1st International Conf. on Motion and Vibration Control, pp.930 -935.
- [28] Kawazoe, Y., Measurement of Chaotic Behavior of Human Operator stabilizing an Inverted Pendulum and Its Fuzzy Identification from Time Series Data, J.Robotics & Mechatronics, 13-1. (2001), pp.23-29.
- [29] Kawazoe, Y., CHAOS-ENTROPY ANALYSIS AND ROBUSTNESS OF HUMAN OPERATOR'S SKILL DURING STABILIZING CONTROL OF AN INVERTED PENDULUM, 7th International Conference on Motion and Vibration Control, MOVIC '04, St. Louis, CD-ROM pp.1-10.
- [30] 川副嘉彦, 空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究 (第1報, 原因を探る諸実験), 日本機械学会論文集51-461, pp. 404- 409. (1985)
- [31] 川副嘉彦, 空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究 (第3報, 低速ハンチングの計算機シミュレーション), 日本機械学会論文集, 51-471, (1985), pp.2789-2795.
- [32] 川副嘉彦, 空気調速式圧縮点火機関の低速ハンチングに関する研究 (第9報, 非線形挙動の考察), 日本機械学会論文集, 56-523, (1990), pp.693- 699.
- [33] 多賀厳太郎, 歩行の創発, 日本ロボット学会誌, 15- 5, (1997), pp. 680- 683.