

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

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

川副 嘉彦

## 1. はじめに

### 1.1 逆風を利用して走るヨットの原理

「スポーツ選手の頂点は、残酷なほど若い時にやってくる。酷使して、あちこち壊れかかった体を残して現役を退いた時には、彼らは後進の指導とかいうもの以外、スポーツに対してもう何をしたらいいのかわからない。(中略) 私が誉めそやしたい技術は、もっと別なところで、おそらくは黙々と生きている技術である。年齢の積み重なりと強く関わり、それ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。こういう技術は、組織的にはほとんど利用することができない。利用するには、いささか手間がかかり過ぎる。待つ時間が長過ぎる。けれども、ほんとうに上達する技とは、そうした在り方しか実はしていないものではないだろうか。」という鋭い指摘がある(甲野と前田 2001)。

武術とスポーツの身体の使い方の違いについて武術研究者・甲野善紀(甲野 2004)が次のように述べている。

「たとえば、サッカーにおいて選手Aが走りぬげようとする動きを選手Bがブロックしたとき、選手Aは方向を大きく変えることになる。しかし、武術的な身体運用法を用いると全く違った展開が拓けてくる。選手Aは選手Bの当たりを利用して(逆風を利用して走るヨットの原理のように)、選手Aが行きたいと思っている方向へ運んでもらうという形をとるように出来るからである。」「このことは、一般的に知られているウェイト・トレーニング等を行って、走り込みをする、というトレーニング方法とは違った身体運用の訓練法が存在している

ことを示している。」

### 1.2 ロボットの壁

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(山本 2006)。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、結局すべてを一から作り直すことになる(Brooks 1986, 1991; Gomi 1998; 川副 2002)。

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(川副ら 2005)。

### 1.3 体を上手に使う

甲野(2006a)によると、戦前の話だが、ごく普通の体格をした山形県の鈴木みなという女性が米俵を5俵(300キロ)背負って歩いている写真があるそうだ。ものを担ぐといった単純に見える動きでも、上手に担げば、普通の人の何倍もの重さを担げるのである。「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。

### 1.4 知能にも身体が必要

ロボットの研究で有名なマサチューセッツ工科大学(MIT)のBrooksが1980年代に「人口知能にも身体が必要だ」と発表したとき、「何をばかな」と会場が騒然

KAWAZOE Yoshihiko: 埼玉工業大学工学部

Key words: 身体操法, ナンバ歩き, ナンバ走り, 人間型二足ロボット, 不安定

として発表を続けられないほど大変なブーイングだった(20年経った現在では納得する人達も増えてきたが、まだ十分には理解されていない)という話に関連して、甲野(2007)が運動と知覚の本質を次のように見事に捉えている。

「私はこの話を聞いたとき、大変感動しました。ブルックスは、物を考える能力、知能の原点の原点を説いたからです。つまり、お茶を入れたりするようなすごく単純な動作でも、茶碗の形や机の状況について、この場合は大丈夫だ、この場合は大丈夫じゃない、と(人工知能が)知らなければならぬ情報を全て一から教えるとする、無限に近いほどたくさんあることに気づいたのです。ところが、身体があれば身体ができる限界という、規定されたものが最初からあって、そこから話が始まる。規定されていれば、前提がすでにある。その前提をすべて思考で作りに出そうとしたら、キリがないということです。」

生死をかけた武術という身体操作の実践研究から生まれてくる理解力の深さに感嘆するしかない。

### 1.5 不安定が俊敏自在の動きを作る

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(たとえば、杉原と中村 2006)。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、後方からの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(川副 2006; 川副ら 2005, 2006a, 2006b, 2007a, 2007b)。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・線形制御では無理である。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。受身のでき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日で走ったと言われる伝説の飛脚「源兵衛」にちなんでいる。

人間に比べてロボットは自由度は少ないので、動きの基本原理がわかりやすい。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300 mm, 体重550 g, 図1, 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(図は省略)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。サーボモータ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」: 筐体KHR-1, 近藤科学製, 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(川副ら 2005, 2006a)。

ナンバ歩きは、ロボットの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」, 18 cm/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(甲野 2006b)。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

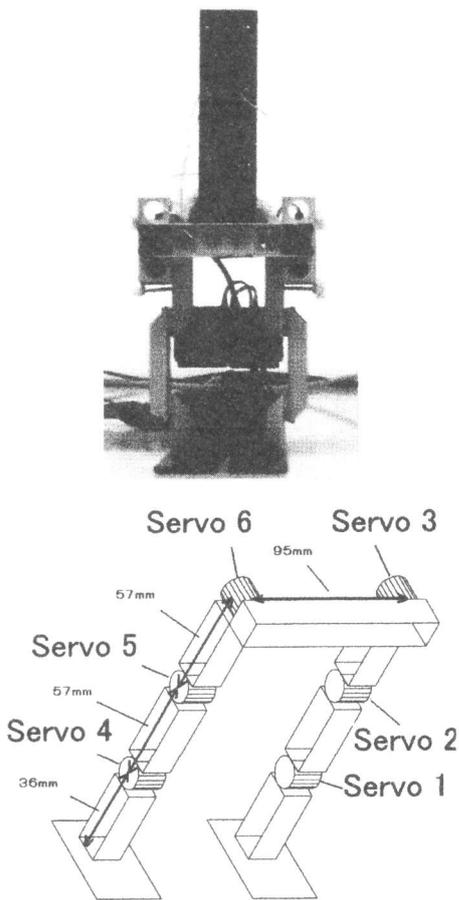


図1 人間型二足ロボット「源兵衛2号」(脚部6自由度).

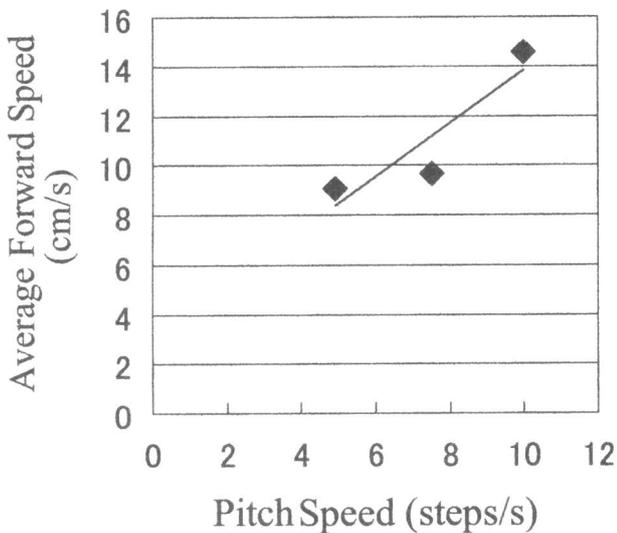


図3 二足ロボット「源兵衛2号」(脚部6関節)の前進速度とピッチ速度の関係.

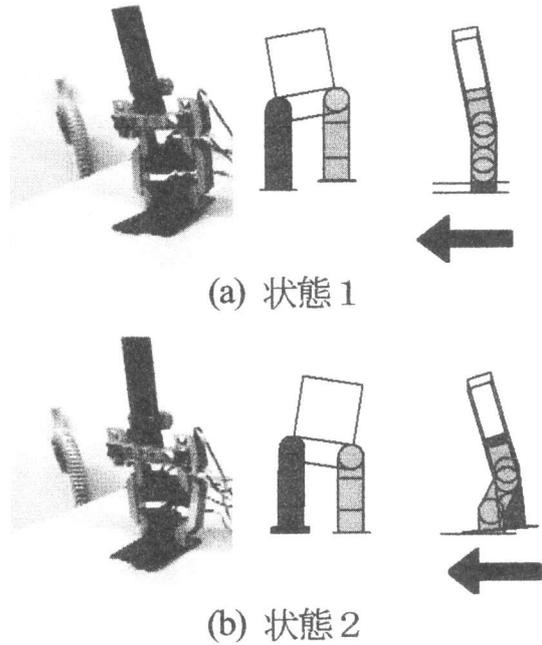


図2 二足ロボット「源兵衛2号」(脚部6関節)のナンバ歩きの基本状態図.

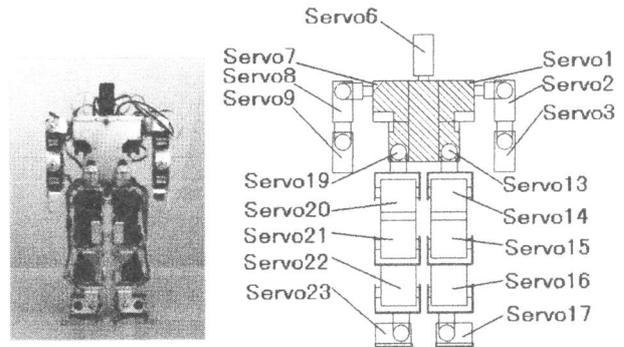


図4 人間型二足ロボット「源兵衛4号」(脚部10関節)のサーボモータ(関節)配置図.

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極めて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する不規則的なリミットサイクルであり、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(川副ら 2005)。

図8の高橋尚子選手の走りは、姿勢が自然に起きているが、前方に上体が大きく倒れ込む以上に繰り返す足のピッチが速いのであって、二足歩行ロボット「源兵衛」



(1)  $t = 0.000$  s    (3)  $t = 0.133$  s    (5)  $t = 0.266$  s    (7)  $t = 0.399$  s    (9)  $t = 0.532$  s    (11)  $t = 0.666$  s

図5 甲野善紀のナンバ的歩行・走行.

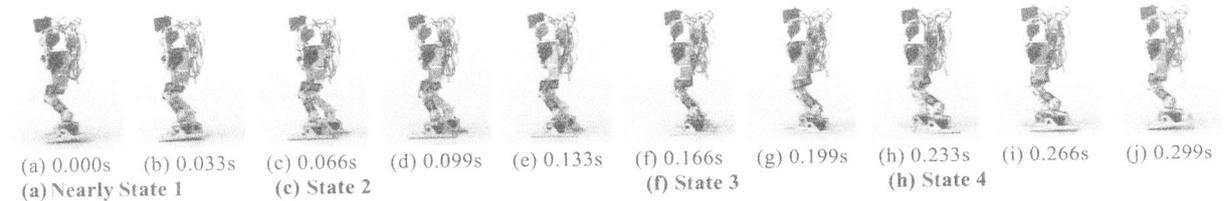


図6 人間型二足ロボット「源兵衛4号」(全高34cm)のロバストなナンバ走りの発現(前進速度:18cm/s, ピッチ速度:毎秒6歩).

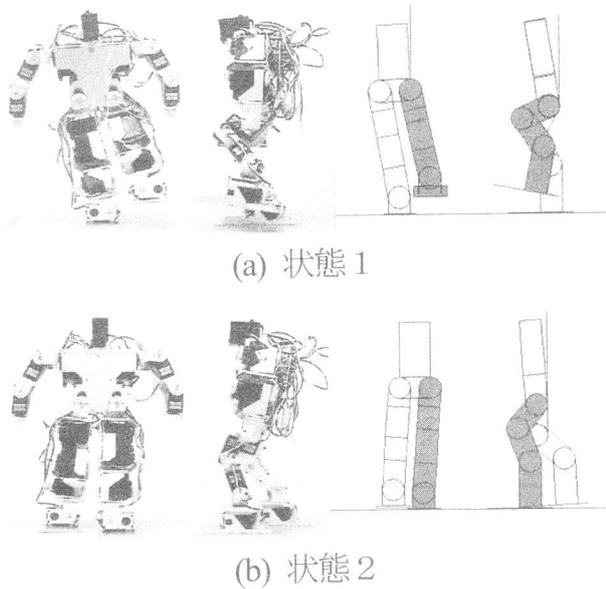
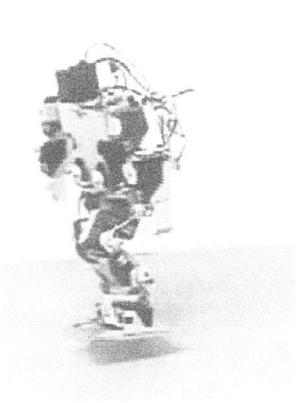
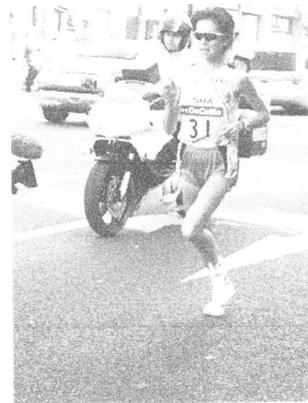


図7 人間型二足ロボット「源兵衛4号」(脚部10関節)のナンバ歩き・ナンバ走りの基本状態図.

の走りに近い(川副2006).

図9は歩行・走行速度(縦軸)と両脚のピッチ速度(横軸)の関係である. ピッチ速度が6steps/sより速くなると前進速度の伸びが鈍くなっている(▲印は後述). 図6の動き(毎秒6step)を見ると, 図7の状態図に比べて脚が十分には上がっていない.



(a) 高橋尚子    (b) 源兵衛4号

図8 ナンバ走りの姿勢.

表1は, 「源兵衛4号」の各設定動作時間 Time Setting (speed)での腕の振り上げ動作におけるサーボモータの実際の動作時間, 最大動作角度, 最大角速度の高速ビデオカメラ画像解析結果である(川副ら2006a). 遅めの時間設定(speed)5~7では, 設定した時間でサーボモータを180degまで回転させることができるが, 速めの設定1~4ではサーボモータのトルク不足になり, 設定時間通りに180degまで回転させることができない.

したがって, 速いナンバ走り(ナンバ・ダッシュ)の状態遷移では, 走行ピッチを上げて目標の関節角度ま

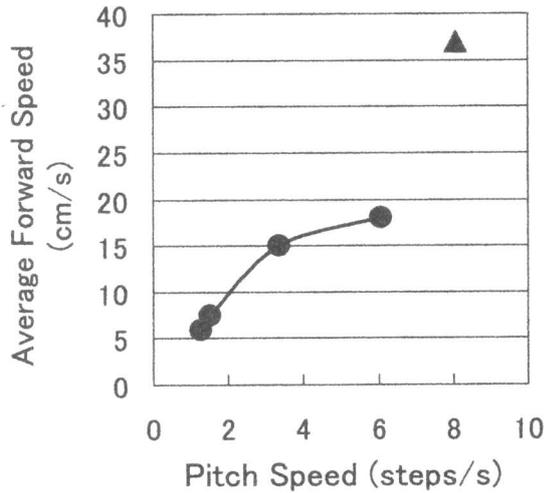


図9 人間型二足ロボット「源兵衛4号2005」(脚部10関節)の前進速度とピッチ速度の関係(● ラージ・ソール, ▲ スモール・ソール)。

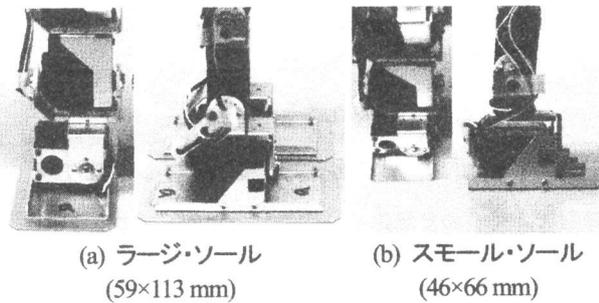


図10 人間型二足ロボット源兵衛4号の足(ソール)。

で至らないまま次の動作に移ることになる。

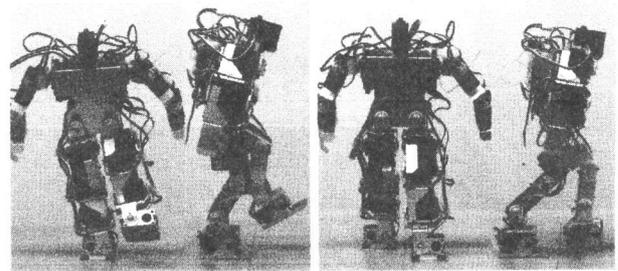
### 3. 二足ロボット「源兵衛」による超高速ナンバ走りと転倒衝撃回避

重心とZMPの制御を基本とする従来の準静的二足歩行ロボットは、足裏が大きいほど歩行が容易である。しかし、硬くて大きい足裏は、速い走りや階段を駆け上がる場合には、地面や階段に衝突しやすく動きの邪魔になる。

図10は、ヒューマノイドロボットにおける一般的な足裏・ラージソール(この場合は、足裏幅59mm、長さ113mm)と比したスモール・ソール(足裏幅46mm、長さ66mm)の概観、図11は、スモール・ソールによる二足ロボットの超高速ナンバ走りの状態図、図12は超高速ナンバ走りの実行結果、図13は空中に吊り下げ

表1 源兵衛4号サーボモータの動作時間、最大動作角、動作角速度の実測値と動作時間設定パラメータ

Time Setting (speed)	Operating Time	Max Operating Angle of Servomotor	Max Operating Angle Velocity of Servomotor
1	0.047 sec	15 deg	319 deg/sec
2	0.094 sec	30 deg	319 deg/sec
3	0.188 sec	60 deg	319 deg/sec
4	0.376 sec	120 deg	319 deg/sec
5	0.752 sec	180 deg	239 deg/sec
6	1.504 sec	180 deg	120 deg/sec
7	3.008 sec	180 deg	60 deg/sec



(a) 状態1 (b) 状態2

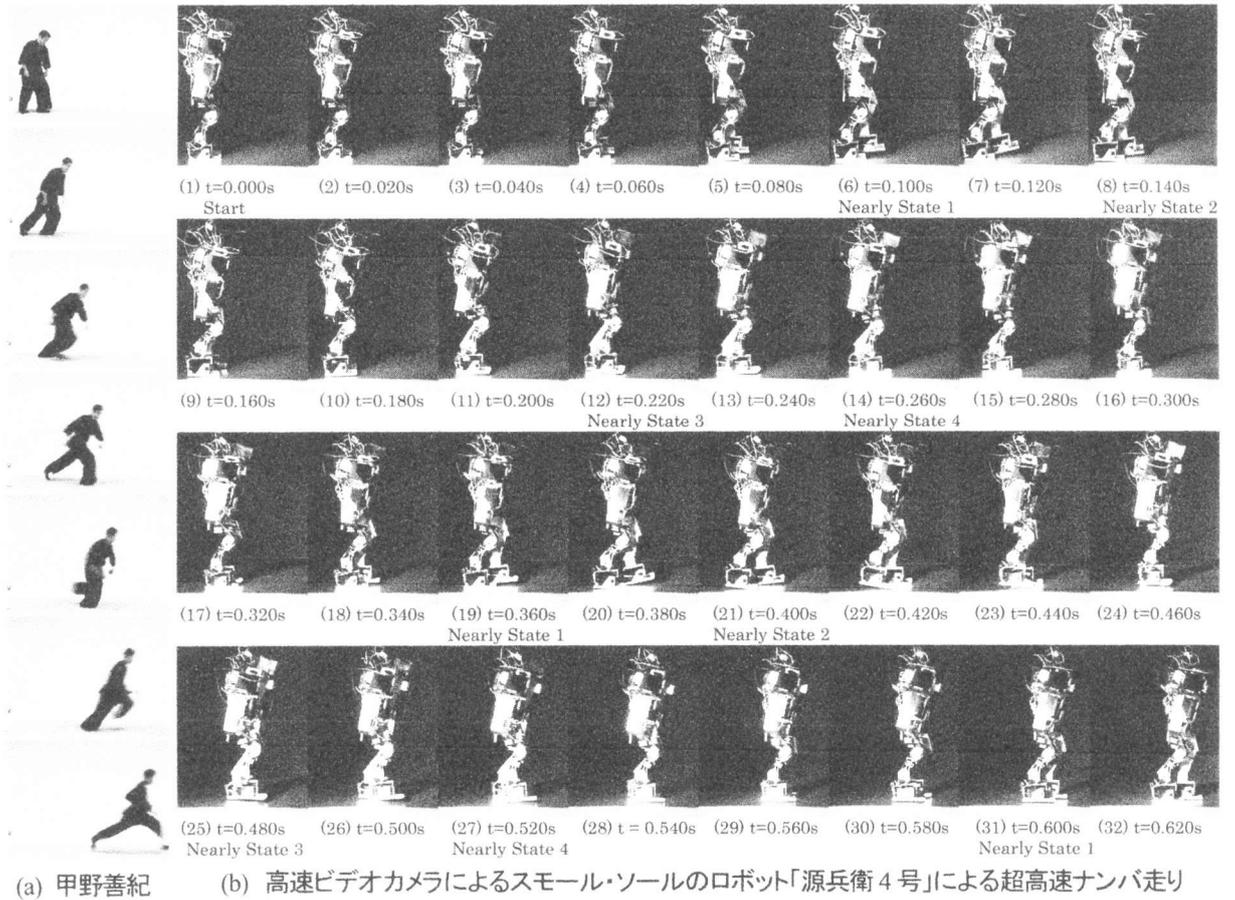
図11 源兵衛4号のスモール・ソールによる超高速ナンバ走り(37 cm/s, 8 steps/s)の状態図。

た状態での超高速ナンバ走りの実行結果である(川副ら2007b)。

図12aの甲野の走りに比べて、図12bのロボット「源兵衛4号」の超高速ナンバ走りは足が十分に上がりきらず、膝が十分折れていないので歩幅が狭いが、状態1から状態2への遷移時間は転倒力を利用して約0.04sと非常に短く、状態2から状態3(状態1と左右反対)への遷移時間0.08sの半分になっており、直立静止状態から2歩前進するのに要した時間は0.6秒である。

図13の空中で吊った状態では、足を上げる時間も接地するまでの時間もほぼ同じであり、0.08s~1.00sである。図9において、スモール・ソール(足裏面積が小さい)による超高速ナンバ走り(記号▲)は、小型二足ロボットの一般的な足裏面積(ラージ・ソール)での最速の走り6 steps/s, 18 cm/s(川副ら2006a, 2006b)の約2倍の速さになっている。

図12bの超高速ナンバ走りは、ピッチの動作時間設定パラメータ(speed)が1の場合であり、実際の走行では最大動作角が表1のように小さくなるので、状態2を3回繰り返して、少しでも前脚の角度(姿勢)が



(a) 甲野善紀 (b) 高速ビデオカメラによるスモール・ソールのロボット「源兵衛 4 号」による超高速ナンバ走り

図12 甲野善紀の超高速走行をヒントにした二足ロボット「源兵衛 4 号」の超高速ナンバ走りの発現（前進速度 37 cm/s, ピッチ速度 8 steps/s. 直立静止状態から 2 歩前進するのに要した時間：0.6 秒）.

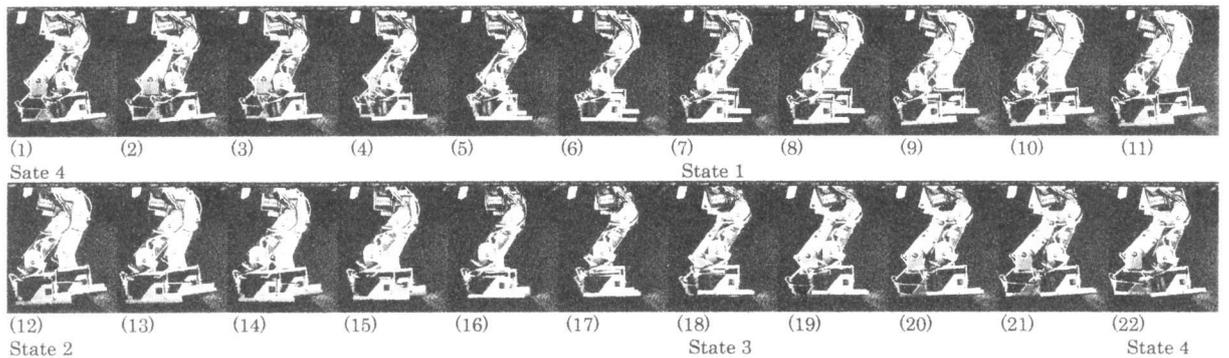


図 13 空中に吊り下げた状態でのスモール・ソールのロボット「源兵衛 4 号」の超高速ナンバ走りの実行結果（高速ビデオカメラによるコマ写真は 0.02 秒ごとに表示）.

形成できるように試みた結果であるが、まだ前脚の角度が十分に形成されていない。この走法は、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、人間の場合でも、走り出しが非常に速い反面、身体の手がかりが従来の走りに比べてあまりに複雑

で、最初の 2、3 歩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言われる（甲野 2005, 2006b）.

二足ロボットにおいてもピッチ速度が増すとサーボモータのトルク不足により前脚の角度が十分に形成されず歩幅が小さくなり、前進しないで転倒しやすくなる。し

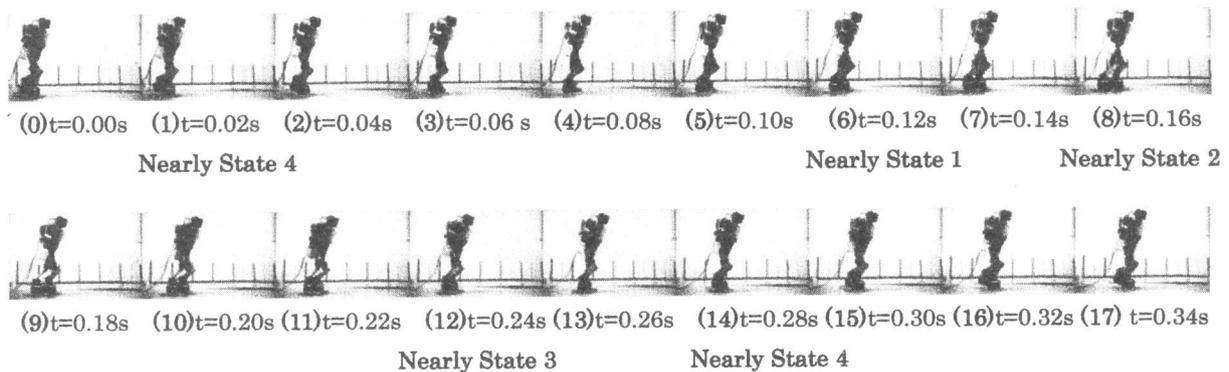


図14 二足ロボット「源兵衛」の「ナンバ歩き (36.5 cm/s, 6.58 steps/s)」の時系列表示 (ほぼ左右各1歩).

たがって、重量に対して高速でのトルクが十分でない現状のサーボモータでは、ピッチ速度を遅めに設定することにより動作時間を長めにとって前脚の角度をある程度形成するほうが、不安定を利用して速く走る可能性がある。

図14は、図15のサーボモータ動作特性を用いて、状態1と状態3を動作時間 Time Setting (speed) 3、状態2と状態4を動作時間 Time Setting (speed) 4に設定したナンバ走りの結果であり(左右各1歩のコマ写真)、高速ビデオカメラの画像解析よりピッチ速度は6.58 steps/s、前進速度は36.5 cm/sであった。図15は、プログラム上でサーボモータ角度を0 deg→90 deg→0 degと与えて無負荷で動作させた結果を高速ビデオカメラで解析したものである。横軸の動作時間 Time Setting (speed) の数値が小さいほど、理論的にはサーボモータの動作時間 Operating Time は短く、回転角速度は大きくなるはずであるが、Time Setting (speed) が12より速いと理論通りにならない。たとえば、動作時間 Time Setting (speed) 3では、90 degの回転角をプログラムしても25 degまでしか回転しない。歩行・走行などの負荷が掛かる場合はさらに稼働範囲が狭く、回転角速度も低くなる。これが一般に研究用の二足歩行ロボットが静的バランスによる静的歩行しかできない大きな理由のひとつである。動バランスと称しても最終的には試行錯誤により調整しないと歩行できない場合が多い。

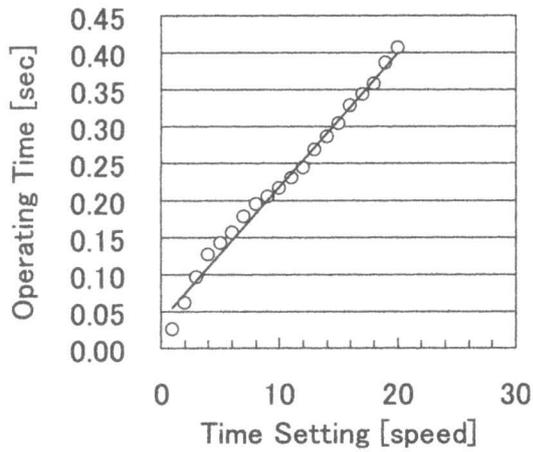
図14では、図12での走りよりも遅いピッチ速度の設定であるにもかかわらず、図12および図9の記号▲と同じ程度の前進速度になっている。

図16は、図14の走行と同一の状態図(姿勢角度データ)を用いて、図15のサーボモータの動作時間設定 Time Setting (speed) を広範囲に変えて歩行・走行を実行した結果(○印)であり、横軸は歩行ピッチ速度(歩

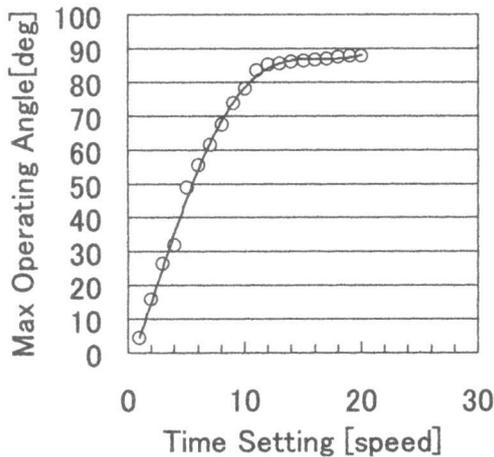
数/秒)、縦軸は前進速度である。図3と同様に、両脚交互のピッチ速度が速くなるほど足が上がりにくくなるにもかかわらず、ピッチ速度に比例して前進速度が増し、ピッチ速度を変えるだけで自在の速度で歩き・走る。この二足ロボット「源兵衛」の俊敏自在の歩き・走りの高速ビデオカメラによる映像解析とロボスタ性(頑健さ)のメカニズムは大変興味深い。紙面の都合でその詳細は別の機会に述べたい。

一方、人間にとっても二足歩行ロボットにとっても、転倒したときに怪我したり壊れたりしないことが重要であり、転倒したときにすぐに自分で起き上がる必要がある。受身のでき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。すなわち、転倒時の衝撃回避は、人間にとっても二足ロボットにとっても最優先の課題であり、転倒しても怪我したり壊れたりしないような身体操法や、倒れたらすぐに自ら起き上がるという動きの生成は人間にとっても二足ロボットにとっても歩行・走行の大前提のはずである。

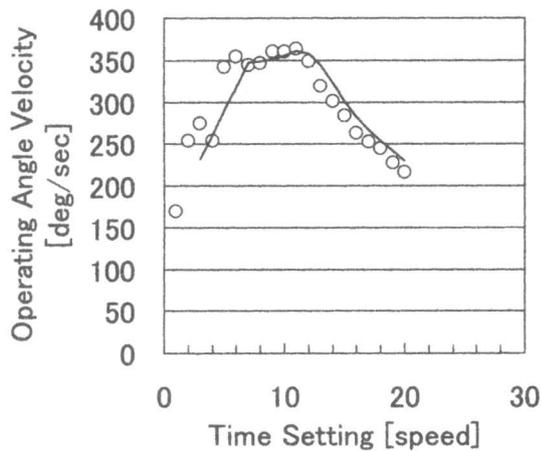
図17は、二足ロボット「源兵衛5号」(図18)が不意に後から押されたときに前方への転倒を検出し(図19, 20)、転倒時の衝撃が小さくなるように受け身的な動きをして転倒し、さらに、転倒した後に素早く立ち上がる動きのサブサンプリング(包摂)構造的要素行動による自律的発現である(川副ら2006b)。「源兵衛5号」は、「源兵衛4号2005」の脚部の上に32ビットCPU(MC68332ACF25)を搭載し、脚部10自由度、腕部各1自由度、胴体中央部に距離検出素子(PSD: Position Sensitive Detector)を搭載している。サーボモータの動作時間を任意に設定できるようにした。



(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15 サーボモータの設定動作時間 Time Setting (speed) と実際の動作特性.

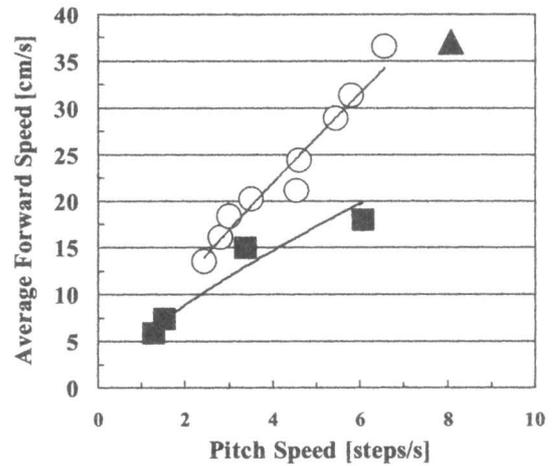


図16 ロボット「源兵衛」の歩行・走行の前進速度とピッチ速度, ○:源兵衛4号2007, ■:源兵衛4号2005, ▲:源兵衛4号2005 (スモール・ソール).

#### 4. 自律型二足ロボット「源兵衛5号」の動的障害物に対する反射的回避

図21は、突然の外乱（動的障害物）に対する源兵衛5号の応答性の良さを示すビデオ・コマ写真である。

「源兵衛5号」がナンバ歩きで前進中に、突然に目の前に出現した障害物（人間が手を急に出して歩行を妨害する）に対して急停止し（ $t=0.40$ 秒）、右へ約90度のナンバ・ターン（右折）をして再び歩き出す（ $t=1.60$ 秒）様子である。さらに90度の左折をしようとした瞬間に再度の突然の妨害（動的障害物）を認識してからの応答（ $t=3.20$ 秒）も極めて良く、動的障害物を認識してから約0.4秒後に停止する。停止後、即座に「構え」の状態をとることにより障害物が退いた後の歩き出しが安定する。また、この「源兵衛5号」の動的障害物回避における90度や180度の方向転換ナンバ・ターン2006は上体を前に倒しながら前（左）脚に体重を移動し、後（右）脚を後方に伸ばすことにより前（左）脚の位置を変えないでターンしている。この場合の障害物検知の実距離は約30cmであり、サブサンプリング（包摂）構造的要素行動による。

図22は、甲野のナンバ的90度方向転換のコマ写真であり、ターンの所要時間は0.5秒である。

#### 5. まとめ

(1) 転倒力に逆らって重心とZMPを制御する従来の

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

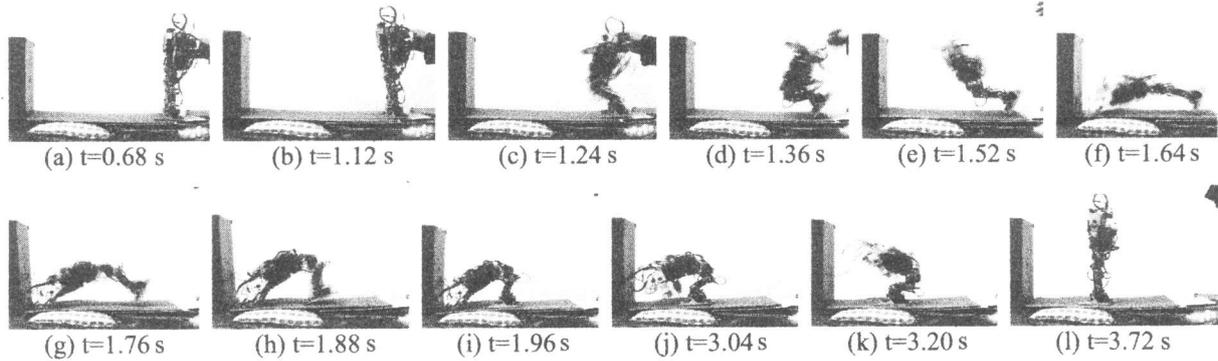


図17 不意に後から押されて転倒するとき不安定を利用して転倒衝撃回避と俊敏な立ち上がりをする自律型二足ロボット「源兵衛5号」。転倒して起き上がるまでの所要時間は2.5秒。

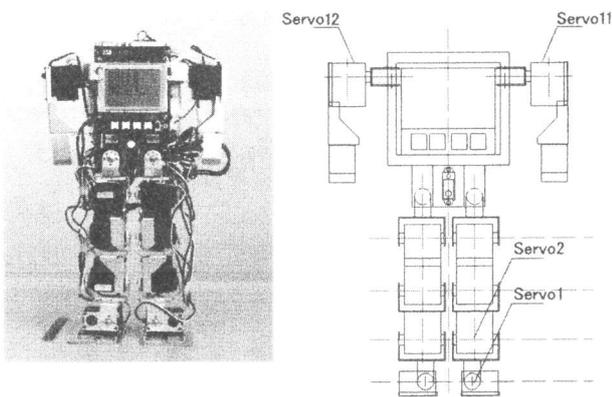


図18 自律型二足ロボット「源兵衛5号」。

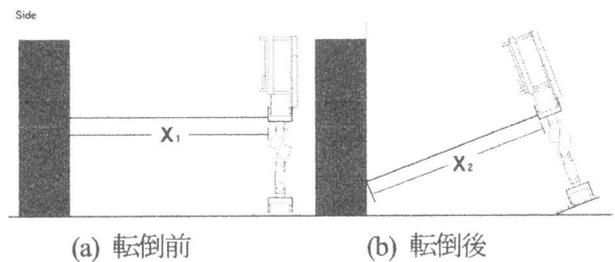


図19 距離センサ (PSD: Position Sensitive Detector) による転倒検知。



図20 自律型二足ロボット「源兵衛5号」の距離センサ (PSD: Position Sensitive Detector) の位置。

二足歩行ロボットの歩行原理とは逆に、不安定な姿勢が動きを作るという転倒力と状態遷移を利用するナンバ歩

きの歩行原理に基づいて、ある状態から別の状態に一気に変化することにより、二足歩行ロボットの速さと強さのある動きを実現することができる。

(2) 不安定な姿勢が動きを作るという転倒力と状態遷移を利用する新しい歩行原理により、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」を発現し、転倒したときの衝撃回避と転倒してからの起き上がりを自律的に発現することができた。

(3) 小さめの足裏 (スモール・ソール) を用いて、ある状態から別の状態へ不安定を利用して一気に遷移することにより速さと威力を生む二足歩行ロボット「源兵衛」の極短距離走・超高速ナンバ走りをピッチ速度を上げて試みた。スモール・ソールによる超高速ナンバ走りは、ラージ・ソールによる最速の約2倍の速さであった。この走法は、走り出しが非常に速い反面、身体操作が従来の走りに比べて非常に難しい。

(4) ピッチ速度をあまり上げずに多少の時間をかけて前足を上げて前脚の形ができるだけ形成されるようにすると、不安定を利用して歩幅を増すことができ、ロバスタな高速走りが実現できる。

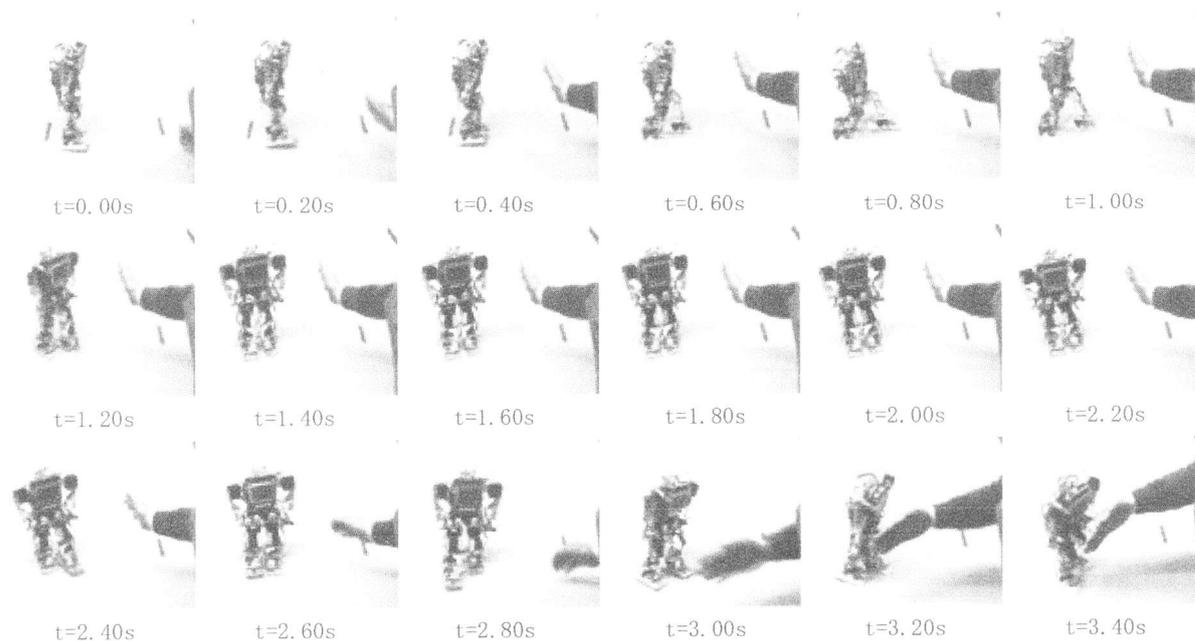


図 21 突然の動的障害物（手を急に出す）に反応して急停止・右折してまた歩き出す「源兵衛 5 号」。30 fps で撮影した映像を 0.2 秒ごとに表示したコマ写真。



図 22 甲野善紀の瞬間的 90 度方向転換のコマ写真（方向転換の所要時間：約 0.5 秒）。

(5) ナンバ歩きで前進中に、突然に目の前に出現した障害物（人間が手を急に出して歩行を妨害する）に対して約 0.40 秒で急停止できた。また、急停止後、約 90 度のナンバ・ターン（右折）をして再び歩き出し、さらに 90 度の左折をしようとした瞬間に再度の突然の妨害に対する応答も極めて良く、動的障害物を認識してから約 0.4 秒後に停止する。停止後、即座に「構え」の状態をとることにより障害物が退いた後の歩き出しが安定するという要素行動の進展例を自律型二足歩行ロボット「源兵衛 5 号」について示した。

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。また、写真の一部をご提供いただいた高橋尚子選手とさかいやスポーツ・酒井孝典氏および学習研究社・椎原豊氏に厚くお礼申し上げます。卒業研究として熱心な協力をいただいた平成 16 年度・南雲貴志・伊能新一・鈴木一彰・池田光雄、17 年度・須永智文・桃井孝昌・原田一臣・清水祐一、18 年度・森山真太郎・田口準・癸生川純一・小嶋賢一、平成 19 年度・伊倉良明・筋野駿介・奥水裕矢・原昌彦の諸君にも深く感謝する。

なお、本研究の一部は平成 17 年度中山隼雄科学技術文化財団助成研究費の援助によって行われたことを付記する。

文 献

Brooks RA (1986) : A robust layered control system for a mobile robot. IEEE Journal of Robotics and Automation 2 (1) :

14-23

- Brooks RA (1991) : Intelligence without representation. Artificial Intelligence 47 : 139-159
- Goñi T (1998) : Impact of non-cartesianism on software engineering. In : Computational Intelligence in Software Engineering. Pedrycz W, Peter JF (eds), 487-519, World Scientific, Ontario
- 川副嘉彦 (2002) : 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. 日本機械学会年次大会講演論文集 6 : 171-172
- 川副嘉彦, 南雲貴志, 伊能新一, 鈴木一彰 (2005) : 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. 運動と振動の制御シンポジウム論文集 9 : 514-519
- 川副嘉彦 (2006) : 不安定を利用する非線形制御による人間型二足ロボット「源兵衛」の俊敏自在の身体操法. 日本機械学会ジョイントシンポジウム (スポーツ工学&ヒューマン・ダイナミクス) 講演論文集. 296-301
- 川副嘉彦, 須永智文, 桃井孝昌 (2006a) : 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. 日本機械学会 2006 CD-ROM 論文集. 論文 No. 560 : 1-6
- 川副嘉彦, 原田一臣, 清水祐一 (2006b) : 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 2006 CD-ROM 論文集. 論文 No. 550 : 1-6
- 川副嘉彦, 森山真太郎, 田口 準 (2007a) : 古 (いにしえ) の身体操法に学ぶ二足歩行ロボット「源兵衛」の自在な動きの発現 (不安定を利用する階段の登り降り). 日本機械学会年次大会講演論文集 7 : 27-28
- 川副嘉彦, 田口 準, 癸生川純一 (2007b) : スモール・ソールによる二足ロボット「源兵衛」の不安定を利用するナンバ走りの進展. 日本機械学会年次大会講演論文集 7 : 29-30
- 甲野善紀, 前田英樹 (2001) : 剣の思想. 17-18, 青土社, 東京
- 甲野善紀 (2004) : 武術とスポーツの身体操法の違い. 身体運動に対する新たな視座を. 科学 74 (6) : 772-773
- 甲野善紀 (2005) : 甲野善紀の身体革命. 54-55, 学習研究社,

東京

- 甲野善紀 (2006a) : 日本人古来の動きを取り戻せ. 中央公論 11 (1470) : 184-192
- 甲野善紀 (2006b) : 甲野善紀の驚異のカラダ革命. 58-61, 学習研究社, 東京
- 甲野善紀 (2007) : 古武術の息づかいを現代に活かす. とみん経営ビジネス 21 (TMC 講演会抄録), No. 235. 8-13, とみん経営研究所, 東京
- 杉原知道, 中村仁彦 (2006) : 非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作. 日本ロボット学会誌 24 (2) : 222-231
- 山本哲也 (2006) : 次世代ロボット実用化プロジェクト. 日本ロボット学会誌 24 (2) : 169-170

### 著者紹介



川副 嘉彦

(かわぞえ よしひこ)

埼玉工業大学工学部教授. 工学博士 (東京大学). 日本機械学会フェロー. 専門は機械工学, スポーツ工学, ヒューマン・ロボット学. テニスラケットの研究で日本機械学会賞受賞 (1995年度). 第4回 21世紀連合シンポジウム—科学技術と人間—シンポジウム賞受賞 (2005年度). 研究テーマ: テニスラケットの性能予測と評価. 捻らない・うねらない・踏ん張らない俊敏自在のロボットとテニスの研究. 人間オペレータの安定化制御における個人差・習熟度・ロバスト性のメカニズム.