

377.5
HU

博士論文

力センサー無しで近似 ZMP を用いた
ヒューマノイド型サーフィンロボットの研究
(A Study on Surfing of Humanoid Robot by Using
Approximate ZMP without Force Sensor)

国立大学法人 横浜国立大学大学院
工学府

許 仁
(In HUR)

2008 年 9 月

横浜国立大学附属図書館



12196051

目 次

第1章 序 論	1
1.1 概説	1
1.2 研究の背景	2
1.3 本論文の構成	5
第2章 近似 ZMP の推定方法	7
2.1 概説	7
2.2 ゼロモーメントポイント (Zero-Moment Point: ZMP)	7
2.2.1 ZMP の定義	7
2.2.2 ZMP の存在領域	9
2.3 近似 ZMP の推定方法	11
2.3.1 片足支持モデル	11
2.3.2 両足支持モデル	14
2.3.3 床面から受ける反力評価方法	15
2.4 カセンサーを用いた ZMP 計測	20
2.4.1 ゆっくりとした前向き運動	20
2.4.2 外力による前後運動	24
2.5 要約	27
第3章 近似 ZMP の直接制御を用いたサーフィン運動制御	28
3.1 概説	28
3.2 サーフィン運動制御方法の概要	29
3.3 近似 ZMP の直接制御による前後方向のサーフィン運動	33
3.4 近似 ZMP の直接制御によるサーフィン運動実験と結果	36

3.5	要約	41
<hr/>		
第4章	傾斜面の角度推定法を用いたサーフィン運動制御	42
<hr/>		
4.1	概説	42
4.2	前後方向のサーフィン運動制御	42
4.2.1	傾斜面の角度推定法	43
4.2.2	傾斜面の角度推定実験	45
4.2.3	傾斜面の角度推定による前後方向のサーフィン運動制御アルゴリズム	47
4.3	横方向のサーフィン運動制御	48
4.3.1	傾斜面の角度推定法	48
4.3.2	傾斜面の角度推定による横方向のサーフィン運動制御アルゴリズム	48
4.4	傾斜面の角度推定によるサーフィン運動制御実験とその結果	50
4.4.1	前後方向のサーフィン運動実験と結果	50
4.4.2	横方向のサーフィン運動実験と結果	54
4.5	ダイナミクスに関する考察	58
4.6	要約	60
<hr/>		
第5章	足裏反力の情報を用いたサーフィン運動制御	61
<hr/>		
5.1	概説	61
5.2	足裏反力情報を用いたサーフィン運動制御	61
5.3	実験と結果	64
5.4	考察	68
5.5	要約	70
<hr/>		
第6章	床面から受ける力釣り合い条件を用いたサーフィン運動制御	71
<hr/>		
6.1	概説	71
6.2	足首のロール角度の制御によるサーフィン運動制御	71
6.3	片足のみの長さ制御によるサーフィン運動制御	76
6.4	逆キネマティクス	77
6.5	実験と結果	78
6.6	考察	83
6.7	要約	84

第7章 結論	85
--------	----

文献	88
----	----

第1章

序論

1-1 概説

ロボットというのは、チェコの小説家 Carel čapek が 1920 年に発表した戯曲「Rosuum's Universal Robots」に最初に登場するが、彼の小説に表現されたロボットのイメージは“働ける能力はあるが、考えられる能力はまったくなく、しかし、その姿および形は人間に似てるもの”であった。その小説の発表以後、今まで様々な小説にロボットが登場しているが、実際ロボットについて研究が開始されたのは 1960 年代であったと考えられる。1966 年には早稲田大学の加藤一郎らが、1968 年には Oxford 大学の D.C.Witt らがハードウェアを用いた研究としてロボットの研究をスタートした⁽¹⁾。

それ以後も、ヒューマノイドロボットは人間の姿とその動作が似ているので、興味のある研究対象であった。遂に、1973 年に早稲田大学の加藤一郎研究室が WABOT-1 を開発して、小説に登場してから 50 年後に最初の実際のヒューマノイドロボットが誕生した。それがきっかけになったかもしれないが、それ以後、各大学の研究室でいろいろのヒューマノイドロボットが開発され、ヒューマノイドロボットの研究が加速された。1986 年度には「人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクト」として HONDA 社はヒューマノイドロボットの研究開発を着手した。その研究結果として HONDA のヒューマノイドロボット P2 が誕生した⁽²⁾⁽³⁾。それ以後、高度な機能を有するヒューマノイドロボットが引きつづき研究開発されてきた⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。

一方、ヒューマノイドロボットは直立歩行するので、その直立安定性を評価する指標が必要となり様々な概念が発表された⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾。その概念を紹介すると、「ロボットの足が床面と接触する時、床面から受ける反力 R が足裏に生じる。その反力を、足部の境界の内側に存在する点に作用する等価な力 R が通過する作用点を ZMP (Zero-Moment Point) と呼ぶ。」「足裏と床面が接触しており、足が回転しないように仮想の反力が作用すべき Point を FRI Point と呼ぶ」等である。その中で、ZMP の概念に基づいて、ヒューマノイドロボットの歩行パターンを生成し、安定的な歩行の実現について多くの研究者が研究

を進めてきた。それらの研究成果として、ヒューマノイドロボットが歩く⁽¹²⁾⁻⁽¹⁶⁾、走る⁽⁷⁾、荷物を持ち上げる⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、さらに、環境の急な変化に対応する運動計画の変更⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾などが実現されてきており、各種の環境下で、その直立安定性を保持するために各種の制御方法⁽²¹⁾が提案されてきた。

ヒューマノイドロボットの開発に伴って、センサーの開発も積極的に進められてきている。すなわち、ロボットが高度な機能を有するためには、人間のように感覚、認識機能を向上する必要がある。このような問題の解決のために各種のセンサーが導入されてきた。ヒューマノイドロボットには様々なセンサーが採用されており、それらのセンサーのデータを用いて自然な行動パターンを実現しているが、その代表的なセンサーの例として、力センサー、触覚センサー、加速度センサー、ジャイロセンサーなどがある。図 1.1 と表 1 には 6 軸力センサーとその仕様を示している。この 6 軸力センサーはロボット技術特有な、力制御を実現するために産業用ロボットや研究用マニピュレータの力制御、ヒューマノイドロボットの力制御に用いられている。

このような力センサーは、負荷を 200kg まで支えられるものも開発されており、力の測定に関しては、高度な機能を発揮している。しかしながら、高度な機能を実現するためにはセンサーの大きさと重さも増大し、ロボットの機構設計に大きな影響を及ぼすようになってきた。ヒューマノイドロボットに採用される力センサーは足部に取り付けることが一般的であるが、1メートル以上の高さになるヒューマノイドロボットは 40kg 以上の重さとなり、図 1.2 に示すようにそのロボットが着地の歩行動作を行う時、その衝撃は極めて大きくなる。ヒューマノイドロボットは人間のように歩行ができるという特徴を持っているが、連続的な歩行パターンと走行パターンによって足部の力のセンサーに衝撃が発生し、大きな影響を受ける。このため、力センサーは衝撃を耐えられるように強い耐久性という厳しい条件も必要となっている。

一方、このような力センサーの限界を克服しようとする努力も続けられている。本論文もセンサーの限界を克服しようとするもので、センサーを用いないセンサーレス技術に着目して研究を進めている。

1.2 研究の背景

ヒューマノイドロボットは、人間の生活空間に導入されることを期待されて、研究が活発に進められており、様々なロボットタイプが発表されてきた。HONDAのASIMOは世界的に有名なロボットになっており、SONYもエンタテインメントロボットとしてAIBOとQRIO⁽²²⁾を開発してきた。一方、各大学のロボット研究所でも、いろいろのヒューマノイドロボットを開発し、人間のような行動パターンを実現している。その中には、特に高度な機能を有するスポーツロボット⁽²³⁾も開発されている。このようなロボットは

Table 1 Specifications of Intelligent Force Sensor of NITTA

センサ型式	Fx,Fy (N)	Fz (N)	Mx,Mz (Nm)	外径 (mm)	高さ (mm)	重量 (g)
IFS-67M25A 15	60	120	5	67	25	180
IFS-100M40A 25	100	200	10	100	40	650
IFS-100M40A 50	200	400	20	100	40	650
IFS-100M40A 100	400	800	40	100	40	650
IFS-67M25S50 M40	600	1200	40	67	25	370
IFS-67M25A 250	1000	2000	160	160	50	2500

http://www.nitta.co.jp/product/mechasen/sensor/6dof_top.html



Fig1.1 Industrial 6-axis sensors of NITTA

各種センサーを用いて状態計測を行い、高度な機能を実現している。

その例として、岐阜大学の伊藤らはロボットの足裏にLoad Cellを取り付けて前後方向のバランス制御を提案した。伊藤らは傾斜面上でLoad Cellによって計測された両足の床反力が同じになるように起立姿勢制御を実現した⁽²⁴⁾ ⁽²⁵⁾。JSTの玄らも足裏に床反力センサーを搭載してバランス制御を実現した。玄らが提案するバランス制御とは適切に床反力が配分されるように姿勢を制御しながら、ロボット重心の投影点が支持多角形の重心に来るように能動的に制御することである⁽²⁶⁾。

一方、センサーを用いずにロボットの機能を向上しようとする努力もあり、マニピュ

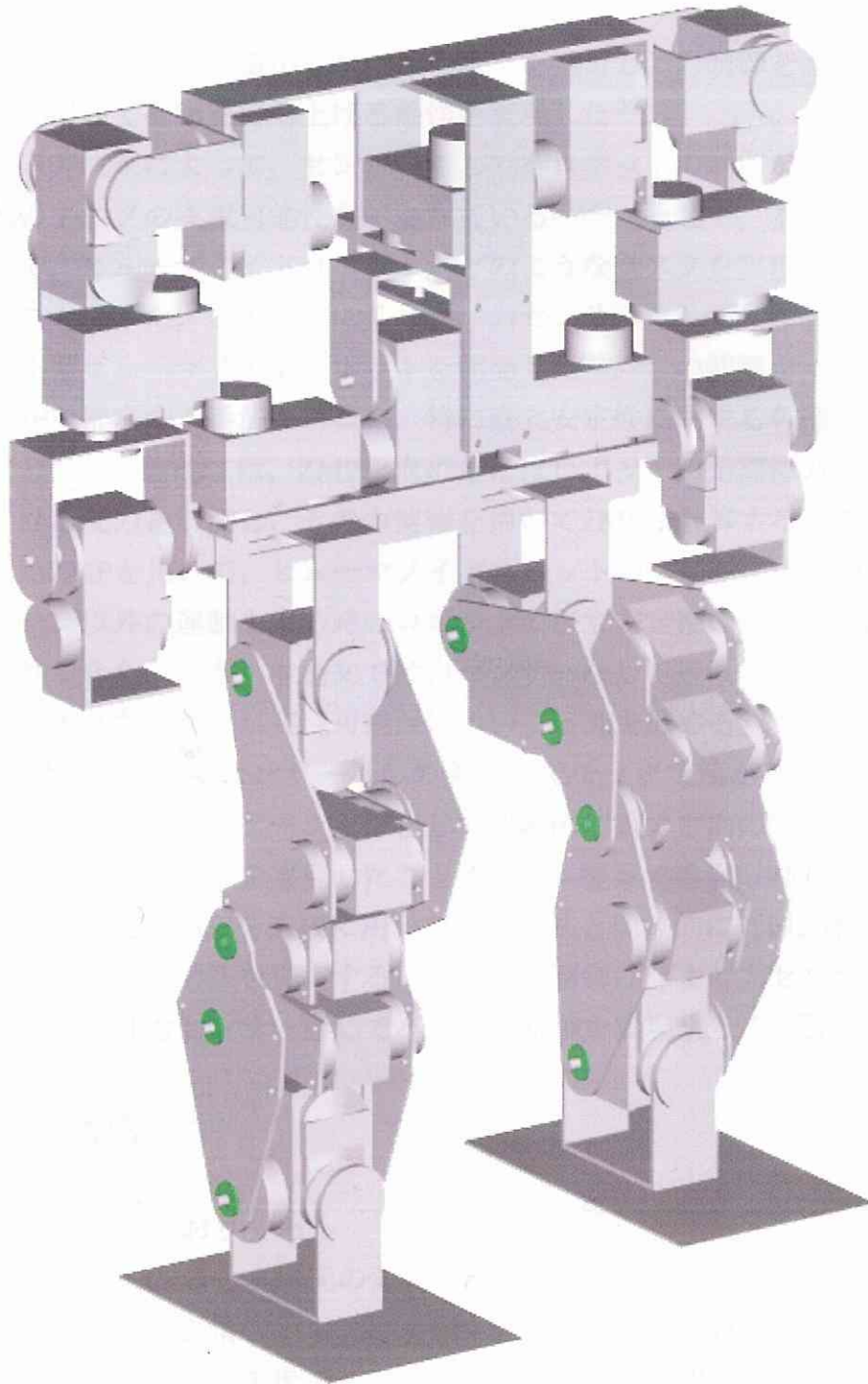


Fig. 1.2 Most force sensors are mounted in a part of leg. Force sensor has to undergo repeated shock then feel fatigue when humanoid robot walks or runs although it was designed to overcome the load of shock.

レータに関する研究を中心として発展してきた。慶応大学の村上らと熊本大学の東らは Disturbance Observerを用いて力センサー無しで力制御を実現した⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。しかし、ヒューマノイドロボットでは力センサーレス技術はあまり適用されていない。力センサーレス技

術の先駆的な研究者は東大の水内らである。水内らはセンサーを持ってないヒューマノイドロボットの関節角度指令値からも一たトルクを推定し、力制御を実現する手法である。この手法を用いて荷物を持ち上げる動作を実現した⁽²⁹⁾。

このような研究成果によって、センサー無しでもロボットの制御ができる技術領域が存在し、各種のタスクの実現可能性が示されている⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。そこで、本論文では力センサーを用いなくて、ヒューマノイドロボットがどのようなタスクを実現できるのかについて考えてみることにした。この発想に基づき、力センサー無しで、モータ電流からトルクを推定する小型ヒューマノイドロボットを開発した⁽³⁰⁾。この関節トルクの推定値を用いて、近似ZMPを推定する手法を考案し、特に直立安定性に関する各種の制御方法を考案することにした。一般的には、ZMPを求めるにはロボットの足部に力センサーをつけて床面から受ける反力を計測し、その力情報を用いてZMPを計算する。この力センサーから推定されたZMPを用いて、ヒューマノイドロボットの運動パターンの生成、計画された運動パターン以外の運動をする時のロボットの直立安定性の保持等に、各種の制御方法が提案されてきた。一方、本論文では力センサーなしで近似ZMPを推定し、その情報を用いてどのようなタスクが実現可能かについて研究を進める。

本論文の特徴としては力センサー無しの条件下でモータ電流から近似ZMPを推定する方法を提案し、そのアプリケーションとして連続的に重力方向の変化が行われるタスクとしてサーフィンロボットを実現したことである。提案する近似ZMPを用いてサーフィンを行うために、近似ZMPを直接に用いた制御手法と間接的に近似ZMPを用いた制御手法およびバランス制御手法を提案する。バランス制御は今まで力センサーを用いて実現したが、本研究では力センサー無しでバランス制御を実現する。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は次のとおりである。

第1章では、研究の背景と本研究の意義を説明している。

第2章では、関節トルク情報から、ヒューマノイドロボットの直立安定性の重要な指標であるZMPの近似推定方法を提案している。本手法では、関節トルク情報からどこまで近似ZMPの推定が可能かを明らかにしている。具体的な成果として、本手法は、ダイナミクスの影響の少ない準静的な状態では、近似ZMPの推定効果を発揮することを明らかにした。準静的な状態でのZMPは、ほぼ重心と一致するのであまり興味ある結果とは思われないが、本手法は重力方向が変化した時にも適用可能であり、重心情報では対応できない領域に効果を発揮することを明らかにしている。

第3章では、重力方向変化の環境タスクとして、ロボットのサーフィン運動に注目し、力センサー無しでサーフィン運動が可能かどうかの検討を進めている。本章では特に、

静的な安定直立領域にZMPを制御することで、サーフィン運動の実現を目指している。サーフィン運動の実現は、傾斜角を時間的に変化させることができる斜面を作り、その斜面上にヒューマノイドを設置し、傾斜面の時間的変化に対応させて直立安定性を維持することで実現している。傾斜角の運動周期が遅い領域では、ヒューマノイドのサーフィン運動は成功したが、周期が速くなるとダイナミクス影響が大きくなり、直立安定性が保持できなくなる。

第4章では、より環境情報およびロボットのキネマティクス情報を活用するために、ZMPから斜面の傾斜角を推定し、その傾斜角情報をもとに、ロボットの上半身を制御する手法を考案した。本手法は、上記のZMP直接制御法と比較して、比較的速い周期の斜面運動でもサーフィン運動が成功している。ヒューマノイドの重心の動きからこの原因を考慮すると、ZMP直接制御方法はZMPが激しく制御されるためにダイナミクスの影響が大きくなり直立安定性が損なわれたが、傾斜角推定法ではZMPの直接制御でないため制御時のダイナミクスの影響が大きくなり、直立安定性が向上することを明らかにしている。

第5章では、ZMP情報を用いずに関節トルク情報から足裏反力情報を推定し、足裏反力の差の情報を基に足の長さを制御し、それぞれの反力を一致させることで直立安定性を保持する制御方法について述べる。足の長さの制御方法は比例制御を用い、その比例ゲインを試行錯誤で求めることで、サーフィンロボットを実現した。この制御方法についても周期が速い状態でも比較的安定なサーフィンロボット制御を実現することを示している。

第6章では、足裏反力を一致させることが、サーフィン運動で効果があることが明らかになったので、関節トルク、近似ZMPおよびロボットのキネマティクス情報を用いて、モーメントの平衡方程式から足裏反力を一致させる条件下でのロボットの姿勢制御目標量の算出を行った。第一の制御目標量は足首のロール角で、ロール角を変化させることで重心位置を変化させる手法であり、第二の制御目標量は第4章で示した足の長さの調整で、この手法を用いて重心位置の制御を実現している。特に、足の長さを調節する手法で、安定なサーフィンロボットの制御を実現できることを明らかにした。

第7章では、各章にわたる研究成果の総括と、各章ごとに得られた知見や結論をまとめている。

第2章

近似 ZMP の推定方法

2-1 概説

本章では ZMP の基本概念と ZMP を求める手法を紹介し、その手法を用いて関節モータトルク情報から近似 ZMP を推定する手法を提案する。近似 ZMP 推定手法の精度を検証するために、関節モータトルク計測機能を持っているヒューマノイドロボットに、実際のカセンサーをつけて厳密な ZMP を計測し、両者の比較を行っている。その比較結果は、準静的な状態では、近似 ZMP と重心の位置がほぼ一致しているので、あまり興味のある結果とは思えない。しかしながら、重力方向が変化した場合には、ロボットのキネマティクス情報から求められる重心情報は変化しないが、近似 ZMP は重力方向の変化を検知できるので、重力方向変化の環境下でのロボットの直立安定性には効果を発揮することを明らかにしている。

2-2 ゼロモーメントポイント(ZERO-MOMENT POINT: ZMP)

普通の産業用ロボットのベースは固定されているが、ヒューマノイドロボットのベースである足部は床面と接触していることのみで自由に動けるようになっており、足は床面に固定されていない。従って、産業用ロボットは作業空間の範囲内で、直立安定性を考慮しないで、任意で動くことができる。一方、足裏を固定されていないヒューマノイドロボットは倒れないように気をつけて、動作が実現されなければならない。そのため、ヒューマノイドロボットの直立安定性を維持するためには、ヒューマノイドロボットの足裏と床面の接触状態を示す指標が必要で、その指標が ZMP である。この指標は、ロボットの密接に直立安定性と関連するが、安定性を直接的に示しているのではない。

2-2-1 ZMP の定義

Vukobratović と Stepanenko という人たちが ZMP を定義した。図 2.1 は足裏に分布

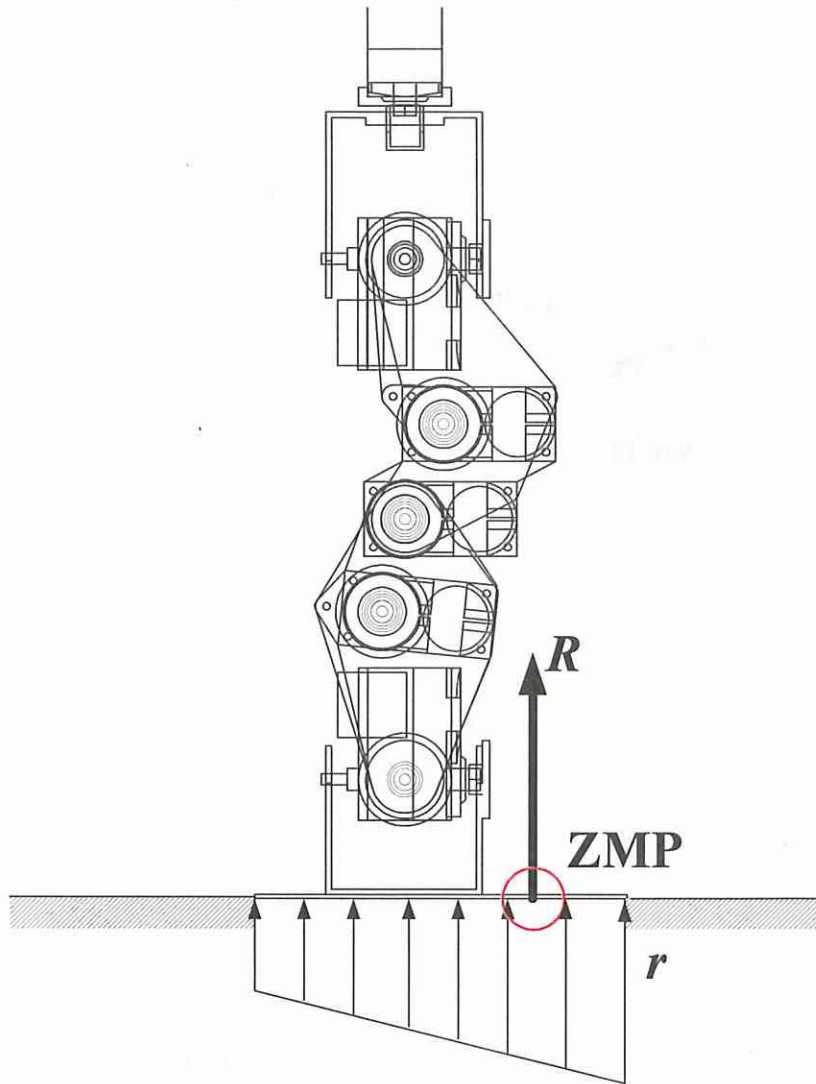


Fig. 2.1 Definition of Zero Moment Point.

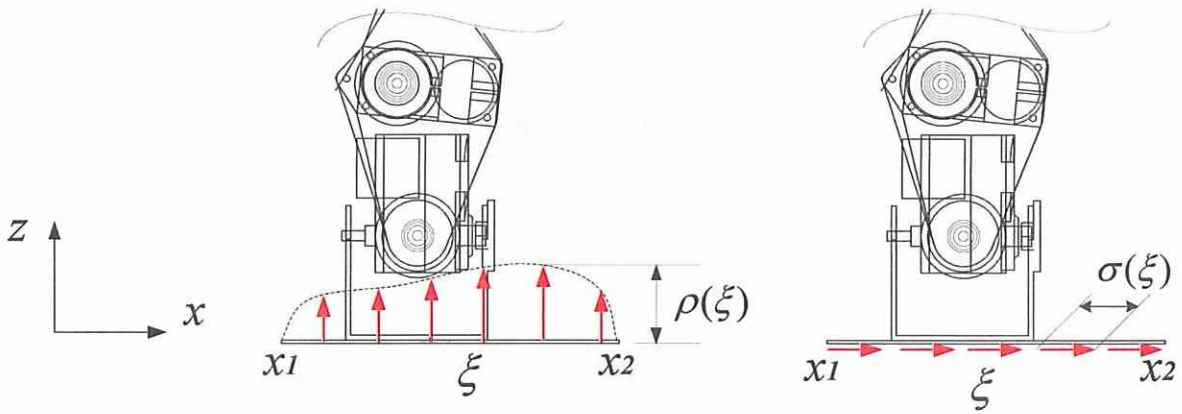
されている反力を示す。図 2.1 に示すように床面と接触されている足裏に反力が分布するが、その分布力を代表的に一つの反力 R として示すことが可能である。反力 R が作用されているポイントでモーメントが 0 になるので、そのポイントを ZMP と呼ぶ。

図 2.1 に示すように足裏の反力を代表的な一つの反力 R で表現できる。それを式で示すと次のようになる。

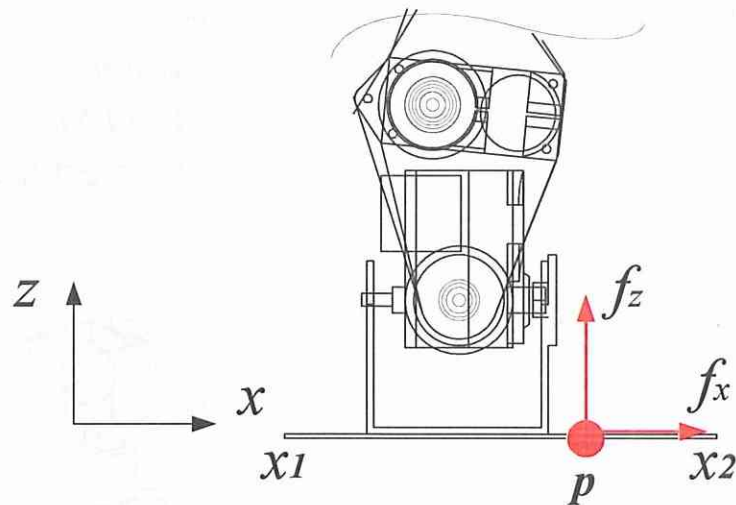
$$f_x = \int_{x_1}^{x_2} \sigma(\xi) d\xi \dots\dots\dots(2.1)$$

$$f_z = \int_{x_1}^{x_2} \rho(\xi) d\xi \dots\dots\dots(2.2)$$

$$M_p = - \int_{x_1}^{x_2} (\xi - p) \rho(\xi) d\xi \dots\dots\dots(2.3)$$



(a) Ground reaction force and friction force.



(b) Equivalent vertical force, friction force, and moment at point p.

Fig. 2.2 The relation between distributed force and both equivalent force and moment.

ここで、 ρ は垂直床反力の分布、 σ は水平床反力の分布、 f_x は x 軸方向の力、 f_z は z 軸方向の力、 M_p は p で作用するモーメントであるが、この関係を図 2.2 に示す。ZMP の概念に従うと p でモーメントが 0 になる位置 p が ZMP である。ZMP は次の式を用いて求められる。

$$p = \frac{\int_{x1}^{x2} \xi \rho(\xi) d\xi}{\int_{x1}^{x2} \rho(\xi) d\xi} \dots\dots\dots(2.4)$$

2・2・2 ZMP の存在領域

支持多角形は ZMP と共に重要な概念である。支持多角形とはロボットが床面に接触している点すべてを外側からゴムひもで囲んだ場合、ゴムひもの内側を支持多角形

と呼ぶ。支持多角形を図 2.3 に示したが、2.2.1 節で求められた ZMP はいつも支持多角形の内に存在している。

普通の場合は、足裏反力の符号は次のような状態である。

$$\rho(\xi) \geq 0 \dots\dots\dots(2.5)$$

式 (2.5) を式 (2.4) を用いて考えると

$$\mathbf{x}_1 \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{x}_2 \dots\dots\dots(2.6)$$

式 (2.6) は ZMP は支持多角形の範囲を超えられないことを示している。従って、ZMP が支持多角形の内に存在していることは、動的な運動をするロボットの安定性を直接示すことではない。しかし、ロボットの安定性を保持するためには ZMP を支持多角形内に設定することが必要である。

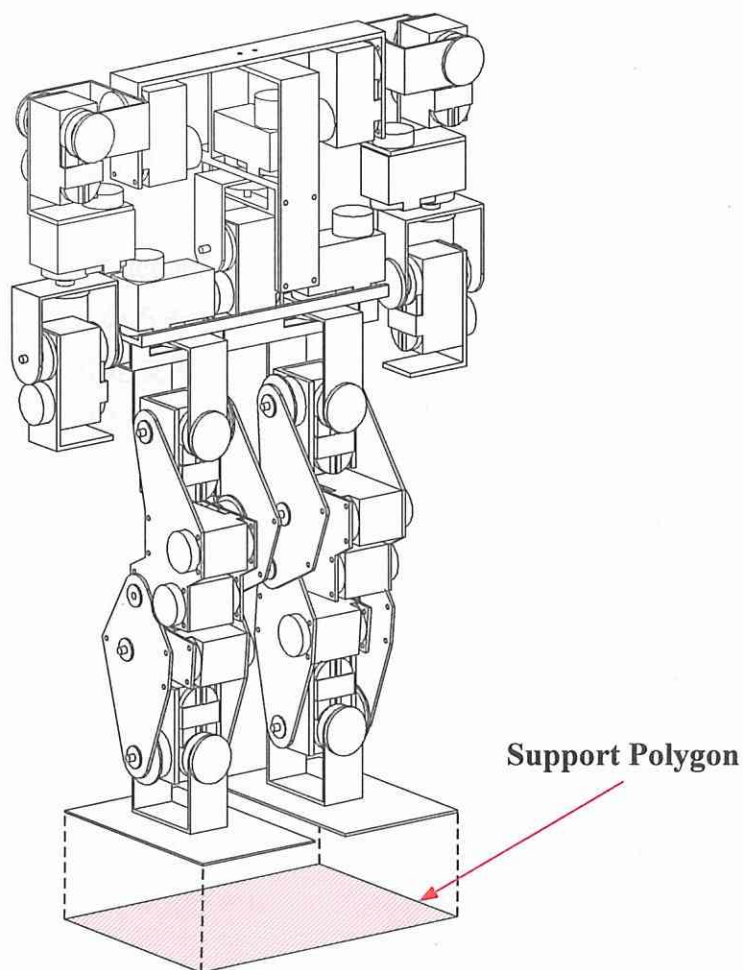


Fig. 2.3 Support polygon is outline of rubber band that surrounds contacted point of humanoid robot with ground.

2-3 近似 ZMP の推定方法

ヒューマノイドロボットを両足を用いて支持するとき、支持するモデルは二つのモデルに分けられる。片足で支持するモデルと両足で支持するモデルである。二つのモデルは、歩行実行プロセスでは順に現れる。たとえば、歩行を始めるに際しては、両足の支持モデルから重心を移動させ、片足の支持モデルに移ることになる。片足の支持モデルには支持している足裏の ZMP 一つを求めればいいが、両足の支持モデルには二つの足裏にそれぞれの ZMP を持っており、両足接地の状態で新たになる ZMP を定義する必要がある。従って、ZMP を求める方法は支持モデルごとに異なるので、支持モデルごとに ZMP を推定する。

2-3-1 片足支持モデル

片足だけがロボットの体を支持する時、片足裏には床面から反力を受けるが、他の足には反力が発生しない。図 2.4 は力とモーメントシステムを示しているが、このシステムのモーメントの釣合を考えると、力とモーメントが actuator A にかかって p で平衡になることは次に示すとおりである。

$$\overrightarrow{PA} \times F + M + M_p = 0 \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

ここで、 $A=(x_a, y_a, z_a)$ は actuator A の位置、 $F=(F_x, F_y, F_z)$ は点 A にかかる力、 $M=(M_x, M_y, M_z)$ は actuator A にかかるモーメント、 $M_p=(M_{px}, M_{py}, M_{pz})$ は任意の点 $p=(x_p, y_p, z_p)$ のモーメントである。片足支持モデルで、 p が ZMP であると仮定すると、ZMP の概念によって p にはモーメントが作用していない。従って p に作用するモーメントは次のとおりである。

$$M_{px} = M_{py} = 0 \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

式 (2.7) に式 (2.8) の条件を代入して点 A での x 軸と y 軸に関するそれぞれのモーメントを求めると次のとおりである。

$$-(x_p - x_a)F_z + z_a F_y + M_y = 0 \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

$$-(y_p - y_a)F_z + z_a F_x + M_x = 0 \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

ここに一つの仮定を追加する。その仮定は ‘x 軸方向に摩擦力は無い’ ということ

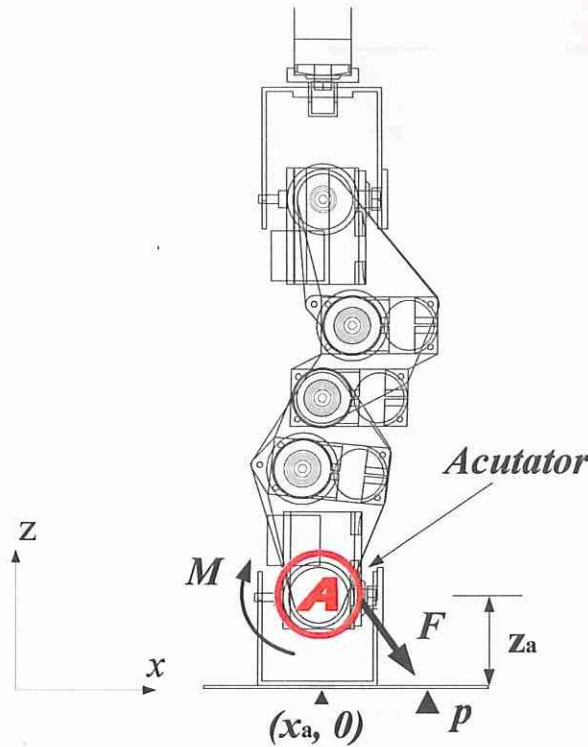


Fig. 2.4 One-leg support model: Only this leg that has ground reaction force is considered.

であり、本論文では歩行よりは直立安定性に視点を置いているので、この仮定を追加した。

$$F_{friction} = 0 \dots\dots\dots(2.11)$$

この条件に基づいて、式 (2.9) と式 (2.10) に摩擦力の項目を取り除いた。式 (2.9) と式 (2.10) より ZMP の位置が次のように求められる。

$$x_p = x_a + \frac{z_a F_y + M_y}{F_z} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$y_p = y_a + \frac{z_a F_x + M_x}{F_z} \dots\dots\dots(2.13)$$

図 2.4 に示すように床面から点 A までの距離は z_a は 2cm であるので、次の条件が加えられる。

$$z_a F_y \ll M_y \dots\dots\dots(2.14)$$

$$z_a F_x \ll M_x \dots\dots\dots(2.15)$$

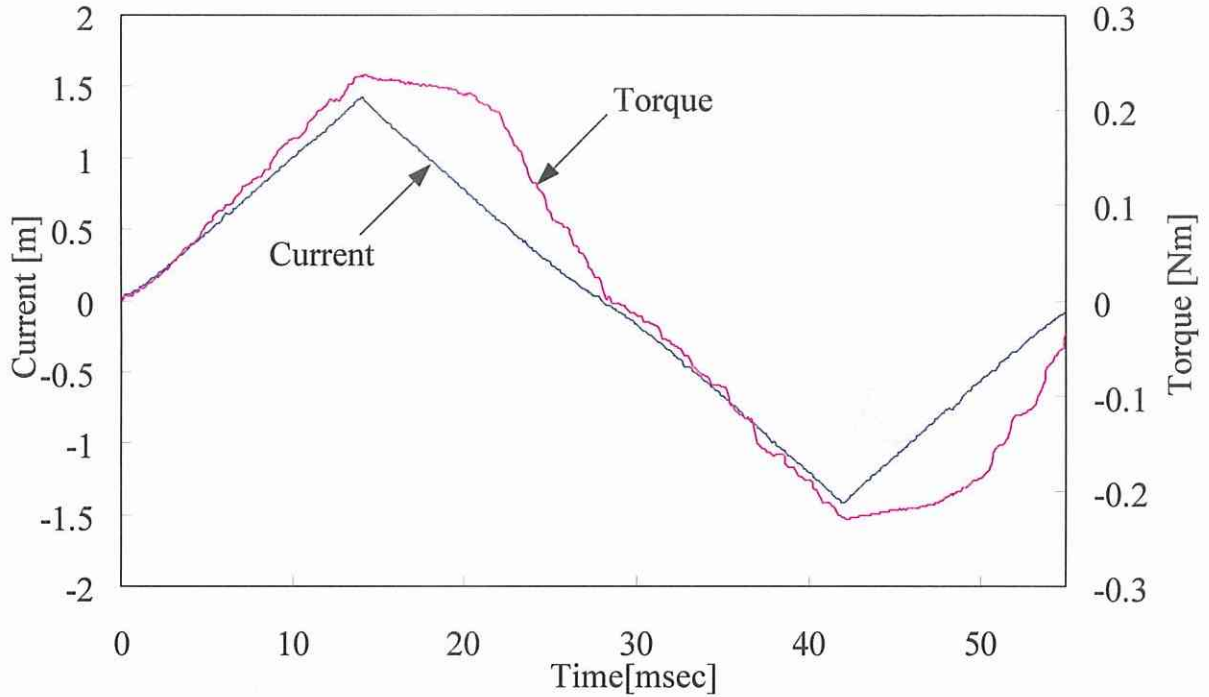


Fig. 2.5 The characteristics of both current and torque of motor.

式 (2.14) と式 (2.15) を書き直すと次のようになる。

$$x_p \approx x_a + \frac{M_y}{F_z} \dots\dots\dots(2.16)$$

$$y_p \approx y_a + \frac{M_x}{F_z} \dots\dots\dots(2.17)$$

M_y と M_x は点 A におけるモーメントであり、そのモーメント（トルク）は A につけたモータの電流から推定される。

ここで、本研究で用いられたヒューマノイドロボットが有するモータ電流計測機能を用いてモータ電流を計測し、その情報より求めたモータトルクの情報を図 2.5 に示す。モータ電流とモータトルクの関係は次のとおりである⁽³⁰⁾。

$$\tau_m = K_m \cdot i_m \dots\dots\dots(2.18)$$

τ_m はモータのトルク、 K_m は比例ゲイン、 i_m はモータの電流である。式 (2.18) を用いて、式 (2.16) と式 (2.17) のモーメントを求めるが、両足の支持モデルでは、足裏の反力情報も必要となるが、関節トルクか足裏反力の推定方法については次節で説明する。

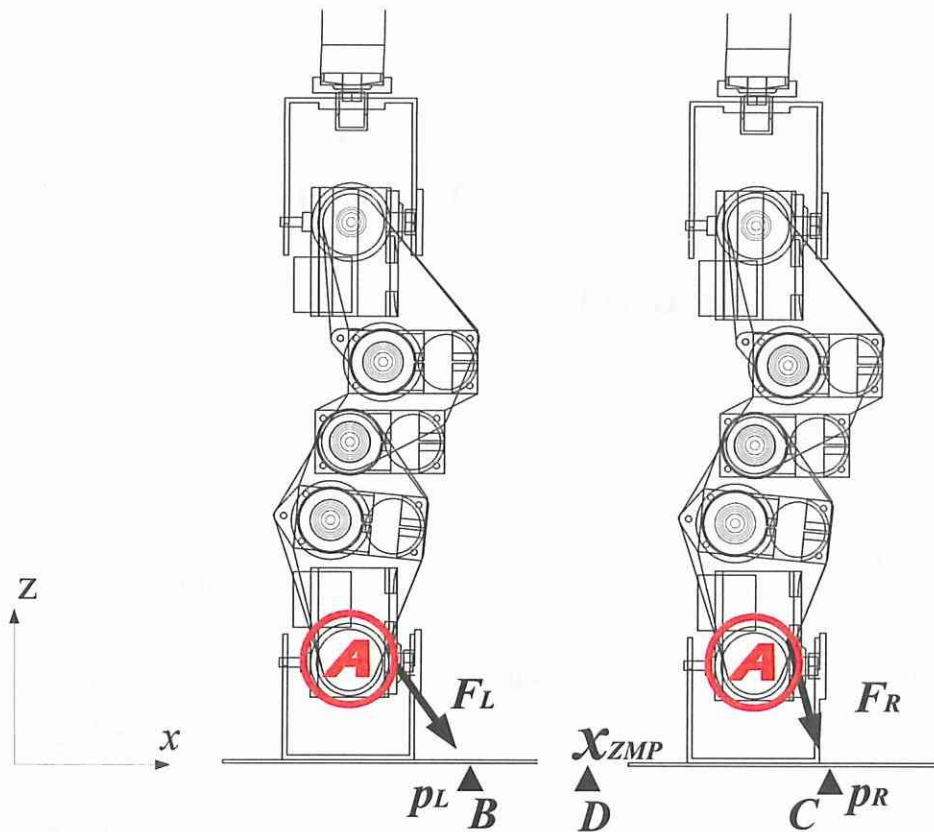


Fig. 2.6 Tow-legs support model: There are two one-leg support models. Each one-leg support model can be treated independently. For example, each one-leg support model has its ZMP, ground reaction force, etc.

2.3.2 両足支持モデル

2.3.1 で片足支持モデルの近似 ZMP の推定手法を示した。次に両足支持モデルの近似 ZMP 推定法を示す。両足支持モデルの近似 ZMP は、片足支持モデルの近似 ZMP を用いて推定することが可能である。両足支持モデルで、それぞれの足を片足支持モデルであると仮定して近似 ZMP を求め、その結果を用いて両足支持の ZMP を求める。そのシステムを図 2.6 に示す。

図 2.6 で B と C は左足と右足それぞれの ZMP である。この両足支持モデルで D におけるモーメントを求めると次のようになる。

$$M_D = \overrightarrow{BD} \times F_{Lz} + \overrightarrow{DC} \times F_{Rz} \dots\dots\dots(2.19)$$

D が ZMP であると、D に作用するモーメントは '0' になる。従って式 (2.19) を書き直すと次のようである。

$$\overrightarrow{BD} \times F_{Lz} + \overrightarrow{DC} \times F_{Rz} = 0 \dots\dots\dots(2.20)$$

式 (2.20) を x 軸と y 軸に分けて書き直すと

$$(x_{ZMP} - x_{pL})F_{Lz} - (x_{pR} - x_{ZMP})F_{Rz} = 0 \dots\dots\dots(2.21)$$

$$(y_{ZMP} - y_{pL})F_{Lz} - (y_{pR} - y_{ZMP})F_{Rz} = 0 \dots\dots\dots(2.22)$$

式 (2.21) と式 (2.22) を用いて x_{ZMP} と y_{ZMP} が求められる。

$$x_{ZMP} = \frac{x_{pL}F_{Lz} + x_{pR}F_{Rz}}{F_{Lz} + F_{Rz}} \dots\dots\dots(2.23)$$

$$y_{ZMP} = \frac{y_{pL}F_{Lz} + y_{pR}F_{Rz}}{F_{Lz} + F_{Rz}} \dots\dots\dots(2.24)$$

ここで, x_{pL} , x_{pR} , y_{pL} , y_{pR} は左足裏と右足裏それぞれの近似 ZMP の x と y の位置で, x_{ZMP} は両足支持モデルの近似 ZMP である。

2-3-3 床面から受ける反力評価方法

近似 ZMP を推定方法について片足支持モデルと両足支持モデルに分けて説明した。しかしながら, 式 (2.16) (2.17) (2.23), 式 (2.24) に示すように, 近似 ZMP を求めるには床面から受ける反力を考慮しなければならない。まず, 片足支持モデルにおいて反力は重力のみを考慮して次のように求められる。このシステムでは摩擦力を無視した。

$$F_z = (M + 2m)g \dots\dots\dots(2.25)$$

ここで, M は上半身の重さであり, m は片足のみの重さ, g は重力加速度である。従って, 全体の重さは 'M+2m' である。次に両足を支持モデルの足裏反力を求める。図 2.7 に示すように, 足裏の反力は, ダイナミックスの影響を無視すると上半身の重量と各足の重量の加算されたものとなる。まず最初に関節トルクの情報を用いて上半身の重さの推定を行う。

上半身の力 F が図 2.7 のように作用し, ヒューマノイドロボットが静的な状態であると仮定しよう。この時は関節のトルクとキネマティクスの関係によって力を推定することができる。その式は次のようである⁽³¹⁾。

$$\tau = J^T F_0 \dots\dots\dots(2.26)$$

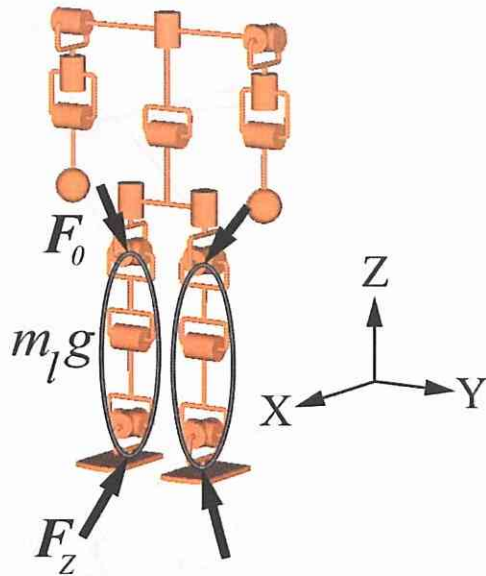


Fig. 2.7 Dynamic influence is ignored in this system. Upper body and two legs have mass respectively.

$$F_0 = J^{-T} \tau \dots\dots\dots (2.27)$$

ここで、 J はヤコビである。式 (2.26) と式 (2.27) では一つの解を持つためには一つの条件が必要である。一つの条件と式 (2.26) と (2.27) を求める過程について具体的に述べる。

図 2.8 に示すように各リンクにかける力とトルクを求めると次のようになる。

$$f_2 = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$\tau_2 = l\hat{X}_2 \times \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ lf_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.29)$$

$$f_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \cos \theta_2 - f_y \sin \theta_2 \\ f_x \sin \theta_2 + f_y \cos \theta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.30)$$

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ lf_y \end{bmatrix} + l\hat{X}_1 \times f_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l(f_x \sin \theta_2 + f_y \cos \theta_2 + f_y) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.31)$$

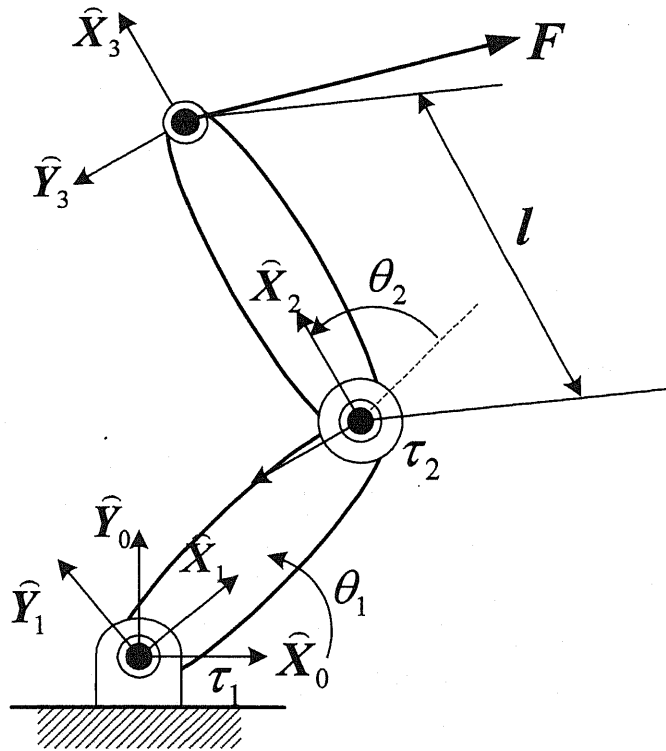


Fig. 2.8 Two-linked leg: This model is same with two-link manipulator applying a force at its tip.

l は、足首から膝までの距離、膝から太ももまでの距離である。すなわち、ALPHA 足部の二つリンクの長さは同一なので、二つのリンクの長さをただ l で表現した。 τ は関節のトルクである。式 (2.27) にはヤコビ行列が逆行列を持つので、関節の角度が '0' にならない。そのために本研究では、ALPHA の膝関節をいつも曲げていることにした。一方、式 (2.31) を書き直すと次のとおりである。

$$\tau_1 = l(f_x \sin \theta_2 + f_y \cos \theta_2 + f_y) \dots\dots\dots (2.32)$$

$$\tau_2 = lf_y \dots\dots\dots (2.33)$$

式 (2.32) と (2.33) を行列で表現すると、式 (2.26) となり、ALPHA は力センサーを持ってないが、関節モータの電流を測ることができるので、計測された電流情報を用いて関節トルクに変換することが可能である。

図 2.7 に示すように、上半身の F_0 に対応する部分が推定できたので、各足の重量を考慮して、足裏反力は次式で与えられた。

$$\begin{bmatrix} F_{Lz} \\ F_{Rz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{0Lz} \\ F_{0Rz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_L \\ m_R \end{bmatrix} g \dots\dots\dots (2.34)$$

ここで、 F_{OLz} と F_{ORz} は式(2.27)を用いて求めた左右の力で、 m_L と m_R はそれぞれ左右足の重さである。式(2.34)を用いると両足支持モデルでも、それぞれの片足の反力を求めることが可能なので、片足支持モデルおよび両足支持モデルのZMPの推定が可能となる。

提案した式(2.34)を用いて、両足のそれぞれ太ももに作用する力 F_{OLz} と F_{ORz} を計測する基礎的な実験を行った。実験環境としては、最初に電源がヒューマノイドロボットに入っていない状態から開始する。電源を入れる直後、角度指令値をヒューマノイドロボットの関節にリアルタイムで伝送する。式(2.34)は静的な条件での方程式なので、実験でヒューマノイドロボットの動きを約1.5秒間の姿勢を維持し、この動きを停止した状態で床面から受ける反力を推定する。この実験で提案した式(2.34)の利用可能かどうかの判断ができる。

実験結果を図2.9に示すが、0秒から1秒まではロボットの初期起動で、太もも関節の角度は -20° であるが、1秒から2秒までは、太もも関節の角度が -20° から 5° に変更され、それ以後は、ほぼ一定な角度で姿勢制御されている。その状態は初期の駆動からの最後まで外力の作用しない条件として両足で立っている姿勢である。図2.9(a)に示すように、2秒以後には静的な状態になるので、2秒以後から反力を比較する。 F_{OLz} は3.5Nで、 F_{ORz} は6.5Nであり、全体的な反力は10Nである。ALPHAの上半身は1kgなので、上半身による反力は9.8Nである。従って、式(2.34)を用いて求めた実験からの反力と理論的な反力がほぼ一致することがわかる。しかし、反力の分配は理想的ではない。左足の反力より右足の反力が大きいと言うのは、ALPHAの重量は右足の方にずれていることがわかる。

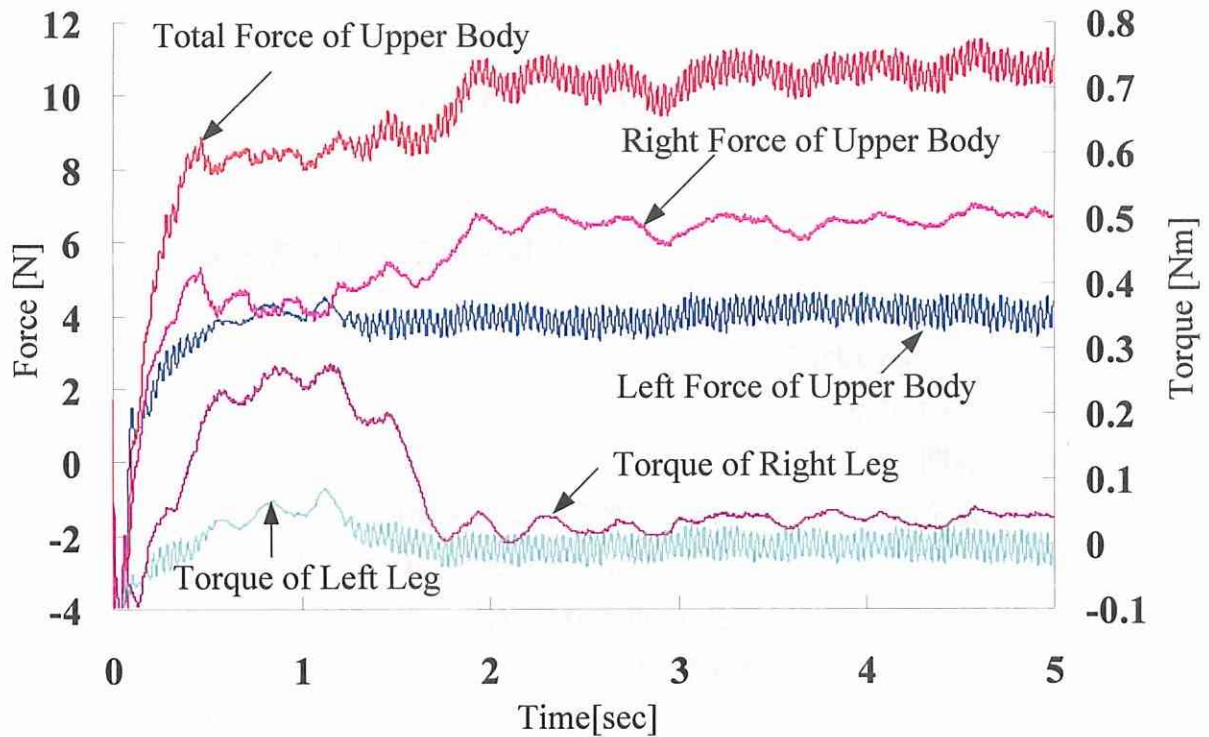
ここで、ZMP方程式を紹介する。ZMP方程式は“ヒューマノイドロボットは単一質点、重心高さ一定の場合に相当である”という仮定によって与えられる式として、次のとおりになる。

$$x_{ZMP} = x_{CoM} - \frac{z_C}{g} \ddot{x}_{CoM} \dots\dots\dots(2.35)$$

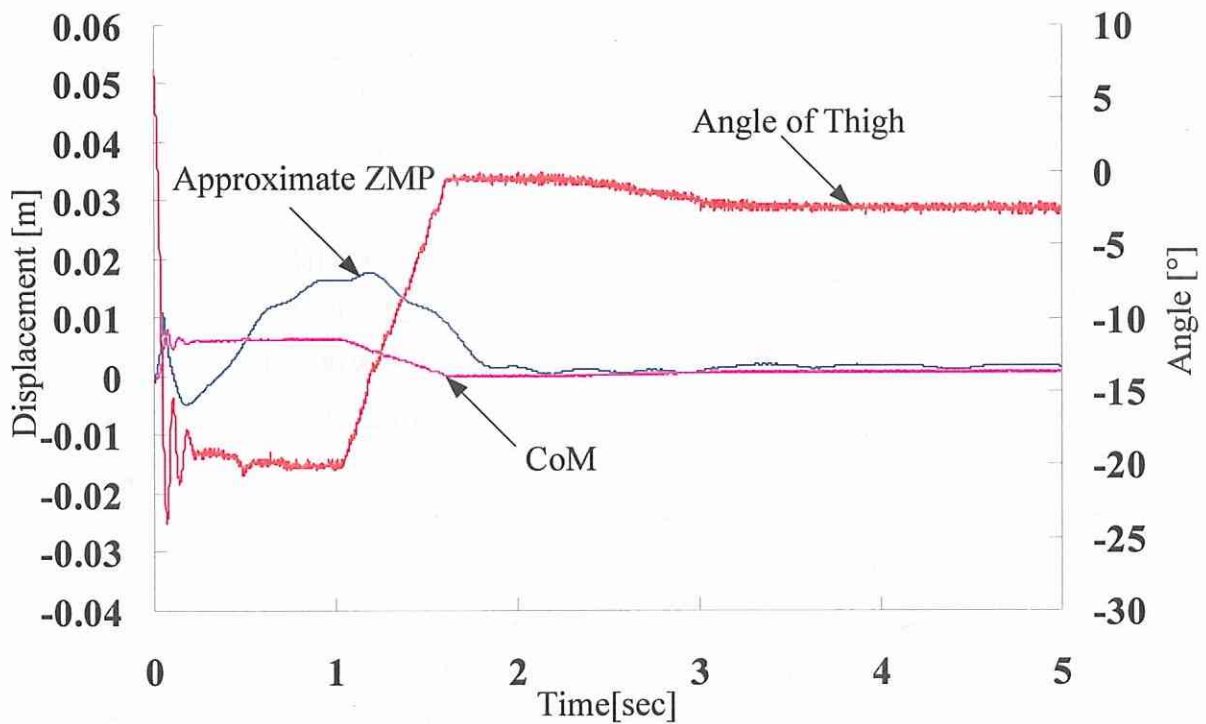
x_{CoM} は重心のx軸上の位置、 z_C は重心高さである。式(2.35)に基づくと重心の動きがない場合、すなわち、静的な場合は次のようになる。

$$x_{ZMP} = x_{CoM} \dots\dots\dots(2.36)$$

図2.9(b)に示すように、0秒から1秒の間は最初起動の影響によって重心と近似ZMPの位置は一致してない。1秒から2秒の間は太ももの回転によってヒューマノイ



(a) Force and torque of the upper-half of the body when ALPHA is supported on two legs.



(b) Trajectory of approximate ZMP, CoM, and angle of thigh

Fig. 2.9 It is possible to evaluate the both ground reaction force and ZMP with proposed method when there is no move and humanoid robot stands with two legs.

ドに動きが生じるので、重心と近似 ZMP も、動的な影響で一致してない。しかし、2 秒以後の場合は動きがない状態では提案した近似 ZMP と重心位置がだいたい一致する。この実験結果が ZMP 方程式とだいたい一致することで、提案する近似 ZMP は、静的な場合には有効性を示している。

2.4 カセンサーを用いた ZMP 計測

前節では支持モデルごとにモータトルク情報を用いて近似 ZMP を推定したが、本節ではヒューマノイドロボットの足裏に実際のカセンサーをつけて前後運動を行い、厳密な ZMP を測定した。前後運動はヒューマノイドロボットの関節を動かして前傾運動を行った場合と、関節角度を固定して外力を加えて前後運動を誘発する場合に分けて行った。二つの場合についてセンサーによる厳密な ZMP とモータトルクによる近似 ZMP とキネマティクスから求められた重心、それぞれの位置を比較し、近似 ZMP の有効性を明らかにした。ダイナミクスの影響を無視した手法なので、本研究ではダイナミクスが生じないように制御を行った。まず、使用したヒューマノイドロボット ALPHA の仕様について図 2.10 と表 2.1 に示す。

2.4.1 ゆっくりとした前向き運動

ヒューマノイドロボットの足首のモータによって、ゆっくりした前傾運動を行わせ、カセンサーによる厳密な ZMP とモータトルクによる近似 ZMP を求め、それぞれを比較した。図 2.11 に示すように、この実験の特徴としては関節モータのみの回転によってヒューマノイドを前向きに動かすが、ゆっくりした運動するので慣性の影響も無視ができ、また、外力も加えない。この実験では、床面が勾配のない平面で、ヒューマノイドロボットの両足裏の全体が床面に接触していると仮定した。この実験を行うことで、厳密な ZMP と近似 ZMP と重心の関係がどのようになっているのか明らかにすることができる。

この実験の結果を図 2.12 に示すが、厳密な ZMP と近似 ZMP と重心の位置は 2 秒から 4 秒の間では、ほぼ一致していることがわかる。この区間は、前傾の運動が始まった区間で、重心の移動量が少なかった区間である。しかし、重心の位置は、厳密な ZMP より 5 秒以後から離れてゆき、近似 ZMP は約 6 秒以後から厳密な ZMP との差が大きくなっている。この結果では、4 秒以前では比較的静的な運動で、4 秒以後はダイナミクスの効果、すなわち動的な運動効果が出現している区間である。これらの実験結果から、比較的静的な運動区間では、理論的な予想と同じく、重心と ZMP は一致する。しかし、動的な効果が大きくなると、厳密な ZMP と重心の差は大きくなってゆく。一方、近似 ZMP については、厳密な ZMP と重心の中間的な位置にあり、

動的な影響を重心情報より良く示していることがわかる。さらに、厳密な ZMP と近似 ZMP が 3cm 以下の場合には、だいたい一致したことがわかる。従って、近似 ZMP がある範囲以内に存在し、ヒューマノイドロボットの状態が準静的な場合なら、厳密な ZMP に代わりに適用可能であることがわかる。

TABLE 2.1 Specification of ALPHA.

D.O.F	22 10 for upper body, 12 for legs.
Weight	2.0kg
Height	313mm

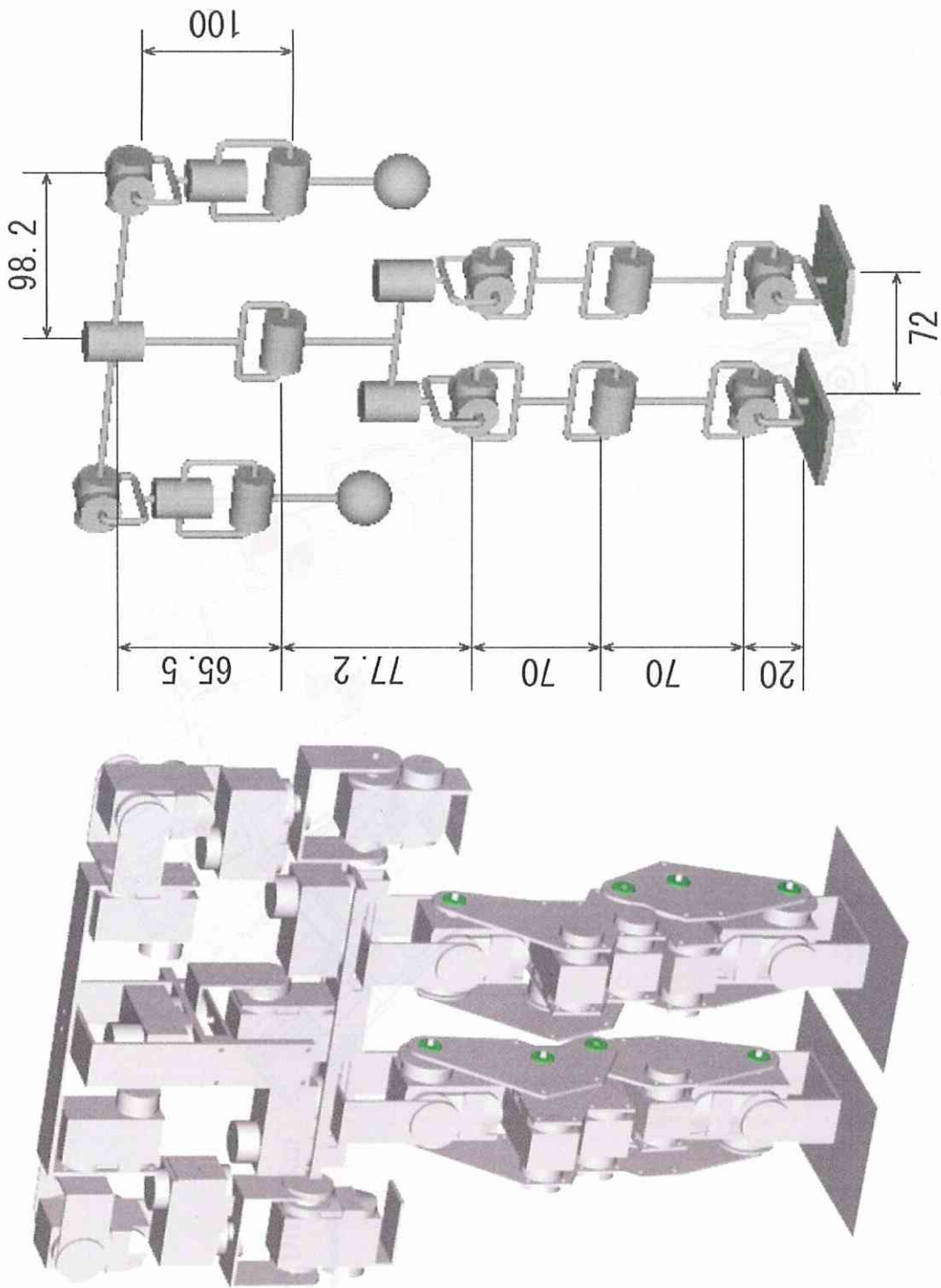


Fig. 2.10 22 D.O.F. compact humanoid robot (ALPHA)

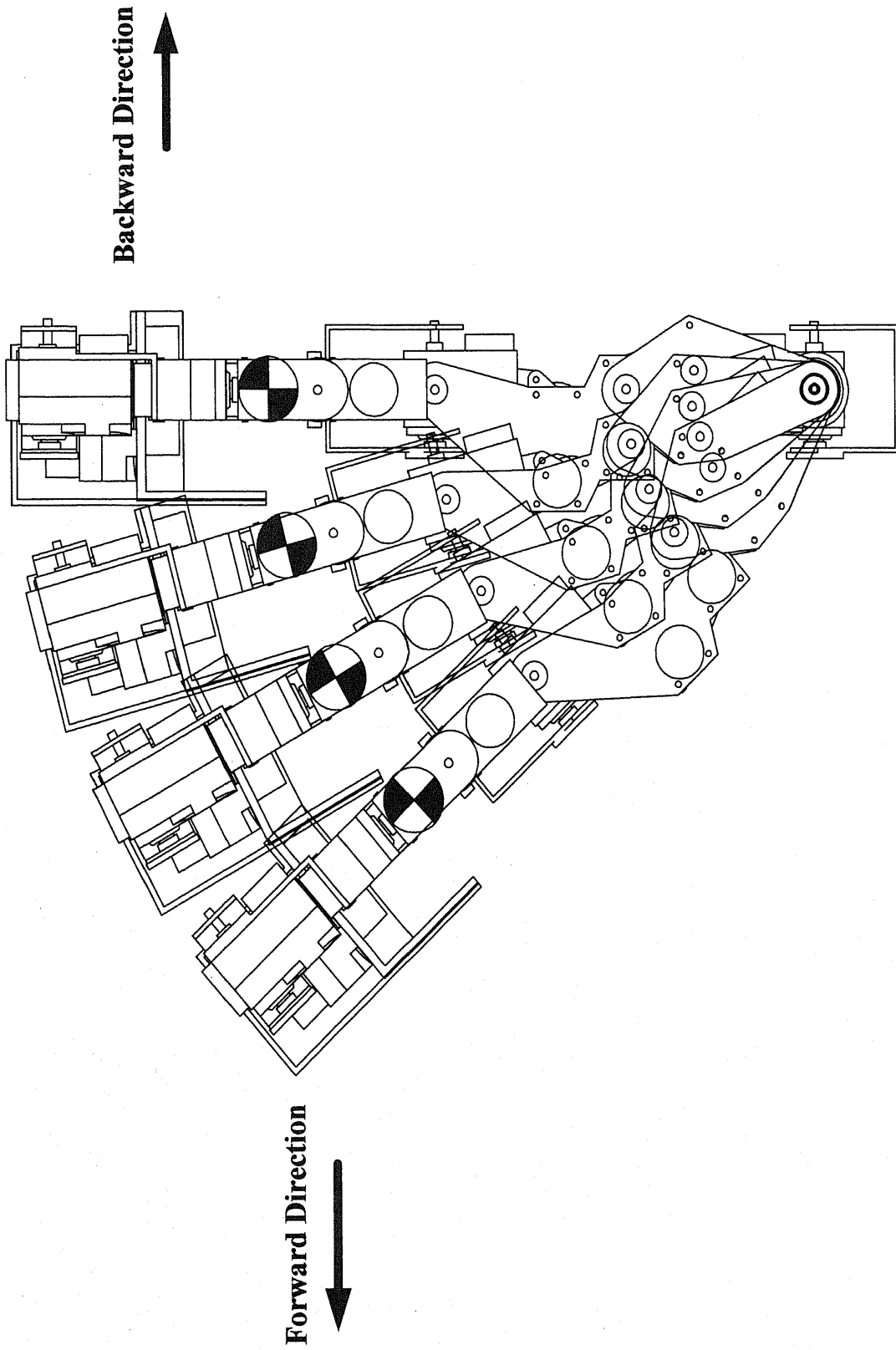


Fig. 2.11 Humanoid robot makes its joint angle rotated to move its Center of Mass (CoM) forward. However, it stopped moving CoM forward to avoid falling down.

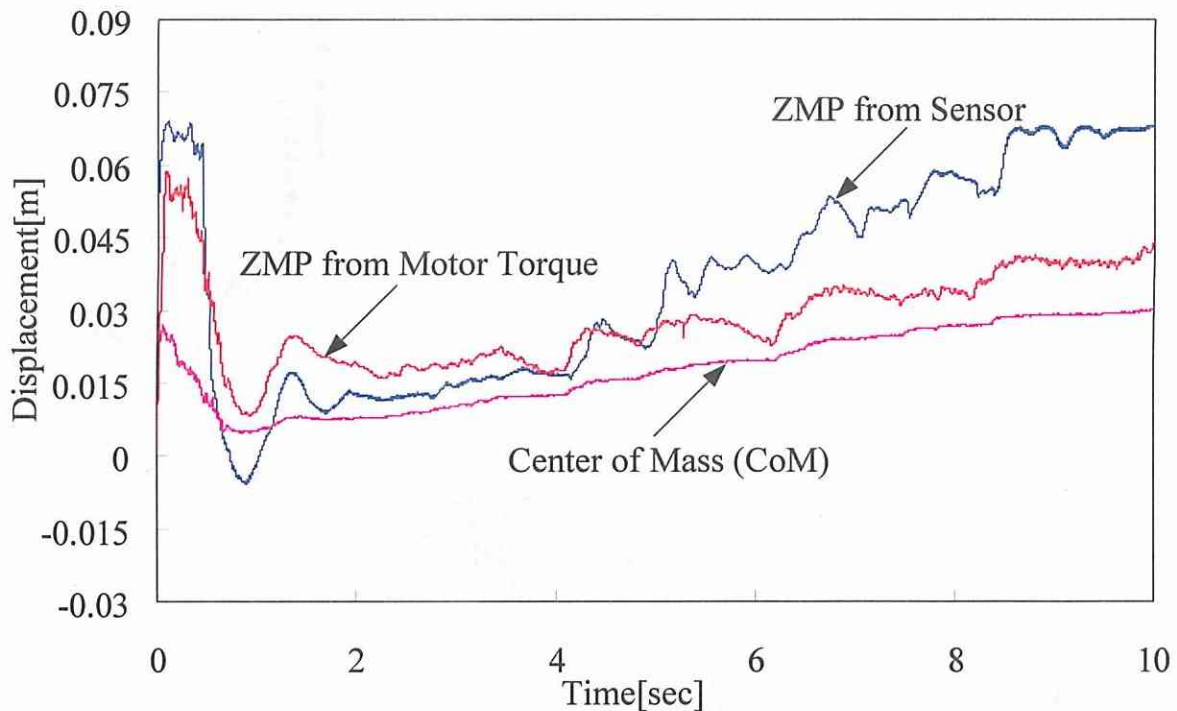


Fig. 2.12 This graph indicates each position of a ZMP from sensor, the other ZMP from motor torque, and CoM when humanoid robot moves its CoM forward. The three data are almost coincided with one another in the statistic condition. However, the gap of distance begins to be large when dynamic effect occurs⁽³²⁾.

2.4.2 外力による前後運動

2.4.1 では、ヒューマノイドロボットが自分で関節を動かしたことで、外力が作用しない場合の ZMP の挙動を推定した。本章では、外力を加えたことで、外力が作用した場合の ZMP の挙動を調査する。この実験の特徴は、ヒューマノイドロボットの関節を位置制御することで固定し、外力によって前後運動を誘発させたことである。本実験に適用されたロボットは式 (2.18) と式 (2.23) を用いてモータトルクと近似 ZMP を推定機能を有しており、両足裏には薄膜の力センサーをつけているので、式 (2.23) を用いて厳密な ZMP が求められる。同一のヒューマノイドロボットを用いて、近似 ZMP と厳密な ZMP の両者が求め、関節のキネマティクス情報を用いて重心位置が求められる。外力の影響を受ける時、厳密な ZMP と近似 ZMP および重心位置を比較して、三つの関係を明らかにする。

実験の様子を図 2.13 に示すが、ヒューマノイドロボットの上部を手で揺らすことで外力を加える。手で外力を加えることで、外力の方向、外力の大きさを制御せずに実験を行う。従って、この実験では、ただ外力の影響による厳密な ZMP と近似 ZMP と重心の位置を計測することのみに重点を置く。この実験では、ヒューマノイドロボッ

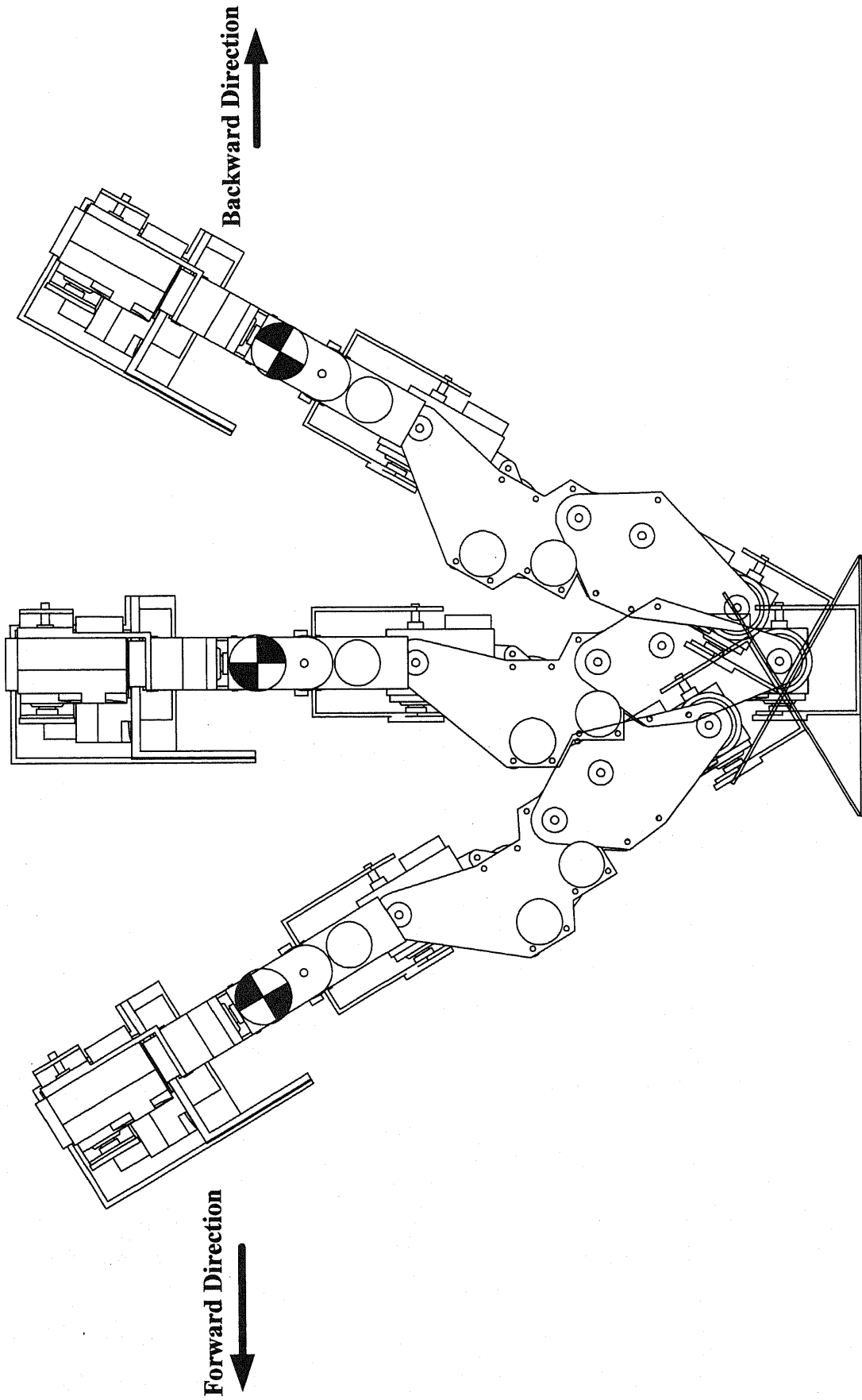


Fig. 2.13 External force shakes humanoid robot forward and backward. Humanoid robot always has the fixed joint angle although external force tried disturbing it from maintaining fixed angle of joint. Therefore, Humanoid robot must stand up with tiptoes or heels.

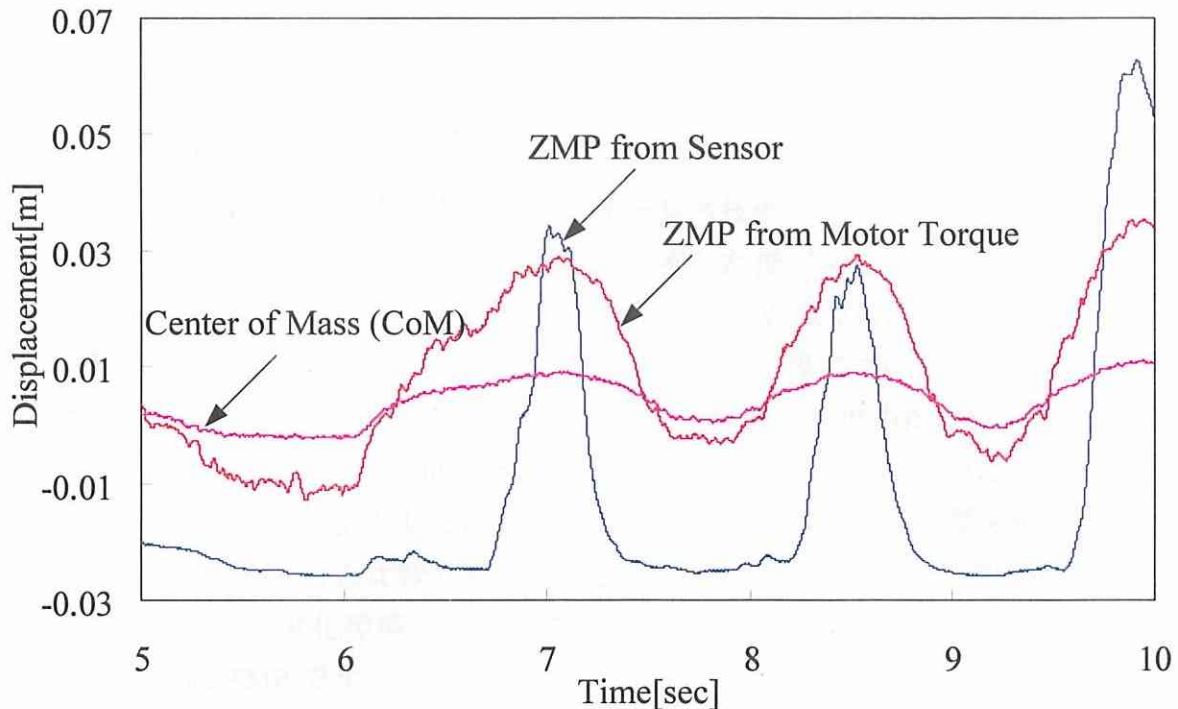


Fig. 2.14 This graph presents each position of a ZMP from sensor, the other ZMP from motor torque, and CoM when humanoid robot is shaken by external force. Approximate ZMP coincides with CoM when there is no effect of external force in humanoid robot. However, approximate ZMP coincides with exact ZMP from force sensor when external force is exerted to humanoid robot. CoM from kinematics cannot provide any information of external force.

トの関節角度を固定し、床面は勾配のない平面で、両足裏全体が床面に接触したと仮定する。

この実験結果を図 2.14 に示すが、実験で約 5 秒、7.5 秒、9.5 秒の付近は外力が作用しない状態で、近似 ZMP と重心の位置がほぼ一致している。この実験結果は 2.4.1 の実験結果と同一である。一方、7 秒、8.5 秒、10 秒の付近は外力が外力が作用している状態で、厳密な ZMP は外力が加わると上昇する。その時、近似 ZMP と重心の位置が離れてしまい、近似 ZMP は上昇した厳密な ZMP とほぼ一致している。図 2.14 に示すように、重心位置はキネマティクス情報から求められるので、外力によって少し関節の角度により、多少のゆらぎは存在するが、外力の効果をほとんど表現できていない。しかしながら、近似 ZMP と厳密な ZMP は外力の影響を表現できていることがわかる。すなわち、近似 ZMP は厳密な ZMP とは完全に一致していないが、重心情報に比較して外力変化の影響を感知していることがわかる。この実験で、近似 ZMP と厳密な ZMP との誤差が存在することがわかる。ヒューマノイドロボットの重心が集中質量系であると仮定して近似 ZMP を求めているが、実際はヒューマノイドロボットは分布質量系であり、集中質量系と分布質量系の差が、近似 ZMP と厳密な ZMP との誤差が

生じると判断される。

2.5 要約

本章では、ZMP の概念を紹介し、センサーレス技術としてモータ電流情報を用いて、近似 ZMP を推定する方法を提案した。提案した推定手法を用いてヒューマノイドロボットが静的に立っている時、両足関節のトルクと近似 ZMP を計測して見た。また、近似 ZMP 推定方法の有効性を確認するために、足裏につけた薄膜の力センサー情報を用いた厳密な ZMP と足部のモータ電流情報を用いて求めた近似 ZMP とキネマティクス情報のみから求めた重心との比較検討を行った。これらの比較から、近似 ZMP はセンサーレス技術として、力センサーを用いずに外力の影響を推定できるので、重心情報のみの場合と比較して、外力変化の環境でより有効な制御が可能である。

本論文では、外力変化環境として、重力方向が変化に対応するサーフィンロボットを提案し、近似 ZMP でサーフィンを実現することを試みる。

第3章

近似 ZMP の直接制御を用いた サーフィン運動制御

3.1 概説

第2章では、ZMP の概念と ZMP を算出方法について述べた。また、本研究で提案したモータトルク情報を用いて近似 ZMP を推定する方法について説明し、片足支持モデルと両足支持モデルに分けて、それぞれの場合の近似 ZMP 推定手法を示した。近似 ZMP の有効性を確認するために、実際のカセンサをヒューマノイドロボットにつけて厳密な ZMP を算出し、厳密な ZMP と近似 ZMP を比較した。その実験結果、ヒューマノイドロボットにあまり動きがない場合、近似 ZMP は重心の位置とだいたい一致した。この結果は興味のない結果であるが、ヒューマノイドロボットに外力を与えてヒューマノイドに作用する重力方向を変化させた場合、ロボットのキネマティクス情報から求められる重心の位置はあまり変化しないが、近似 ZMP はトルク情報を用いているので、重力方向の変化を検知できる可能性を明らかにした。

この近似 ZMP の特徴を有効に活用するために、カセンサ無しの条件下で連続的に重力方向が変化されるタスクとしてヒューマノイドロボットのサーフィン運動を実現することにした。SONY の加藤らも SDR-4X⁽³³⁾ の運動性能評価法として6自由度のプラットフォームに乗せ、回転運動の性能評価法を提案したが⁽³⁴⁾、プラットフォームの角度変化量がサーフィン運動としては不十分だと考えられるので、本研究ではプラットフォームの角度変化量をより大きくすることでサーフィンを実現しようとした。また、サーフィンロボットというとエンターテインメントロボットとしても研究される価値があると考えられる。図 3.1 に示すように、サーフィン運動とは連続的に重力方向が変化するので、高度な運動タイミングと直立安定性の平衡感覚が必要である。また、ヒューマノイドロボットがサーフィン運動を実現するためには連続的に重力の変化を検知し、直立安定性を自動的に制御しなければならない。本研究で提案した近

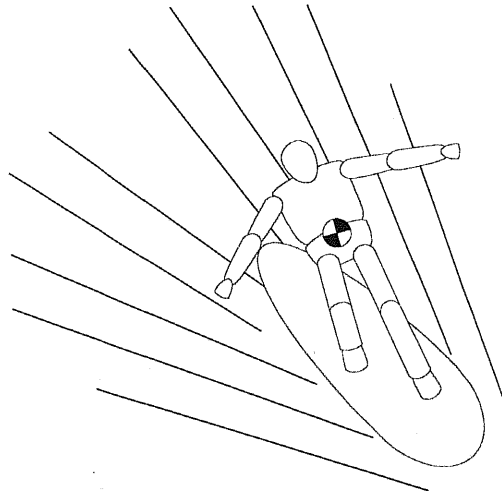
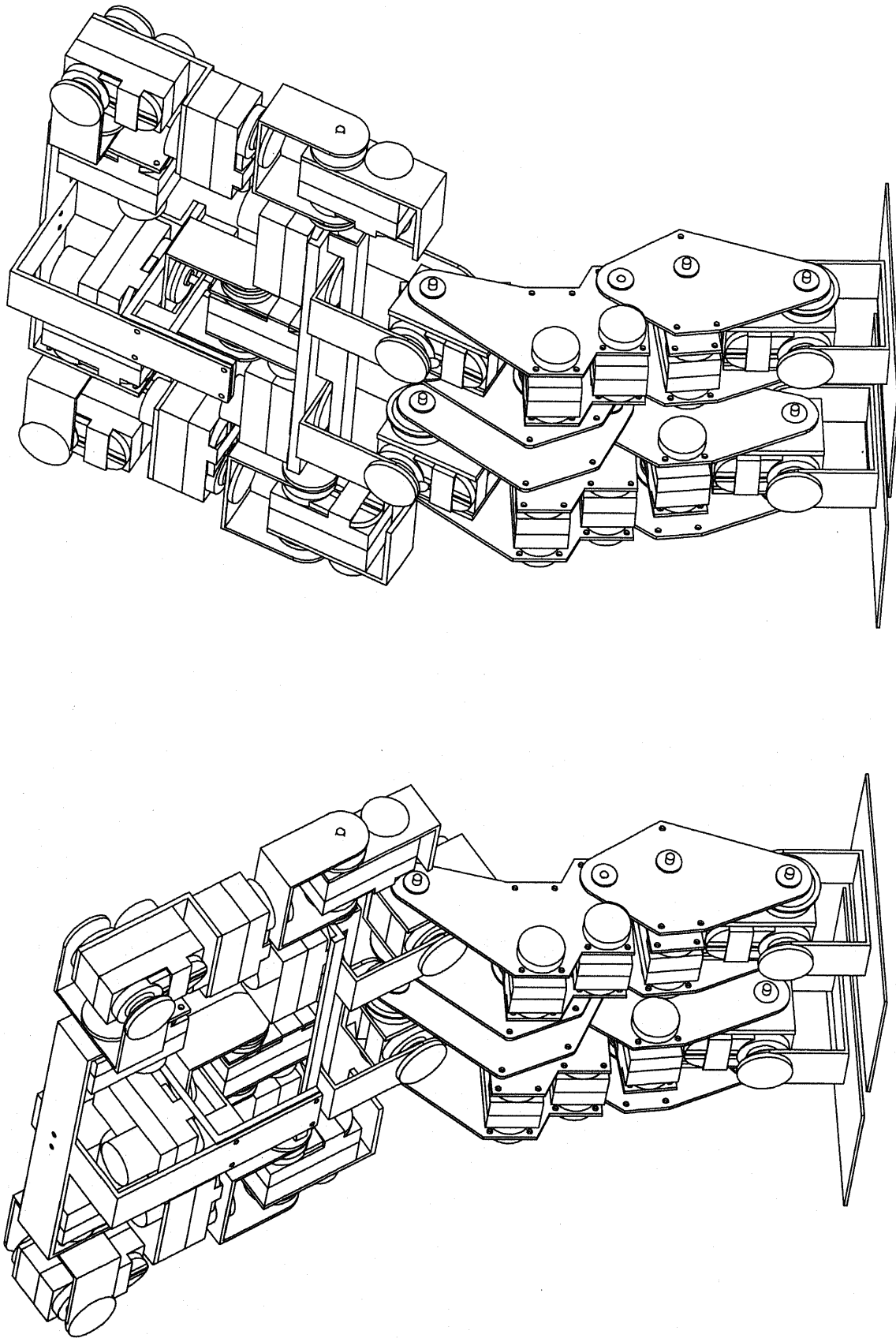


Fig. 3.1 It is one of the characteristics in surfing condition that direction of gravity toward human changes continuously. Therefore, it is necessary to have the sense of equilibrium and perfect timing for performing surfing.

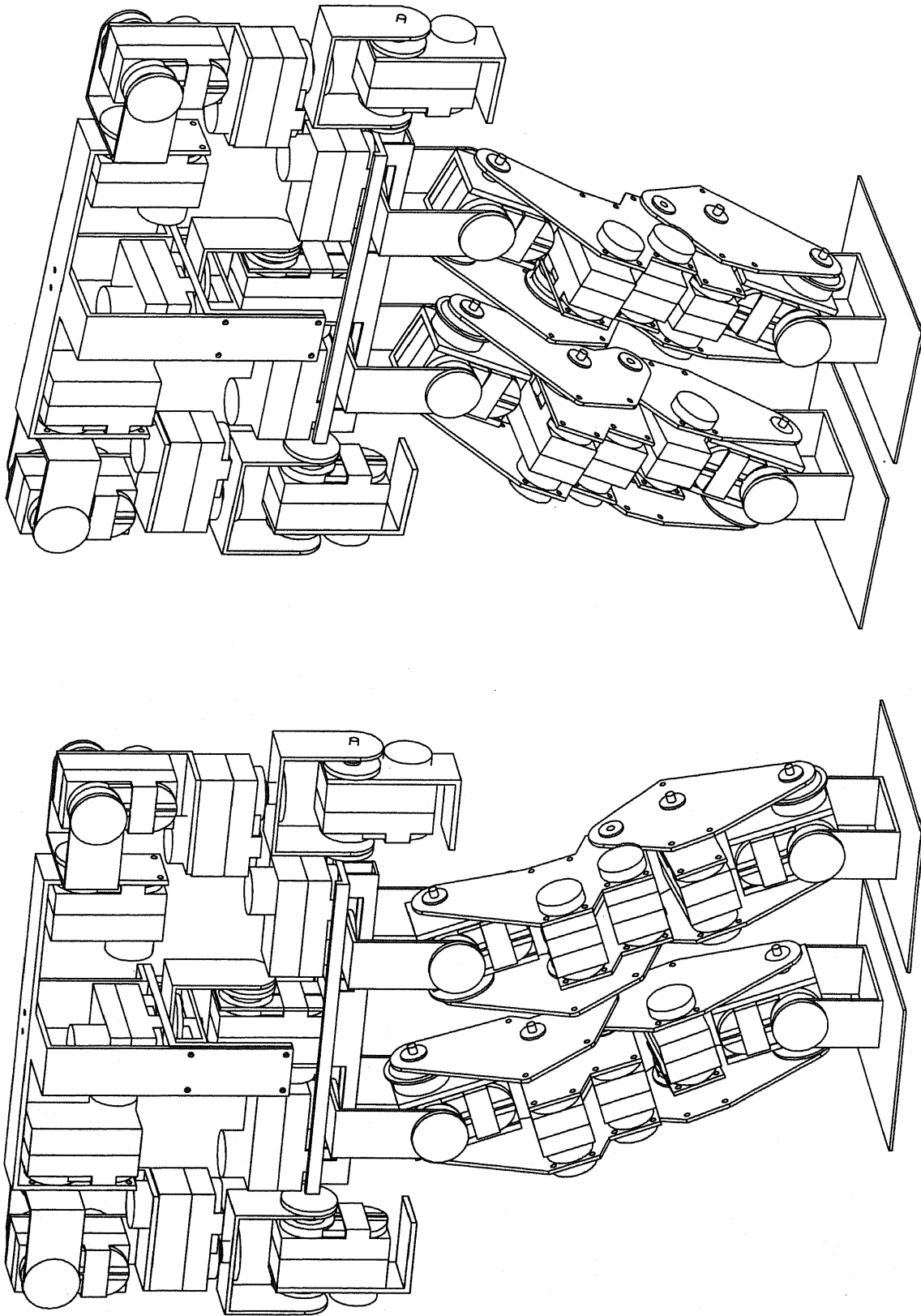
似 ZMP を用いて、重力方向の変化を検知が可能であるので、近似 ZMP を用いてどこまでサーフィン運動を実現できるかを検証する。

3-2 サーフィン運動制御方法の概要

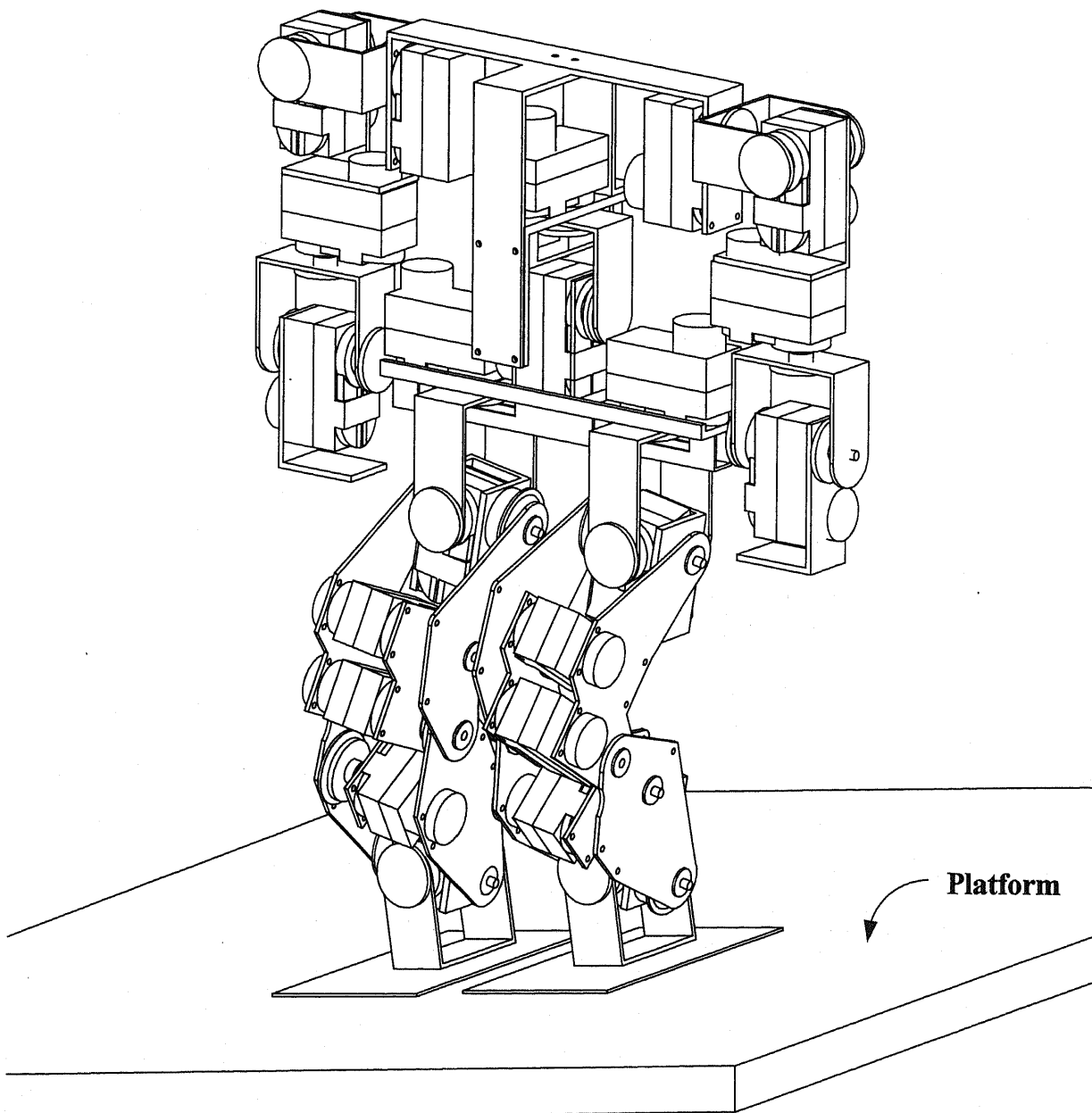
本研究で行うサーフィン運動パターンは二つの種類で、サーファの前後方向サーフィン運動と両足方向の横方向サーフィン運動である。前後方向サーフィン運動は近似 ZMP の直接制御による方法と傾斜面の角度推定を用いた方法を用いており、両方法とも ALPHA の太ももの角度を制御することで、サーフィン運動を実現している。前後方向サーフィン運動パターンは両方とも近似 ZMP を用い、前者はその値を用いた直接制御、後者はその値を用いて傾斜角を推定し、上半身を重力方向と一致させる方法である。一方、横方向サーフィン運動には傾斜面の角度推定による方法と足裏反力の変化を用いる方法があり、横方向サーフィン運動は足の長さを制御することによってサーフィン運動を実現している。前後方向の二つの方法と横方向の傾斜面の角度推定による方法は近似 ZMP を用いるが、足裏反力の変化分を用いた制御方法は近似 ZMP を用いずに、床面から受ける反力の変化分のみを用いてサーフィン運動を実現する。また、第3章から第5章の内容と異なって、第6章では床面から受ける足裏反力の釣り合いによるサーフィン運動を実現を目指しており、静的なモーメントの釣り合いモデルを構成し、そのモデルを活用する手法である。すなわち、両足の ZMP の力とモーメントの力学的な平衡の仮定を用いてモデルを構成し、両足裏の反力が一致させるように制御する手法である。この手法は足首のロール角度と太もものロール角度を制御してサーフィン運動を実現する方法と、片足の長さを制御してサーフィン



(a) Alpha can keep its stability in the forward and backward surfing with controlling thigh angle when the ground becomes slope.



(b) Alpha can keep its stability in the rightward and leftward surfing with controlling roll angles of ankle and thigh.



(c) Alpha can keep its stability in the rightward and leftward surfing with controlling the length of a leg when the ground becomes slope.

Fig. 3.2 Alpha can perform surfing on both sides; one is forward and backward direction, the other is rightward and leftward direction. Forward and backward direction surfing method includes both only approximate ZMP control surfing method and slope angle estimation surfing method. Rightward and leftward direction surfing method contains both slope angle estimation surfing method and increased reaction force estimation surfing method.

運動を実現する方法，二種類のサーフィン運動パターンがある。

前後方向および横方向のサーフィン運動パターンは図 3.2 に示すが，本章では，まず近似 ZMP の直接制御によるサーフィン運動手法について説明する。

3-3 近似 ZMP の直接制御による前後方向のサーフィン運動

前節では、本論文を構成する全体的なサーフィン運動手法について概略的に説明したが、本節で近似 ZMP の直接制御を用いたサーフィン運動制御について提案する。図 3.3 に示すように近似 ZMP の直接制御とは、単純に言うと重心を移動させることで、近似 ZMP を直接制御して目標位置まで移動させることである。すなわち、近似 ZMP 推定の結果を用いることで、現在推定された近似 ZMP を設定した目標 ZMP へ行くように重心を制御する手法である。サーフィン運動ロボットの直立安定性は、重力方向に射影した時に重心の位置を足裏の支持多角形内部に置く静的安定性と、ダイナミックスの影響による動的安定性の二つに大別され、本手法は静的安定性に重点をおいたものである。

本研究で行われた近似 ZMP の直接サーフィン運動制御の概念を図 3.3 に示す。図 3.3 の左図に示すように、最初水平面上にロボットが置かれた場合、支持多角形内に重心射影位置があれば、直立安定性を保たれるので、その時の重心射影位置を目標 ZMP として設定する。図 3.3 の真中の図に示すように平面が傾くと重力方向が変化し、重心の重力方向の射影位置が変化する。この射影位置の変化はロボットの重心情報から求められないが、近似 ZMP を用いて重力方向の変化の検知ができる。この図に示すように近似 ZMP を目標 ZMP に一致させることで、重力方向のロボットの重心位置の射影を足裏の支持多角形に移動させることができ、直立安定性の保持ができると考えられる。具体的な制御方法は、ロボットの太ももの角度を制御することで、ロボットの上半身の姿勢を制御し、重心の位置の制御を実現している。

まず、近似 ZMP が目標 ZMP からどの程度離れているのかを検知するためにも目標 ZMP から現在の近似 ZMP との距離誤差 $e(k)$ を次の式で求める。

$$e(k) = ZMP_d - ZMP(k) \dots\dots\dots(3.1)$$

ここで、 ZMP_d は目標 ZMP の位置で、 $ZMP(k)$ は計測される近似 ZMP の位置である。

図 3.3 の右図に示すように、前後方向のサーフィン運動実現のための ALPHA の重心を移動させるために、太もも角度を制御することにした。具体的な制御量 $u(k)$ は、式 (3.1) による目標 ZMP との誤差を用いて PD 制御で実現している。その制御量を太ももの関節角度に適用してサーフィン運動を実現する。それを式で書き示すと次のとおりである。

$$u(k) = K_p e(k) - K_D \dot{e}(k) \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\theta_{data}(k) = u(k) \dots\dots\dots(3.3)$$

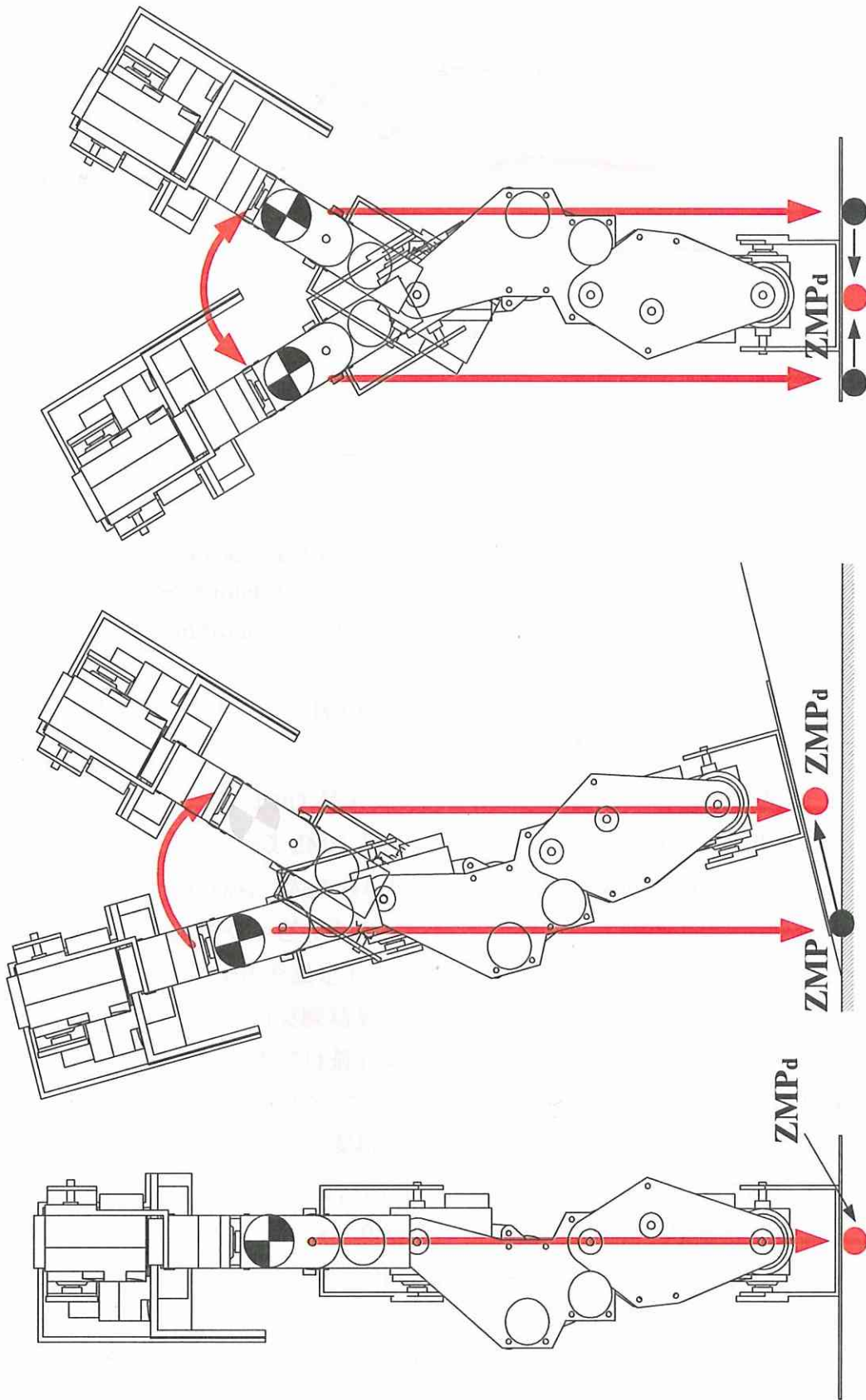


Fig. 3.3 Approximate ZMP direct control method: Desired ZMP is set at first, then estimated approximate ZMP goes to desired ZMP. Estimated approximate ZMP is separated from desired ZMP when ground begins slope. This control method makes approximate ZMP coincided with desired ZMP to maintain its stability.

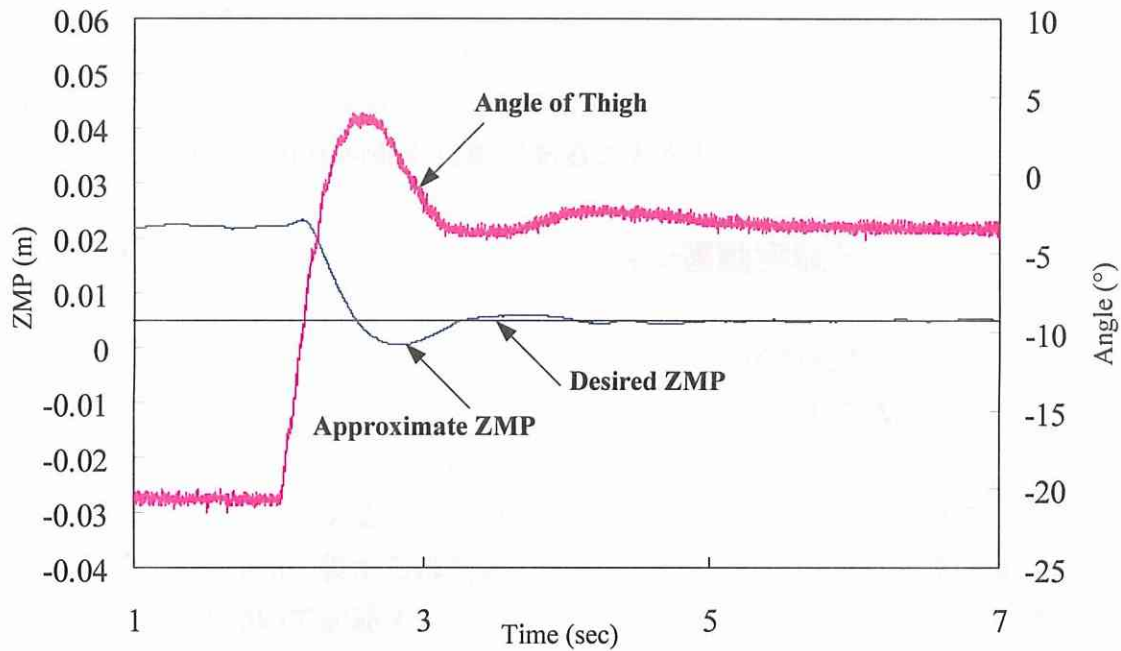


Fig. 3.4 A basic experiment was performed to confirm the applicability of both approximate ZMP and angle of joint thigh because the each units of those applied to equations of (3.1) to (3.4) are different from each other.

$$\theta_{thigh}(k) = \theta_{thigh}(k-1) + \theta_{data}(k) \dots\dots\dots(3.4)$$

ここで、 K_P と K_D はPDゲインであり、 θ_{thigh} は太ももの角度である。上記の式(3.1)から式(3.4)まで近似ZMPと目標ZMPの誤差を制御アルゴリズムで目標角度に変換することであるが、ZMPの単位は[m]で、角度の単位は[°]であるので、制御アルゴリズムが有効に働くかどうかを判断するために、実機で基礎的な実験を行うこととした。そこで目標ZMPを設定して近似ZMPが目標ZMPに制御できるのかどうかについて実験を行い、その実験結果を図3.4に示す。

この実験で、2秒までは最初の起動の安定化モードで、2秒から近似ZMPを目標ZMPの0.5cmに近づくように太ももの関節を制御した。ALPHAの足裏の座標系は図3.5に示すように、各足裏の支持ポイントは点Aと点Bであるので点Aと点Bの間中点Cを原点とした。従って、ZMPが原点と一致すると安定であると考えられる。本実験では安定である原点から0.5cm外れると、不安定になるのかを調べることで目標ZMPを0.5cmとした。2秒まではALPHAの太もも関節の角度が約-20°で、計測された近似ZMPは約2cmであるが、2秒からALPHAの太もも角度の制御を開始する。制御が始まって太ももの関節角度が-20°から上昇する時、近似ZMPも2cmから下る。2.5秒で太もも関節の角度が5°まで上昇し、近似ZMPは0になってから、約3.5秒では、太ももの角度が約-3°になり、近似ZMPが目標ZMPに一致していることがわか

った。ALPHA の全体的な重心は上半身に位置するが，このアルゴリズムによって体の全体を動かすのではなく，上半身のみを動かすので，多少太ももの関節角度の制御範囲が大きくなったこともわかった。この結果に示すように，式 (3.1) から式 (3.4) を用いて近似 ZMP の直接制御が可能であることがわかる。

3.4 近似 ZMP の直接制御によるサーフィン運動実験と結果

図 3.5 に示すように ALPHA の片足裏サイズは，前後の長さが 10cm，横の長さは 6cm，両足の間は 3cm である。片足および両足の支持モデルで ALPHA の足裏のサイズが支持多角形であると言える。図に示すように，ALPHA の片足では，点 A と点 B がそれぞれ足裏の中心であるが，その位置は横方向に左足と右足対称で，前後方向には爪先から後方で 6cm，後からは前方で 4cm である。ALPHA の座標系は，具体的に原点との関係に基づいて記述すると，点 C が原点として，y 軸には両足の真ん中で x 軸には点 A と点 B と同一の位置である。従って，支持多角形は ALPHA の前後方向 (x 軸) 座標系で -4cm から 6cm の間である。本実験では目標 ZMP を前方の 0.5cm の位置に設定して，近似 ZMP が目標 ZMP に戻るように制御した。図 3.5 および図 3.6 に示すように，ロボットが直立しているプラットフォームを回転させることで，サーフィン運動が実現できる。

図 3.6 に示すのは本研究で使われるプラットフォームである。プラットフォームはモータ，ベアリング，透明アクリルで構成された 1 自由度の駆動システムで，PC と

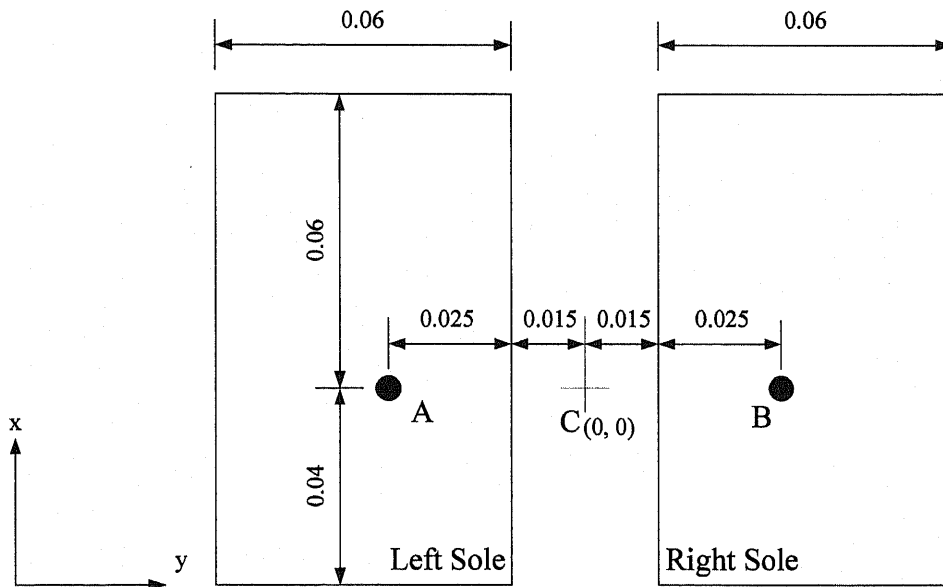


Fig. 3.5 Detail dimensions of feet of Alpha. That can be said as the support polygon. Each sole of two legs has an origin point of A and B, respectively. However, there is just one original point C in the coordinate system of ALPHA.

つながって様々な回転パターンの実行ができる。ALPHA がプラットフォームの亚克力に乗せられてサーフィン運動を行うが、亚克力の摩擦係数が非常に低いので、ALPHA が滑りやすくなる可能性が高い。そのような理由のため、本研究では亚克力にゴムをかぶせて滑りを防止するようにした。

図 3.7 にはサーフィン運動の姿勢を示す。ALPHA をプラットフォームに乗せてから、プラットフォームを回転させる。プラットフォームが回転を始めると、提案したアルゴリズムである式 (3.1) から式 (3.4) まで適用して ALPHA の重心を制御する。たとえば、プラットフォームが CW (Clock Wise) の方向に回転すると、ALPHA は CCW (Counter Clock Wise) の方向に重心を回転させる。一方、プラットフォームが



Fig. 3.6 Platform: This platform consists of three parts; one is motor, another is connection part with PC, and the other is plate that has low friction level. Therefore, the plate is covered with rubber.

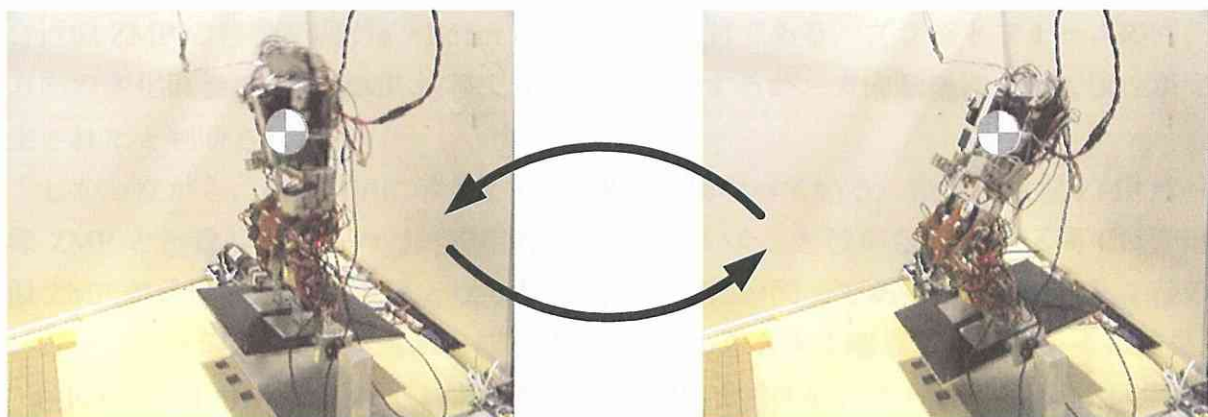


Fig. 3.7 Forward and backward surfing: Alpha moves its CoM (Center of Mass) in direction of CW (Clock Wise) when the platform rotates in direction of CCW (Counter Clock Wise). In the contrary, Alpha moves its CoM in direction of CCW when the platform rotates in direction of CW.

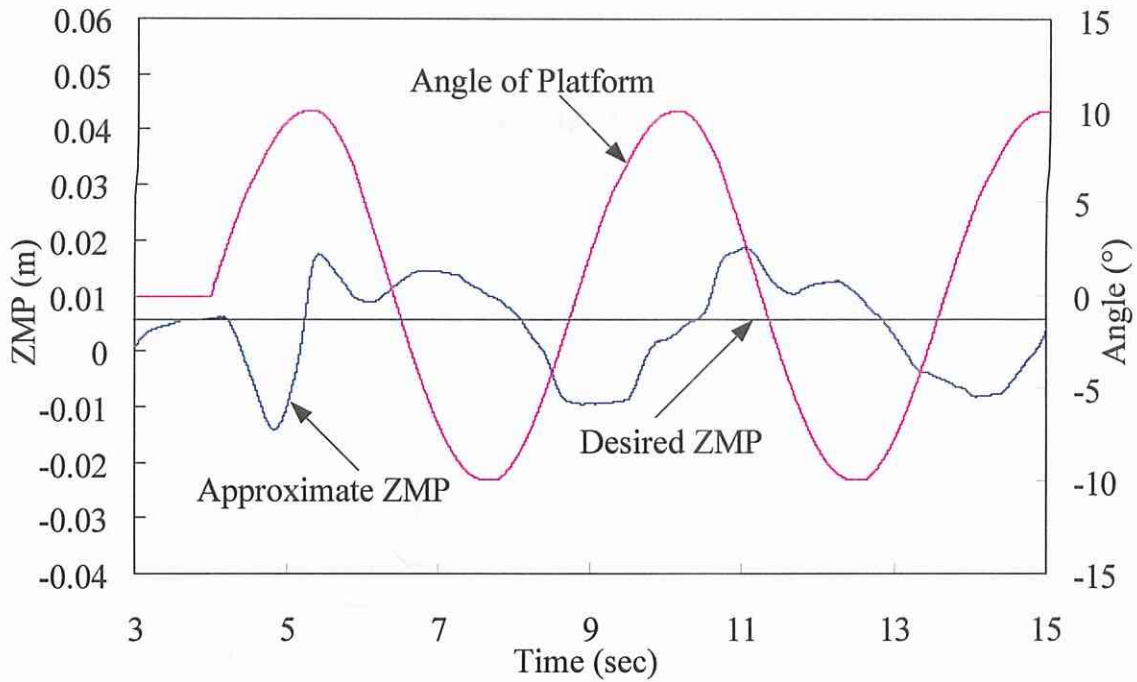
CCW の方向に回転すると、ALPHA は CW の方向に重心を回転させる。床面が周期的に回転するので、このような動作を繰り返すことでサーフィン運動を実現する。

プラットフォームの回転パターンはサイン波形の二種類としたが、二つのパターンで速い速度で回転するパターンを短周期、より遅い速度で回転するパターンを長周期と定義する。回転速度は 1Cycle を長周期では 4.8sec と短周期では 2.8sec とし、最大傾斜角度は $\pm 10^\circ$ とした。前後方向のサーフィン運動は、プラットフォーム角度（傾斜角）が 8° を超える時、ALPHA を制御しないと倒れるので、最大傾斜角を $\pm 10^\circ$ として、この値を採用した。二つの回転パターンを実施し、サーフィン運動を実現することとしたが、その実験結果を図 3.8 に示す。

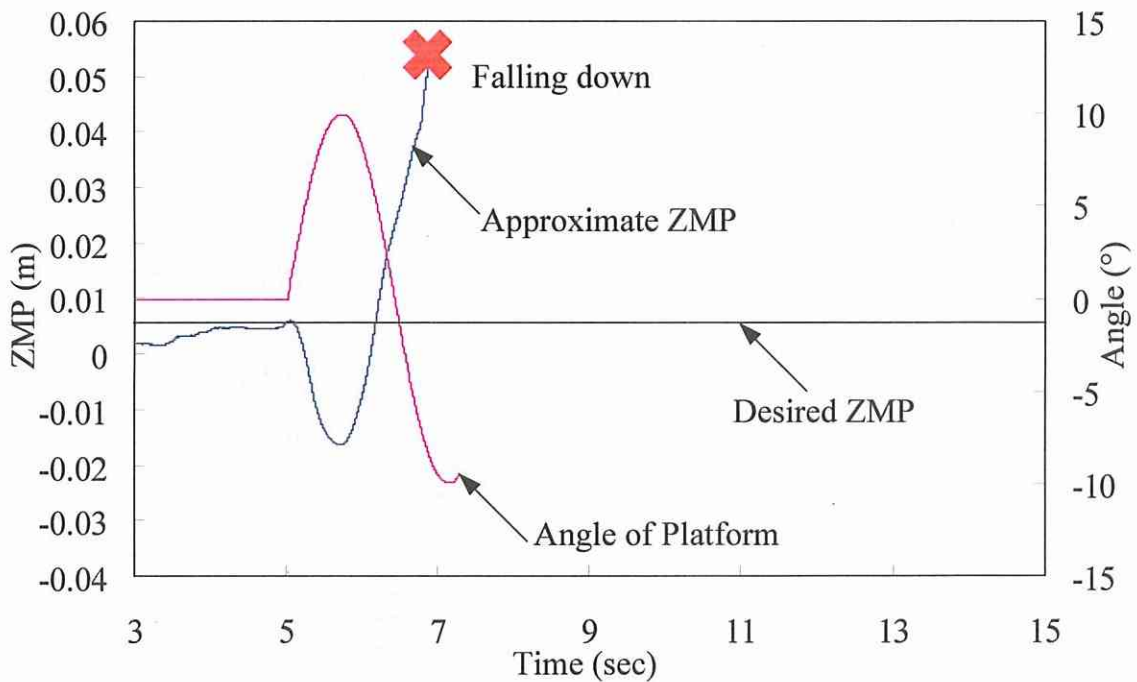
図 3.8(a)に長周期の 4.8 秒 Cycle の制御結果を(b)に短周期の 2.8 秒 Cycle の結果を示すが、両者とも最初の計測 ZMP は約 0.05cm で目標 ZMP と一致しており、ALPHA は安定的に直立している。このように安定的な直立動作から回転を始めたが、サーフィン運動の結果は異なった。

まず、図 3.8(a)に示すようにプラットフォームがゆっくり回転した場合はサーフィン運動は成功した。ALPHA を制御しない場合は、プラットフォームの角度が $\pm 8^\circ$ を超えると ALPHA は倒れてしまうが、この実験では最大傾斜角度は $\pm 10^\circ$ なので、制御がうまく行かないと ALPHA は倒れるはずである。しかしながら、ゆっくり回転する場合は最大傾斜角度でも直立安定性は保たれ、サーフィン運動を行うことができた。プラットフォームが回転する時、計測された近似 ZMP 変化推移で、約 6 秒、11.5 秒には変曲点が存在し、約 9.5 秒から 10.5 秒の区間には、近似 ZMP の変化速度が変わる。また、9 秒の前後には近似 ZMP の変化なしの状態である。この実験結果に示すように、長周期でプラットフォームを回転すると、近似 ZMP の直接制御方法で直立安定性を保持することができた。近似 ZMP の直接制御手法を適用する場合、長周期の場合近似 ZMP の移動範囲が約-1.5cm から 1.8cm の間である。プラットフォームの回転方向の変化直後に近似 ZMP 推移で変曲点が存在するが、方向転換によって慣性が発生されたと判断される。

しかしながら、図 3.8(b)に示す結果は 3.8(a)と異なっている。最初の近似 ZMP は目標 ZMP と一致しているので、安定的に直立していた。5 秒から 6 秒の区間では、近似 ZMP の最低値が約-1.5cm となり長周期とだいたい同一であったが、6 秒と 7 秒の付近では、近似 ZMP の位置が目標 ZMP の位置から大きく離れてしまう。その結果、7 秒付近で ALPHA は倒れてしまった。この原因はプラットフォームをより速く回転させると、ダイナミックスの影響で倒れてしまったと推定されるが、近似 ZMP の直接制御で 2.8 sec の回転パターンで倒れた原因については 4 章で傾斜面角度の推定手法と比較して詳細に考察することにする。



(a) Rotating pattern 4.8 sec per 1 cycle: It was possible for Alpha to perform surfing stably.



(b) Rotating pattern 2.8 sec per 1 cycle: It was impossible for Alpha to perform surfing stably.

Fig. 3.8 Surfing was performed in each rotating pattern of platform. It was possible for Alpha to carry out surfing in the slow rotating pattern (case a). It could be thought that there was little dynamic effect. However, it was impossible to perform surfing in the fast rotating pattern (case b). It could be said that dynamics influenced on Alpha.

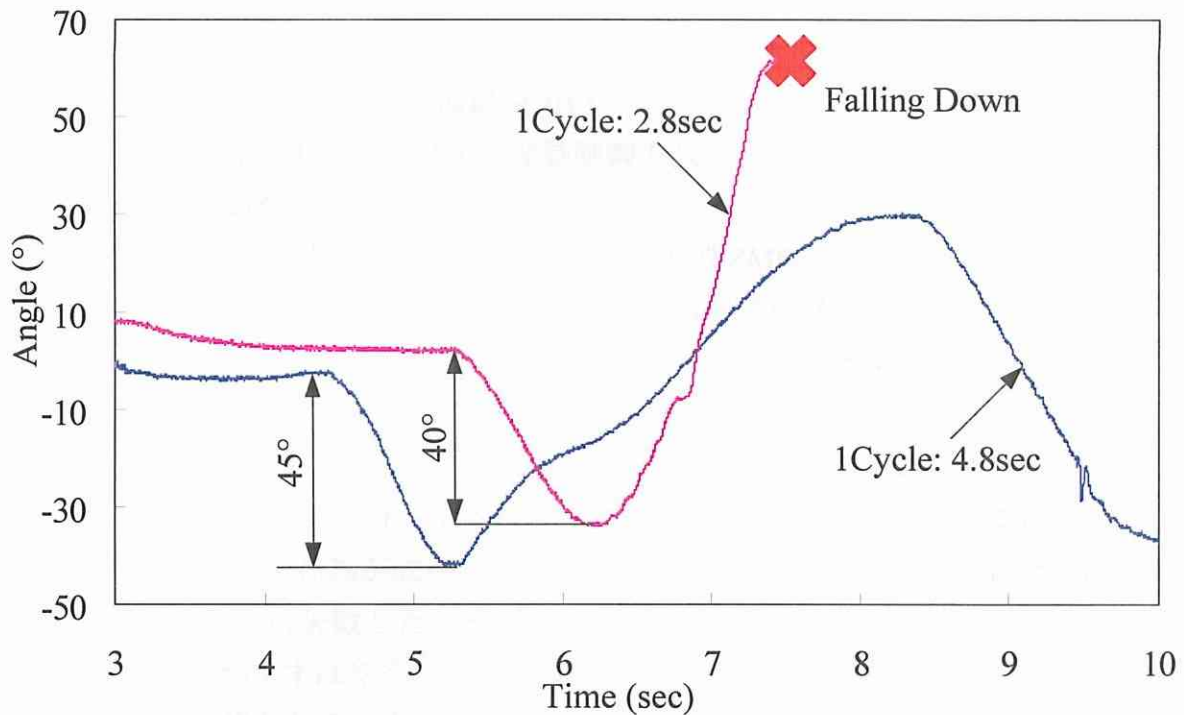


Fig. 3.9 The change of thigh angle is shown when the platform begins to rotate. Alpha does not fall down in both cases at the start of rotating. However, Alpha falls down in the 2.8 sec cycle because of dynamic effect when rotating direction changed.

サーフィン運動が成功した場合と失敗した場合のそれぞれの太ももの角度変化量を図 3.9 に示す。短周期の場合、太ももの角度の制御が約 5.5 秒から始まり、長周期の場合は約 4.5 秒から始まった。周期別にスタート始点が約 1 秒の差異がある。長周期の場合、最初プラットフォームが CCW 方向で回転するので、ALPHA は自分の重心を CW 方向、すなわち後方に重心を移動させるため太ももの角度を制御する。ALPHA の太ももの角度変化量は約 45° である。その次、プラットフォームが CW 方向で回転する場合、ALPHA の太ももの角度変化量は約 75° で重心を前方に移動させる。一方、短周期の場合は、プラットフォームが CCW 方向で回転すると、重心を後方に移動させることで、太ももの角度変化量は約 40° である。最初は短周期場合の太ももの制御量がむしろ長周期の場合より小さいが、続いて、プラットフォームが回転すると、短周期の場合目標 ZMP に戻るために太ももの角度変化量が約 100° となり、長周期より 25° ほど大きくなり、倒れてしまう。この実験結果で、回転が順方向となる場合ダイナミックスの影響は短周期と長周期とあまり差異がないが、回転方向の反対になる始点、すなわち、逆回転が始まる時、ダイナミックスの影響が急激に大きくなり、その影響によって倒れる可能性が高まることがわかる。ダイナミックスに関する考察は 4.5 節でも行う。

3-5 要約

本章では近似 ZMP 推定法の機能を用いて、サーフィン運動を実現することにした。そこで、最初に提案するサーフィン運動制御方法として近似 ZMP を直接制御するサーフィン運動制御を行った。

本制御アルゴリズムは目標 ZMP と提案した近似 ZMP との誤差を用いて ALPHA の太ももの角度を制御することである。最初に、制御アルゴリズムで ZMP 制御が可能かどうかを判断するために、基礎的な実験をし、提案したアルゴリズムで ZMP の制御が可能であることを明らかにした。

続いて、提案したアルゴリズムを用いて二つのサーフィン運動パターンの実験を行った。ゆっくりプラットフォームが回転するパターン(1Cycle を 4.8 秒で回転するパターン)ではサーフィン運動が成功したが、速く回転するパターン(1Cycle を 2.8 秒で回転するパターン)では失敗した。その失敗の原因としては、プラットフォームを速く回転する時、重心をすはやく制御するためにダイナミックスの影響が大きくなり、倒れてしまったと思われる。また、回転が始まる始点より、回転の方向が変わって逆回転が始まる時、ダイナミックスの影響によって倒れる可能性が高まるとと思われる。

第4章

傾斜面の角度推定法を用いた サーフィン運動制御

4-1 概説

第3章に示すように、近似 ZMP の直接制御を用いたサーフィン運動制御では、プラットフォームをゆっくり回転させた場合(1Cycle を 4.8 秒で回転するパターン)では、ヒューマノイドロボットのサーフィン運動が成功したが、速く回転させた場合(1Cycle を 2.8 秒で回転するパターン)では失敗した。その理由にはダイナミックスの影響と思われる。

このように、ZMP を直接制御する方法は、ダイナミックスの影響が大きくなるものと考えられるので、ZMP を間接制御に用いる方法について述べる。本章では、ZMP の計測値を用いて傾斜面の角度を推定し、その情報を基にロボットの姿勢を制御する方法である。前章の手法は、近似 ZMP の直接制御は直接的に ZMP を制御しようとする手法であるが、本章で示す傾斜面の角度推定法も近似 ZMP の情報を用いるが、近似 ZMP を直接制御しないので、ダイナミックスの影響を低減できる可能性がある。

本章では、傾斜面の角度推定法を用いてサーフィン運動を実現するが、前章の前後方向のサーフィン運動と横方向のサーフィン運動の両者の実現を目指す。特に、前後方向のサーフィン運動については第3章で行った近似 ZMP の直接制御手法と比較することで、前節の前後サーフィン運動の失敗の原因を明らかにすることが期待できる。

4-2 前後方向のサーフィン運動制御

傾斜面の角度推定法とは、近似 ZMP を用いてロボットが直立している傾斜面の角度を推定する手法である。この手法も近似 ZMP を用いるが、近似 ZMP を直接制御することではなく、傾斜面の角度推定のみを用いる。傾斜面の角度推定法を用いたサーフィン運動制御は、前後方向と横方向二つのサーフィン運動に適用されるが、本節で

は、まず前後方向のサーフィン運動について議論する。

4.2.1 傾斜面の角度推定法

図 4.1 を用いて傾斜面の角度変化と ZMP の変化との関係を説明する。2 章で紹介したが、ZMP 方程式について再び述べる。ZMP 方程式は力センサーを用いずに、ヒューマノイドロボット重心の運動に基づいて ZMP を求める方法である。ZMP 方程式は次のとおりである⁽¹⁾。

$$x_{ZMP} = x_{CoM} - \frac{z_C}{g + \ddot{z}_C} \ddot{x}_{CoM} \dots\dots\dots(4.1)$$

ここで、 x_{ZMP} は ZMP の位置、 x_{CoM} は重心の位置、 g は重力加速度 z_C は重心の高さである。

最初、ヒューマノイドロボットが水平面に直立姿勢で安定的に立っていると仮定し、ヒューマノイドロボットに外力も作用していない。静止した状態なら、式 (4.1) によって ZMP と重心の関係は次のようになる。

$$x_{ZMP0} = x_{CoM} \dots\dots\dots(4.2)$$

ここで、 x_{ZMP0} は初期 ZMP の位置である。図 4.1 の中の図に示すように、傾斜面になって傾斜角 θ_{slope} が生じると、重力方向の変化によって ZMP は左側に移動する。傾斜角変化量は重力方向変化量と一致するので、傾斜角は重心の新たな重力方向の射影の ZMP と重心の初期位置である x_{ZMP0} となす角に一致する。このように、重力変化がある場合は、ヒューマノイドロボットのキネマティクス情報より求められる重心情報のみでは、重力方向の変化を感知できず、力情報に関連する ZMP 情報が必要となる。そこで提案した近似 ZMP を用いて重力方向変化を検知し、傾斜面の角度を推定することにした。図 4.1 の中の図より ZMP と傾斜角との幾何学的な関係は次式で与えられる。

$$x_{ZMP} - x_{ZMP0} = z_C \tan \theta_{slope} \dots\dots\dots(4.3)$$

ここで、 x_{ZMP} は現在の ZMP で、 θ_{slope} は傾斜角である。式 (4.3) の関係から計測 ZMP 情報を用いて傾斜角度が求められる。

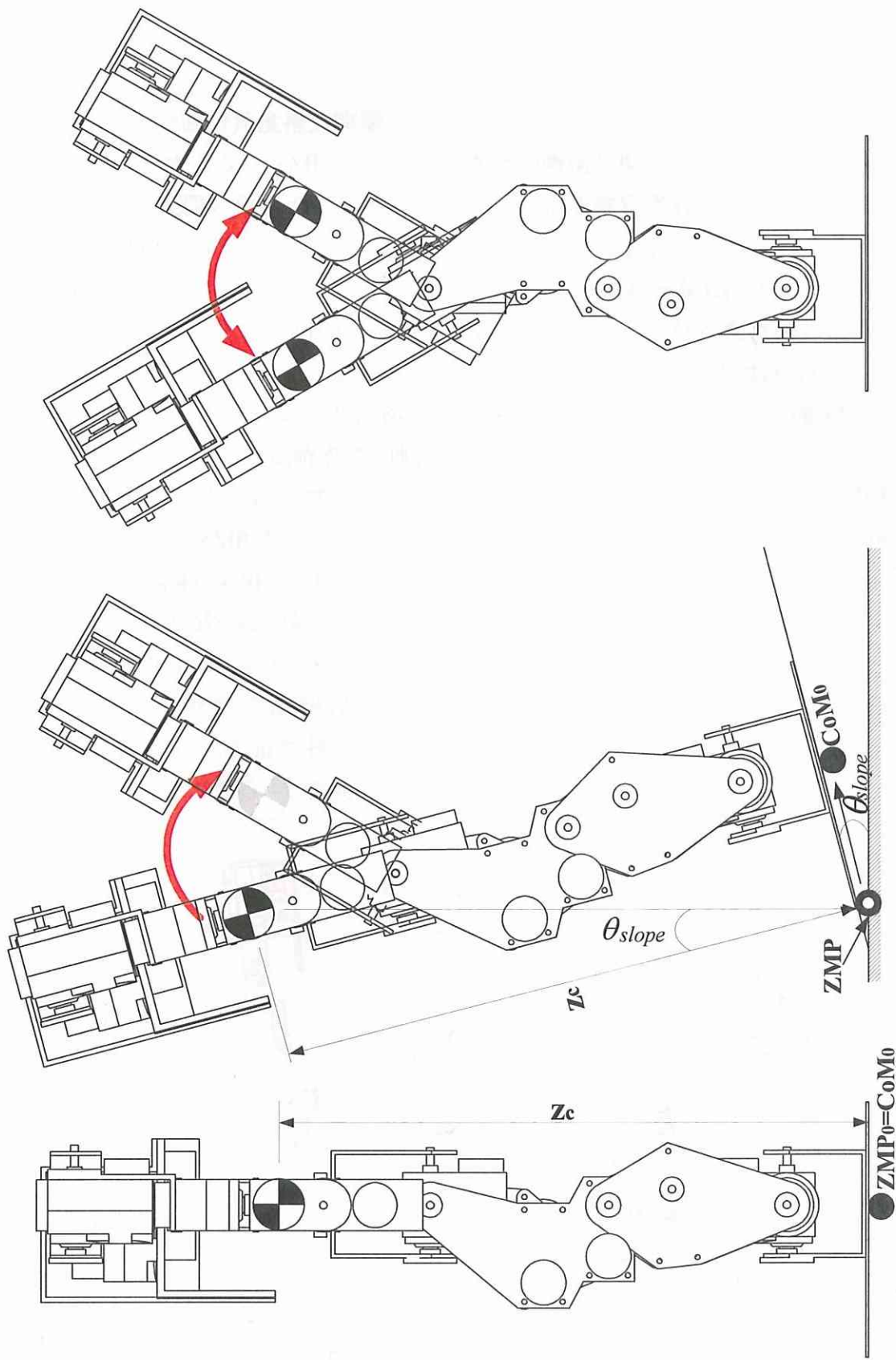


Fig. 4.1 Slope estimation method for forward and backward surfing: ZMP moves to another point, which is different with the first position, when Alpha stands on the slope. Then, it is possible to estimate the slope angle with approximate ZMP.

$$\theta_{slope} = \tan^{-1} \left(\frac{x_{ZMP} - x_{ZMP_0}}{z_C} \right) \dots\dots\dots (4.4)$$

4.2.2 傾斜面の角度推定実験

図 4.1 に示すように ZMP と重心の高さとの幾何学関係より傾斜面の角度推定が可能であるが、実際の傾斜面の角度と式 (4.3) による推定された傾斜面の角度とはどのくらいの誤差があるのかについて実験を行うことにした。

実験条件としては、図 4.2 に示すようにプラットフォーム上にヒューマノイドロボット ALPHA を設置し、制御は行わず ZMP の計測のみを行った。図のように連続的に ALPHA の後方に傾けたが、プラットフォーム傾斜の時間変化は、0.7°/sec, 1.6°/sec, 1.8°/sec で三つのパターンとし、傾斜角が 8°以上になると ALPHA が転倒するので、最大傾斜角が 8°になった時点で回転は止めた。

図 4.3 に示すように、プラットフォームの傾斜角度を変化させると、計測された ZMP が変化し、ZMP から推定される斜面の傾斜角も、実際の角度変化と同様な変化を示し、式 (4.4) を用いて傾斜角の変化を推定できることがわかる。具体的には、プラットフォームが回転開始直前で、三つの場合の ZMP は 0.7cm であるが、回転の終了直後の ZMP は三つのパターンは異なっている。0.7°/sec の回転パターンでは、回転終了していない状態で ZMP は約 0.3cm で推定傾斜角は約 5.5°、1.6°/sec の場合は回転終了直後 ZMP が 0.5cm で推定傾斜角は 6.5°、1.8°/sec の場合は ZMP が 0.8cm で推定傾斜角は約 7.2°である。1.6°/sec の場合と 1.8°/sec の場合のみを比較すると、二つの場

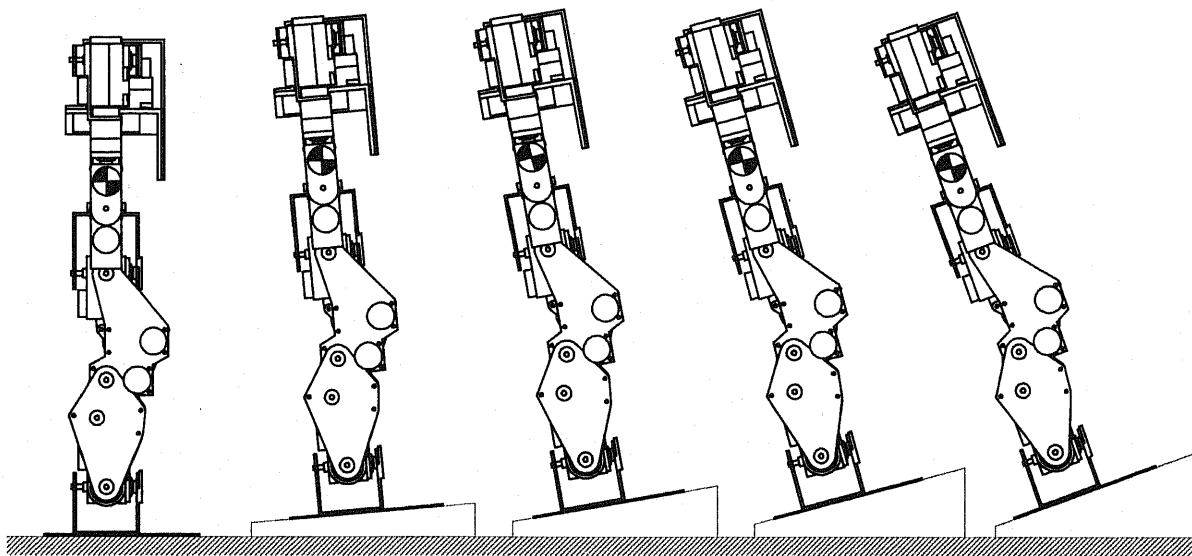
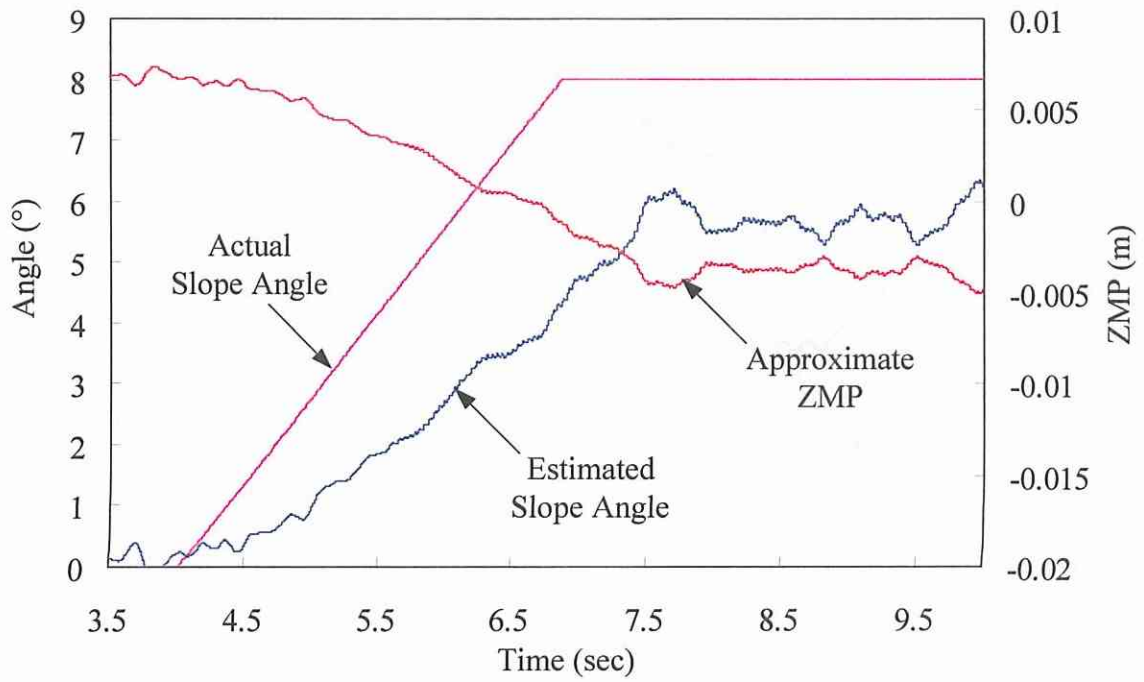
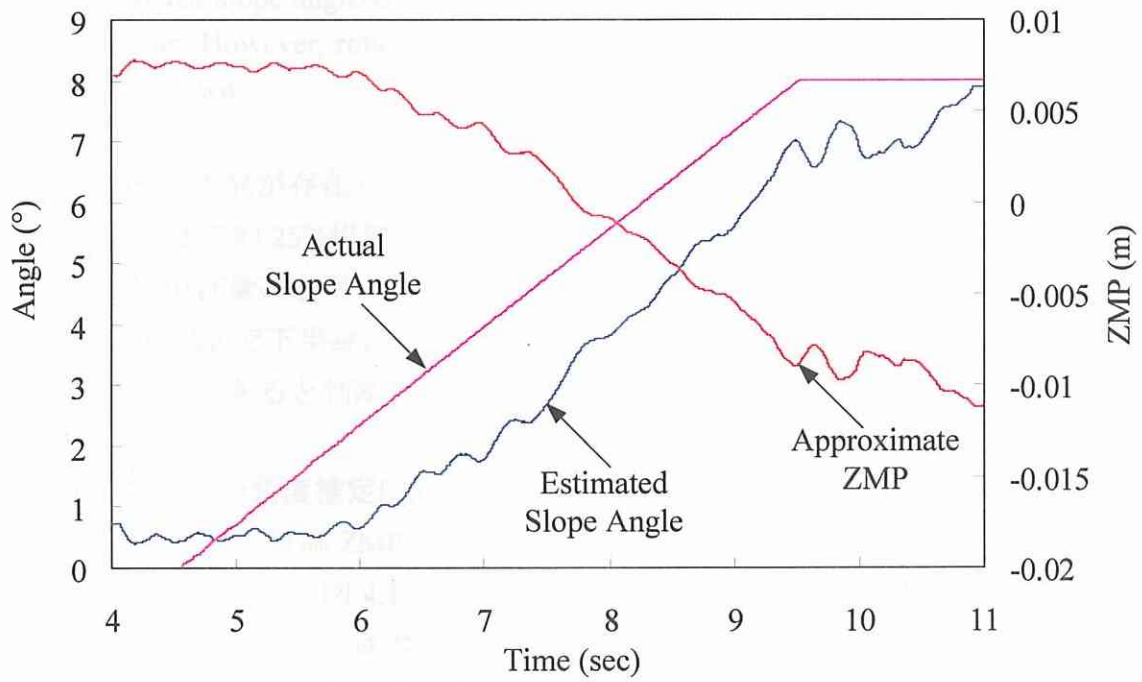


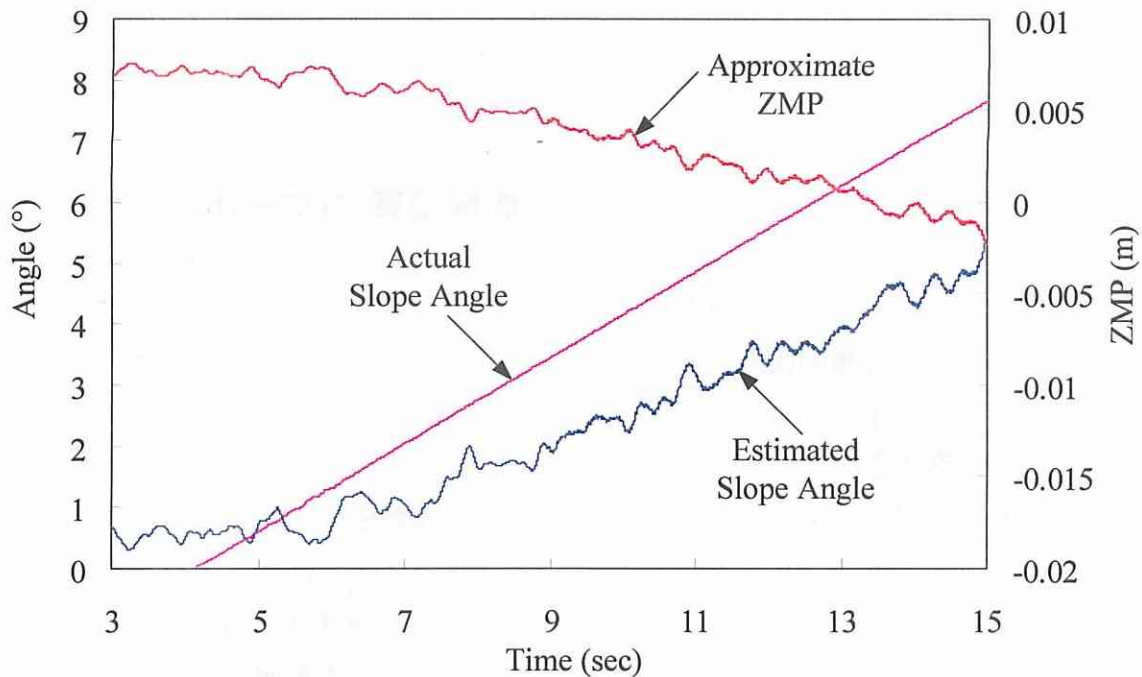
Fig. 4.2 Figure of experiment for surveying change of slope angle. Platform is rotating with 3 patterns, 0.7°/sec, 1.6°/sec, and 1.8°/sec. This experiment shows that it is possible to estimate the slope angle approximately with information of ZMP.



(a) Rotation pattern: $1.8^\circ/\text{sec}$



(b) Rotation pattern: $1.6^\circ/\text{sec}$



(c) Rotation pattern: 0.7°/sec

Fig. 4.3 Estimated slope angle is comparison with actual platform angle under three different rotating patterns. However, rotation is stopped when the slope angle reaches to 8°, because Alpha is fallen down.

合は約 0.3cm の差異が存在し、推定傾斜角は約 0.7°の差異が生じることがわかる。

最大傾斜角度で約 25%程度の誤差が生じているが、これは傾斜角度推定を図 4.1 に示すように集中質量系を用いて推定したが、ALPHA の質量分布は、上半身に約 1kg、一つの足に 0.52kg で下半身にも約 1kg の質量が分布されているので、この質量の分布の差異が主原因であると判断される。

4・2・3 傾斜面の角度推定による前後方向のサーフィン運動制御アルゴリズム

式 (4.4) を用いて計測 ZMP の情報より傾斜角を推定することができる。この傾斜角推定が可能となれば、図 4.1 の右図に示すように傾斜角情報を用いて ALPHA の太ももの関節角度を制御し、ロボットの上半身の重心位置を制御することができる。制御方法は ALPHA の上半身を重力方向と一致させるように制御することで、次に示すアルゴリズムを用いた。

$$\theta_d(h) = \theta_{thigh_0} + \alpha\theta_{slope}(h) \dots\dots\dots(4.5)$$

$$u(h) = K_P\{\theta_d(h) - \theta(h)\} - K_D\dot{\theta}(h) \dots\dots\dots(4.6)$$

ここで、 θ_d は太ももの目標角度、 θ_{thigh} は最初の太ももの角度、 θ_{slope} は式(4.4)より推定された傾斜面の角度、 α は補正パラメータとして2であり、モデル誤差などの補正のために用いている。

4.3 横方向のサーフィン運動制御

4.2節では傾斜面の角度推定法を用いた前後方向のサーフィン運動アルゴリズムを示したが、本節では同一の手法で横方向のサーフィン運動制御を示す。傾斜面の角度推定法において前後方向と異なる部分はあまりないが、サーフィン運動を実現するために関節モータを制御する方法は異なり、重心を移動させる動きも異なる。図4.4に示すように、横方向で重心を移動するには片足のみではなく、両足を制御する必要がある。関節モータも太もものみではなく、足首のロール関節モータとピッチ関節モータ、膝関節モータ、太もものロール関節モータとピッチ関節モータを制御しなければならない。従って、前後方向より複雑な制御アルゴリズムが必要である。まず、横方向の傾斜面の角度推定法から説明する。

4.3.1 傾斜面の角度推定法

横方向の傾斜面の角度推定法は前後方向の傾斜面の角度推定法と大きく異なっていないが、横方向では両足支持モデルのZMP測定結果に基づいて斜面の角度を推定する。ただし、この手法では、片足の長さが制御によって変化した時にも、重心の高さは変化していないと仮定した。

図4.4に示すように最初ヒューマノイドロボットが床面に直立姿勢で安定的に立っていると、ZMPの位置と重心の位置は一致する。しかしながら、床面が傾斜面になると、ZMPは最初に重心と一致していた ZMP_0 の位置から離れてしまう。このように、傾斜面になった時、式(4.4)を用いて重心の高さとZMPとの幾何学関係によって傾斜面の角度を推定することができる。

4.3.2 傾斜面の角度推定法による横方向のサーフィン運動制御アルゴリズム

横方向のサーフィン運動も式(4.4)の傾斜面の角度推定アルゴリズムを用いて行う。ここでは、図4.4に示すように左右の足の長さを、傾斜面の変化に適応させるように変化させることで直立安定性を実現することにした。

図4.4に概念図を示すが、逆キネマティクスを用いて足の関節角度を制御して、左右の足の長さを傾斜面に合わせて調整する方法である。そのアルゴリズムを以下に示す。

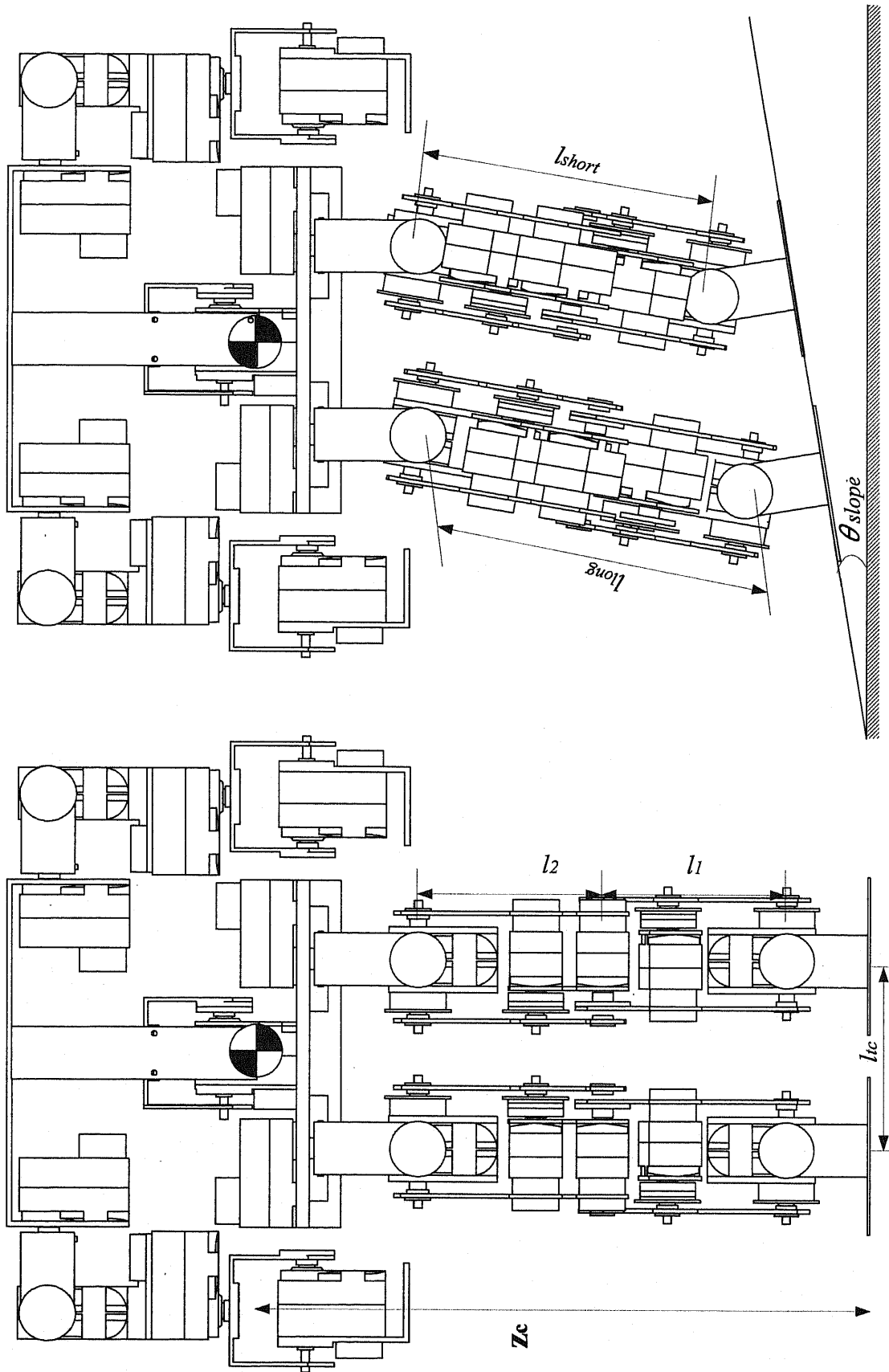


Fig. 4.4 Slope estimation method for rightward and leftward surfing: The basic estimation concept is same with that of forward and backward surfing. The number of motors to control is increased because all of both legs have to be controlled.

$$l_{long} = l_1 + l_2 \dots\dots\dots(4.7)$$

$$l_{short} = l_{long} \times (1 - l_{tc} \tan \theta_{slope}) \dots\dots\dots(4.8)$$

ここで、 l_1 および l_2 はもも部、すね部のリンク長さであり、 l_{long} は足を伸ばした状態に対応する。また l_{short} は傾斜面に対して足を縮めた状態に対応し、幾何学的関係から傾斜角 θ_{slope} および両足間の距離 l_{tc} を用いて、式 (4.8) に与えられる。このため、本制御方法では、傾斜面の角度に対応した l_{short} を実現するように、足首および膝の関節角 θ_1 、 θ_2 を制御する必要がある。具体的な制御方法は、図 4.4 の設置位置 (x 座標) を変化せずに、足の長さ方向を変化させる必要があり、二リンクマニピュレータのキネマティクスの関係から次の関係が得られる。

$$x_0 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \dots\dots\dots(4.9)$$

$$l_{short} = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dots\dots\dots(4.10)$$

ここで、 x_0 は l_{short} の足の x 座標設置位置であり、足の設置位置は変化をさせない制御方法であることを示している。式 (4.9) および (4.10) から逆キネマティクス方法を用いて、 θ_1 および θ_2 を求めることができる。具体的には、式 (4.4) を用いて近似 ZMP から傾斜角の θ_{slope} 推定を行い、式 (4.7) から (4.10) のキネマティクス情報から足首および膝の目標角度 θ_1 および θ_2 を求め、それぞれの関節角度を PD 制御アルゴリズムを用いて位置制御することで実現する。

4.4 傾斜面の角度推定法によるサーフィン運動制御実験とその結果

傾斜面の角度推定法によるサーフィン運動制御は前後方向のサーフィン運動と横方向のサーフィン運動に分けて行った。プラットフォームの回転パターンは第 3 章で行ったパターンと同一で、ゆっくり回転するパターン 4.8sec 周期のパターンと 2.8sec の周期で回転するパターンである。最大傾斜角度は、制御なしで直立できる傾斜角度が 8° なので、制御効果を明らかにするためにその値を超える $\pm 10^\circ$ とする。最初のプラットフォームの角度は 0° で、サイン波形で、最大 $\pm 10^\circ$ まで回転を繰り返す。

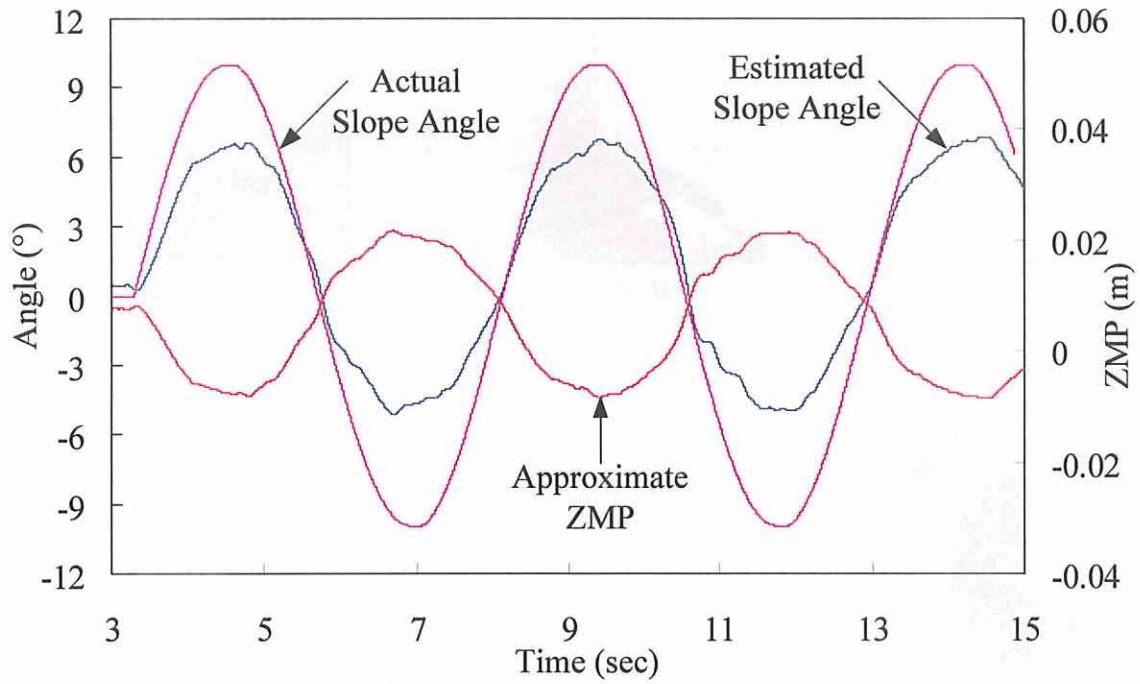
4.4.1 前後方向のサーフィン運動実験と結果

前後方向のサーフィン運動結果を図 4.5 と図 4.6 に示すが、図 4.5(a) は周期 4.8sec の長周期の場合で、図 4.5(b) は周期 2.8sec の短周期の場合の制御結果を示している。図 4.5(a) および (b) の実験結果が示すように、ZMP の変化は $-1 \sim 2\text{cm}$ の範囲内で変化し、

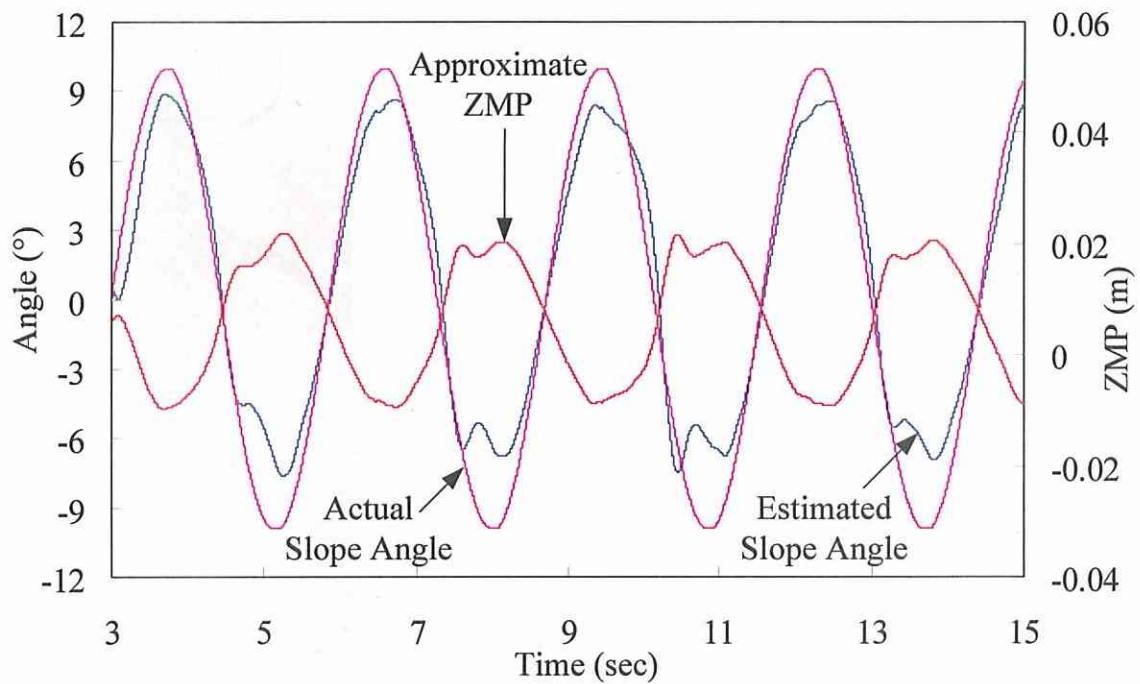
時間経過とともに増大傾向は認められないので、安定的な直立安定性が保持できることがわかる。これ以上に周期を速くし、プラットフォームの運動を速くすると、ALPHAはプラットフォーム運動開始時に、ダイナミクス影響で動的安定性が保証されず倒れてしまう。

図 4.5(a)に示すように、プラットフォームの回転パターンとほぼ同一なパターンで傾斜角を推定している。図 4.3 の傾斜角推定実験に示すように、実際の傾斜角と推定傾斜角との間に誤差が存在するので、本節で行った制御実験にも傾斜角の推定誤差が存在する。推定された最大傾斜角は約 7.3° で実際の傾斜角に比べて 2.7° の誤差が存在するが、最大 $\pm 10^\circ$ まで倒れなくてサーフィン運動が実現できた。第 3 章の近似 ZMP 直接制御手法の実験結果と比べると、図 3.8(a)に示すように、長周期の回転パターンの場合、近似 ZMP が上がる時には近似 ZMP 直接制御によって近づいたところがあり、近似 ZMP が下がる時には近似 ZMP 直接制御によって一定の近似 ZMP を維持したところがある。一方、図 4.5(a)にはそのような推移がない。その理由としては、第 3 章のアルゴリズムでは近似 ZMP 直接制御するが、傾斜角推定手法では間接的に近似 ZMP を用いることが原因であると思われる。

一方、図 4.5(b)に示すように、周期が短周期となると傾斜角の推定角度が向上しているように思えるが、これは動的なダイナミクスの効果の影響によるものと推定される。このダイナミクスの影響は傾斜角の推定値を大きくする方向に作用するので、制御量も大きくなり、その結果、ダイナミクスの影響が大きくなり、動的安定性に悪影響を及ぼす可能性も推定される。また、図 4.5(b)に示すように、推定 ZMP に、長周期の場合には図 3.8(a)のような現象は生じないが、短周期の場合には図 3.8(a)のような現象が生じる。しかしながら、第 3 章の長周期の実験で生じる現象と異なる理由と考えられる。図 3.8(a)のように近似 ZMP が急激な変更変が生じた地点はプラットフォーム回転方向変更の直前後で、長周期には生じていない。この事実によってプラットフォームの方向転換によるダイナミクスによる現象と思われる。

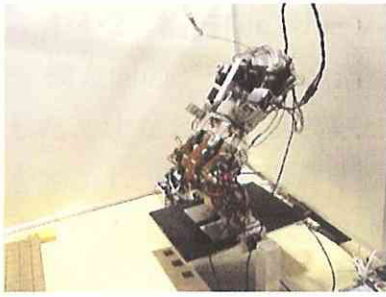


(a) Cycle control performance 4.8 sec

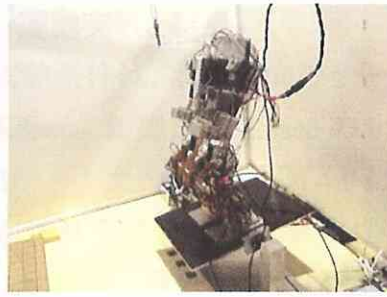


(b) Cycle control performance 2.8 sec

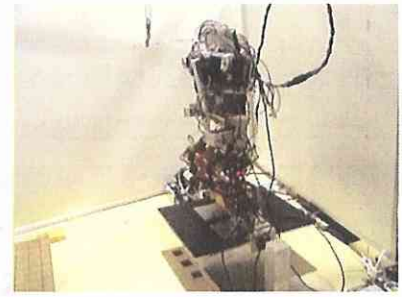
Fig. 4.5 Forward and backward surfing is performed with slope angle estimation method. This method makes it possible to carry out surfing although approximate ZMP control method was failed in the cycle of 2.8 sec.



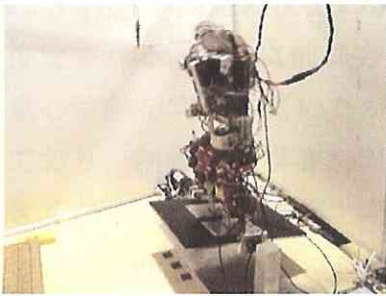
Rotation:CCW
Backward



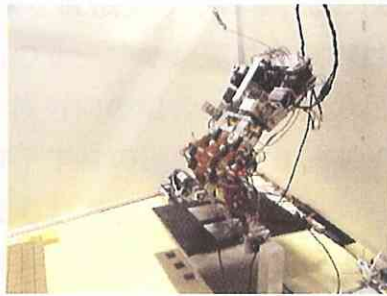
Rotation:CCW
Backward



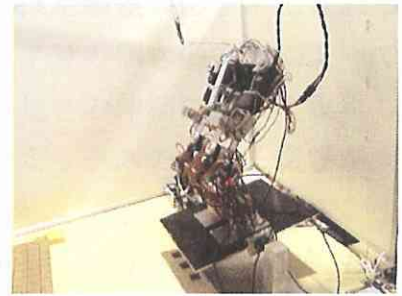
Rotation:CW
Forward



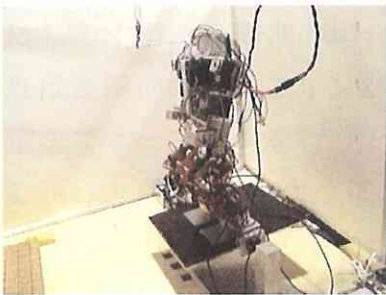
Rotation:CCW
Backward



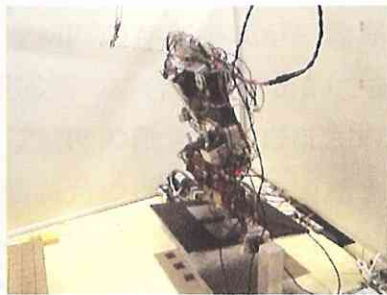
Rotation:CCW
Backward



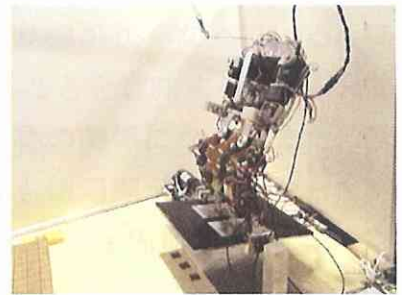
Rotation:CW
Forward



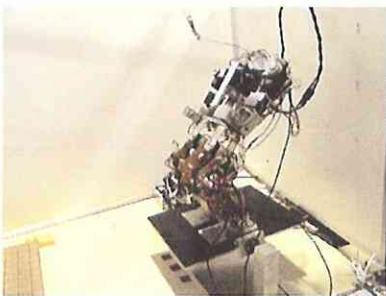
Rotation:CW
Forward



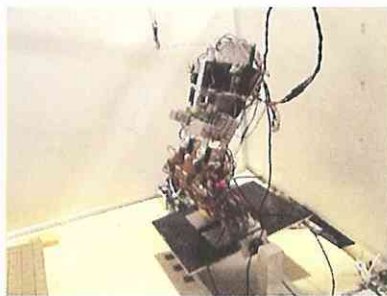
Rotation:CW
Forward



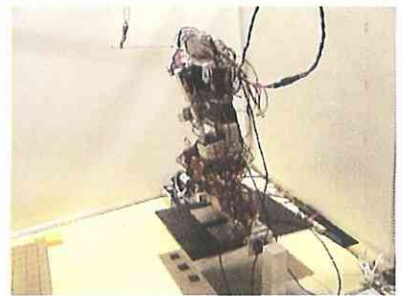
Rotation:CCW
Backward



Rotation:CCW
Backward



Rotation:CCW
Backward



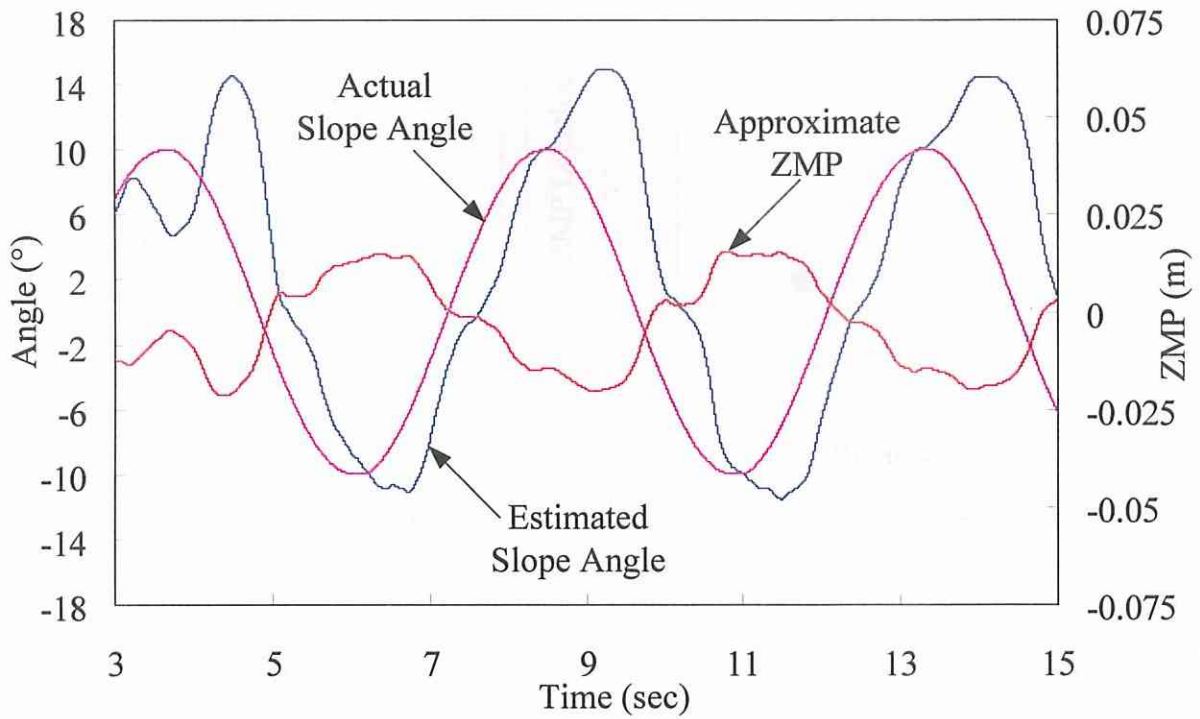
Rotation:CW
Forward

Fig. 4.6 Alpha rotates its upper body according to rotating direction of platform when it is forward and backward surfing with 4.8cycle rotation pattern. Rotation:CCW means platform is rotating with counter-clock wise; Rotation:CW means platform is rotating with clock wise.

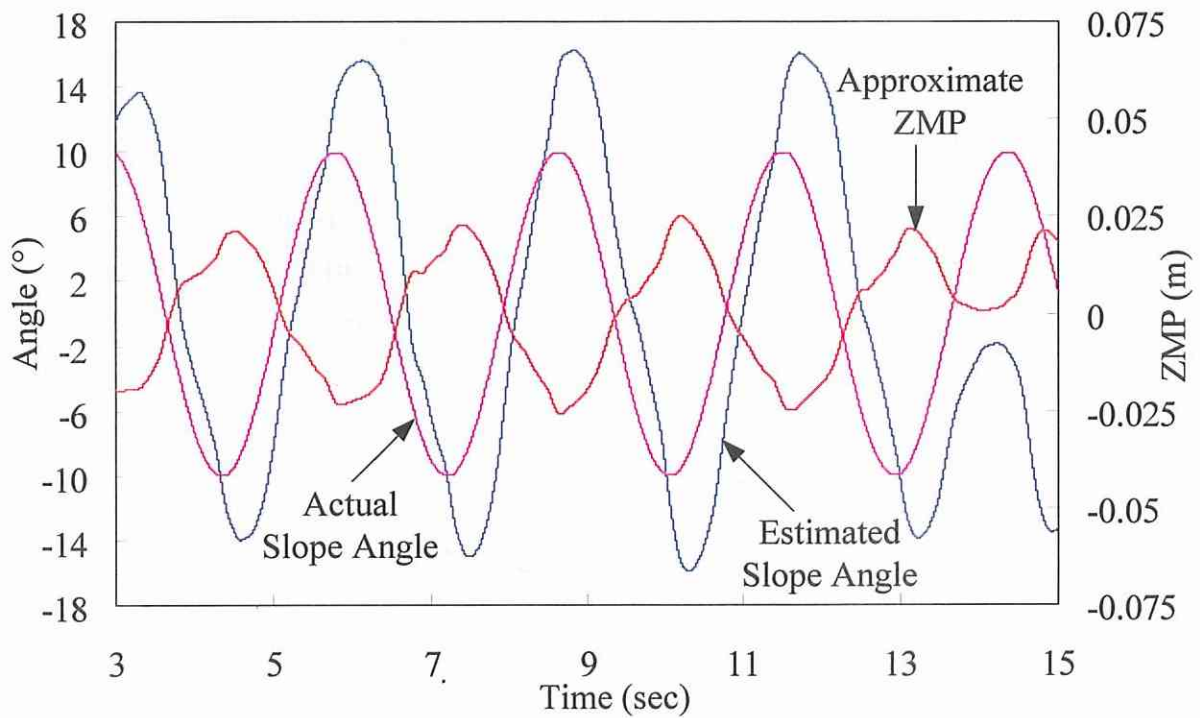
4.4.2 横方向のサーフィン運動実験と結果

横方向のサーフィン運動実験条件は、前後方向のサーフィン運動実験と同一条件とした。すなわち、長周期は 4.8sec、短周期は 2.8sec のサイン波形でプラットフォームを動かし、最大傾斜角度は $\pm 10^\circ$ とした。図 4.7～図 4.9 に実験結果を示すが、傾斜角推定法は両周期とも両足を伸縮させることで直立安定性を保ったままサーフィン運動を実現できた。前後方向のサーフィン運動の場合は近似 ZMP からの傾斜角の推定結果は過小評価する傾向があったが、横方向のサーフィン運動の場合は過大評価する傾向がある。この理由としては、y 軸方向の場合は、式 (2.16) と同様な型から求められる y_{ZMP} が両足の反力の影響を直接受けるので、この反力推定誤差の影響が主要因と推定される。さらに前後方向のサーフィン運動の制御は上半身の傾きの変化によって重心移動を実現していたが、横方向の場合は下半身の足の長さの伸縮によって実現しており、制御が上半身および下半身の運動となり、ダイナミックスの与える影響が大きくなったことも原因と考えられる。

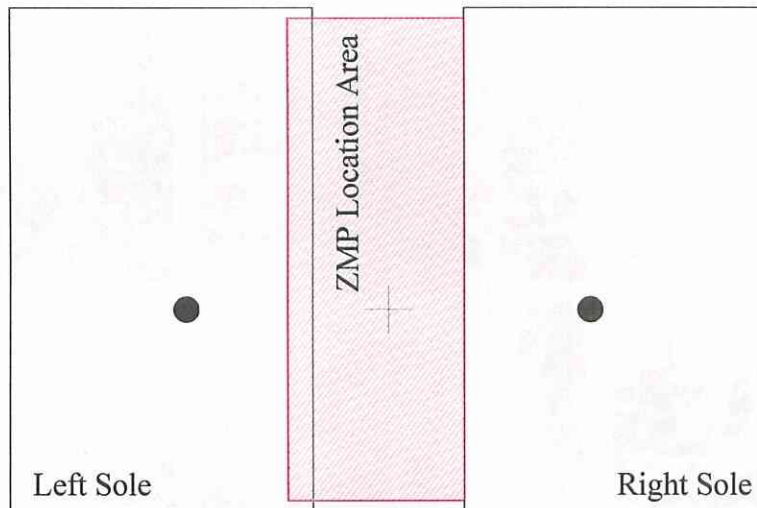
推定 ZMP の変化幅は、長周期 4.8sec の場合 -2cm～1.5cm 間で変化している。短周期 2.8sec の場合は長周期より ZMP の変化幅が広がって -2.5cm～2.5 間で変化している。この実験では静的安定性を保証する支持多角形の ZMP の変化幅は 7.5～-7.5cm なので、上記の ZMP の変化幅では静的安定性は損なわれない。ZMP 存在領域を図 4.7(c)と(d)にしめすが、長周期の場合、ZMP の存在領域が短周期より幅が狭くなっている。これは長周期のサーフィンが短周期の場合より安定的であることを意味する。傾斜角推定法でサーフィンを行うと、ZMP の動きは、ほぼ左右対称の関係になる。また、図 4.7(a)と(b)に示すように、傾斜角の推定値は長周期よりも短周期が大きくなっているが、この原因はダイナミックスの影響と推定される。また、短周期の場合、‘-’方向において推定値が大きくなるが、この現象は 5 章で詳しく説明する。



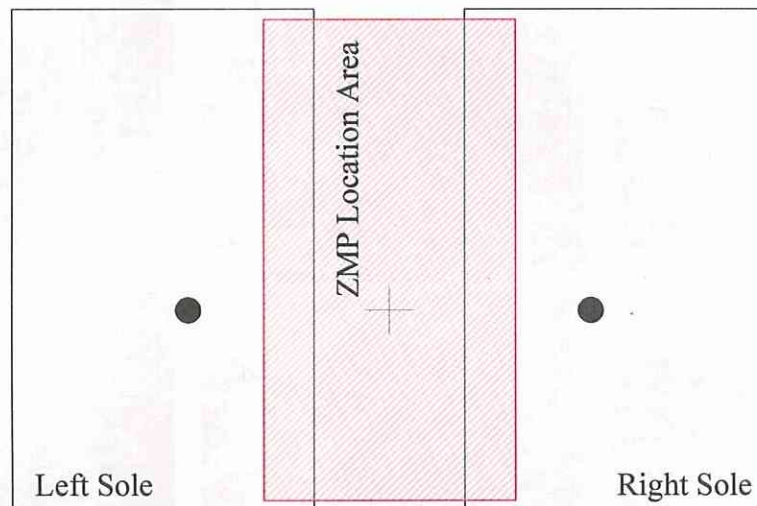
(a) Cycle control performance 4.8 sec



(b) Cycle control performance 2.8 sec



(c) The ZMP location area on the sole of ALPHA in 4.8sec cycle.



(d) The ZMP location area on the sole of ALPHA in 2.8sec cycle.

Fig. 4.7 Rightward and leftward surfing is performed with slope angle estimation method.

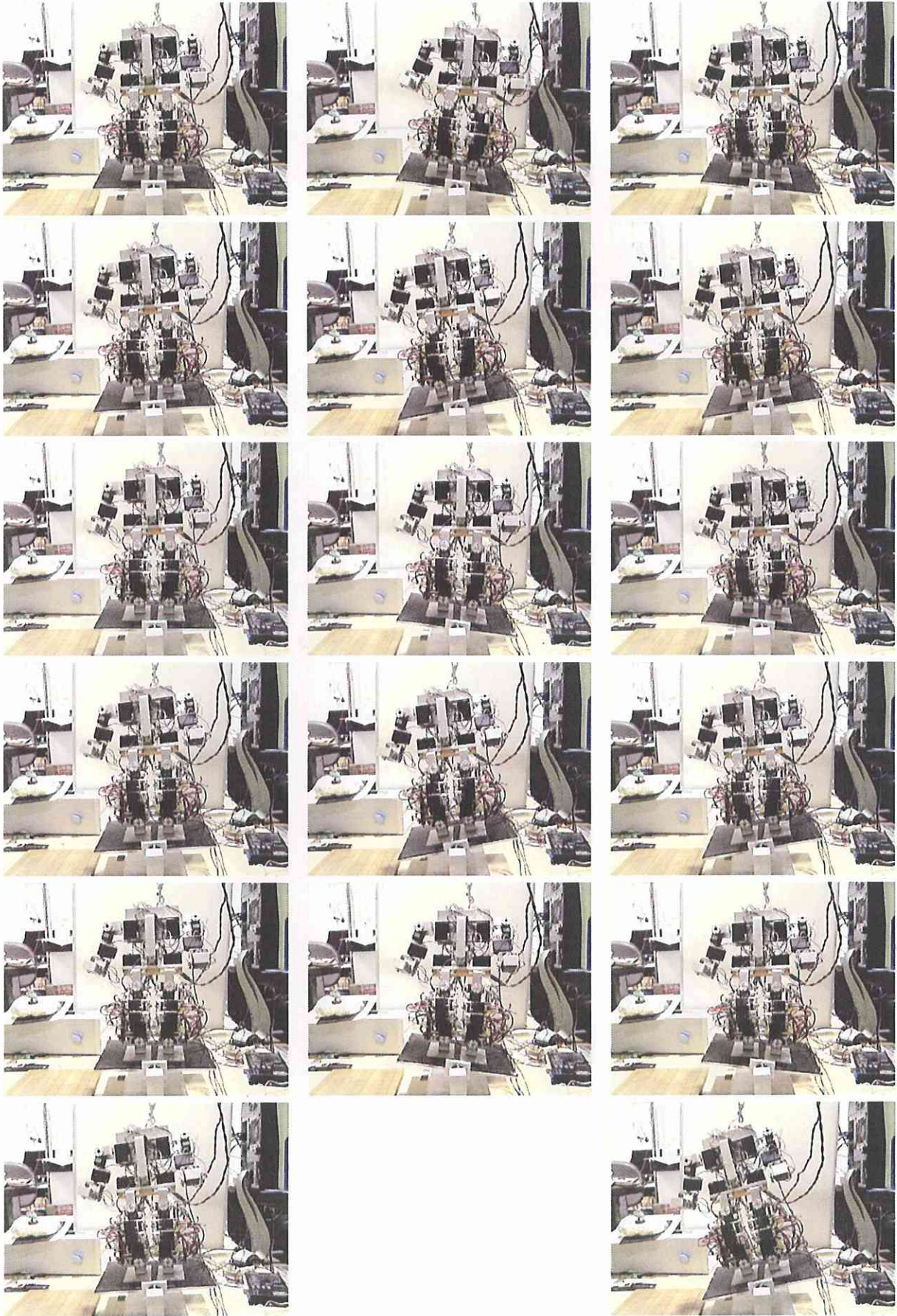


Fig. 4.8 Rightward and leftward surfing is performed with 4.8cycle rotation pattern.

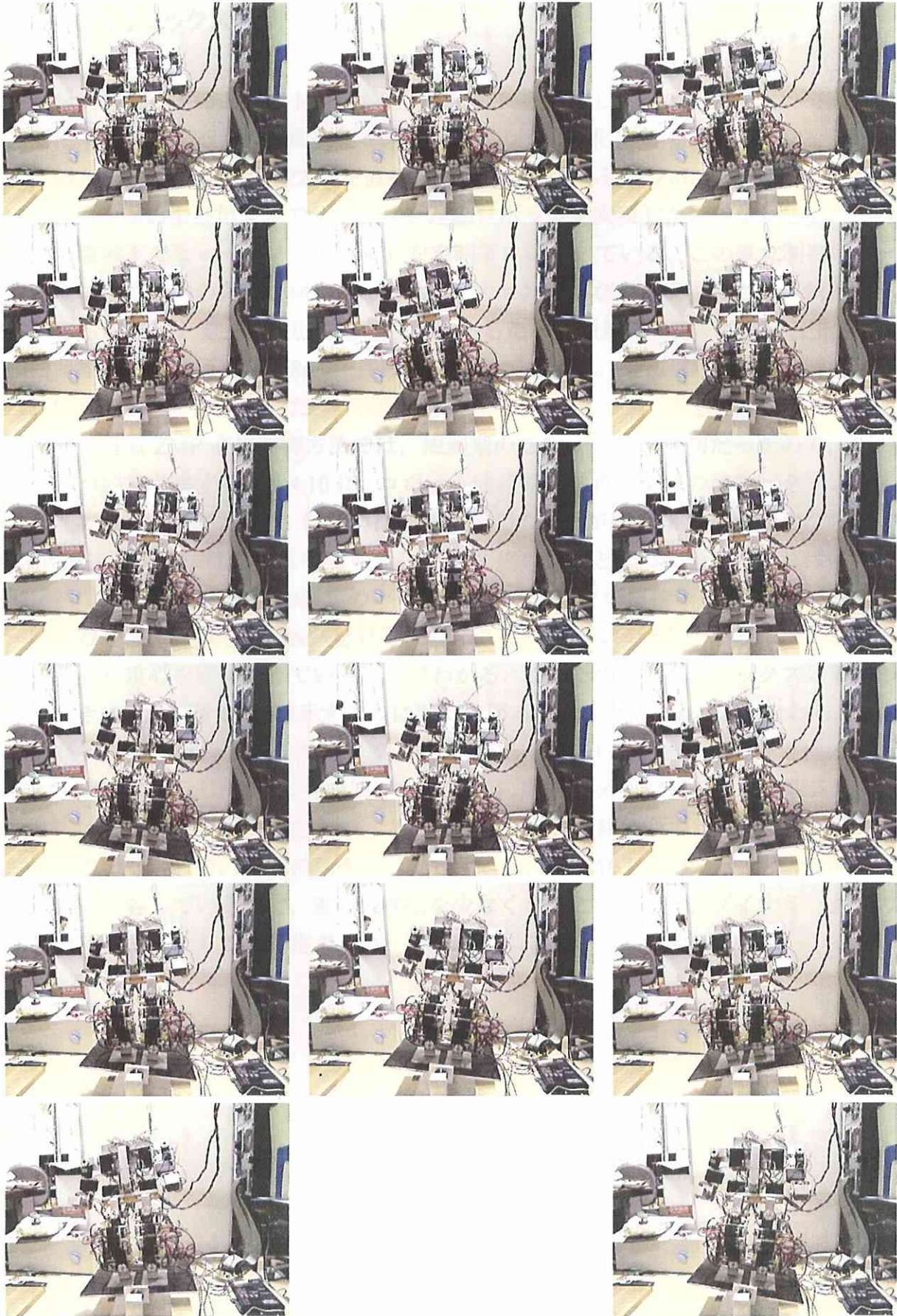
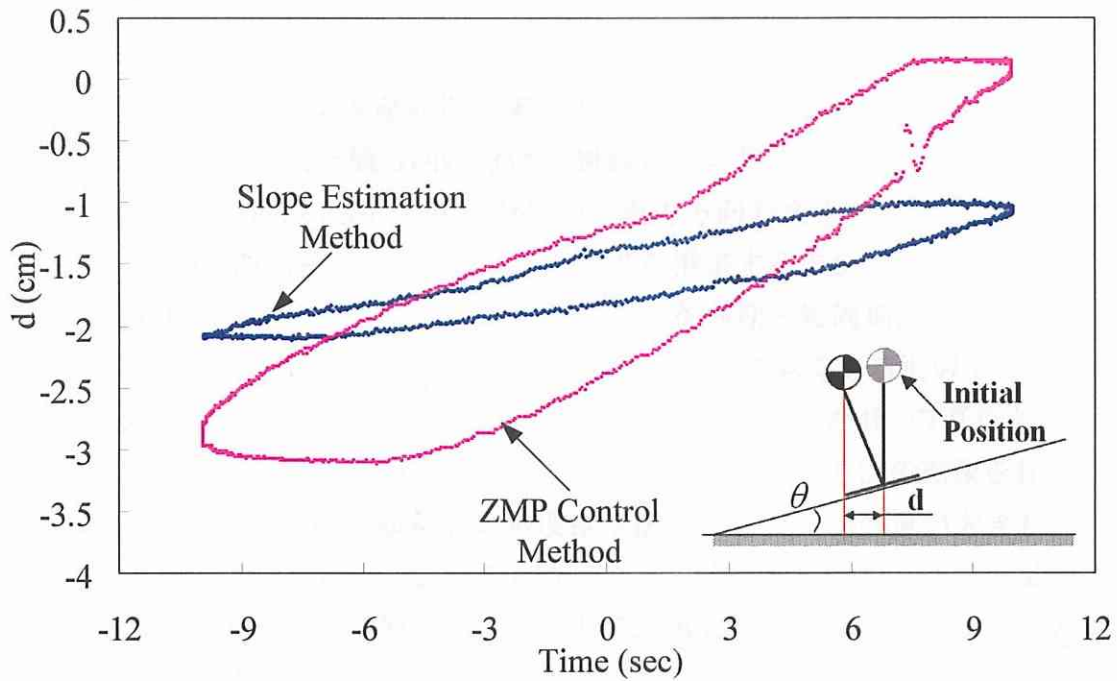


Fig. 4.9 Rightward and leftward surfing is performed with 2.8cycle rotation pattern.

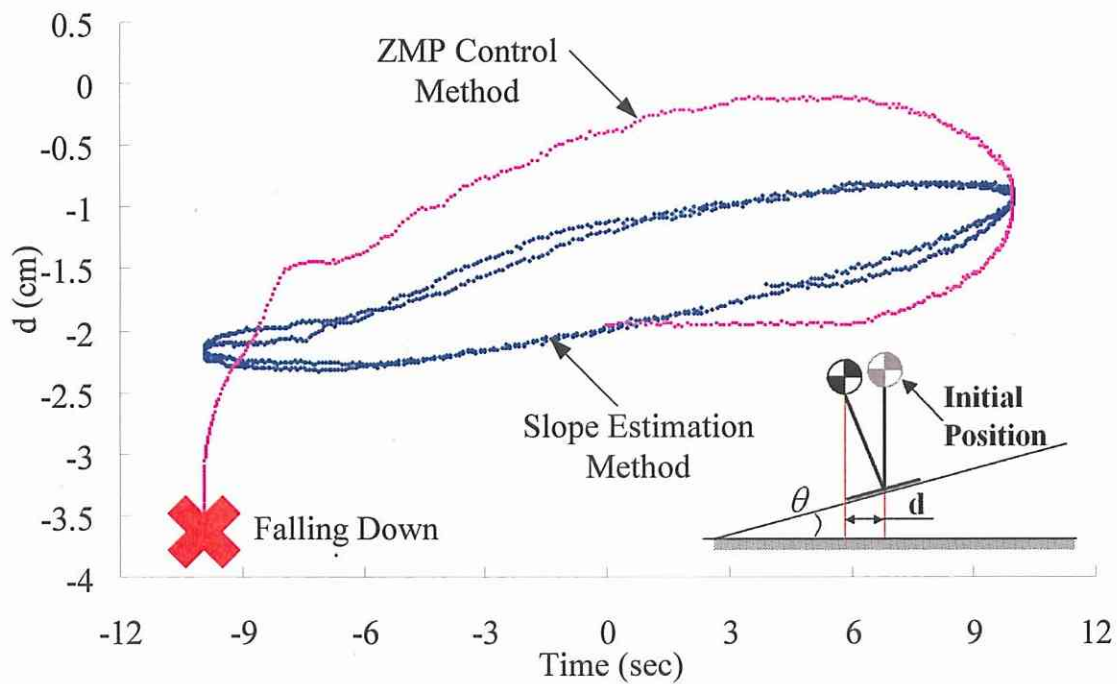
4.5 ダイナミクスに関する考察

力センサを用いずに、関節トルクから近似 ZMP を推定し、その結果を用いて重力方向変化下に対応する傾斜角度変化を求めた。その角度変化に対応して上半身を制御する傾斜角度推定法と、測定 ZMP を直接目標値へ制御する近似 ZMP 直接制御方法を用いて、第 3 章および第 4 章でサーフィン運動ロボットを実現した。すなわち重力方向変化の環境下でヒューマノイドの直立安定制御に成功している。この直立制御は、一般的には重力方向の変化を検出するために、力センサがないと実現できない制御である。さらにダイナミクス影響を明らかにするために傾斜面の回転周期を変化させ、傾斜角推定法では短周期 2.8sec、長周期 4.8sec で成功し、近似 ZMP 直接制御方法では長周期 4.8sec のみ成功した。

前章の近似 ZMP 直接制御方法では、短周期の 2.8sec では不成功だったので、その原因について考察する。図 4.10 に、ロボット座標系での重心位置の移動パターンを示す。図 4.10(a)に示すように、傾斜角推定法は重心の変化が約 1cm 程度の変化なのに、ZMP 直接制御方法は約 3cm 程度の変化で約 3 倍の動きとなっている。これは傾斜角推定法では ZMP は傾斜角の推定のみを用いており、ZMP の直接制御を行っていない。一方、ZMP 直接制御法は ZMP を目標位置に直接制御しようとしており、図に示すように激しく重心を移動させていることがわかる。このため、ダイナミクス効果の影響が大きくなり、図 4.6(b)に示すように転倒に至ったものと思われる。すなわち、ZMP 直接制御法では支持多角形内の目標値に位置に一致させるという静的安定性のみの制御を忠実に実行したため、その慣性力として F_x 方向のダイナミクス効果が大きくなり動的安定性が損なわれたものと考えられる。一方、傾斜角推定法は ZMP を直接制御していないので、重心の動きから推定すると、図 4.10 に示すように ZMP の一定の動きを許容しているので、重心の移動を少なくすることができ、ダイナミクスの影響を軽減できたものと推定できる。



(a) Distance between controlled position and initial position of CoM with respect to slope angle in cycle 4.8 sec.



(b) Distance between controlled position and initial position of CoM with respect to slope angle in cycle 2.8 sec.

Fig. 4.10 Each CoM position of two control methods is compared with respect to the slope angle. These results indicate that approximate ZMP direct control method makes Alpha's CoM moved much more than slope estimation method.

4-6 要約

本章では、サーフィン運動制御を実現する手法の一つである傾斜面の角度推定制御法について、前後方向と横方向に分けて制御アルゴリズムを提案し、実際にサーフィン運動を行った。近似 ZMP の変化を用いて重力方向の変化を検知し、近似 ZMP と重心の高さの幾何学関係を用いて傾斜面の角度を推定する方法である。

本章で提案した傾斜面の角度推定方法を用いて長周期と短周期、両方でサーフィン運動の実現ができた。第 3 章で提案した制御アルゴリズムである近似 ZMP の直接制御では長周期のみが実現できたことと比較すると、近似 ZMP の直接制御手法より ALPHA の直立安定性を高めることができた。両方の制御方法の結果を比較すると、近似 ZMP の直接制御法が傾斜面の角度推定法より重心の制御量が大きし、ダイナミックスの影響によって倒れたことがわかった。この結果、サーフィン運動を実現する上で、目標 ZMP の一定の動きを許すことで、重心の移動を少なくすることが、動的安定性を向上することであることがわかった。

第5章

足裏反力の情報を用いた サーフィン運動制御

5-1 概説

4章までは、近似 ZMP を用いて重力方向の変化を推定する方法に基づいて制御アルゴリズムを提案してきたが、本章では式 (2.34) から求められる両足にかかる反力を計測し、その反力の変化分から足の長さを調節する制御方法を提案する。より一般的な状態でセンサーレス制御を適用するために、本章では重力方向の変化の検知を用いない手法を考える。すなわち、本章では、床面から受ける反力情報のみを用いてサーフィン運動制御を実現する。

ZMP 情報を用いて前後方向と横方向のサーフィン運動制御を行うと、安定性を保持しながらサーフィン運動を実現できた。本章では、ただ足裏の反力情報のみを用いてもサーフィン運動制御ができるのか、ZMP 情報を用いる場合とは何が異なるのかについて検討し、二つの制御方法を比較することにより、より安定的な制御アルゴリズムの提案を目指す。

5-2 足裏反力情報を用いたサーフィン運動制御

足裏反力情報を用いたサーフィン運動とは、図 5.1 の左図に示すように、まず両足の反力基準を設定する。ヒューマノイドロボットの姿勢、動作、周辺環境によって足裏の反力は変化する。その時、両足の反力の変化分を計測した後、両者を比較し、どちらの足裏反力の増加が大きかったのかを判断する。この制御手法の特徴は増加分が少ない足を縮めることで、両足の反力のバランスを回復しようとするものである。具体的制御アルゴリズムは以下に示すとおりである。

- 1) 傾斜角がゼロ度の両足の反力を測定する。

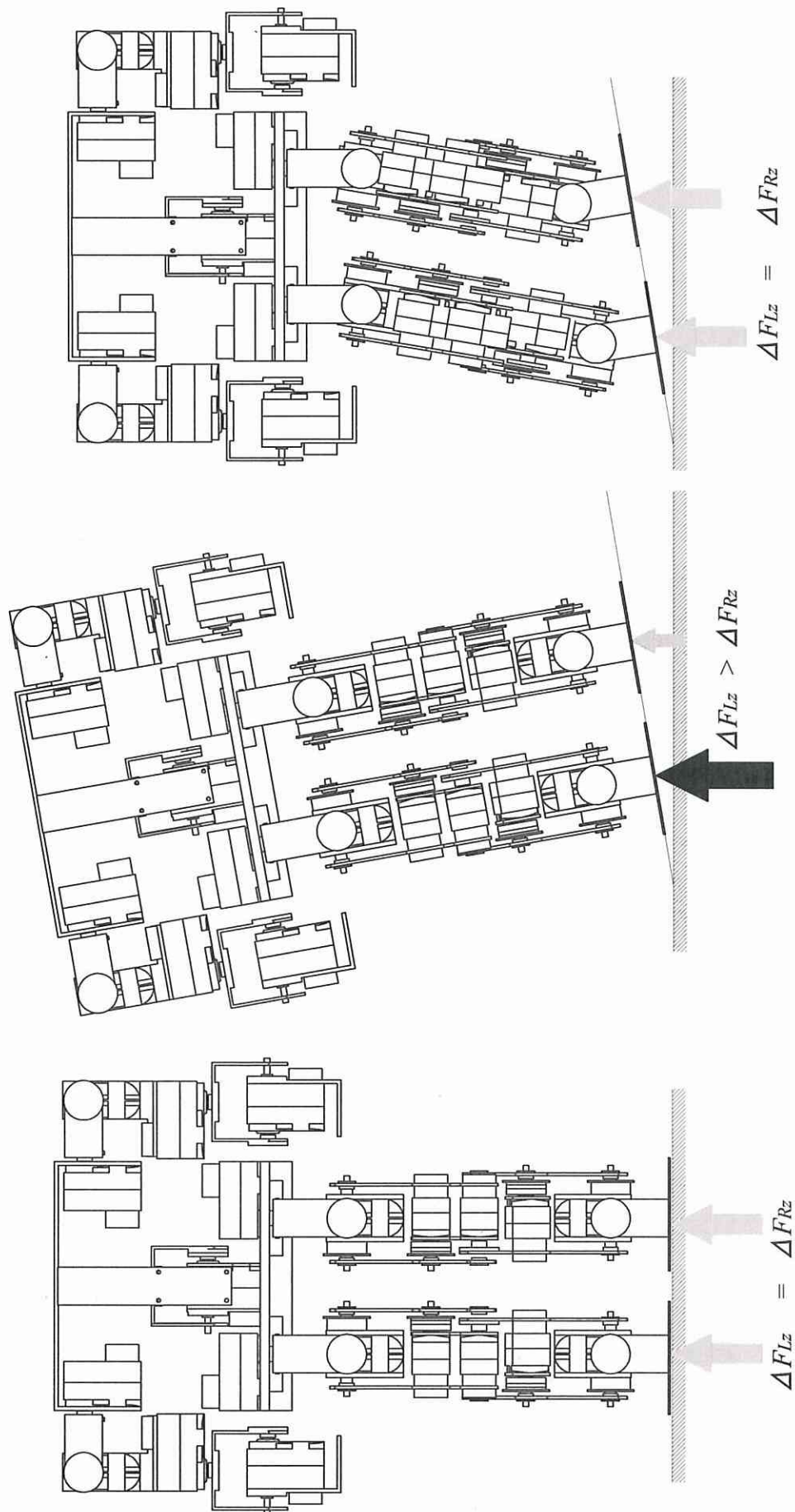


Fig. 5.1 This algorithm is based on the compliance concept. Both ground reaction force (G.R.F.) of two legs are same each other when humanoid robot is standing on non-sloped plane. However, both G.R.F. are different from each other when it is standing on sloped plane. A leg that is opposite side of the other leg that has G.R.F. increased is controlled.

- 2) 傾斜角が生じた時の両足反力の変化分を計測する.
- 3) 反力変化分の大きい足は式 (4.7) に示す l_{long} の長さとし, 反力変化分の小さい足の長さは l_{short} として, 以下のアルゴリズムを用いて求める.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_R \\ \Delta F_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{Rp} \\ F_{Lp} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{R0} \\ F_{L0} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5.1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Z_{Ropp} \\ \Delta Z_{Lopp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_R / k_p \\ \Delta F_L / k_p \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5.2)$$

$$l_{short} = \begin{cases} l_{Left} = l_{long} - \Delta Z_{Ropp} & \Delta Z_{Lopp} < \Delta Z_{Ropp} \\ l_{Left} = l_{Right} = l_{long} & \Delta Z_{Lopp} = \Delta Z_{Ropp} \\ l_{Right} = l_{long} - \Delta Z_{Lopp} & \Delta Z_{Lopp} > \Delta Z_{Ropp} \end{cases} \dots\dots\dots(5.3)$$

ここで, F_{Lp} , F_{Rp} は左右足裏の反力, ΔF_L , ΔF_R は左右足裏の反力の変化量である. その情報を用いて, 反対の足を縮める制御を行っている. k_p はコンプライアンスパラメータである.

- 4) l_{short} の情報から, 逆キネマティクス法と同様に式 (4.10) と式 (4.11) を用いて足首と膝の目標関節角を求め, 関節の位置制御を行う.
- 5) (2) のステップに戻る.

以上示したように, 本アルゴリズムを用いて床面からの両足の反力を比較し, 反力が小さい方の足の長さを短くすることで, 反力バランスを調節している. このアルゴリズムを FLOW CHART で示すと図 5.2 のようになる.

足の長さを短くする量はコンプライアンスの概念を用いて決定しているが, 式 (5.1) から式 (5.3) に示すように, 直接その足の反力を用いて制御するのではなく, 足の反力変化と伸縮変化が逆になるので, 反対側の足裏反力の情報を用いて制御しており, これが本アルゴリズムの特徴である. 本制御アルゴリズムでは, k_p のコンプライアンスパラメータの設定が制御性能に大きな影響を及ぼすが, 試行錯誤方法を用いて実験から最適パラメータを求めた.

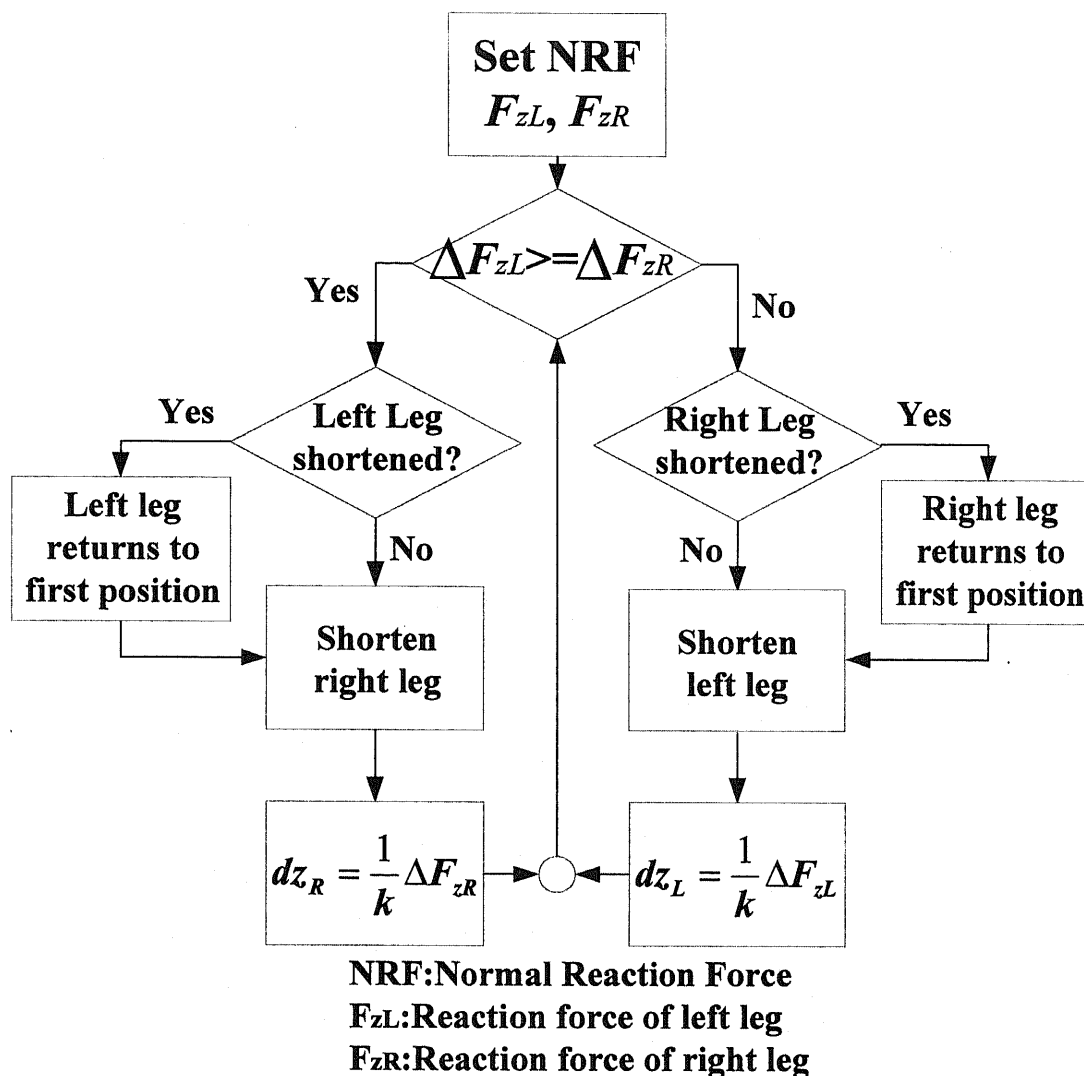
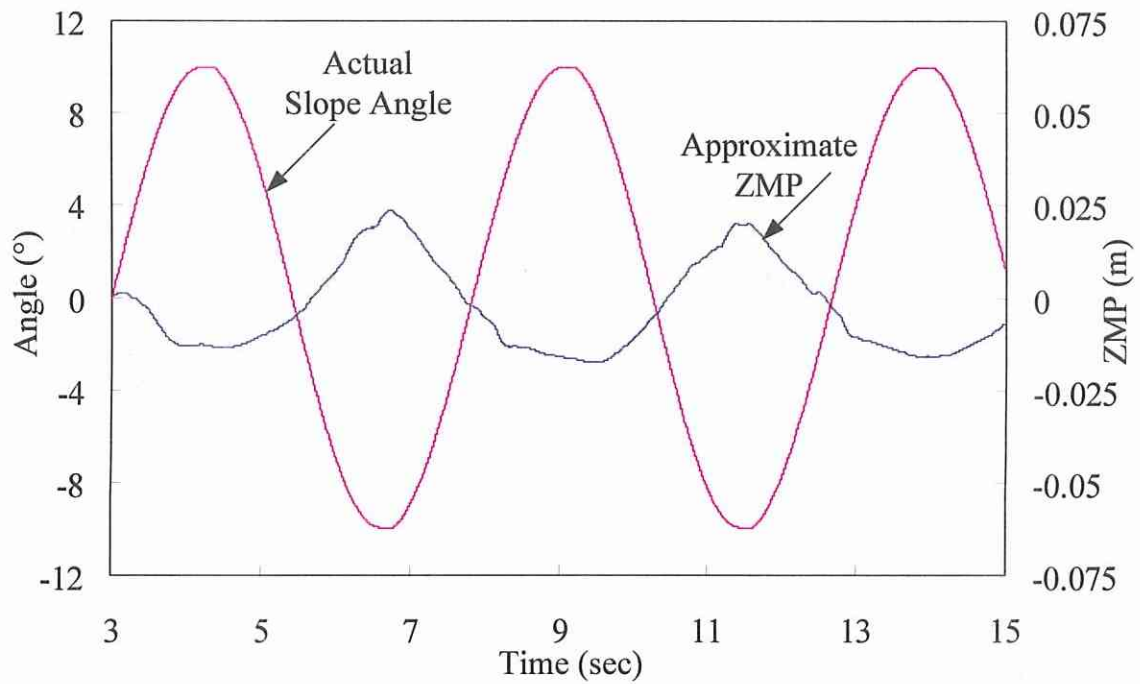


Fig. 5.2 Flow of control based on compliance concept

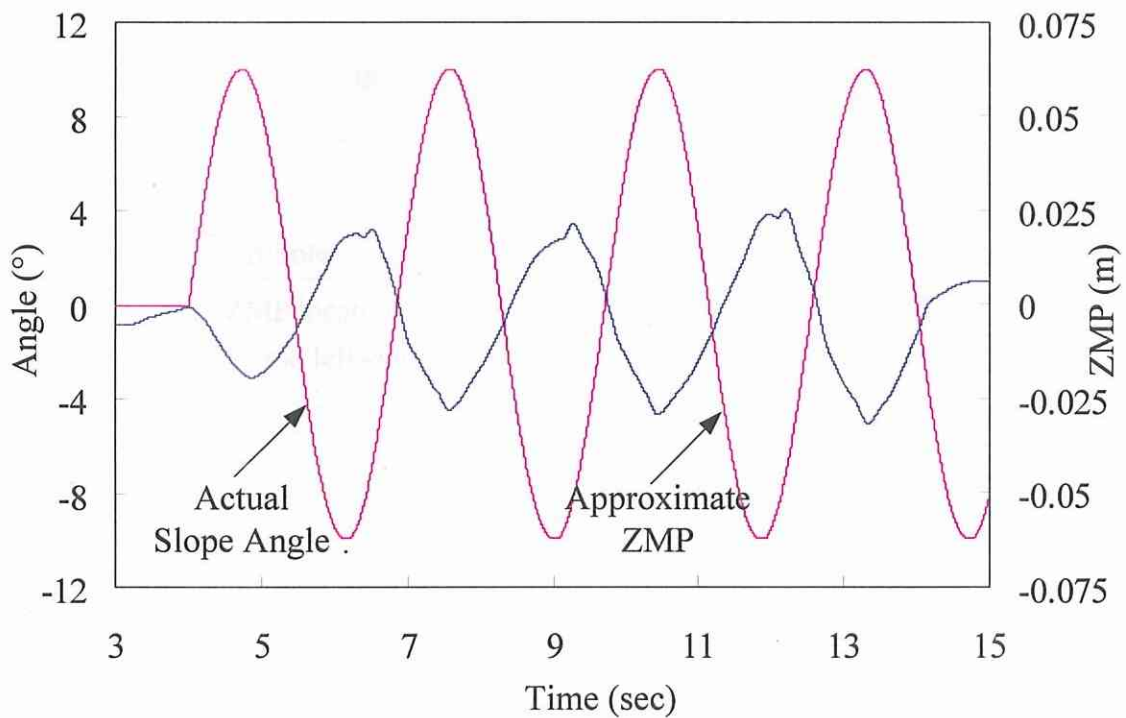
5-3 実験と結果

実験条件は、4章の横方向のサーフィン運動実験と同様とした。すなわち、長周期は4.8sec、短周期は2.8secのサイン波形でプラットフォームを動かし、最大傾斜角度は $\pm 10^\circ$ とした。図5.3に実験結果と図5.4と図5.5には実験風景を示す。本実験では、近似ZMPを用いた傾斜角推定を行わず、両足の反力バランスの差から直接制御を行っている。式(5.2)で与えられるコンプライアンスパラメータが本制御実験では重要な役割を示す。この値は、試行錯誤のチューニングを行い、 $k_p=1000$ [N/m]の値を最適値として用いた。この値を用いると、長周期および短周期とも安定なサーフィン運動が実現できた。

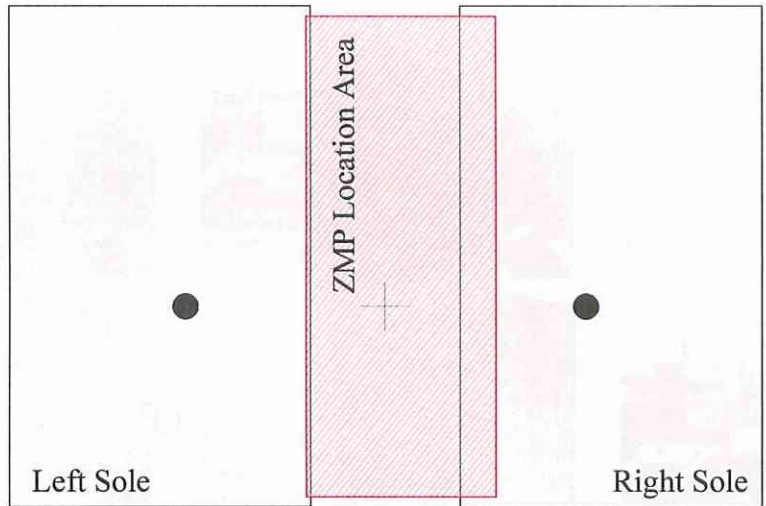
長周期の場合、ZMPの変化幅は2.3~-1.7cmであるが、傾斜角推定法よりZMPの移動幅が大きくなっている。長周期では、ZMPの変化が左右対称の関係であると考え



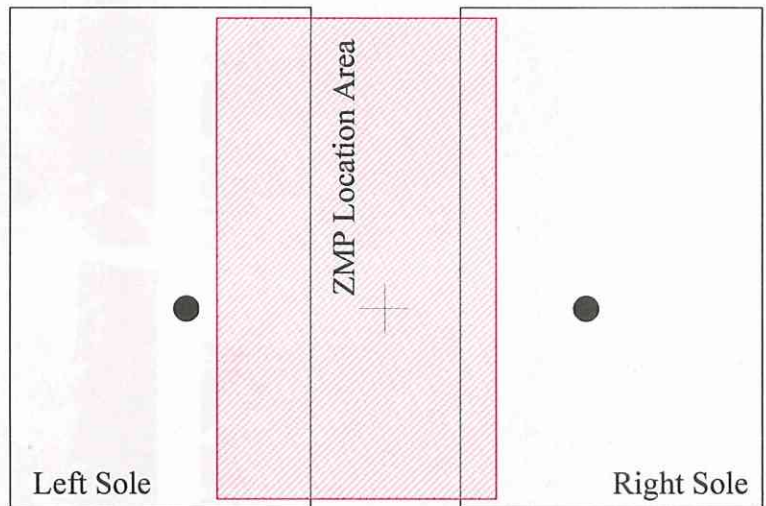
(a) Cycle control performance 4.8 sec



(b) Cycle control performance 2.8 sec



(c) ZMP location area on the sole of ALPHA in 4.8sec cycle



(d) ZMP location area on the sole of ALPHA in 2.8sec cycle

Fig. 5.3 Rightward and leftward surfing is performed by using the compliance concept.

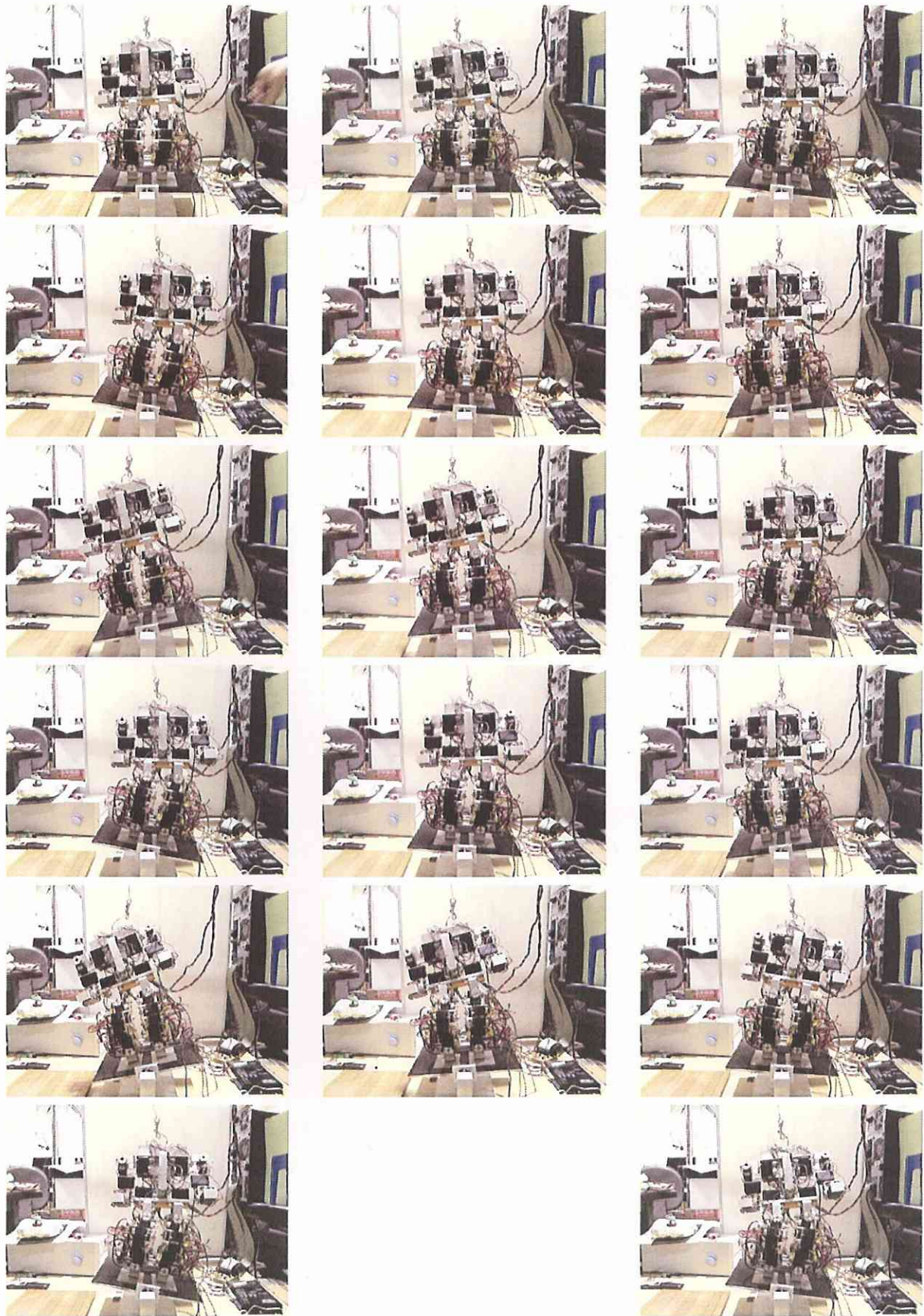


Fig. 5.4 Rightward and leftward surfing is performed with 4.8cycle rotation pattern.



Fig. 5.5 Rightward and leftward surfing is performed with 2.8cycle rotation pattern.

られるが、図 5.4 に示すように、最初の ALPHA の姿勢を見ると若干左側にずれている。このずれの原因は両足の力のバランスが崩れているので ALPHA は重心を左側に移動させてバランスを維持しようとしている。このバランス崩れの影響について後で説明する。

短周期の場合、ZMP の変化幅は 2.4~3.1cm であるが、傾斜角推定法と比較して、ZMP が大きな変化となっている。ZMP の存在領域を図 5.3(d)に示す。また、短周期の場合は ZMP の変化幅がサーフィン運動の時間経過とともに増加している傾向も見られる。その原因は、サーフィンを始める時、ALPHA の両足の力バランスが崩れたことが原因と思われ、ALPHA の姿勢が左側にずれている。ALPHA の姿勢が左側にずれているので、プラットフォームの回転にしだいに合わなくなってゆく。

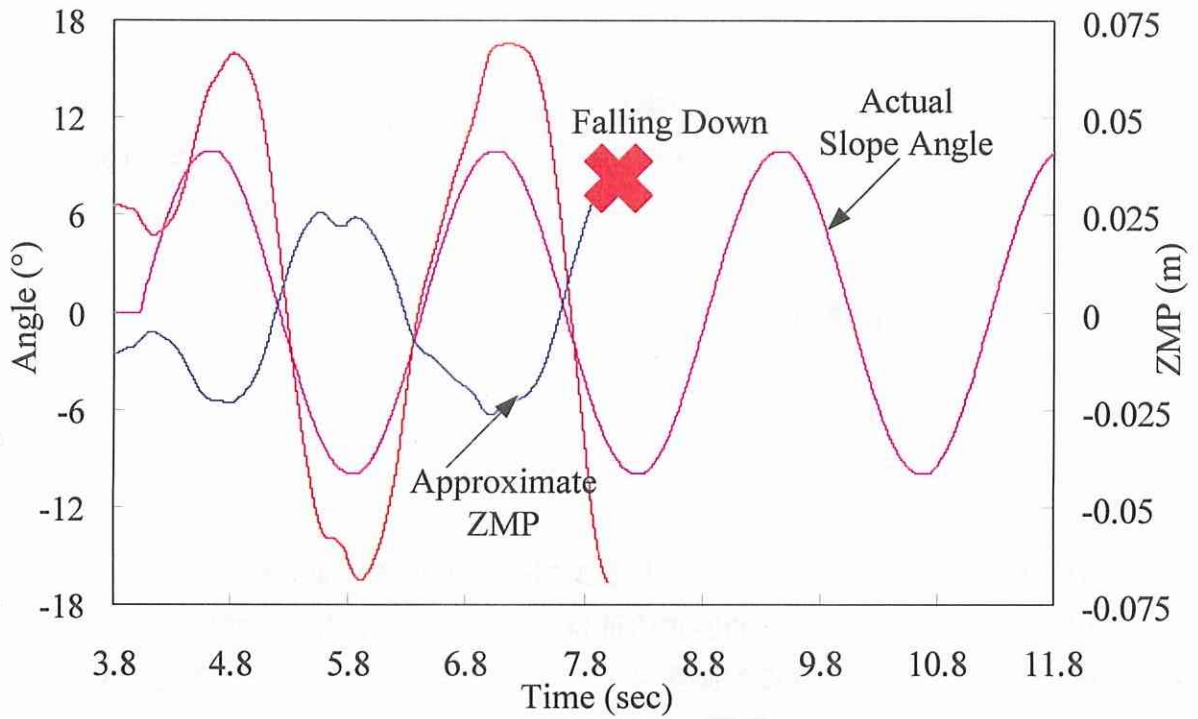
5.4 考察

横方向のサーフィン運動ロボットの実験は、傾斜角推定法および足裏反力の情報を用いた方法とも、長周期の 4.8sec および短周期の 2.8sec の両実験条件でサーフィン運動を実現できた。しかし、図 5.3(b)の実験に示すように、ZMP 変化の変動幅が時間とともにしだいに大きくなり、時間経過とともに不安定になる可能性も示している。そこで、周期を短周期に比較して、もう少し小さくし、2.4sec 周期の実験を行った。図 5.6(a)に傾斜角推定法、図 5.6(b)に足裏反力の情報を用いた制御実験結果を示す。

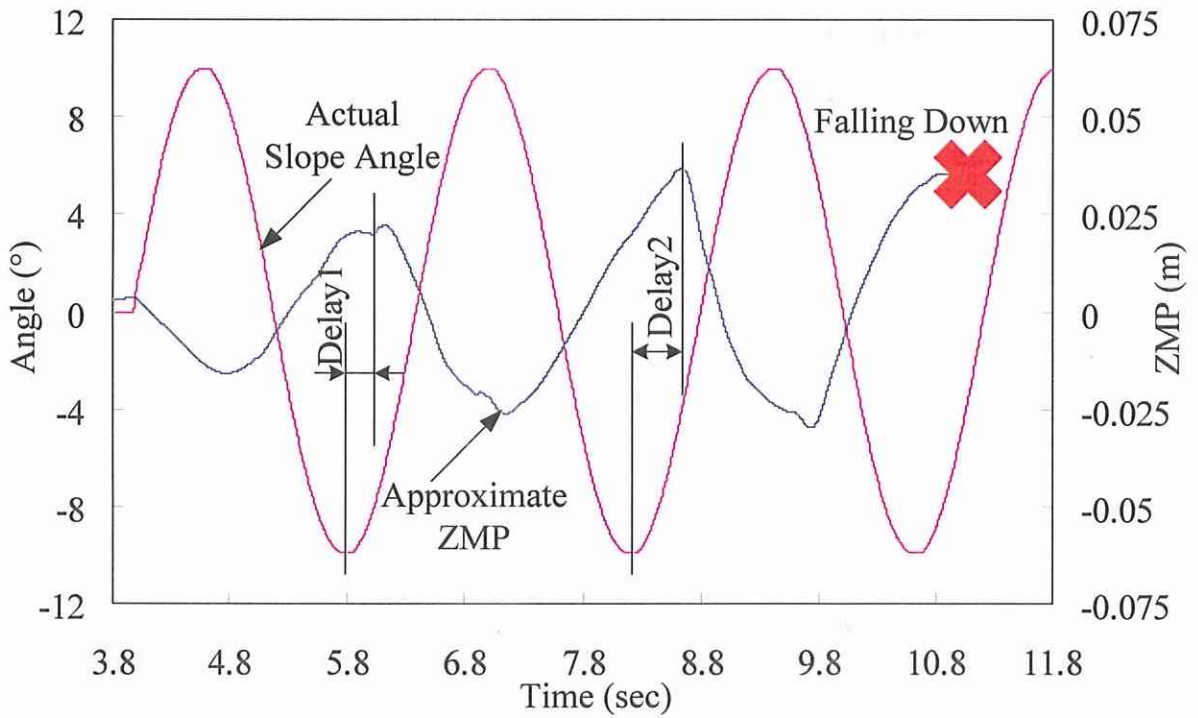
図 5.6 に示すように、傾斜角推定法では、1 周期の動作の後に転倒し、足裏反力の情報を用いた方法では 2 周期の動作の後に転倒した。前後方向のサーフィン運動ロボットの場合は短周期になると傾斜面の回転と同時に転倒するが、横方向サーフィン運動ロボットは動きの中で転倒となり、異なった転倒パターンとなる。

図 5.6(a)に示すように、傾斜角度推定法では、傾斜角の変化と近似 ZMP の変化の位置差は変化しない。傾斜角度の推定値を比較すると+の方向傾斜角の推定値は 1 度目と 2 度目との違いがほとんどないが、-の方向傾斜角度の推定値は 1 度目より 2 度目が大きくなった。従って、推定傾斜角度が大きくなると、回転周期が一定であってもダイナミックスの影響はサーフィンが始まる時のみではなく、サーフィンの途中でもダイナミックス影響を受ける可能性があることがわかる。

図 5.6(b)に示すが、足裏反力の情報を用いたサーフィンでは、傾斜角と近似 ZMP の位相差がしだいに大きくなり、特に片方向のみに位相遅れが大きくなり発生する。具体的には、ALPHA の重心が左より右に移動する過程に時間の遅れが大きくなる。その理由としては、左足裏の反力と右足裏の反力の力バランスが崩れたと考えられる。また、このような原因不明の足裏反力の変化がなくなると、足裏反力情報を用いたサーフィン制御が傾斜角度推定法よるサーフィン制御より効果的であることがわかる。



(a) Control performance using slope estimation method with 2.4cycle.



(b) Control performance using slope estimation method with 2.4cycle.

Fig. 5.6 Rightward and leftward surfing is performed by using both slope angle estimation method and compliance concept with 2.4cycle.

5-5 要約

本章ではサーフィン運動実現のために、足裏反力の情報を用いた方法で、足裏の反力増加分に対応して反対側の足の長さを縮める制御手法で実験を行った。本章で提案したサーフィン運動制御の特徴は近似 ZMP を用いずに足裏の反力のみを用いる手法である。4 章で提案した傾斜面の角度推定法によるサーフィン運動制御と同様に、長周期と短周期のサーフィン運動は成功したが、近似 ZMP を用いる手法と異なることは、短周期の時には計測される近似 ZMP が時間経過と伴いしだいに大きくなることである。この現象に注目し、どの程度の短周期まで横方向のサーフィン運動が可能であるのかについて解明するために、より短周期の 2.4sec 周期のサーフィン運動実現を行った。

この実験では、傾斜面の角度推定法によるサーフィン運動と足裏の反力変化分によるサーフィン運動、両者は失敗した。傾斜面の角度推定法は 1cycle の間で安定性を保持したが、足裏の反力増加分によるサーフィン運動は 2cycle の間で安定性を保持した。二つのサーフィン運動には、倒れるまで 1cycle の間隔があるが、倒れる時の ZMP 位置が約 3.7cm で倒れる方向も同一である。足裏の反力変化分によるサーフィン運動は周期が速くなるとしだいに不安定になると判断されるが、傾斜面の角度推定法によるサーフィン運動制御より足裏の反力変化分によるサーフィン運動の方が安定であると思われる。

第6章

床面から受ける力の釣り合い条件を用いたサーフィン運動制御

6.1 概説

前章までは、ヒューマノイドロボットのサーフィン運動制御実現のために、近似 ZMP を直接制御する方法、近似 ZMP から傾斜面の角度を推定して制御する方法、関節トルク情報から足裏の反力の変化分を推定し、反力をバランスさせる制御方法を示してきた。前章までは、ヒューマノイドロボットシステムの情報をあまり用いずに制御手法を開発してきたが、本章では、力の釣り合い（力の平衡状態）の情報を用いて、より精度の高いサーフィン運動制御の実現を目指す。本制御の基本的な概念は、モーメントの釣り合い方程式から両足の反力が等しくなる条件を求め、その条件が成立するための制御パラメータの目標値を算出する手法である。

6.2 足首のロール角度の制御によるサーフィン運動制御

本章では、上記の制御手法をアルゴリズム化するために、足首のロール角度を制御パラメータにする手法を示す。力の釣り合いの基礎方程式として左足および右足の ZMP の位置に着目してモーメントの釣り合いを考える。左足および右足の反力 F_{Lz} および F_{Rz} は ZMP の概念を用いて、それぞれの ZMP の位置に集中的に作用していると仮定する。図 5.1 に示すように上半身の重さを Mg 、左右のそれぞれの足の重さを mg 、太もも関節に作用する力を F_y として、モーメントの釣り合いを考える。左側の足の ZMP の地点のモーメントを MLp 、右側の ZMP の地点のモーメントを MRp を考えると、力の釣り合いから '0' となり、以下の基礎式が求められる。

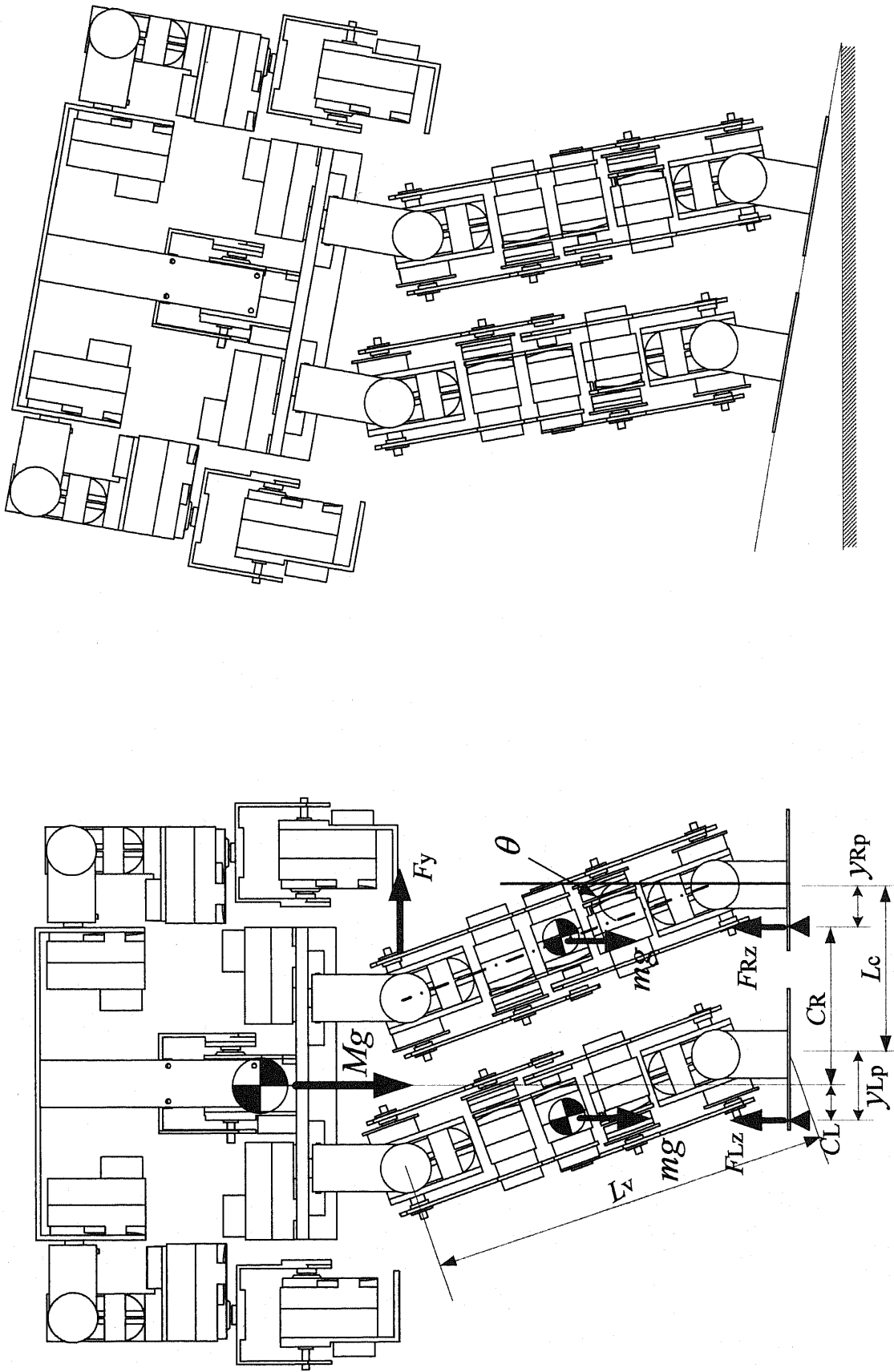


Fig. 6.1 Algorithm concept with the view points of front and left side. This is to control both roll angles of ankle and thigh. Each length of two legs is always same with initial length, because CoM is controlled to coincide with each G.R.F. of two legs.

$$M_{Lp} = F_{Rz}(C_L + C_R) - F_y L_V \cos \theta - MgC_L + (2y_{Lp} + L_V \sin \theta - L_C)mg = 0 \quad \dots\dots\dots(6.1)$$

$$M_{Rp} = -F_{Rz}(C_L + C_R) - F_y L_V \cos \theta + MgC_R + (2y_{Rp} + L_V \sin \theta + L_C)mg = 0 \quad \dots\dots\dots(6.2)$$

ここで、 F_{Lz} と F_{Rz} は両足それぞれの床面から受ける反力、 F_y はy軸における力で式(2.27)を用いて求められるもの、 C_L と C_R は重心からそれぞれZMPまで離れた距離、 L_V は最初の足の高さ、 L_C は両足裏二つのローカル座標系原点間の距離、 θ は足首のロール角度、 M と m は上半身の重さと下半身で一つの足の重さ、 y_{Lp} と y_{Rp} は二つのローカル座標系におけるそれぞれのZMPである。

従って、式(6.1)と(6.2)から足裏反力 F_{Lz} および F_{Rz} を求めると以下のようなになる。

$$F_{Lz} = \frac{MgC_L + F_y L_V \cos \theta - (2y_{Lp} + L_V \sin \theta - L_C)mg}{C_L + C_R} \quad \dots\dots\dots(6.3)$$

$$F_{Rz} = \frac{MgC_R - F_y L_V \cos \theta + (2y_{Rp} + L_V \sin \theta + L_C)mg}{C_L + C_R} \quad \dots\dots\dots(6.4)$$

6.1の概説で示したように、両足の反力が一致する条件が制御手法の基本概念である。

$$F_{Lz} = F_{Rz} \quad \dots\dots\dots(6.5)$$

目標制御パラメータが、式(6.5)を成立させる条件を求める。本節では、制御パラメータを足首ロール角度 θ とし、 θ が式(6.5)を成立させる条件を求める。式(6.3)と(6.4)の関係は、式(6.5)を用いて書き直すと次が求められる。

$$Mg(C_L - C_R) + 2F_y L_V \cos \theta - 2mgL_V \sin \theta = 2mg(x_{Rp} + x_{Lp}) \quad \dots\dots\dots(6.6)$$

図6.2に示すように C_L と C_R を定義すると次のとおりである。

$$C_L = \frac{1}{2}L_C - L_V \sin \theta + y_{Lp} \quad \dots\dots\dots(6.7)$$

$$C_R = \frac{1}{2}L_C + L_V \sin \theta - y_{Rp} \dots\dots\dots(6.8)$$

したがって、 C_L と C_R の関係は次のとおりである。

$$C_L - C_R = -2L_V \sin \theta + x_{Rp} + x_{Lp} \dots\dots\dots(6.9)$$

式 (6.9) を式 (6.6) 代入すると次のようになる。

$$(Mg + mg) \sin \theta - F_y \cos \theta = -\frac{g(2m + M)(x_{Lp} + x_{Rp})}{2L_V} \dots\dots\dots(6.10)$$

式 (6.10) を次のように整理ができる。

$$\sqrt{(Mg + mg)^2 + F_y^2} \sin(\theta - \alpha) = W \dots\dots\dots(6.11)$$

ここで、

$$\sin \alpha = \frac{F_y}{\sqrt{(Mg + mg)^2 + F_y^2}} \dots\dots\dots(6.12)$$

$$\cos \alpha = \frac{Mg + mg}{\sqrt{(Mg + mg)^2 + F_y^2}} \dots\dots\dots(6.13)$$

$$W = -\frac{g(M + 2m)(x_{Lp} + x_{Rp})}{2L_V} \dots\dots\dots(6.14)$$

従って、式 (6.5) を成立させる足首のロール角度 θ は次のとおりである。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{W}{\sqrt{(Mg + mg)^2 + F_y^2}} \right) + \alpha \dots\dots\dots(6.15)$$

式 (6.15) を用いると準静的な状態でヒューマノイドロボットの足首角度を制御しながらサーフィン運動を実現することができる。

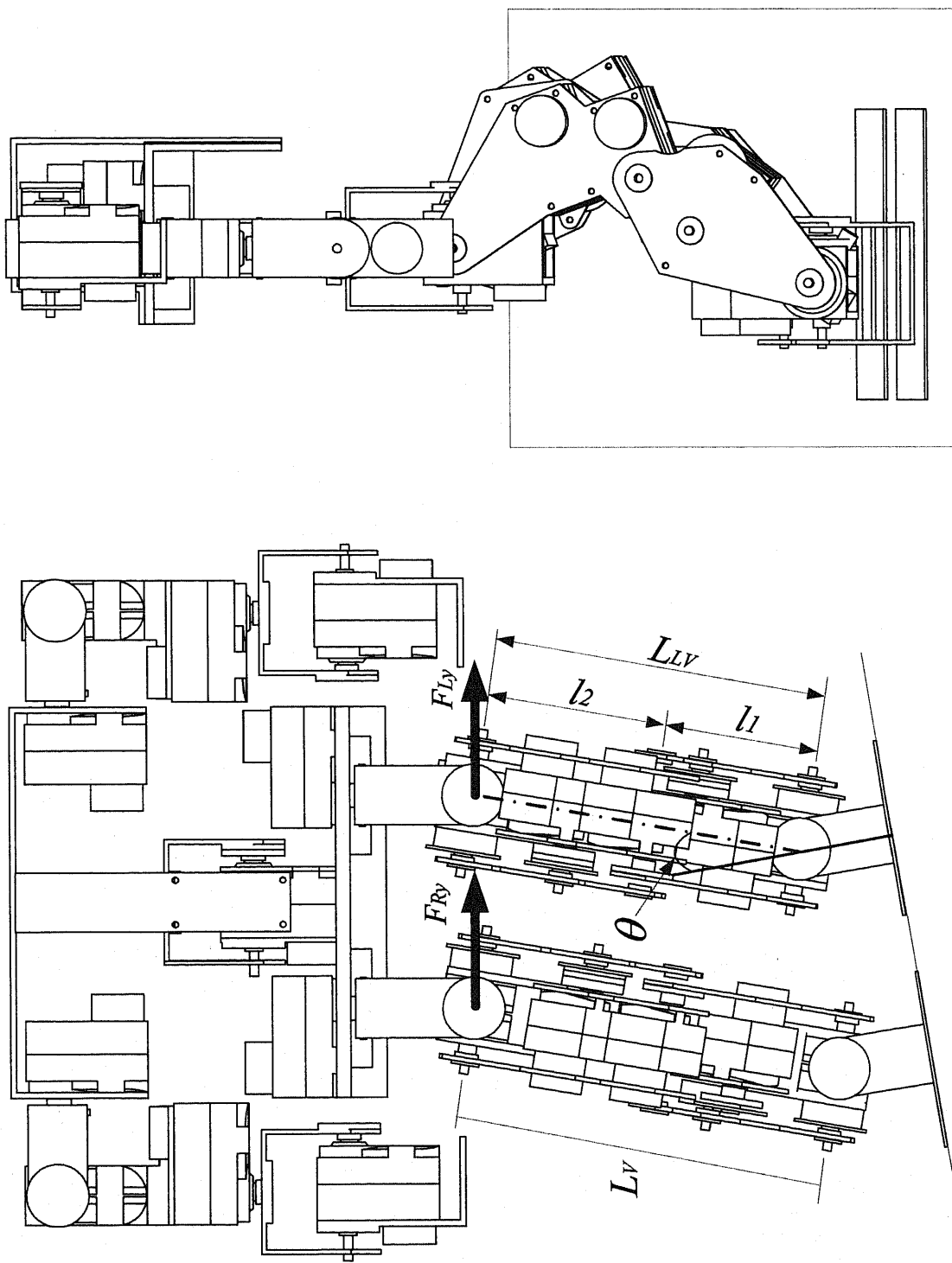


Fig. 6.2 Algorithm concept with the view points of front and left side. This is to control the height of left leg. Only height of left leg is changed with respect to the slope angle to coincide with each G.R.F. of two legs.

太もものロール角度の制御について具体的な制御イメージは、足首ロール角度を制御する時に上半身の姿勢を一定にするために、太もものロール角度を制御する。その制御量は、足首ロール角度の制御量の同一で、方向は反対である。

6.3 片足のみの長さ制御によるサーフィン運動制御

前節のサーフィン運動の条件は両足の長さを一定とし、足首ロール角度の制御でサーフィン運動を実現したが、本章では図 6.2 に示すように左足の長さを制御することでサーフィン運動を実現することにする。本節の制御手法も、6.2 節で示した ZMP の定義から議論を進める。

$$M_{Lp} = F_{Rz}(C_L + C_R) - F_{Ly}L_{LV} \cos \theta - F_{Ry}L_V \cos \theta - MgC_L + (2y_{Lp} + H - L_C)mg = 0 \quad \dots\dots\dots(6.16)$$

$$M_{Rp} = -F_{Lz}(C_L + C_R) - F_{Ly}L_{LV} \cos \theta + F_{Ry}L_V \cos \theta + MgC_R + (2y_{Rp} + H + L_C)mg = 0 \quad \dots\dots\dots(6.17)$$

ここで、

$$H = \frac{L_{LV} + L_V}{2} \sin \theta \quad \dots\dots\dots(6.18)$$

上式で L_{LV} は制御される足の高さである。式 (6.14) と (6.15) を用いて両足それぞれの反力を求めることができる。

$$F_{Rz} = \frac{MgC_L + F_{Ly}L_{LV} \cos \theta + F_{Ry}L_V \cos \theta - (2y_{Lp} + H - L_C)mg}{C_L + C_R} \quad \dots\dots(6.19)$$

$$F_{Lz} = \frac{MgC_R + F_{Ly}L_{LV} \cos \theta + F_{Ry}L_V \cos \theta + (2y_{Rp} + H + L_C)mg}{C_L + C_R} \quad \dots\dots(6.20)$$

式 (6.5) の両足の反力が一致する条件を成立させるための制御パラメータの L_{LV} を求めると、式 (6.19) と (6.20) の関係は次のようになる。

$$Mg(C_L - C_R) - 2F_d + 2(H + x_{Lp} + x_{Rp})mg = 0 \quad \dots\dots\dots(6.21)$$

本章では、片足のみの高さを制御することなので、左足を制御することにした。従って、右足の高さは固定される。式 (6.19) を用いて左足の高さを求めると、

$$L_{LV} = \frac{(x_{Lp} + x_{Rp})(M + 2m)}{R} g + \frac{2M + m}{R} g L_V \sin \theta - \frac{2F_R}{R} L_V \cos \theta \quad \dots\dots\dots (6.22)$$

ここで、 θ は式 (6.15) を用いて求めたものであり、

$$R = 2F_{L_V} \cos \theta - mg \sin \theta \quad \dots\dots\dots (6.23)$$

6.4 逆キネマティクス

本章では、二つのサーフィン運動アルゴリズムを提案した。6.2 節では、両足の高さを同一として足首の角度を制御することであるが、6.3 節では、右足の高さをいつも固定とし、左足の高さを制御することである。ヒューマノイドロボットの制御は関節角度を用いて行うので関節角を逆キネマティクスから求める必要がある。今回は片足の長さを調節なので、関節の特異点問題生じる可能性があるので、次のような条件を追加した。

$$L_{LV} \leq L_V \quad \dots\dots\dots (6.24)$$

今回の実験では上記条件を満足するために、最初の状態から特異点問題を生じないように、膝関節を若干曲げた状態で実験を開始する。サーフィン運動の時、ALPHA は足の長さのみが変化し、太ももの x 座標の位置は変化されないように制御する。このような条件に基づくと、次のような式が成り立つ。

$$x_0 = l_1 \cos \beta + l_2 \cos(\beta + \gamma) \quad \dots\dots\dots (6.25)$$

$$L_{LV} = l_1 \sin \beta + l_2 \sin(\beta + \gamma) \quad \dots\dots\dots (6.26)$$

ここで、 β は足首のピッチ角度、 γ は膝の角度である。

式 (6.24) および (6.25) から、 x_0 が一定条件で、 L_{LV} が与えられた時の制御パラメータ β , γ を求めることができる。

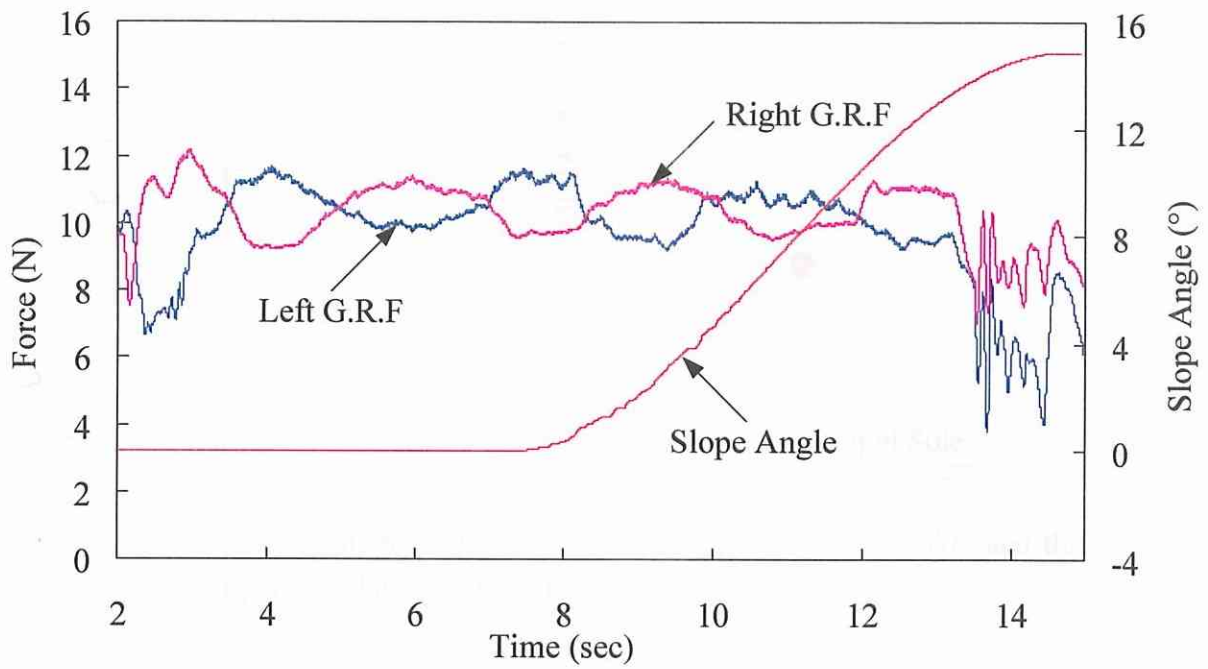
6.5 実験と結果

本章では静的なモーメントの釣り合いを仮定して二つのサーフィン運動を提案した。本節では提案したアルゴリズムを用いて行ったサーフィン運動結果を説明する。

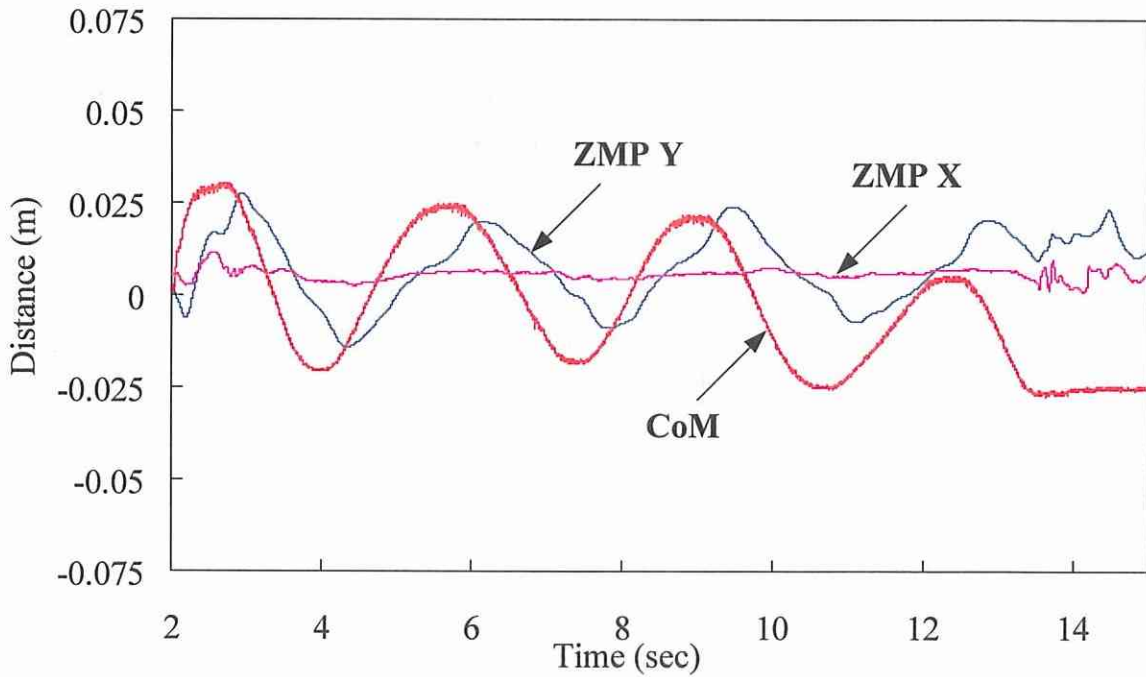
式(6.3)の制御アルゴリズムを用いた足首のロール角度制御の実験を図 6.3 に示す。この図(a)に示すように、8 秒以前はプラットフォームは静止しており、8 秒からプラットフォームは回転を始め、最大 15° まで回転する。図 6.3(b)に示すように、プラットフォーム回転以前にも、重心位置を $\pm 0.25\text{cm}$ 以内に設置するようにゆるやかに制御していることがわかる。また、図 6.3(b)の ZMPY と ZMPX の変化に示すように、今回の制御は横方向は y 軸と一致する方向なので、y 軸の ZMP である ZMPY の変化は大きいですが、制御と関係ない x 軸方向の ZMPX はほとんど変化していないことがわかる。図 6.3 に示すように、13 秒付近から、両足反力および ZMP に急激な変化が認められ、この現象は ALPHA がプラットフォーム上を滑ったことに起因している。その理由の一つは、人間の足首の可動範囲は制限があるので、本実験ではロール角度制限を $\pm 20^\circ$ として設定したことが、滑りの原因となったのかもしれない。このように、ロール角制御のみでは滑り現象が生じるので、サーフィン運動制御までは実験を進めなかった。

続いて、式(6.21)のアルゴリズムを用いた片足の長さ制御手法の実験結果を図 6.4 に示す。この図に示すように、プラットフォームの周期は長周期の 4.8sec とし、最大回転角度を 15° とし最低角度を 0° とした。図 6.4(a)に示すように、8 秒および 14 秒付近で、右足と左足の反力の差が大きくなるが、左足の長さ調節制御が機能し、両者が一致するように制御されていることがわかる。また、重心の位置変化は $0 \sim -2.5\text{cm}$ 以内に保たれており、滑りもなく安定な制御が実現できた。前章までの実験では最大傾斜角度が 10° であったが、本章のアルゴリズムを用いると最大傾斜角度を 15° まで拡大することができた。この実験結果を見ると、足のロール角度を制御する方法より足の長さを制御する方法が安定的であることが予想される。

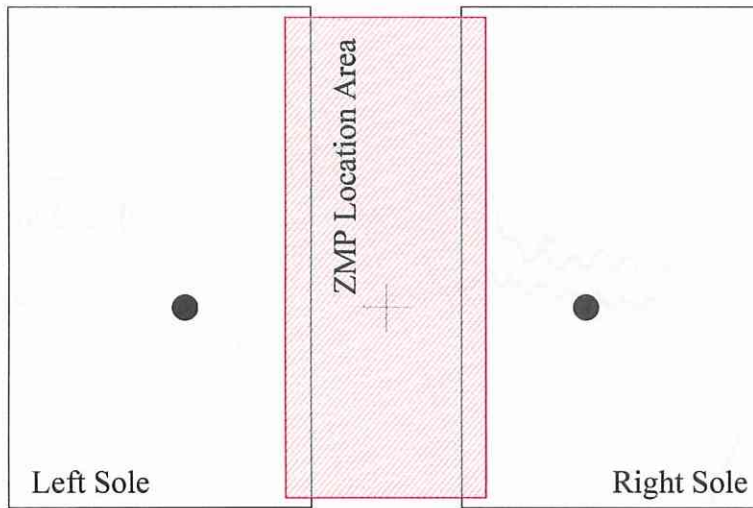
最後に、図 6.3(c)と図 6.4(c)にはロール角度制御と足の長さ制御の ZMP の存在領域を示すが、ロール角度制御の場合 ZMP の位置領域は対称となっているが、片足の長さを制御した場合は非対称となっている。これはシステムの故障で片足制御しか実現できなかったためで、もし両足制御が可能で左右方向のサーフィンを行うと図 6.4(c)の場合も左右対称の存在領域になると考えられる。



(a) Each G.R.F. of two legs with respect to slope angle.

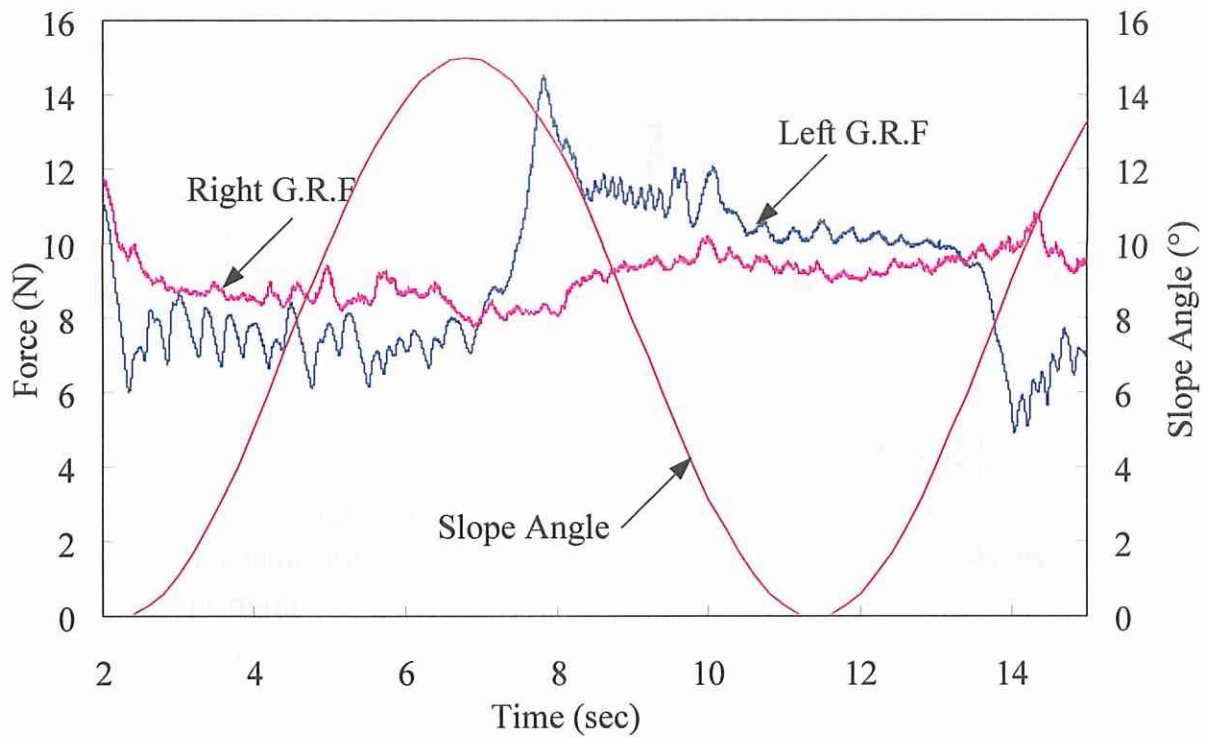


(b) Both ZMP on x-axis and y-axis with respect to CoM.

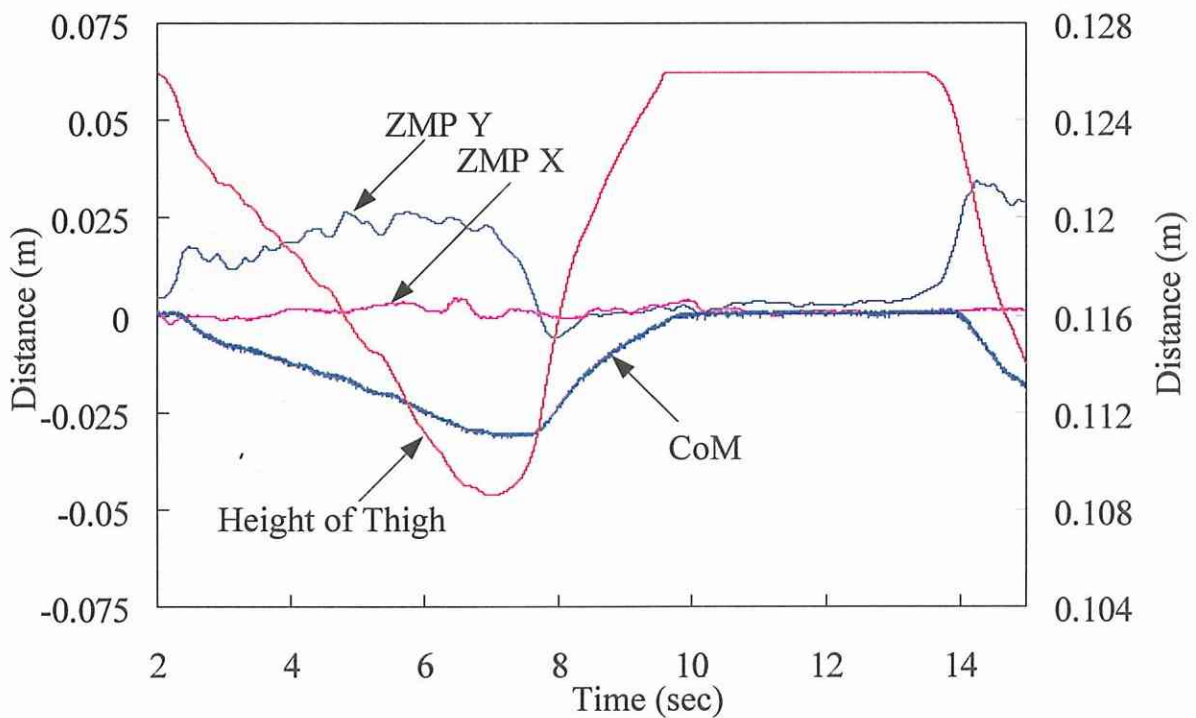


(c) ZMP location area on the sole of ALPHA

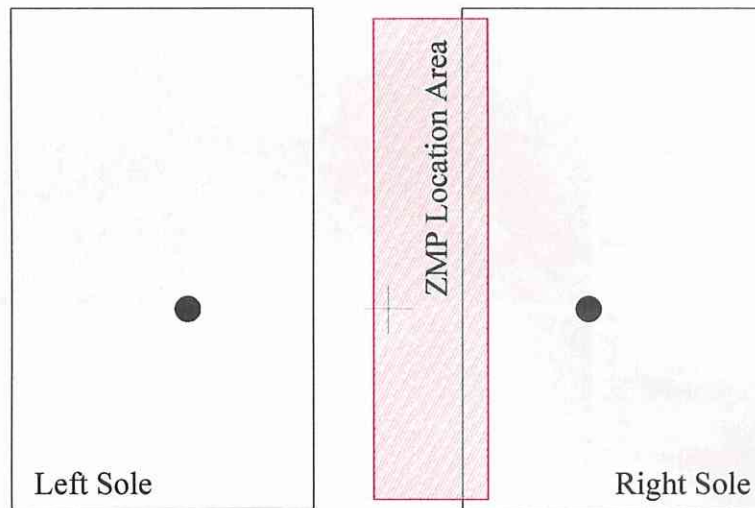
Fig. 6.3 Surfing control was performed by controlling roll angles of ankle and thigh. Alpha slid down slope of platform because it has restrictive angle range of ankle.



(a) Each G.R.F. of two legs with respect to slope angle



(b) Both ZMP on x-axis and y-axis with respect to CoM



(c) ZMP location area on the sole of ALPHA

Fig. 6.4 Surfing control was performed by controlling length of left leg. Alpha did not slid down slope of platform

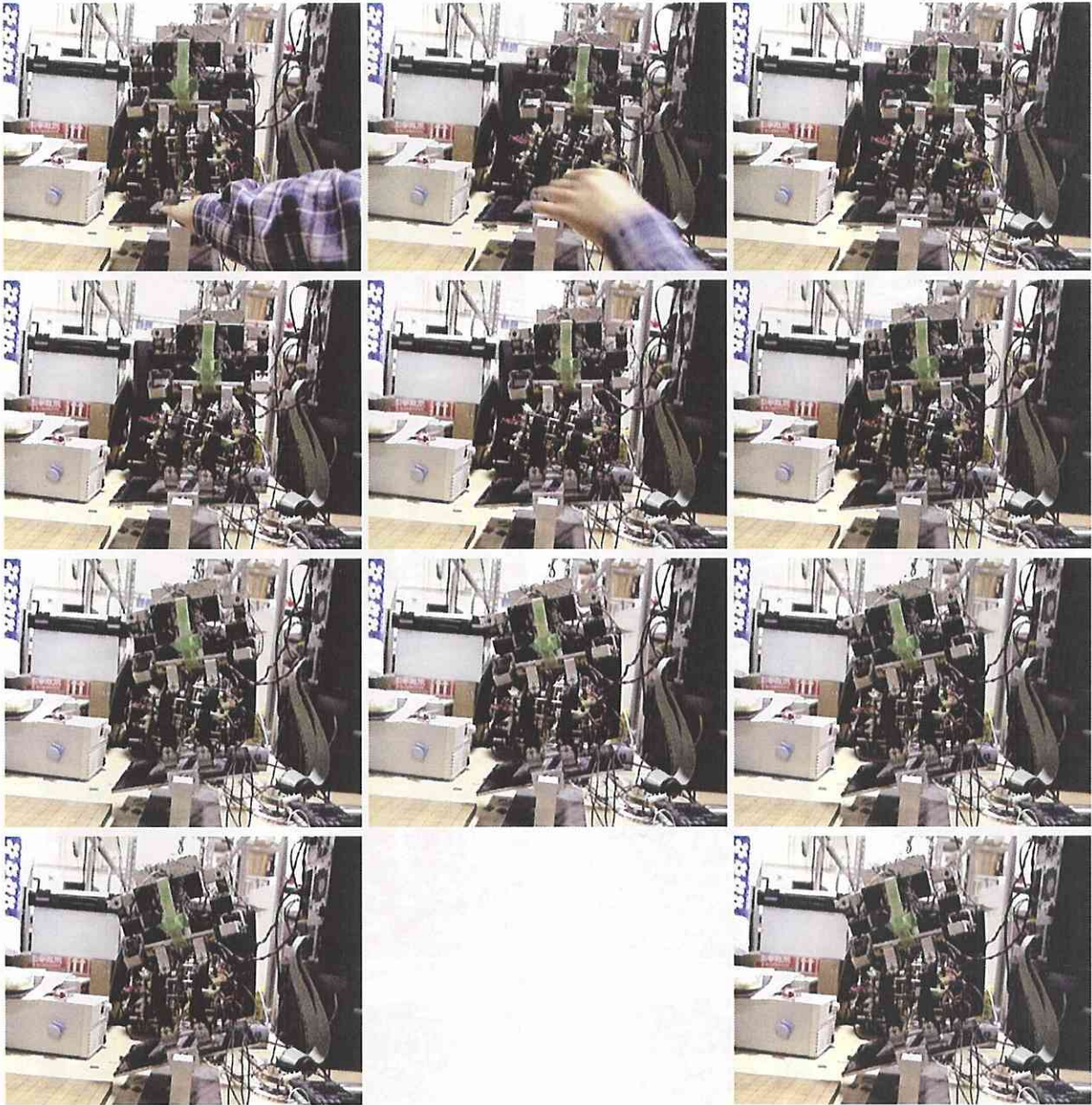


Fig 6.5 Surfing is performed with controlling roll angles of both ankle and thigh.

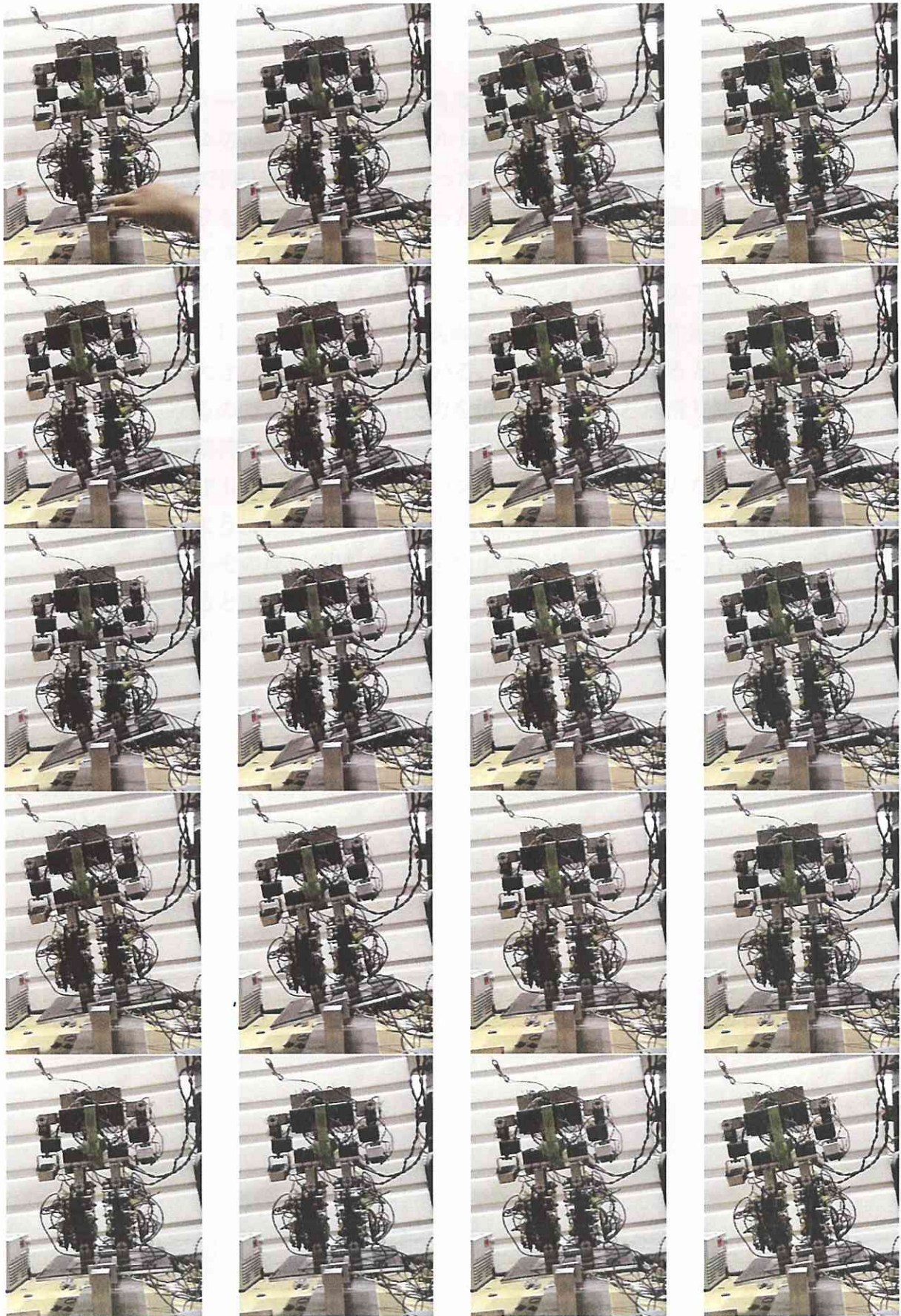


Fig 6.6 Surfing is performed with controlling the length of left leg.

6-6 考察

図 6.7 に、足首ロールと太ももロール角度制御の結果と片足の長さを制御結果を示す。プラットホームの制御周期は、ロール角度制御手法では、1Cycle17sec とし、片足の長さ制御手法では 1Cycle10sec で行った。ロール角度制御手法では、遅い周期の制御であるが、滑りを生じて倒れてしまった。図 6.7 に示す制御結果を用いて、滑りの防止方法について考察する。

- 1) 今回の実験では、右足がプラットホームが傾いた場合の下側の足となる。図 6.7 に示すように、ロール角度制御の場合、右足には片足の長さ制御方法に比較して大きな反力が作用している。反力が大きくなると、滑り方向の力も大きくなるので、下側の足の反力を低下させることが滑り防止に効果を与えることが期待できる。
- 2) 一方、ZMP については、図 6.7 のプラス側が滑り方向となっている。制御結果に示すように、ロール角制御の ZMP は滑りが始まった時は滑り方向側にきており、その反対側に ZMP を制御すると、1) 項の反力も減らせ、滑りが防止できると推定できる。

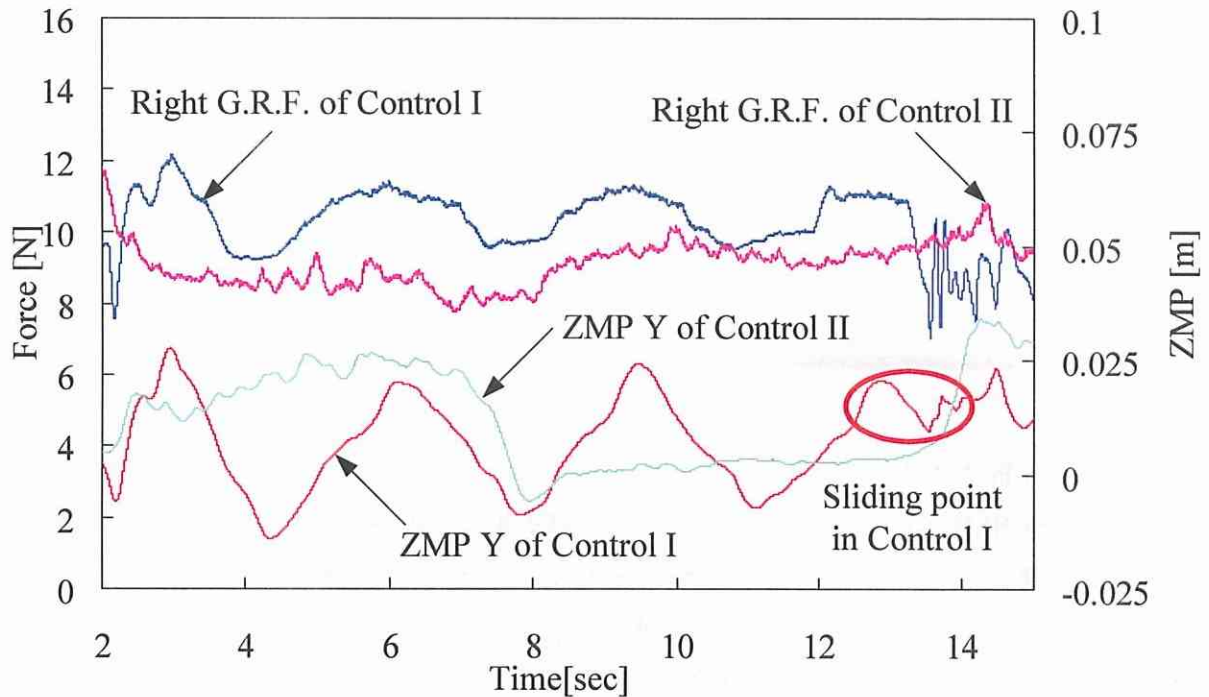


Fig. 6.7 Two right G.R.F. and ZMP of each surfing control model were compared with each other. G.R.F. of Surfing control I is larger than control II; ZMP of surfing control I is more rightward than surfing control II. These means surfing control II is more stable than surfing control I.

** Control I: 足首と太もものロール角度制御

** Control II: 片足の長さを制御する方法

6.7 要約

前章では、サーフィン運動ロボットのモデル情報を用いずに、制御アルゴリズムを構築してきた。本章ではサーフィン運動ロボットのモデル情報を活用し、より高度な制御手法について検討を進めてきた。足首ロール角制御では、サーフィン運動としては非常に限定された運動なので、あまり効果を発揮しなかったが、足の長さ制御手法では最大傾斜角度を 10° から 15° に大幅に向上させることができた。

第7章

結 論

本研究では、力センサ無しの条件下で、モータ電流より関節トルクを推定し、その情報を用いて近似 ZMP を求める方法を提案した。さらに、求めた近似 ZMP を用いて様々なサーフィン制御手法を提案し、ヒューマノイドロボットのサーフィン運動を実現した。ヒューマノイドロボットが水平面上で直立し、動きのない状態の場合、求めた近似 ZMP とヒューマノイドロボットの重心位置がだいたい一致する。この場合、重心位置の情報をうまく用いるとヒューマノイドロボットの安定性を維持することができるので、近似 ZMP はあまり興味のないものかもしれない。しかしながら、ヒューマノイドロボットが傾き重力方向が変化する環境では、ヒューマノイドロボットの重心位置情報のみで安定性を維持する制御は不可能である。一方、本手法で提案した近似 ZMP 推定法を用いると、力センサなしの条件で重力方向の変化の検知が可能なので、その特徴を活かす効果的タスクとして、サーフィン制御の実現を目指した。サーフィン運動制御の特徴は、連続的に重力方向が変化するので、ヒューマノイドロボットの重心情報のみでは安定性維持の制御が不可能なので、本手法の有効性を示すことができる。近似 ZMP を適用することで様々な制御アルゴリズムを提案しながらサーフィン運動の実現を試みた。各種制御アルゴリズムとして、第 3 章では近似 ZMP の直接制御によるサーフィン制御、第 4 章では傾斜面の角度推定によるサーフィン制御、第 5 章では床面から受ける足裏の反力の増加分によるサーフィン制御、第 6 章では床面から受ける反力釣り合いによるサーフィン制御を提案して、それぞれのサーフィン運動制御を実現している。

本論文により得られたサーフィン運動制御性能の比較を表 7.1 示し、それぞれの制御の ZMP の存在範囲を参考のために表 7.2 に示す。以下に、本研究に得られた結果を示す。

(1) ロボット用センサレス技術として、モータ電流より関節トルクを推定し、その情報を用いて近似 ZMP の推定法を提案した。また、近似 ZMP の有効性を確認するために、足裏につけた力センサを用いて厳密な ZMP とキネマティクス情報のみから求めた重心との比較検討を行った。これらの比較より、近似 ZMP はセンサレス技術として、

力センサを用いずに外力の影響を推定できた。この結果は、重心情報のみの場合と比較して、外力変化の環境でより有効な制御が可能であることを明らかにしている。

(2) サーフィン運動の実現については、近似 ZMP 直接制御することで直立安定性を保証する方法と、近似 ZMP を用いて傾斜面の角度推定を行い、その情報を用いた間接制御方法を考案した。両者の結果を比較すると、間接制御方法がより短周期の傾斜面の運動に対応することが可能なことを明らかにし、直接制御方法は制御時のダイナミックスの影響で直立安定性が損なわれることを解明した。この結果から直立安定性は支持多角形内に重心を置く静的安定性と、ダイナミックスの影響が関連する動的安定性の両者が重要であり、目標 ZMP の動きを許容することで、重心の移動を少なくする制御が動的安定性を向上させることを明らかにした。

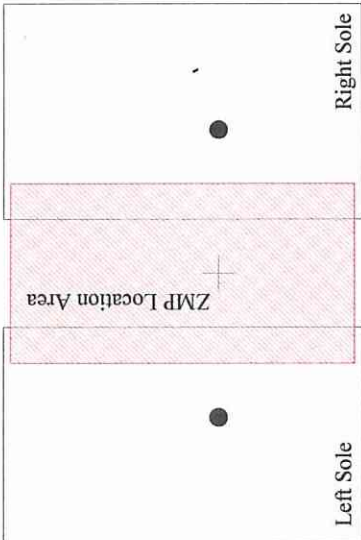
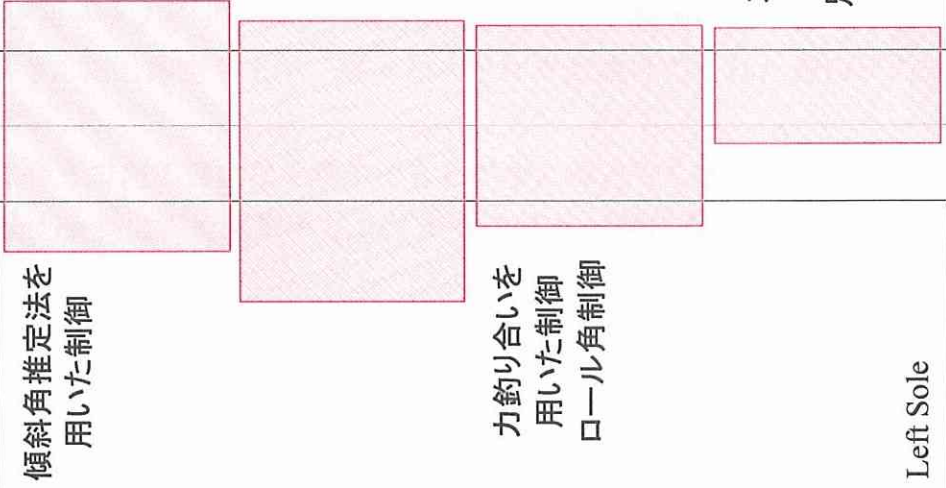

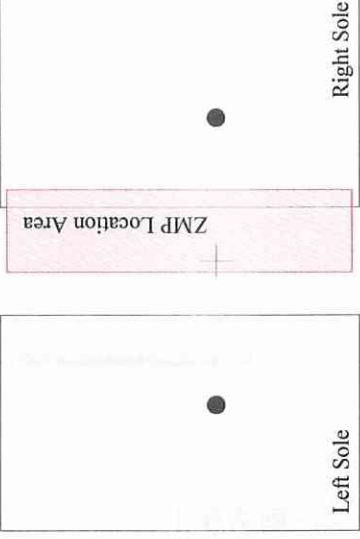

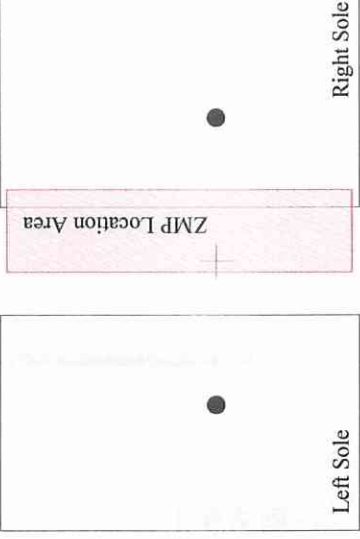
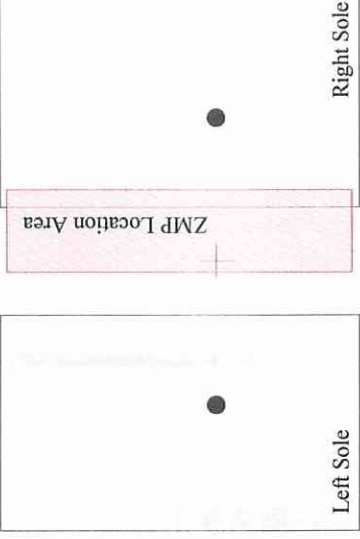
(3) サーフィン運動の実現のために、足裏反力を釣り合わせる手法も考案し、ZMP の定義を用いたモーメントの釣り合い条件から足裏反力を一致させるロボットの制御パラメータを抽出した。制御パラメータとしては足首のロール角度と足の長さを制御する方法を検討したが、足の長さ制御手法は、傾斜角度が上記の制御法に比較して大きくなっても、安定な直立安定性が実現できた。

(4) センサレス技術として、力センサを用いた ZMP 推定法を考案し、力センサがない状況では実現不可能であった重力方向の変化する環境でのヒューマノイドロボットの直立安定性を実現することができ、その基本的な制御指針をえることができた。

Table. 7.1 The comparison of all surfing control algorithms

サーフィン方向	前後方向サーフィン		横方向サーフィン	
	制御方法	傾斜面の角度推定方法	傾斜面の角度推定方法	足裏反力増加分を一致させる方法
制御方法	近似 ZMP 直接制御	ZMP を用いて傾斜面の角度を推定し、上半身を重力の方向と合わせる。	ZMP を用いて傾斜面の角度を推定し、重心を重力の方向と合わせる。	モデル情報を用いた足裏反力を一致させる方法
ZMP の使用方法	目標 ZMP に一致するように ZMP を直接制御		ZMP を用いて傾斜面の角度を推定し、重心を重力の方向と合わせる。	ZMP を用いたモーメント釣合条件から足裏反力を一致させる条件を求める。
制御される関節	太もも	太もも	足首, 膝, 太もも	1. 足首, 太もも 2. 足首, 膝, 太もも
制御時に動く部位	上半身	上半身	上半身と下半身 両足の動きはそれぞれ異なる	1. 上半身と下半身 (両足の動きは同一) 2. 上半身と下半身 (両足の動きはそれぞれ異なる)
特徴と得失	目標 ZMP より離れない傾向があるが、重心の動きが大きくなる。プラットフォームの回転速度がある程度遅いと効果的であるが、速くなると重心移動に伴うダイナミックスの影響が大きくなり、安定性が現れる	プラットフォームの回転に従って ZMP が動くが、重心の動きが小さい。回転速度がある程度早くなっても、ダイナミックスの影響が少ない。	時間が経つと ZMP の変化が大きくなる傾向がある。従って、短期的なサーフィンは効果があるが、長期的なサーフィンには不具合発生。	モデルを用いると傾斜角 15°まで向上され、ロバスタな制御が期待される。

Table. 7.2 The comparison of ZMP area

 <p>傾斜角推定した制御</p>	 <p>傾斜角推定法を用いた制御</p> <p>足裏反力情報を用いた制御</p> <p>力釣り合いを用いた制御</p> <p>力釣り合いを用いた制御 足の長さ制御</p>	 <p>力釣り合いによる制御 (ロール制御)</p>	 <p>力釣り合いによる制御 (長さ制御)</p>
 <p>傾斜角推定した制御</p>	<p>傾斜角推定法を用いた制御</p> <p>足裏反力情報を用いた制御</p> <p>力釣り合いを用いた制御</p> <p>力釣り合いを用いた制御 足の長さ制御</p>	 <p>力釣り合いによる制御 (ロール制御)</p>	 <p>力釣り合いによる制御 (長さ制御)</p>

謝 辞

平成 17 年度から平成 20 年度まで 3 年半、終始懇切なご指導を賜った横浜国立大学大学院 藪田 哲郎 教授に心から深く感謝の意を表し、厚くお礼を申し上げます。

機会あるたびごとに貴重な助言と懇切なご指摘をいただいた 黄 健 先生にも厚くお礼申し上げます。また、本論文をまとめるにあたり、貴重なご教示をいただいた 高田 一 教授、森下 信 教授、眞田 一志 教授、前田 雄介 準教授に深く感謝申し上げます。

また、ヒューマノイドロボット ALPHA を製作し、技術的なサポートをいただいた 友国 伸保さんにも感謝します。様々なことに支え続けてくれた藪田研の皆さんにも感謝します。

最後に、今まで何不自由なく集中できる環境に導いてくださった神様と Robert Shin 様、Devorah Lee 様に深く感謝申し上げます。3 年半一緒になった家族にも感謝します。

文 献

- (1) 梶田秀司, ヒューマノイドロボット, (2005), オーム社.
- (2) K. Hirai, "Current and future perspective of Honda humanoid robot," IEEE International conference on Intelligent Robots and System, (1997), pp.500-508.
- (3) K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, T. Takenaka, "The development of Honda humanoid robot," IEEE International conference on robotics and automation, (1998), pp. 1321-1326.
- (4) J. Kim, I. Park, J. Lee, M. Kim, B. Cho, J. Oh, "System design and dynamic walking of humanoid robot KHR-2," IEEE International conference on robotics and automation, (2005), pp. 1443-1448.
- (5) Y. Ogura, T. Kataoka, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Lim, A. Takanishi, "Evaluation of various walking patterns of biped humanoid robot," IEEE International conference on robotics and automation, (2005), pp. 605-610
- (6) S. Kajita, T. Nagasaki, K. Kaneko, K. Yokoi, K. Tanie, "A running controller of humanoid biped HRP-2LR," IEEE International conference on robotics and automation, (2005), pp. 618-624.
- (7) K. Kaneko, S. Kajita, K. Yokoi, V. Huegel, P. Blazevic, P. Coiffet, "Design of LRP humanoid robot and its control method," IEEE International workshop on robot and human interface communication, (2001), pp. 556-561
- (8) M. Vukobratovic and J. Stepanenko, "On the stability of anthropomorphic system," Mathematical Biosciences, vol. 15, No. 1, pp. 1-37.
- (9) M. Vukobratovic and B. Borovac, "Zero-moment-point – thirty five years of its life," International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 1 (2004), No. 1, pp. 157-173.
- (10) A. Goswami, "Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (FRI) point," International Journal of robotics research, Vol. 18, No. 6, (1999), pp. 523-533.

- (11) M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, D. Stokic, "Biped locomotion, scientific fundamentals of robotics 7," Springer-Verlag, (1990)
- (12) Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko and H. Arai, N. Koyachi, K. Tanie, "Planning walking patterns for a biped robot," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 3 (2001), pp.280-289.
- (13) J. Park and H. Cho, "An on-line trajectory modifier for the base link of biped robots to enhance locomotion stability," IEEE proc. International conference on robotics and automation, (2000), pp. 3353-3358.
- (14) T. Sugihara, Y. Nakamura, "A fast online gait planning with boundary condition," IEEE International conference on robotics and automation, (2005), pp. 306-311.
- (15) A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki and I. Kato, "The realization of dynamic walking by the biped robot WL-10RD," Journal of Robot Society of Japan, Vol. 3 (1985), pp. 67-78.
- (16) Q. Li, A. Takanishi and I. Kato, "Development of ZMP measurement system for biped walking robot using universal force-moment sensors," Journal of Robot Society of Japan, Vol. 10 (1992), pp. 828-833.
- (17) K. Harada, S. Kajita, H. Saito, M. Morisawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko and H. Hirukawa, "A humanoid robot carrying a heavy object," IEEE proc. International Conference on Robotics and Automation, (2005), pp. 1724-1729.
- (18) H. Arisumi, J. Chardonnet, A. Kheddar, K. Yokoi, "Dynamic lifting motion of humanoid robots," IEEE International conference of robotics and automation, (2007), pp. 2661-2667.
- (19) T. Takubo, T. Tanaka, K. Inoue, T. Arai, "Emergent walking stop using 3-D ZMP modification criteria map for humanoid robot," IEEE International conference of robotics and automation, (2007), pp. 2676-2681.
- (20) M. Morisawa, K. Kaneko, S. Kajita, K. Fujiwara, K. Harada, H. Hirukawa, "Motion planning of emergency stop for humanoid robot by state space approach," IEEE International conference on intelligence robot and system, (2006), pp. 2986-2992.
- (21) 江上, 土谷, "最適予見制御と一般化予測制御," 計測と制御, Vol.39, No. 5, (2000), pp. 337-342.
- (22) G. Endo, J. Nakanishi, J. Morimoto, G. Cheng, "Experimental studies of a neural

- oscillator for biped locomotion with QRIO,” IEEE International conference of robotics and automation, (2005), pp. 598-604.
- (23) J. Choi, B. So, B. Y. W. Kim, I. Suh, “Impact based trajectory planning of a soccer ball in kicking robot,” IEEE International conference of robotics and automation, (2005), pp. 2845-2851.
- (24) 伊藤聡, 浅野博紀, 川崎晴久, “床反力中心制御による二足歩行系両脚支持期の重心移動,” 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 4, (2004), pp. 535-542.
- (25) 伊藤聡, 西垣智寛, 川崎晴久, “床反力に基づいた一定外力場での起立姿勢に対する制御法,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No. 1, (2002), pp. 79-86.
- (26) 玄相昊, ゴードン・テェン, “冗長自由度を有する脚式ロボットの実用的な接触力制御手法とバランス制御への応用,” 第25回日本ロボット学会講演会, (2007), 3H12.
- (27) T. Murakami, R. Nakamura, F. Yu, K. Onishi, “Force sensorless impedance control by disturbance observer,” Power conversion conference, (1993), pp. 352-357.
- (28) S. Kawaji, F. Ozaki, R. Higasi, “Sensorless force control for high-speed pressurization,” Journal of robotics and mechatronics, Vol. 13, No. 3, (2001), pp. 222-229.
- (29) I. Mizuuchi, M. Inaba, H. Inoue, “Adaptive pick-and-place behaviors in a whole-body humanoid robot with an autonomous layer based on parallel sensor-motor modules,” Robotics and autonomous system, **28**, (1999), pp. 99-113.
- (30) 友國伸保, 雑賀優, 藪田哲郎, “トルク制御可能なサーボユニットを用いた小型ヒューマノイドロボット,” 日本機械学会論文集, Vol.71-C, No.200, (2005), pp. 2578-2585, 2005.
- (31) John J. Craig: “Introduction to Robotics, Mechanics and Control”, (2005), Prentice Hall.
- (32) 松木洋介, 許仁, 友國伸保, 黄健, 藪田哲郎, “電流計測による関節トルク推定値を用いた ZMP 推定法の提案とその応用,” 日本機械学会論文集, Vol.73-C, No. 732, pp. 2295-2304.
- (33) 黒木義博, 石田健蔵, 長阪憲一郎, 山口仁一, “高度統合運動制御機能を有する小型二足歩行エンターテインメントロボット SDR-4X,” 第20回日本ロボット学会講演会, 1C17, (2002).
- (34) 加藤恵輔, 黒木義博, 長阪憲一郎, 宮本敦志, 上野謙一郎, “小型ヒューマノイドロボットの運動性評価システム 6 自由度モーションベースの開発,” 第22回日

本ロボット学会講演会, 1L26, (2004).

本論文を構成する公表論文

【学術雑誌掲載論文】：フルペーパー審査

- (1) 松木洋介・許仁・黄健・薮田哲郎：電流測定による関節トルク推定値を用いた ZMP 推定法の提案とその応用，日本機械学会論文集，C編，73 巻，732 号(2007-8)，pp.2295-2304.，
- (2) 許仁・松木洋介・友國伸保・黄健・薮田哲郎：力センサ無しの条件下で近似 ZMP を用いたサーフィンロボットの実現（重力方向変化の環境下でロボットの直立安定性の考察）会論文集，C編，74 巻，740 号(2008-4)，pp. 912-921.

【国内シンポジウム】：フルペーパー審査

- (1) 許仁・松木洋介・友國伸保・黄健・薮田哲郎：The realization of surfing robot without force sensor, 第 13 回ロボティクスシンポジウム予稿集 5B, pp.421-426, 2008

【国内講演】

- (1) 許仁，中川知彦，松木洋介，友國伸保，黄健，薮田哲郎：近似 ZMP を用いた動的傾斜面上の直立姿勢制御，第 24 回日本ロボット学会講演概要集，3H25(2006).
- (2) 許仁・松木洋介・友國伸保・黄健・薮田哲郎：Standing stability of surfing robot without force sensor, 第 25 回日本ロボット学会講演論文集，CDROM,3H11(2007)