

修士論文

位置指令型インピーダンス制御による四足歩行ロボットの
柔軟な制御

The flexible control of the Quadruped Walking Robot by Position-Based Impedance
Control

指導教員 井上 喜雄 教授
副指導教員 岡 宏一 助教授

高知工科大学大学院工学研究科
基盤工学専攻博士課程（前期）

1055031 大田 大

目次

1. 序章	1
1.1 歩行ロボットの研究	1
1.2 四足歩行ロボットの従来研究	2
1.3 研究内容	3
1.4 本論文の構成	3
2. 準備	5
2.1 二つの制御方法	6
2.2 動歩行と静歩行	6
2.3 歩行サイクルとデューティ比	6
2.4 歩容の種類	7
2.5 安定判別	9
3. 歩行ロボットモデル	10
3.1 モデルの全体構成と座標系	10
3.2 脚機構	11
3.3 逆運動学	11
3.4 稼動角度範囲	12
4. 歩行	13
4.1 間歇クローラ歩容について	13
4.2 歩行シーケンス	13
4.3 軌道の決定	14
4.4 立脚相の制御	14
4.5 遊脚相の制御	14
5. 位置指令型インピーダンス制御	15
5.1 位置指令型インピーダンス制御とは	15
5.2 制御式	16
5.3 安定余裕と重心移動量の関係	18
5.4 位置指令型インピーダンス制御の利点	18
6. シミュレーションプログラム	19
6.1 制御の流れ	19

6.2	力センサからの情報の取得	20
6.3	安定余裕の計算	21
6.4	制御パラメータ	22
7	シミュレーション	23
7.1	安定余裕の確保	23
7.2	側行歩容による軌道変更	24
8	シミュレーション結果	26
9	考察	34
10	結言	35
	謝辞	35
	参考文献	36

1. 序章

本論文では、将来、四足歩行ロボットが人間と協調した作業を行う事を想定し、その時に起こりうる人や物への接触に対応するため、ロボット本体重心位置を位置指令型インピーダンス制御によって制御する事を提案する。また、力センサを使用し、側行歩容による位置指令型インピーダンス制御を基にした軌道変更を提案する。本章では 1.1 で歩行ロボットの特徴と種類、ロボット開発の歴史を紹介する。1.2 では四足歩行ロボットの従来の研究内容を紹介する。1.3 では本研究の目的について述べる。最後に 1.4 で本論文の構成について述べる。

1.1 歩行ロボットの研究

歩行ロボットとは、脚機構有し、歩く事で移動するロボットである。この脚機構を用いた移動手段を持つロボットは、ロボットと地面の接点が離散的であり、着地点を選択できる事が最大の特徴である。近年、ロボットの作業領域は工場などから、人間の生活空間や自然環境下に広まりつつあり、脚の着地点を自由に選べるという特徴は他の移動手法に比べて、より人間の生活空間に適応できる移動ロボットの特徴といえる。ここで、以下に、これまでの脚移動ロボットの種類と、その現状について述べる。

脚移動ロボットは 2 脚、4 脚、6 脚のロボットの研究などが盛んに行われてきた。2 脚ロボットについては、本質的に動的な安定性を確保する必要があり、制御が難しいという問題点がある。現在では HONDA の ASIMO や SONY の SDR-3X などいくつかの 2 脚ロボットが世に出ている。

次に 6 脚の歩行ロボットであるが、6 脚歩行ロボットは静的安定な状態を作りやすく、状況に応じて様々な歩容を選択でき安定性や歩行速度において有利であるが、ロボットが大型化する問題が生じる。1970～80 年代にかけてこのような多足歩行ロボットの研究が盛んに行われており、1977 年の McGhee らによって開発された The OSU Hexapod や 1976～79 にかけて小松製作所によって 8 脚移動ロボットの ReCUS などが開発された。また、1980 年代以後には Waldron の ASV や Whitaker による Ambler、Halme の MECANT などが開発されている。しかし、この三つのロボットはどれも 1,000kg 超える重量を持つ大型のものであった。その後、1980 年代後半からは、Brooks によって提唱されたサブサンクション・アーキテクチャを実現するための小型脚移動ロボットが数多く作られるようになっている。

最後に本研究でとりあげる 4 脚歩行ロボットについてであるが、4 脚による歩行は、静的な安定性を保って歩行できる最低脚数であり、静歩行を行うロボットとしては、機構上は 6 脚より有利である。この 4 脚歩行ロボットに関する研究の歴史は古く、1870 年代には、すでに Muybridge による連続写真を使った馬の歩容解析が行われ、1960 年代に入り、Mosher の Walking Truck や McGhee による Phony Pony などが開発された。日本国内でも、1979 に広瀬らによって PV⁽¹⁾ が開発された。他にも、滝田⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ や内田⁽⁵⁾⁽⁶⁾ らによって四足

歩行ロボットが開発され、その他研究機関でも多くロボットが開発される。多足歩行ロボットの分野において、外国では6脚以上の歩行ロボットが主流となる中、日本ではこの四脚歩行ロボットが主流となったといえる。その後、広瀬らの研究が進み、TITAN、NINJA⁽⁷⁾、ローラーウォーカー⁽⁸⁾などの四足歩行ロボットが開発され、加えてTITANシリーズの8号機TITAN⁽⁹⁾の開発により、各研究機関に向けた汎用ロボットとしてTITANが広まり、各大学等でより四足歩行ロボットを使用した研究が行われるようになった。また、新しい四足歩行ロボットの研究開発も行われ、木村らによるTekkenやPatrushなどの神経振動子を使った歩行生成機構⁽¹⁰⁾を要するロボットが開発され注目され、近年ではAIBOなどのペット型ロボットが一部実用化されている。

多足歩行ロボットの研究において、4脚、及び6脚の歩行ロボットの研究は、当初乗り物としての研究開発が主であった。しかし、現在では、2脚ロボットを含め、無人作業用ロボットや、ペット型ロボットなどのように、自立しての作業支援、人間生活空間内での稼働を目的としたロボット研究に移行してきている。

1.2 四足歩行ロボットの従来研究

四足歩行ロボットはその機構から、不整地に適応した歩行が可能であるなど他の移動ロボットにはないメリットをいくつか持つが、いまだアミューズメントロボット以外に実用化された例はほとんどない。しかしながら、多数の研究成果があり、ここでは、それについて制御システムの分類に従って論ずる。

歩行の制御を行うには、3つの階層に分類する事が望ましい⁽¹¹⁾とされている。まず、3つのうち、最上位の制御系は、ナビゲーションに相当する部分で、人間によるオペレーション等がこれにあたる。この部分にカメラ等を使用した研究⁽¹²⁾⁽¹³⁾がいくつかなされている。この系では、センサ情報からの経路計画を行う事が主な機能であり、JROB-1を使用した五十嵐⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾らの研究が多く、三次元経路計画から、それに追従した歩容を作成する成果が報告されている。

次の階層に来るのが知能的歩容制御系と呼ばれる系である。この系は上位の階層において実際に計画された経路から実際に歩行を生成する。この系においても五十嵐らのいくつかの研究がなされており、軌道追従型歩容⁽¹⁴⁾などが提案され、その他独自の安定判別方法⁽¹⁶⁾などが提案されている。また、この部分の歩行制御系の研究にZMPについての研究がある。ZMPの測定は非常に困難であり、実際にはZMPを推定し、歩行制御を行うロボットが多い。現在はこの推定ZMPと実際の外乱を考慮したフィードバックによるZMP規範型の歩行制御の研究が進んでいる。また、この系の中で議論される知的的歩容に関しては、Free Gaitによる歩行などいくつかの成果がある。しかし、これも未解決の部分が多く、加えて、上位ナビゲーション機能とのリンクも未解決の多くの問題を抱えている。四足歩行ロボットの従来研究はほとんどこの系での研究であり、歩容や歩行の生成方法⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾、及び各種センサ、による情報を使用した、歩行の生成や階段昇降などについての多

くの研究⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾がなされている。また、歩行ロボットの最大の特徴である不整地歩行に関する研究⁽³⁰⁾⁽³¹⁾もこの系の研究が多い。

最後の系は人間で言う脳幹にあたる部分で、反射的運動調整機能の役割を担う。従来研究でも、反射神経的反応などを利用した歩行についての研究⁽³²⁾も行われている。その他、歩行以外の四足歩行ロボットの研究としては、足機構のうち遊脚可能な脚をマニピレータとして使用するリムメカニズム⁽³³⁾⁽³⁴⁾や、踏ん張り動作⁽³⁵⁾などがあるが、その数は少ない。

以上のように、今までの四足歩行ロボットの研究では軌道計画からの歩行生成など、歩行に重点を置いた研究と、その経路、軌道計画の方法などが主であり、その他の研究があまり行われていないのが現状である。

1.3 研究内容

本研究では、目的を、現在の歩行ロボット研究の流れ同様、自立して移動するロボットの制御手法とし、人間の生活空間内で移動する四足歩行ロボットを想定した制御を二つ提案する。

まず、一つ目は、人や障害物への接触に柔軟に対応する方法として、ロボット重心位置の位置指令型インピーダンス制御を提案する。この制御は四足歩行ロボットが将来人間を介助したり、誘導したりする場合、人間と共に移動する事が考えられる。そのような場合に、まず、Fig.1.1 に示すような、本体重心位置に力センサを取り付けたフロート状の機構などを用いることによって、接触、衝突時にかかる力を計測する。その後、その力に対応した重心移動量を位置指令型インピーダンス制御式によって生成し、ロボットの重心位置を安定余裕 (Stability margin)⁽³⁶⁾ 内で制御する事で衝突、接触に対して柔軟な制御を行うものである。

次に提案する二つ目の制御は、位置指令型インピーダンス制御式による重心移動量を仮想的に生成し、その変化量に応じて軌道変更を行う制御を提案する。この制御は、将来、一つ目に提案した制御とリンクさせる事で、衝突回避アルゴリズムへの応用を考えたものである。また、この制御は Fig.1.1 に示すように、力センサを人間とのインターフェイスとして使用し、四足歩行ロボットの操縦にも使用可能であると考えられる。

この提案した二つの制御について、数値シミュレーションによって指令値の生成が可能である事を示す。

1.4 本論文の構成

第2章では準備として、四足歩行ロボットの ZMP 規範型の制御方法について、その基本的な歩行の生成方法と原理、動歩行や静歩行、歩容の種類、安定判別方法について論ずる。次に第3章ではシミュレーションで使用する、TITAN をモデルにした歩行ロボットモデルについて論ずる。第4章ではシミュレーションでの歩行について論ずる。第5章では位

置指令型インピーダンス制御について述べる．第 6 章においては，本研究で行ったシミュレーションプログラムについて述べる．第 7 章では提案する二つの制御方法について，具体的な指令値の生成について述べる．第 8 章ではシミュレーションの結果を示し，第 9 章でその考察を行い，今後の課題等を示す．最後に，第 10 章で，本研究による知見を示す．

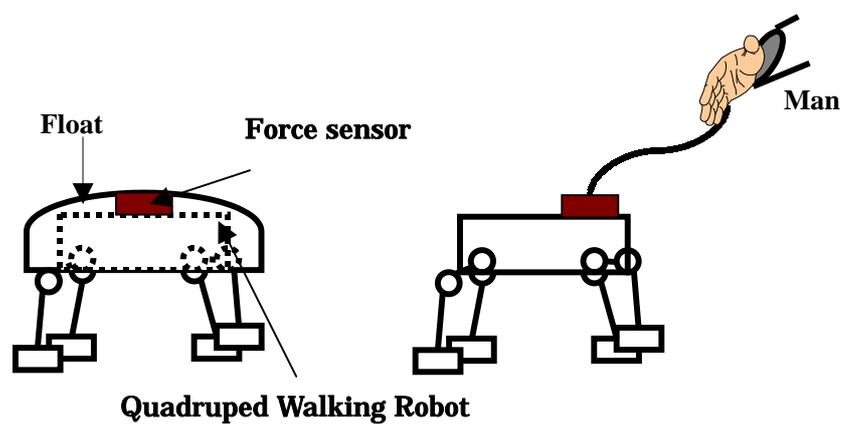


Fig.1.1 Quadruped Walking Robot image

2. 準備

本章では，四足歩行ロボットの研究の準備として，四足歩行ロボットの基礎的な制御の理論を紹介する．2.1 では四足歩行ロボットの二つの制御方法を紹介する．2.2 では本研究で使用される ZMP 規範型での静歩行と動歩行の仕組みについて述べる．2.3 で，歩行サイクルとデューティー比について説明する．2.4 では歩行を決定する重要な要素である歩容について述べる．2.5 では ZMP 規範型の制御の安定判別法について述べる．

2.1 二つの制御方法

現在研究されている四足歩行ロボットの制御方法には大きく分けて二つのタイプが存在する．一つは支持脚点を基点とした倒立振り子モデルに基づき，軌道計画・制御を行う倒立振り子モデル規範型⁽³⁷⁾．もう一つが Zero Moment Point(ZMP)もしくは重心を着地脚が作る多角形(支持脚多角形)上に常におく軌道計画・制御を行う ZMP 規範型⁽³⁷⁾である．Fig.2.1 にその二つの制御のイメージを示す．左側が倒立振り子モデル規範型の制御方法，右側が ZMP 規範型の制御方法である．

倒立振り子モデル規範型のロボットは常に重力により倒れようとしているので非常に不安定で，動的制御が必要であり，その制御も難しい．つまり，倒立振り子モデル規範型のロボットは，倒立振り子のモデルによって歩行するため，歩行以外の動作に向いていない．

一方，ZMP 規範型の制御は倒立振り子モデル規範型のロボットよりも動的制御が難しくなり，歩行速度も遅くなるが，高速の歩行以外の動作には向いており，静的安定な状態を維持しやすく，重心位置の推定が容易である．従って，歩行以外の目的を持った歩行ロボットへの汎用性に優れている．

本研究では以上の事を考慮し，歩行以外の動作に優れた ZMP 規範型のロボットを用いて力センサを用いた二つの制御を提案する．

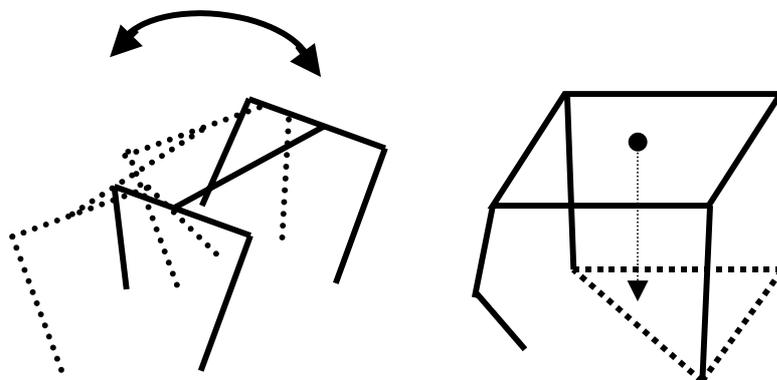


Fig.2.1 Control image of ZMP type and Pendulum type

2.2 動歩行と静歩行

歩行ロボットには、動歩行⁽³⁸⁾と静歩行⁽³⁸⁾存在する。一般に動歩行は制御が難しく、歩行速度は速い。また、静歩行は制御が容易であるが、歩行速度は遅くなる。

まず、静歩行であるが、ZMP 規範型の四足歩行ロボットの静歩行は、接地脚が歩行路面上に作る支持脚多角形の中に重心を常に保つ事によって歩行が行われる。歩行移動ロボットの歩行には通常、Fig.2.2 に示すように、接地脚が二脚である二脚支持期と、接地脚が三脚の三脚支持期が存在し、静歩行は、常に三本の脚が接地しており二脚支持期が存在しない。従って、動的制御を必要としないので、軌道の計画や制御が非常に簡単になるという利点がある。

逆に動歩行は、支持脚多角形の中に重心を保つ事なく歩行が行われるため、歩行中に二脚支持期が現れる。歩行速度は静歩行に比べて速くなるが、二脚支持期に本体が非常に不安定になるという欠点を持っており、その二脚支持期に動的制御が必要となる。

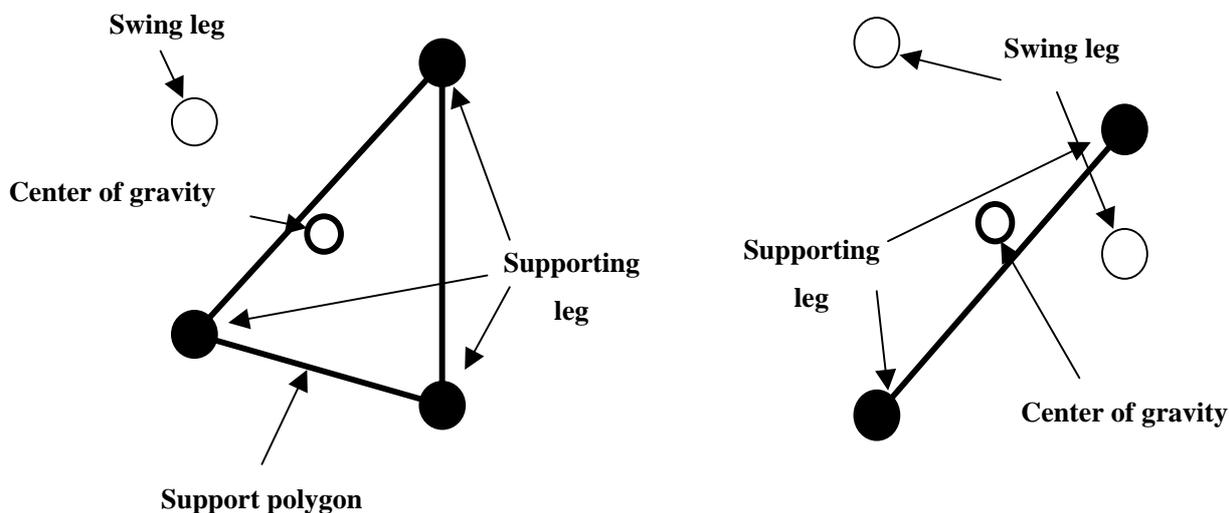


Fig.2.2 Support polygon

2.3 歩行サイクルとデューティー比

次に、歩行の特徴を示す値にデューティー比について示す。四足歩行ロボットの場合、デューティー比は、ある一つの脚に着目した場合の歩行サイクル内での脚の接地率を指し、その歩行が動歩行であるか、静歩行であるのかを判断する一つの指標となる。まず、歩行サイクルとは、歩行中の脚移動の1周期分を指し、Fig.2.3 に示すように、二つの期間、脚を接地した立脚相、脚を遊脚にした遊脚相に分かれる。デューティー比はこの二つの相から算出される。

T : 歩行1サイクルの周期, T_g : 脚の接地時間, とした場合,

$$\beta = \frac{T_g}{T} \dots (1)$$

で計算され、この値が 0.75 下回る時、つまり、この値が 3/4 以下になった場合は、歩行中、四つある脚のうち二つの脚が遊脚になる期間、つまり二脚支持期が存在するという事である。

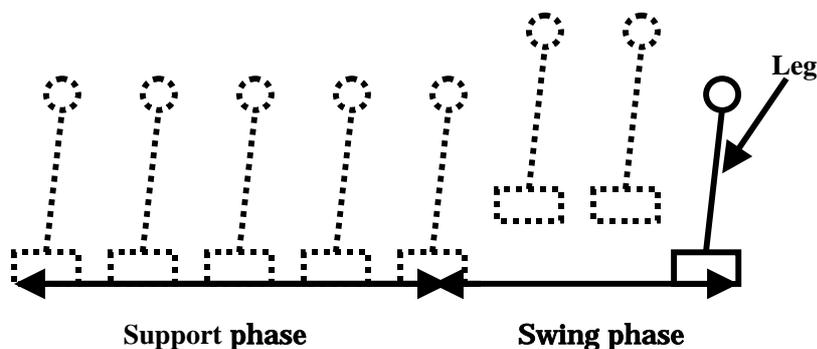


Fig2.3 Walk cycle

2.4 歩容の種類

次に歩容の種類について論ずる。この歩容という言葉自体に明確な定義はなく、扱われる論文によって若干意味が違う場合があるが、ほとんどの場合、歩容とは脚の復帰順序やそのタイミングなどを指す言葉である。四足歩行ロボットの研究では、四足獣による歩行を元に作られた歩容を基礎に、多くの歩容が提案されており、ZMP 規範型における歩行制御では、この歩容とデューティー比によって歩行のほとんどが決定される。以下にその代表的な歩容の種類とその特徴をまとめる。

クローラ歩容

まず、クローラ歩容は、最もゆっくりとした歩行のパターンで、常に 3 本の脚で本体を支持するので、常に本体が静的安定を保つ歩容である。特徴としては、

- 歩行中、常に 3 脚以上が接地している。
- 4 脚の接地率が等しい正規歩容である。
- 左右の脚の運動が対称な対称歩容である。
- 静歩行の中では、縦安定余裕が最大である。

などがあり、ZMP 規範型制御方法の基本となる歩容パターンであり、四足移動歩行ロボットの歩行パターンでは最も広く使用されている。

トロット歩容

次に、トロット歩容であるが、この歩容は四足獣などが中速度の歩行時に行う歩容である。特徴は、

正規対称歩容である。

対角にある二つの脚が対になって運動する。

という特徴がある。トロット歩容には二脚だけで体を支える二脚支持期が存在し、静力学的に不安定であるが、転倒の方向にある脚が次の支持脚となるために接地をするので、完全に転倒する前に脚が接地し、歩行が可能となる。従って、重心の詳細な制御をしなくても、この歩容を導入することで、四足歩行の動歩行が可能になる。

ペース歩容

三番目にペース歩容について説明する。トロット同様、中速度の歩行時に行われる歩容に分類され、特徴として

正規対象歩容である。

前後の2脚が対になって運動する。

などがあり、この歩容で歩行を行うには、動的安定化制御が必要不可欠である。そのため、ZMP規範型の制御にはあまり使用されず、倒立振り子モデル規範型に多く使用されている。

バウンス歩容

最後にバウンス歩容であるが、バウンス歩容は4脚すべてが遊脚となる期間が存在し、動力学的な姿勢制御が必要である。この歩容は「歩行」というよりも「走行」と言ったほうが良い。

以上4つ以外にもたくさんの歩容が提案されている。本研究では、静的安定を常に大きく保ち、動的制御を必要としないクロール歩容を改良した間歇クロール⁽²¹⁾、及び、軌道変更には、同じくクロール歩容を变形した側行歩容⁽¹¹⁾を使用する。両者とも基本的な脚の運び等はクロール歩容と同じであり、クロール歩容との整合性が非常に良い歩容である。

Table.1 classification of Gait

Duty factor	Supporting leg	Leg phase (Right and Left)	Leg phase (Front and Rear)	Gait	Velocity of walk
0.75	3 or 4	0.5	1-	Crawl	Slow
0.5	2		0	Pace	
		0	0.5	Bounce	Quick

2.5 安定判別

次に、歩行ロボットの制御を行うにあたり、その転倒安定性の評価基準である安定判別方法を示す。この安定判別の方法としては、安定余裕、転倒安定余裕、傾斜度安定余裕、Tipover Stability Margin、Energy Stability Margin、Dynamic Energy Stability Margin、NE 安定余裕⁽¹⁴⁾⁽⁴⁰⁾、RSM 安定余裕⁽¹⁶⁾などが提案されている。本研究ではこの中で、最も基本的な安定判別方法である安定余裕による判別方法を評価基準とした。

安定余裕とは、歩行機械が水平で平坦な地表面を歩行したときに、歩行機械の重心から地表面へ下ろした垂線の足を重心投影点とし、その重心投影点から支持脚多角形への境界線への距離の最小値である。この安定余裕が 0 以下になってしまうと転倒が生じる。つまり、重心投影点が支持脚多角形の外に出ると転倒が生じる。

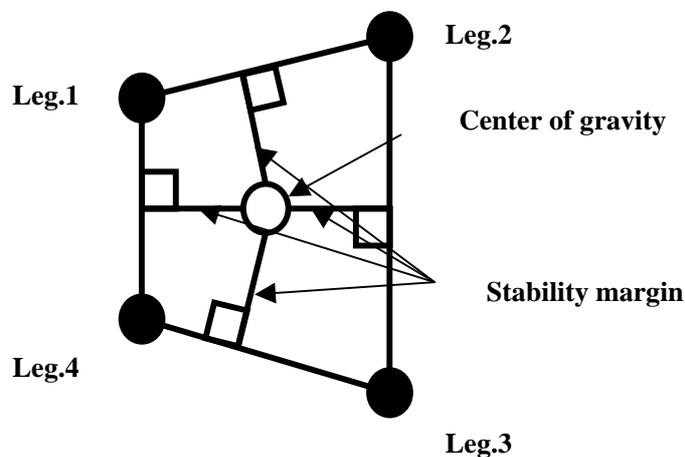


Fig.2.3 Stability margin

3. 歩行ロボットモデル

本章では、本研究のシミュレーションで使用する 4 足歩行ロボットのモデルについて述べる。本研究で使用する四足歩行ロボットのモデルは、今後実機による実験を行う場合を考慮し、広瀬らによって開発された TITAN を元に各リンク長や座標系を設定した。3.1 でロボットの全体構成と座標系について述べる。3.2 ではロボットの脚機構について述べ、3.3 で脚先位置から各関節角度を導く逆運動学、3.4 で脚機構の可動範囲について述べる。

3.1 モデルの全体構成と座標系

この四足歩行ロボットモデルの座標系は Fig.3.1 に示すとおり、ロボットの進行方向を Y 方向、進行方向に対して垂直な方向を X 方向とし、ロボットの高さ方向を Z とするグローバル座標系を持つ。また、ロボットは 3 自由度の脚を四本持ち、各脚を進行方向に対して横方向に張り出した歩行姿勢を基準歩行姿勢として歩行する。本体重心位置と脚の位置は次のような関係にあり、それぞれの脚にローカル座標系の原点を持つ。Leg.1 は本体重心位置から X 方向に - 100 mm, Y 方向に + 200 mm の位置に脚座標系の原点がある。Leg.2 は本体重心位置から X 方向に + 100 mm, Y 方向に + 200 mm の位置に脚座標系の原点がある。Leg.3 は本体重心位置から X 方向に + 100 mm, Y 方向に - 200 mm の位置に脚座標系の原点がある。Leg.4 は本体重心位置から X 方向に - 100 mm, Y 方向に - 200 mm の位置に脚座標系の原点がある。

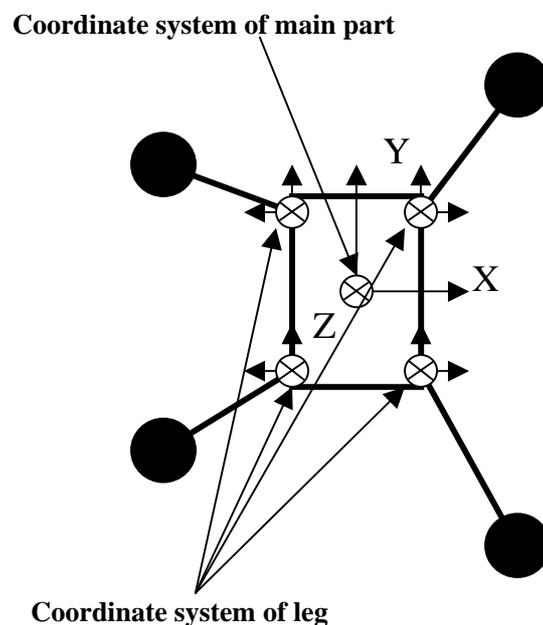


Fig.3.1 Coordinate system

3.2 脚機構

脚の機構は，TITAN の脚機構を基にモデルを構築した．各脚の構造はすべて同じで， $l_1 = 45 \text{ mm}$ ， $l_2 = 155 \text{ mm}$ ， $l_3 = 243 \text{ mm}$ のリンクを持つ．そして，この脚機構の自由度は，平面二自由度機構と，それ全体を回転させる機構の合計三自由度によって構成されている．

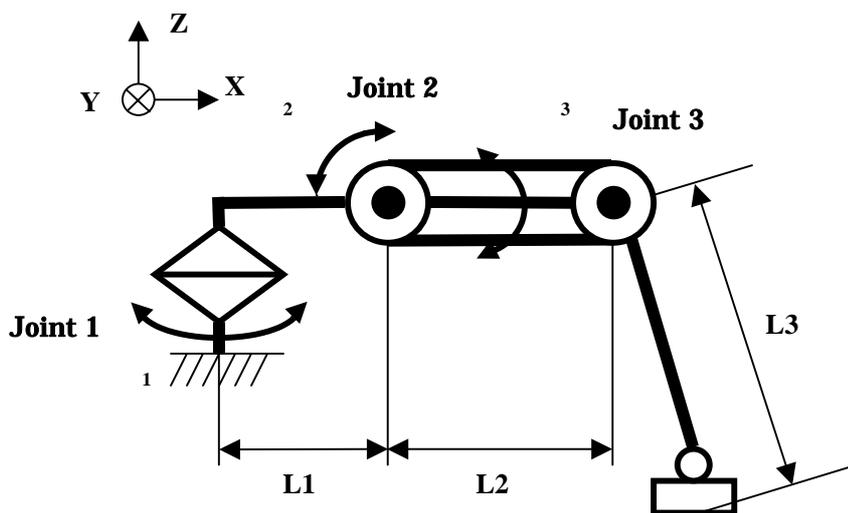


Fig.3.2 Simplified leg mechanism

3.3 逆運動学

次に逆運動学について述べる．このロボットはそれぞれの足機構が持つ三つの Joint に対し，角度指令値を与えて制御する．まず，与えられた軌道計画により，歩容を考慮してそれぞれの脚先位置を決定する．その後，逆運動学を使用して指令角度を導かなければならない．まず，その逆運動学を解くために，脚のローカル座標系の原点から脚先位置への順運動学を示すと

$$X = \cos \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3) \dots (2)$$

$$Y = \sin \theta_1 (l_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3) \dots (3)$$

$$Z = l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 \dots (4)$$

の式が導出される．次にこの運動学の式を使って，逆運動学を解くと

$$\theta_1 = \arctan \frac{Y}{X} \dots (5)$$

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{Z}{\frac{X}{\cos \theta_1} - l_1} \right) \pm \arccos \left(\frac{l_2^2 - l_3^2 + \left(\frac{X}{\cos \theta_1} - l_1 \right)^2 + Z^2}{2l_2 \sqrt{\left(\frac{X}{\cos \theta_1} - l_1 \right)^2 + Z^2}} \right) \dots (6)$$

$$\theta_3 = \theta_2 \pm \left(\pi + \arccos \left(\frac{l_2^2 - l_3^2 + \left(\frac{X}{\cos \theta_1} - l_1 \right)^2 + Z^2}{2l_2 l_3} \right) \right) \dots (7)$$

となる。

3.4 可動角度範囲

脚機構の各関節は、それぞれ、Fig.3.3のような可動範囲を持っている。この稼動範囲についても、TITAN と全く同じである。

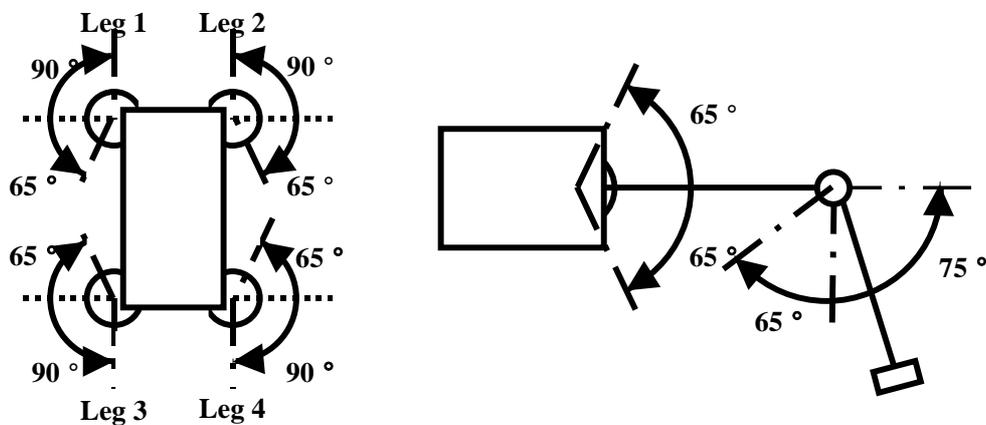


Fig.3.3 Movable angle

4. 歩行

本章では、シミュレーションで使用する基本的な歩行について述べる。4.1 で選択する間歇クローラ歩容について述べる。4.2 ではその間歇クローラ歩容によって決定された歩行シーケンスについて述べる。4.3 で歩行パラメータと遊脚相の脚の制御について述べる。最後に4.4 で歩行中の安定余裕の算出について述べる。

4.1 間歇クローラ歩容について

まず、本研究で使用する歩容は間歇クローラ歩容である。この歩容はクローラ歩容を改良して、安定性を常時高く保つように設計された歩容である。間歇クローラ歩容には次のような特徴がある。

同じ側の脚の位置は、その脚の座標系で等しい。

左右の脚の位置は、その脚の座標系で半ストロークずれている。

脚の復帰動作は、まず後脚が行い引き続いて同側の前脚が行う。

以上の特徴により、四足歩行ロボットの脚の初期位置、歩行シーケンスが決定される。

4.2 歩行シーケンス

4.1 で述べた間歇クローラ歩容に基づき、歩行のシーケンスが決定される。シーケンスはまず、右後脚 (Leg.4) が復帰を行い、続いて右前脚 (Leg.1) が復帰する。その後、重心移動を行った後、左後脚 (Leg.3)、左前脚 (Leg.2) と復帰させ、再び重心移動を行う。このシーケンスを繰り返す事で四足歩行ロボットは前進を行う。後進の場合は、このシーケンスを全く逆に行う事で実現する。

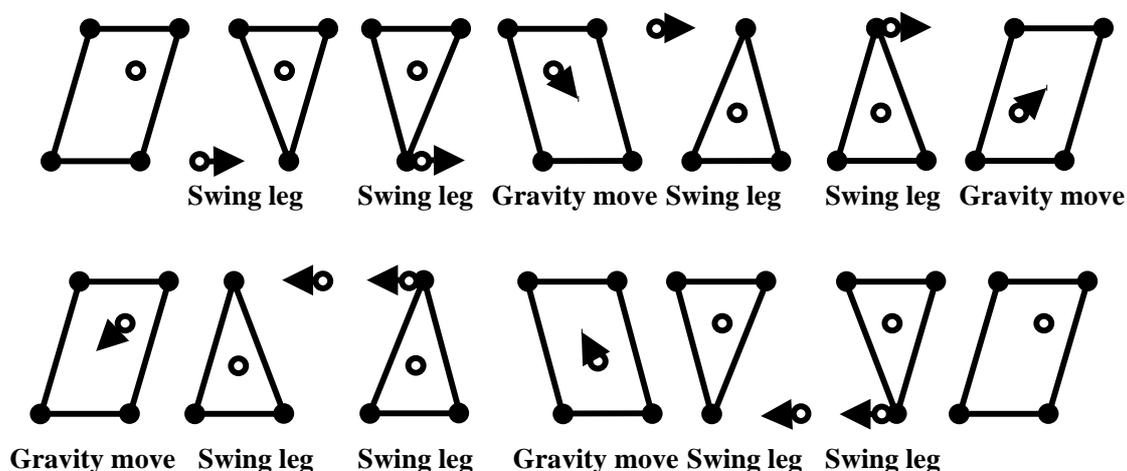


Fig.4.1 Walk sequence

4.3 軌道の決定

本研究では、二つの提案した制御を、四足歩行ロボットが平地を直進移動している場合についてシミュレーションする。このときの本体重心の軌道は、速度 0.0167m/s まっすぐ Y 方向に進むように計画し、歩行ロボットはこの軌道計画に基づき、それぞれの脚が歩容によって決められた歩行シーケンスによって、遊脚を繰り返す事で歩行を行うように設計した。この時、歩行中の脚の接地率であるディューティ比 β は 0.83 とし、脚のストロークは 100mm である。

4.4 立脚相の脚の制御

歩行サイクル内の脚接地相である立脚相では、本体重心の移動量とは逆の方向に重心移動のストロークだけ脚先を移動させる制御をする事が必要である。つまり、今回の場合、間歇クロール歩容によって決定した歩行シーケンスにより、その重心移動期間において、脚先を重心とは逆の方向へ移動させる。

4.5 遊脚相の脚の制御

遊脚相の制御について述べる。遊脚相にはさらに、脚を持ち上げるセクション(Lifting)、脚を前に移動させるセクション、脚を接地させるセクション(Placing)に分かれる。今回のシミュレーションでは、この遊脚相の脚の動きを次のように設定する。まず、各脚の座標系で Z 方向へ 100mm 脚を上げ、その動作の完了後に Y 方向へ脚を 100mm 移動させ、その後再び Z 方向に 100mm 脚を下げる。その時、Lifting と Placing にかかる時間 $T1 = T3 = 0.25\text{msec}$ 、 $T2 = 50\text{msec}$ となる。

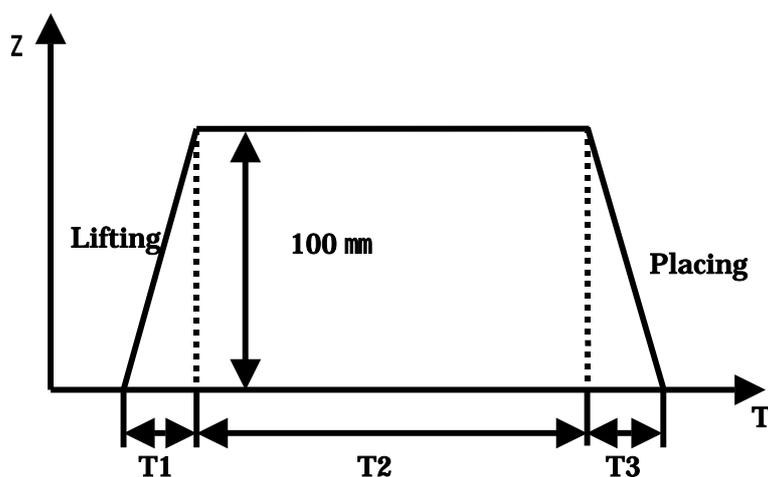


Fig.4.2 swing phase

5 . 位置指令型インピーダンス制御

本章では，四足歩行ロボットの重心位置を位置指令型インピーダンス制御について論ずる．5.1で位置指令型インピーダンス制御について述べ，5.2でその制御式を導く．5.3では位置指令型インピーダンス制御による重心位置移動と安定余裕の関係について述べる．5.4では，位置指令型インピーダンス制御の利点について述べる．

5 . 1 位置指令型インピーダンス制御とは

本研究で使用する四足歩行ロボットのモデルは位置指令による命令によって制御される．従って，位置指令はこの位置指令型インピーダンス制御の式を使用した．この位置指令型インピーダンス制御は，もともとオープンアーキテクチャ型の産業用ロボットに容易に適用可能なインピーダンスモデル追従型制御法として提案された制御法で，実際にバネやダンパ機構を取り付けなくても，機械インピーダンスをソフトウェアで変化させることで，仮想的に柔軟な機械の制御が可能となる力制御である．四足歩行ロボットの本体重心位置に仮想的なバネ，ダンパ，質量を想定し運動方程式をたて，力から変位への変換を，慣性質量，粘性摩擦係数，剛性の三つのパラメータによって計算する．

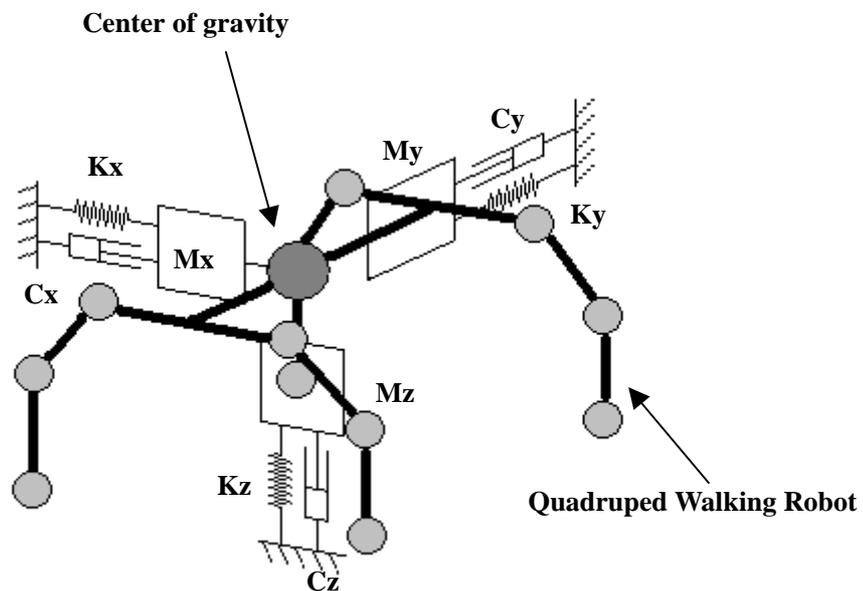


Fig.5.1 Virtual mechanical impedance

5.2 制御式

次に，位置指令型インピーダンス制御の制御式を導出する．まず，運動方程式は，

$$F = M \ddot{P}g_n + C \dot{P}g_n + K(Pg_n - Pg_0) \dots (8)$$

となり，ここで， F_n ：重心にかかる力， $\ddot{P}g_n$ ：重心の加速度， $\dot{P}g_n$ ：重心の速度， Pg_0 ：重心の初期位置 Pg_n ：重心位置， M ：仮想慣性質量， C ：仮想粘性摩擦定数， K ：仮想剛性定数である．

次に式を離散値系で表すために

$$\ddot{P}g_n = \frac{\dot{P}g_n - \dot{P}g_{n-1}}{dt} \dots (9)$$

$$\dot{P}g_n = \frac{Pg_n - Pg_{n-1}}{dt} \dots (10)$$

とする。 dt ：サンプリング時間， $\dot{P}g_{n-1}$ ：1 サイクル前の速度， Pg_n ：現在の速度である。

式(8)に式(9),(10)代入すると

$$F_{n-1} = m \frac{\dot{P}g_n - \dot{P}g_{n-1}}{dt} + C \frac{Pg_n - Pg_{n-1}}{dt} + K(Pg_n - Pg_0) \dots (11)$$

となり，さらに

$$\dot{P}g_{n-1} = \frac{Pg_{n-1} - Pg_{n-2}}{dt} \dots (12)$$

とする． Pg_{n-2} ：1 サイクル前の位置である．この式(12)を式(11)に代入して式を変形すると現在位置が次のような離散系の式で表される．

$$P_{g_n} = \frac{F_{n-1} + \frac{M}{dt^2}(2P_{g_{n-1}} - P_{g_{n-2}}) + C \frac{P_{g_{n-1}}}{dt} + KP_{g_0}}{\frac{M}{dt^2} + \frac{C}{dt} + K} \dots (13)$$

ここで、制御目標位置 P_{g_n} が求まり、この目標位置を使って重心位置の変化量を

$$\Delta P_{g_n} = P_{g_n} - P_{g_{n-1}} \dots (14)$$

と求める事ができる。

この ΔP_{g_n} を歩行のための脚先制御量 P_{f_i} に付加し、位置制御系に入力してロボットを制御する制御量 P_i を生成する。

Fig.5.2 では、TITAN を使用した場合の制御系をブロック線図で示す。Position Based Impedance Control 内は、上記の制御式のようなモデルを独自に持っており、そのモデルに基づき、Robot (シミュレーションの場合力センサ) から得た力によって、 ΔP_{g_n} を生成する。その後、Robot の位置制御系に指令値を入力して制御が行われる。TITAN は Titech Robot Driver によって位置制御が行われている。

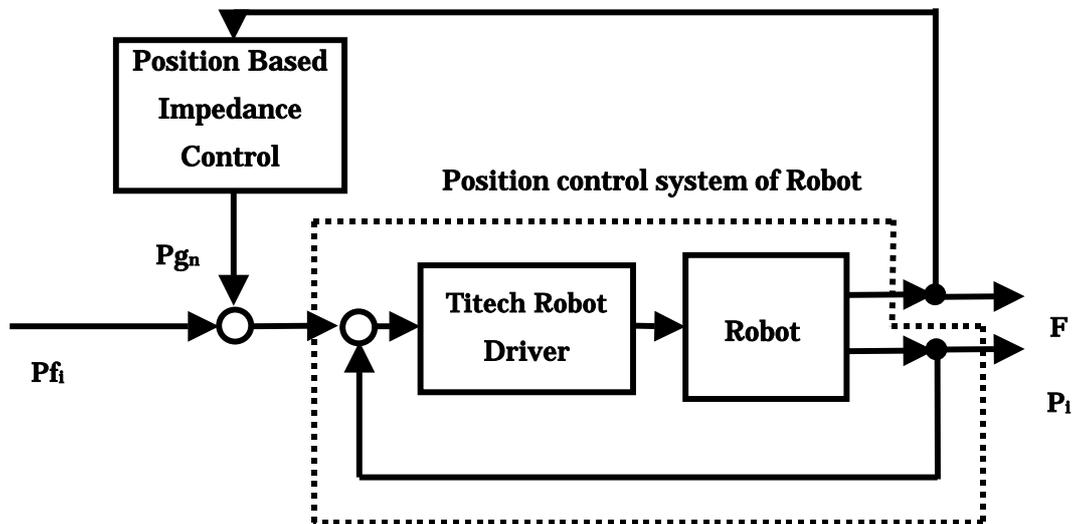


Fig.5.2 System of Quadruped Walking Robot

5.3 安定余裕と重心移動量の関係

提案する位置指令型インピーダンス制御による本体重心位置の柔軟な制御は、その重心の移動可能領域を、四足歩行ロボットの支持脚多角形内とする。これは、2.5で述べた、“重心投影点が支持脚多角形内にある時には四足歩行ロボットは静的安定を保っている”という理論に基づいている。ここで問題になるのは、歩行中には四脚支持期と三脚支持期が存在し、その内、三脚支持期では安定余裕が非常に小さい事である。その部分では、重心の移動可能な領域が非常に狭くなってしまう。また、重心移動可能領域は、理論上、安定余裕内なら自由に動く事が可能であるが、本研究の使用した TITAN では、脚機構の移動可能領域の都合上、安定余裕を全て使用する事は出来ない。

5.4 位置指令型インピーダンス制御の利点

この位置指令型インピーダンス制御の利点は、制御対象であるロボットが持つインピーダンス特性に関係なく、仮想インピーダンスによって位置変化量が生成される所にある。つまり、ロボット本体の機械的インピーダンスをソフトウェアで変化させる事が可能である。しかし、その変化させるインピーダンスによって、ロボット全体のインピーダンス特性が変化するわけではないので、同じく力制御に使用されるトルクベースの制御に比べると、その点が有利だと言える。例えば、力センサから入力される力のみに対して、柔軟な動作を行う事ができ、それ以外の動作に関しては、通常のインピーダンス特性で制御が行われ、歩行ロボットの歩行事態には、そのインピーダンスの変化が影響しない。この特性を利用して、仮想慣性質量をロボット本体よりも小さく設定しておけば、実際に発生する衝突時の衝撃力を小さくする事が可能であると同時に、歩行自体も通常どおり可能である。

6. シミュレーションプログラム

次に，力センサによって得た力の情報から，制御システムがどのような重心移動の指令値が出るかをシミュレートするプログラムを作成した．本章では，まず 6.1 で制御の流れを示し，6.2 でシミュレーションシステムを示す．次に 6.3 で安定余裕の計算について述べ，6.4 で制御パラメータを示す．

6.1 制御の流れ

本研究で使用する制御フローは，四足歩行ロボットが直進している状況のみを考え，歩行路面も平面として制御フローを構築する．制御システムは設定された重心の軌道から，歩行シーケンスにそった脚の遊脚を考慮しつつ，脚先位置の目標値を生成する．

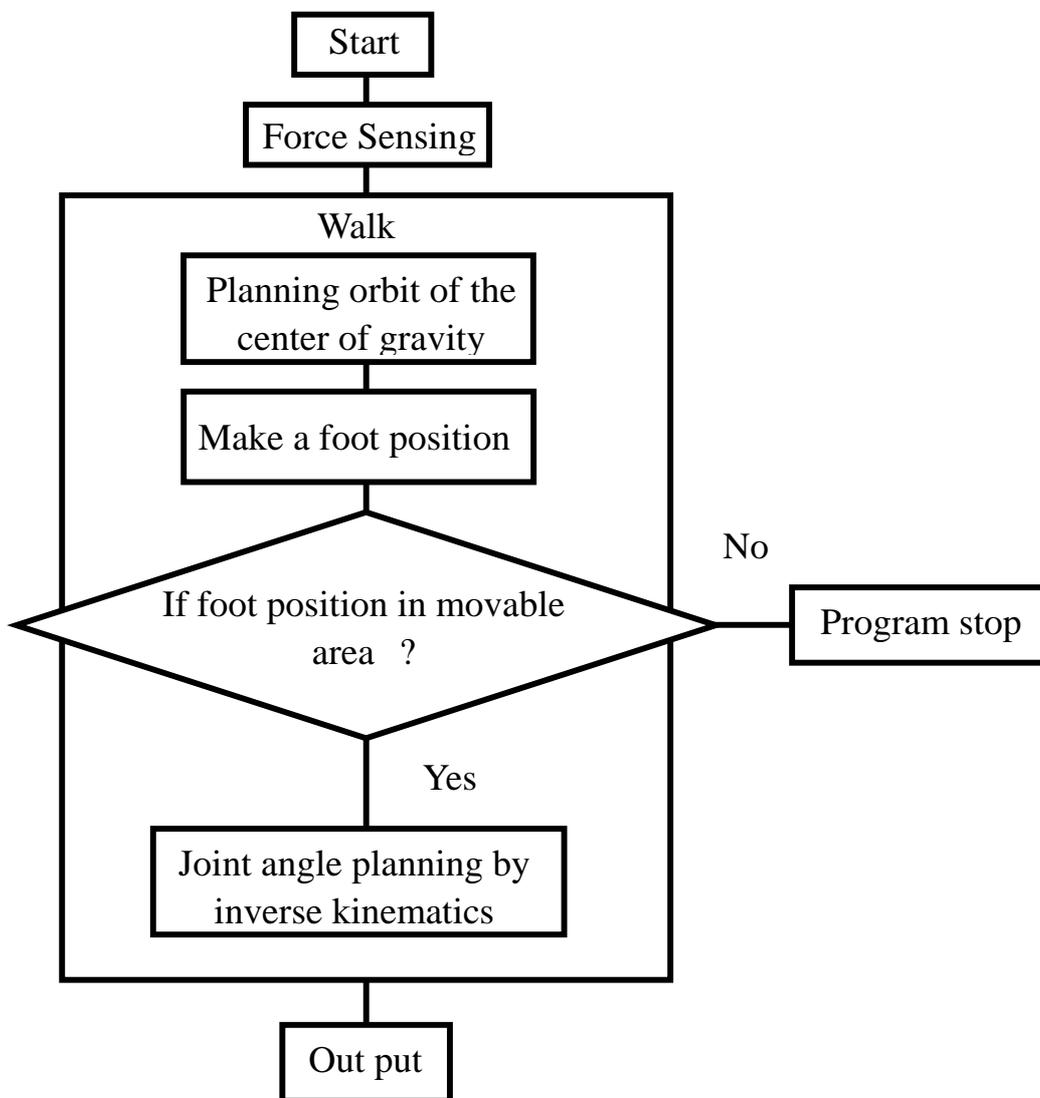


Fig.6.1 Control flow

6.2 カセンサからの情報の取得

シミュレーションで使用する本体重心位置にかかる力は、ニッタ IFS-67M25A 50-I40 センサを使用し、専用のレシーバーボードを通して、シミュレーションを行う PC に取り込まれる。加える力は人間の手で押した程度し、センサを直に手で押して入力した。また Table.2 にそのカセンサの仕様を示す。

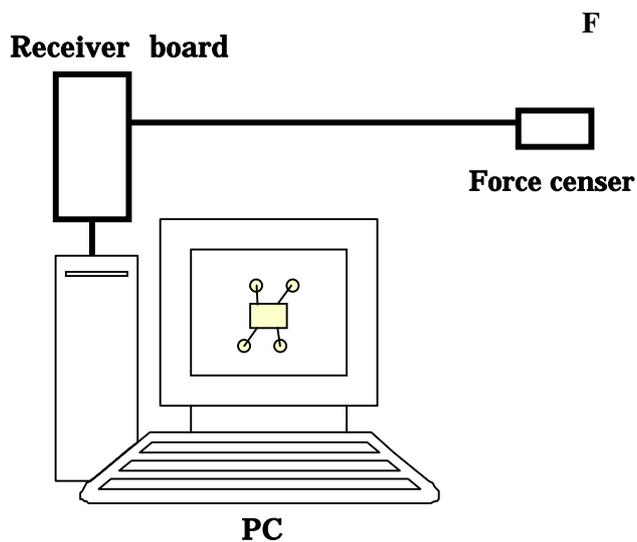


Fig.6.2 Simulation system

Table.2 Specification of F/T Sensor

IFS-67M25A 50-I40 (NITTA)	
Measurement bounds of X and Y direction	200[N]
Measurement bounds of Z direction	400[N]
Measurement bounds of each axis moment	12.5[N · m]
Diameter	67[mm]
Height	25[mm]
Weight	180[g]
Data output cycle	8000[Hz]

6.3 安定余裕の計算

次に安定余裕の計算方法を示す。安定余裕とは、支持脚多角形の辺と、本体重心位置の距離の最小値である。従って、安定余裕の候補は支持脚多角形の辺の数と同じだけ存在する。つまり、四脚支持期には四つ、三脚支持期には三つである。この距離は、直線と原点の距離の公式から計算できる。

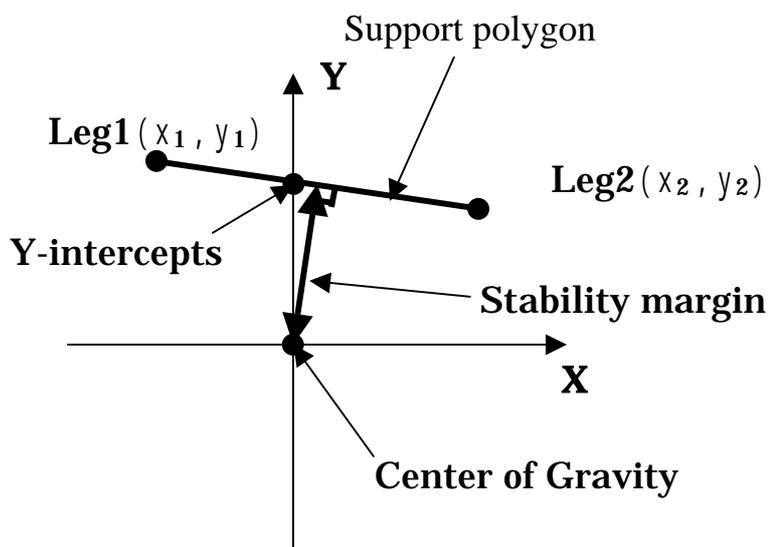


Fig.6.3 Relation between a support polygon and a stability margin

S : 安定余裕とし、直線

$$y = mx + n \dots (15)$$

と原点の距離を求める場合、点と直線と距離の公式から

$$S = \sqrt{\frac{n^2}{1+m^2}} \dots (16)$$

と支持脚多角形と重心位置の距離が計算できる。この時、

$$\text{直線の傾き} : m = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \dots (17)$$

$$\text{Y 切片} : n = y_1 + mx_1 \dots (18)$$

となる．

この S 値は絶対値であるため，この計算式のままだと，本体重心位置が支持脚多角形の外側にあるのか，内側にあるのか判断できない．そのため，直線の Y 切片， X 切片を参照する事で本体重心位置が支持脚多角形の外か，内かを判断し，安定余裕の候補を誘導した．このいくつかの候補のうち最小値が安定余裕である．

6.4 制御パラメータ

位置指令型インピーダンス制御を行うにあたり，その制御対象の柔軟さを決定するパラメータ M ， C ， K を決定する．このパラメータは， M ：慣性質量を 1kgf ， C ：粘性摩擦係数を 100NS/m ， K ：剛性は 100N/m とした．この数値は衝突，接触の対象やその大きさによって決定されなければならないが，本研究ではその値については考慮しない．なお，このソフトは，先に構築した制御フローと四足歩行ロボットモデルに基づき， C 言語で作成し， MS-DOS 上で動作するものである．

7. シミュレーション

本章では、本研究で提案する二つの制御方法について述べる。まず 7.1 において、一つ目の制御手法である位置指令型インピーダンス制御について、シミュレーション時の条件とその重心の移動可能領域である安定余裕の確保について述べる。次に、7.2 において、二つ目の提案である、位置指令型インピーダンス制御と側行歩容を用いた軌道変更の制御について述べる

7.1 安定余裕の確保

歩行中の安定余裕は、三脚支持期に小さくなる特徴を持つ。つまり、位置指令型インピーダンス制御による重心移動量を十分確保できなくなる。しかし、それは、安定余裕が大きい歩容を選択する事と、もう一つ、歩容の歩行中に重心に外部から力が加わった場合、即座に脚を接地し、四脚支持の状態を作るアルゴリズムを設定する事で解決される。これにより、脚接地までに時間がかかるものの、四脚支持状態を作る事で安定余裕を増大させ、インピーダンスによる重心移動量を多く確保する事ができる。

シミュレーションではこの位置指令型インピーダンス制御による重心の移動量を X 方向に ± 85 mm, Y 方向には ± 70 mm, Z 方向に ± 30 mm を上限とした。この重心移動量は四脚支持によって生成される安定余裕の大きさ、及び、脚機構の可動範囲によって決定した。

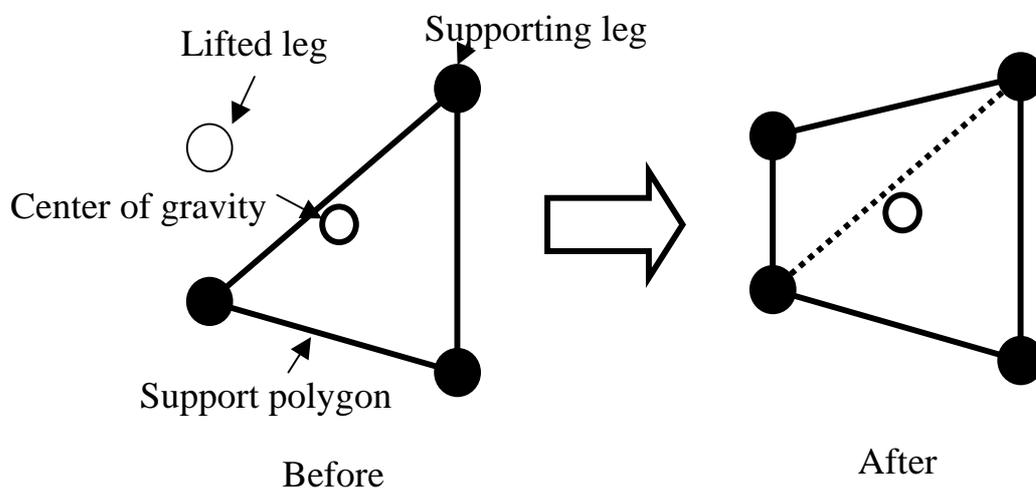


Fig.7.1 Change of Support polygon

7.2 側行歩容による軌道変更

次に，二つ目のシミュレーションについて説明する．このシミュレーションは重心位置ではなく，四足歩行ロボットの軌道自体を位置指令型インピーダンス制御によって変更するものである．この軌道の変更は側行歩容と間歇クローリング歩容の組み合わせによって行なわれる．側行歩容とは，間歇クローリング同様，クローリング歩容の変形であり，胴体方向と推進方向が一致しない歩容である．

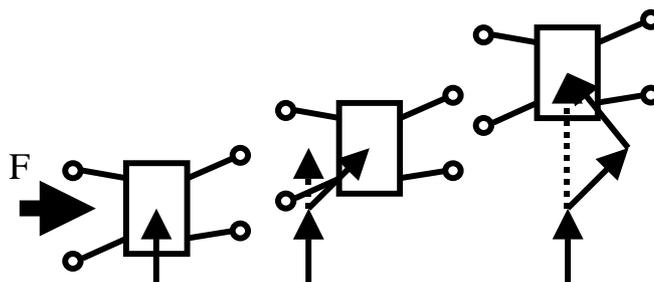


Fig.7.2 Orbit change at X direction

軌道の計算

制作した軌道変更のアルゴリズムは，歩行サイクル毎に，力センサからの情報によって算出された位置指令型インピーダンス制御による重心位置の変位について，その平均値を算出する．この時，位置指令型インピーダンスによる重心移動量は実際のロボットには影響がなく，仮想的に重心の移動量を計算するものである．次に，その値によって側行歩容を用いた軌道変更の軌道変化量を生成する．つまり，歩行サイクル内での，インピーダンスによる変位の平均値を計算し，指令値として，現在の位置と変位平均の差 ΔG_n を与える．インピーダンスによる変位の平均値： G_n は

$$G_n = \frac{\sum \Delta P g_n}{T} \dots (19)$$

とし，現在位置である $P g_n$ からの差を計算し

$$\Delta G_n = P g_n - G_n \dots (20)$$

を導出する．

遊脚相，立脚相における，それぞれの脚のストローク変化量を， $\Delta F l$ ：遊脚相， $\Delta F g$ ：立脚相とすると，遊脚相には，

$$\Delta Fl = \frac{-\Delta Gn}{(1-\beta)T} \dots (21)$$

が Pf_i に加算され、同時に立脚相では

$$\Delta Fg = \frac{\Delta Gn}{\beta T} \dots (22)$$

が Pf_i に加算される事で側行歩容が完成される。この時の最大ストローク変化量は脚の可動範囲から、X 方向には ± 25 mm、Y 方向には ± 25 mm を上限とした。また、Y 方向に関して、力センサによる変位が、歩行 1 サイクルの移動量を下回った場合、つまり、+ 100 mm 移動の場合、位置指令型インピーダンス制御による重心移動量が - 100 mm を超えた場合には、歩行シーケンスの逆転により、Fig.7.3 に示すように歩行がマイナス方向に切り替わるようにアルゴリズムを作成した。

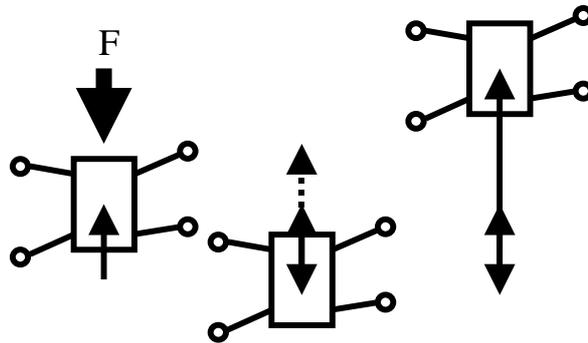


Fig.7.3 Orbit change at Y direction

8 . シミュレーション結果

以下に，シミュレーション結果を示す．まず，四脚接地による安定余裕確保と位置指令型インピーダンス制御についてのシミュレーション結果を示す．それぞれ X 軸が時間を示し，Fig.8.1,8.2 では Y 軸には X 方向の重心移動量と，重心にかかった力，及び安定余裕の変化を示す．Fig.8.1 では，四脚支持を行わなかった場合の結果を示し，Fig.8.2 では四脚支持を行った場合の結果を示す．次に Fig.8.3,8.4 に位置指令型インピーダンス式を使用した側行歩容による軌道変更のシミュレーション結果を示す．X 軸に時間，Y 軸にそれぞれの軸での軌道の変化を示す．また，Fig.8.5 には基準とした間歇クロール歩容によるロボットの軌跡，Fig.8.6 にはその安定余裕，Fig.8.7 にはそれぞれの脚の，Z 方向の軌道を示す．Fig.8.8 には X 方向の脚先位置，Fig.8.9 には Y 方向の足先位置をグローバル座標系にて示す．その後，Fig.8.10～8.15 で，軌道変更時の側行歩容の様子として，X，Y 方向の脚先位置の変化を示す．最後に Fig.8.16 以降で位置指令型インピーダンス制御による重心移動量を，力センサより取得した力と一緒に示す．

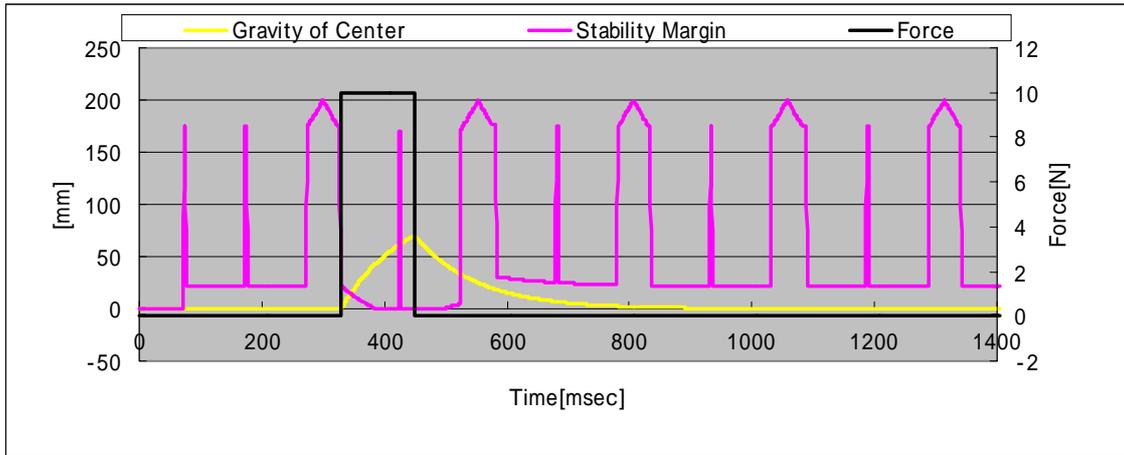


Fig.8.1 Stability margin at 3 legs support

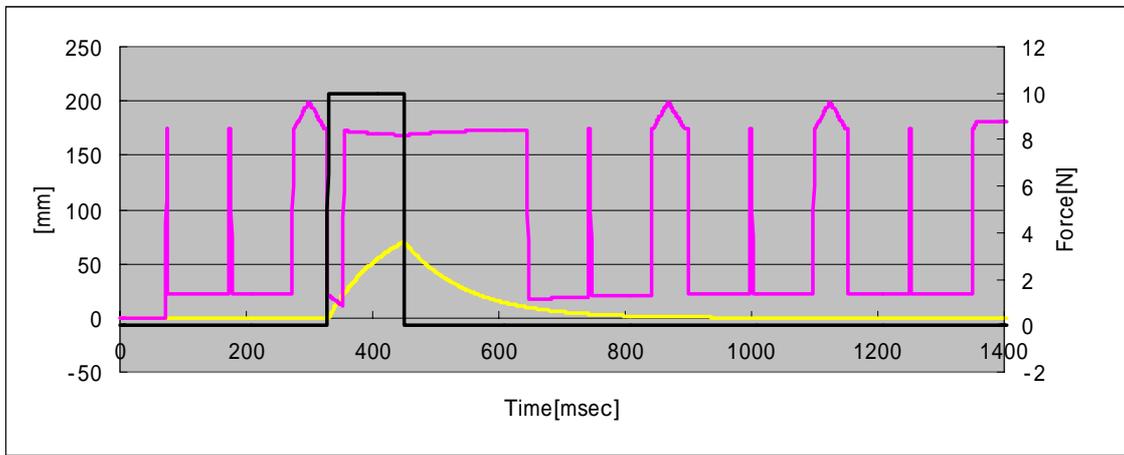


Fig.8.2 Stability margin at 4 legs support

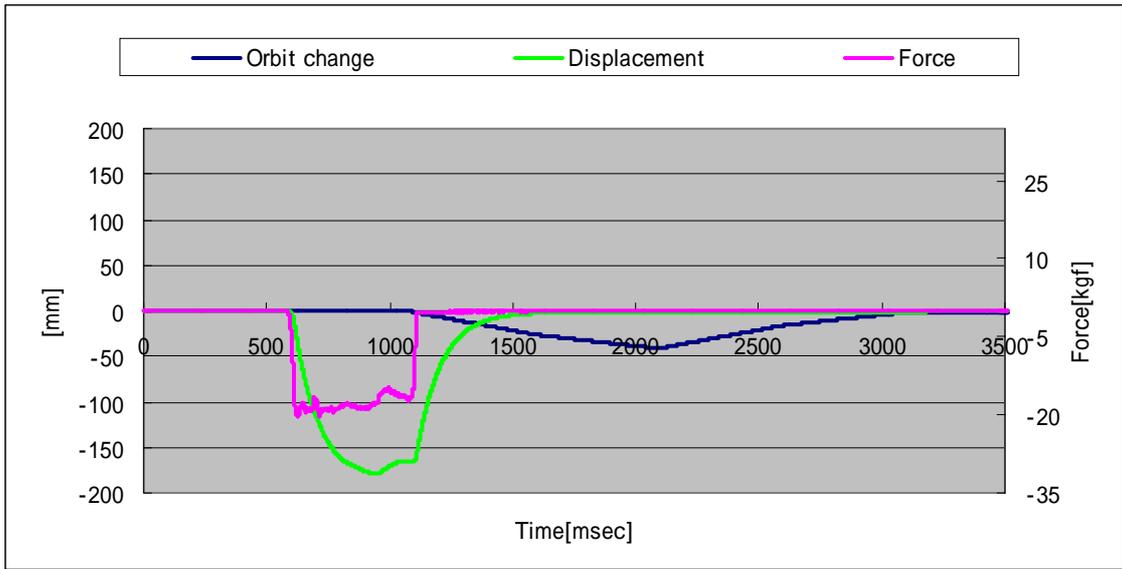


Fig.8.3 Orbit change on X direction

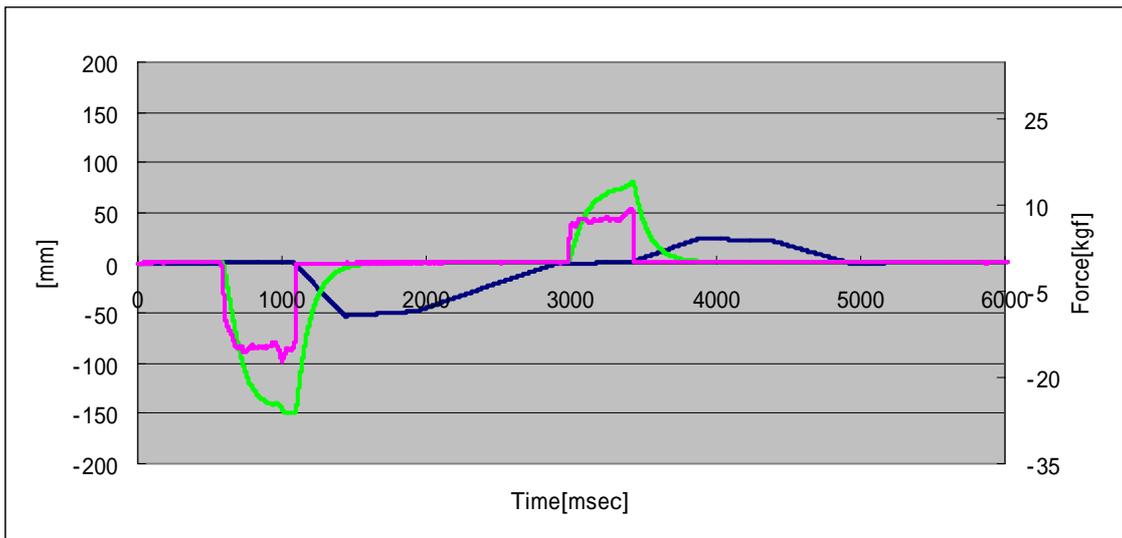


Fig.8.4 Orbit change on Y direction

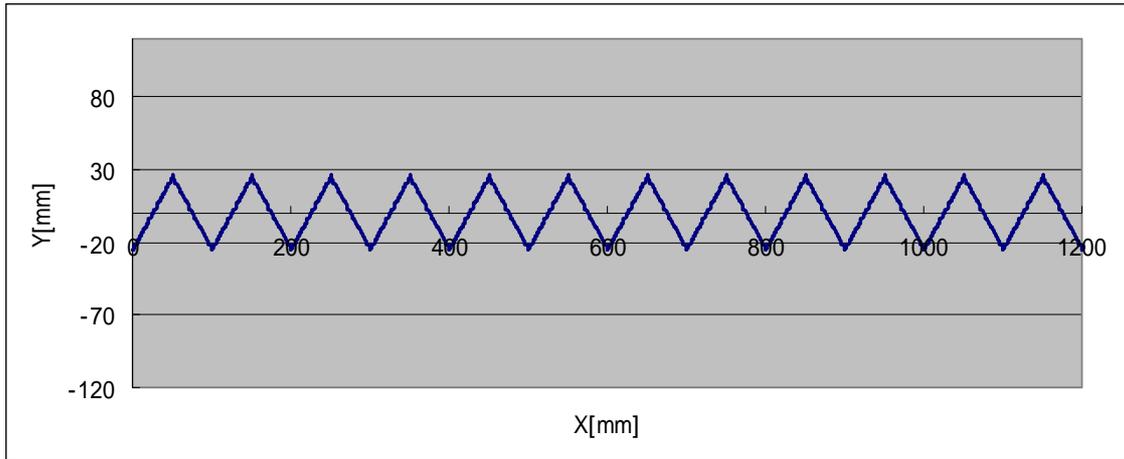


Fig.8.5 Locus of Center of gravity by intermittent crawl gait

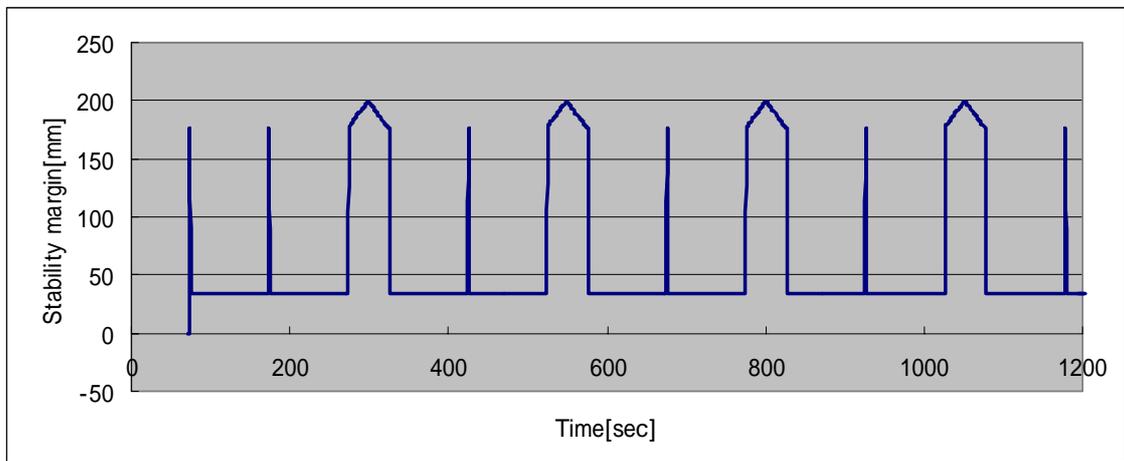


Fig.8.6 Stability margin of intermittent crawl gait

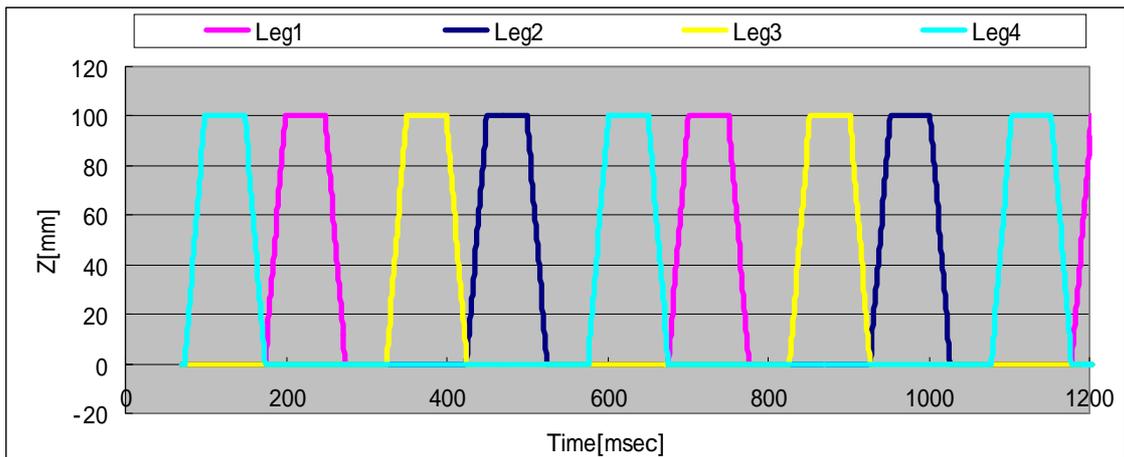


Fig.8.7 Leg position of intermittent crawl gait on Z direction

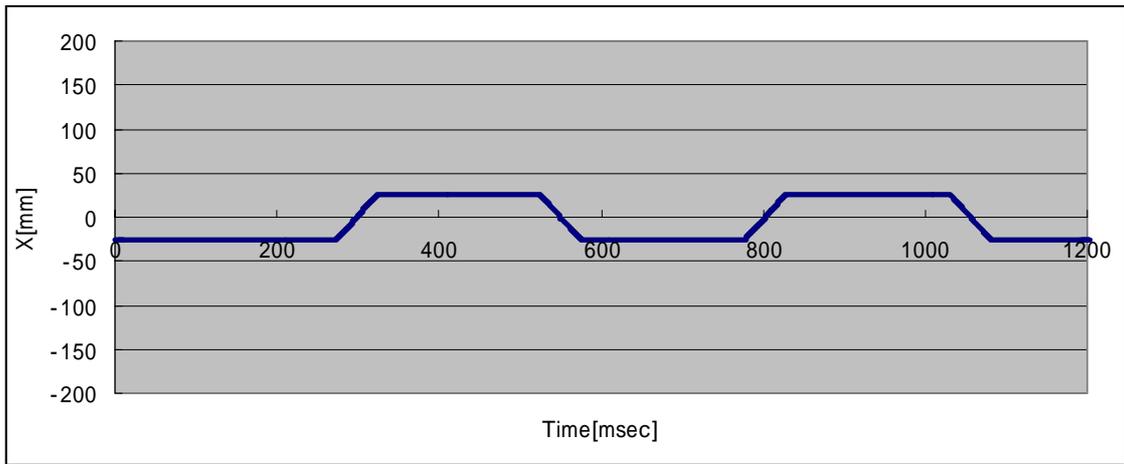


Fig.8.8 Orbit on X direction

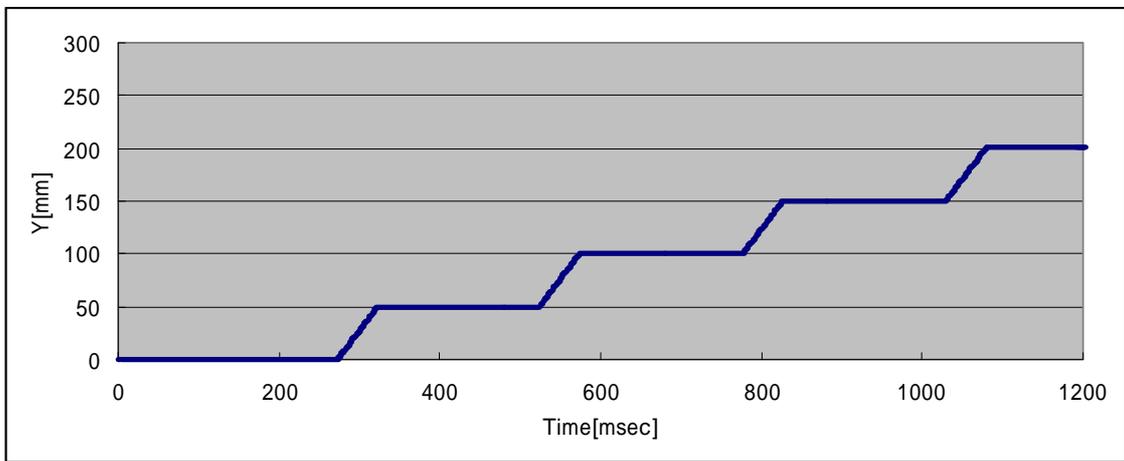


Fig.8.9 Orbit on Y direction

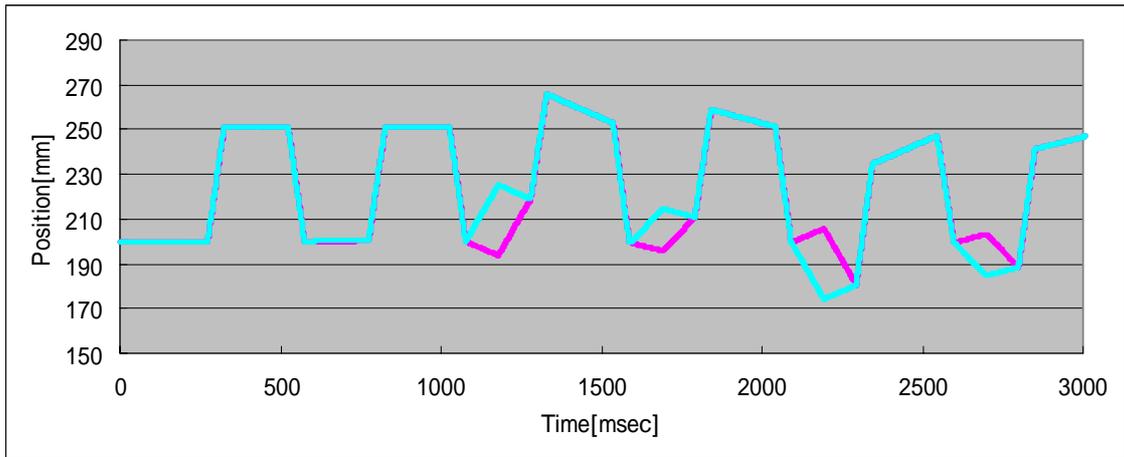


Fig8.10 Leg position of leg.1 and leg.4 on X direction

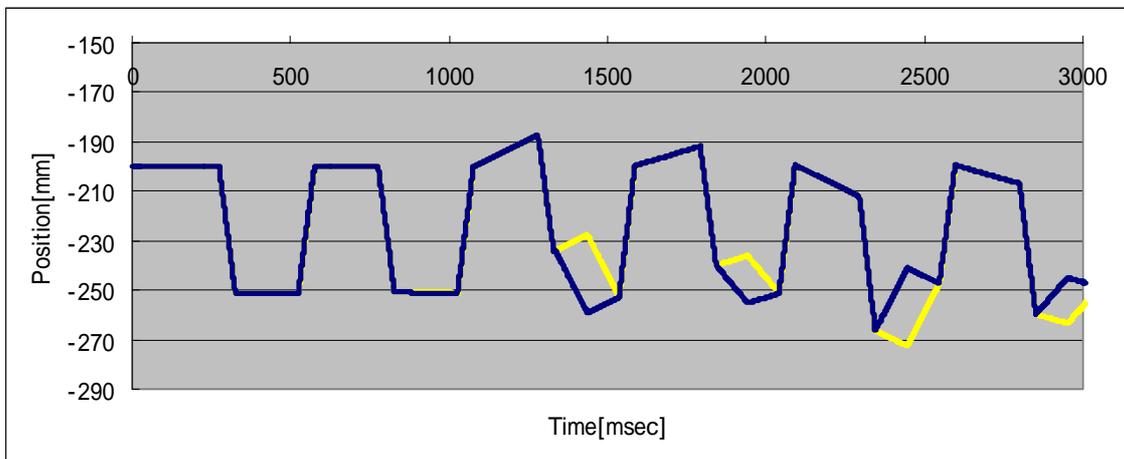


Fig8.11 Leg position of leg.2 and leg.3 on X direction

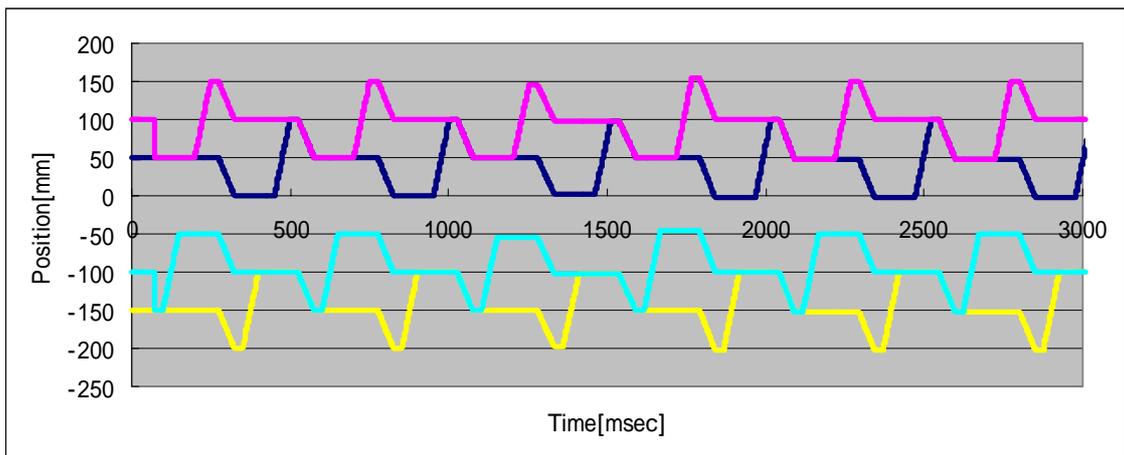


Fig8.12 Leg position on Y direction

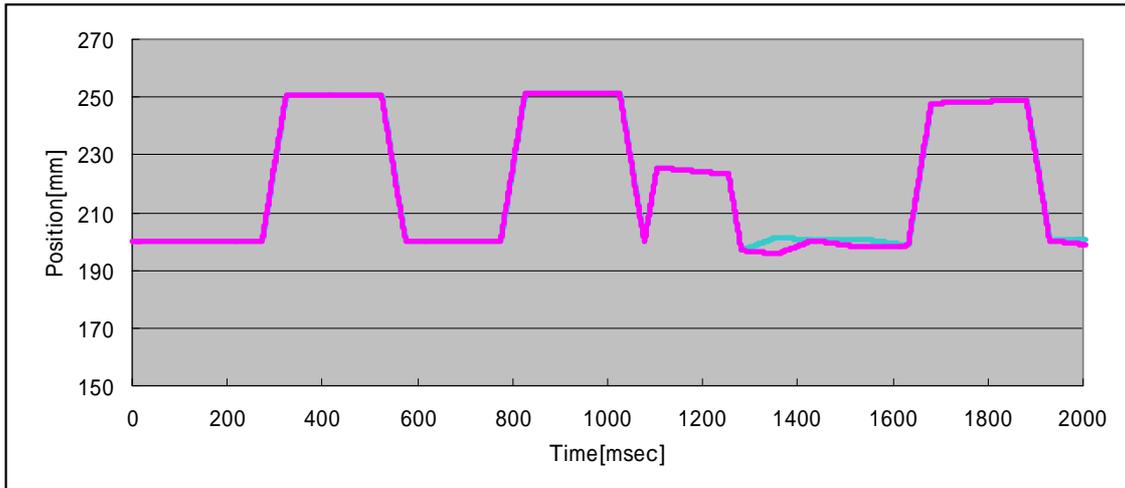


Fig8.13 Leg position of leg.1 and leg.4 on X direction

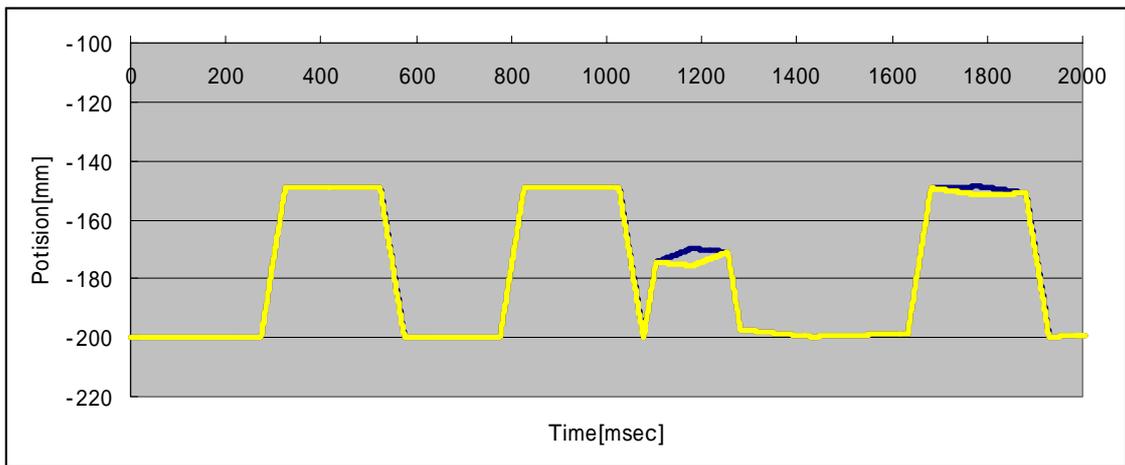


Fig8.14 Leg position of leg.2 and leg.3 on X direction

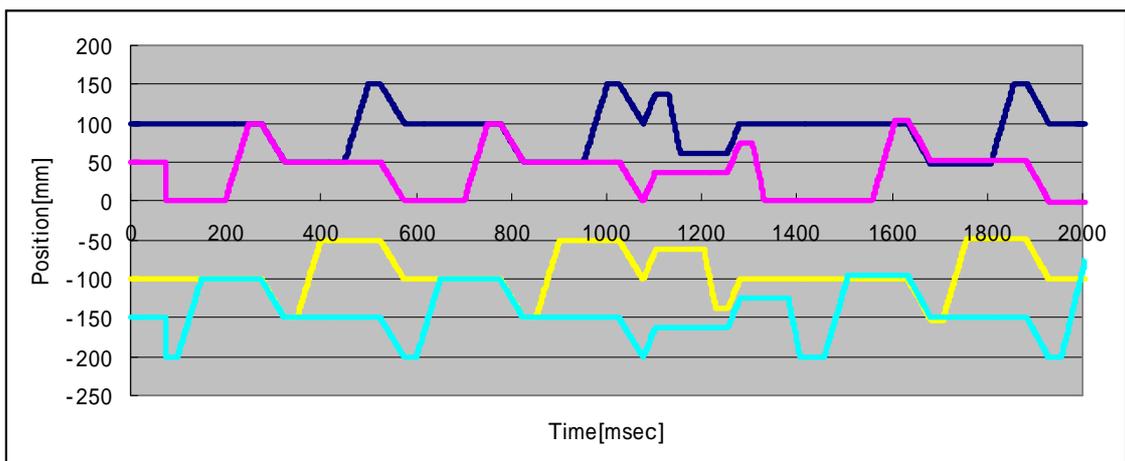


Fig8.15 Leg position on Y direction

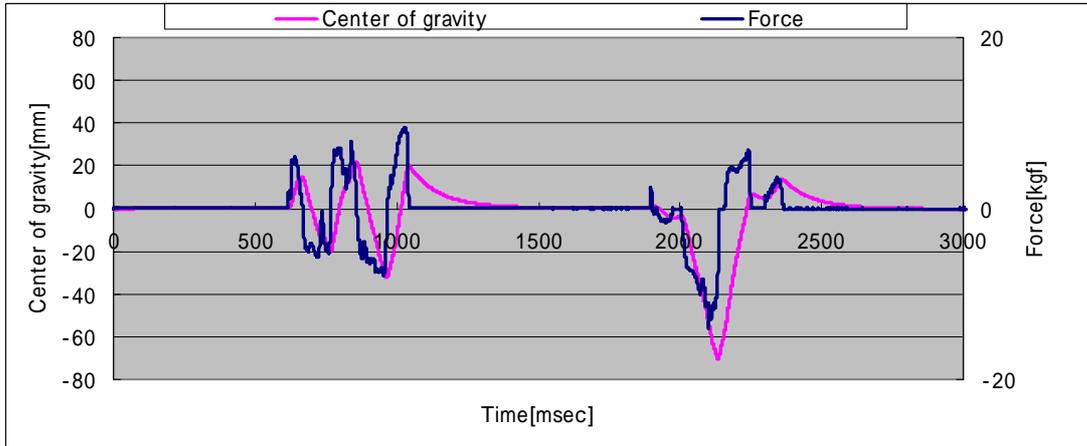


Fig.8.16 Center of gravity and force on X direction

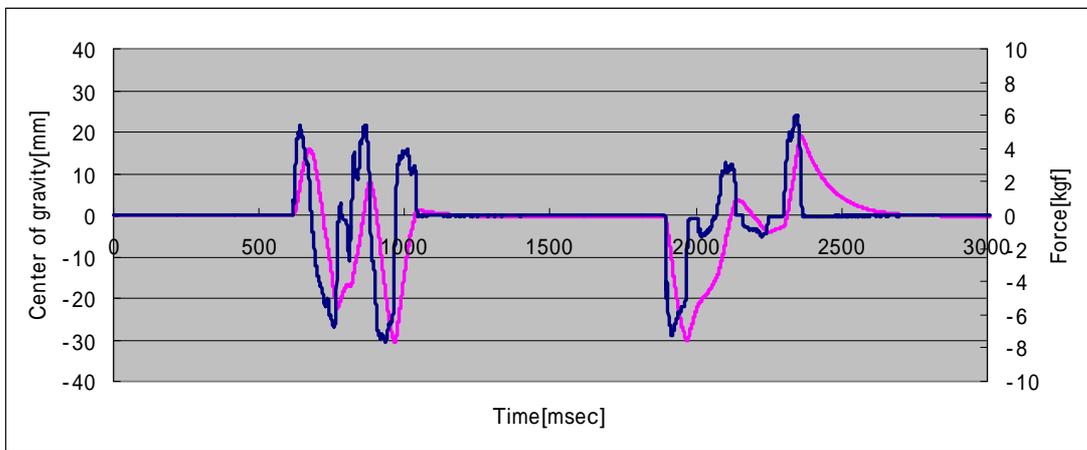


Fig.8.16 Center of gravity and force on Y direction

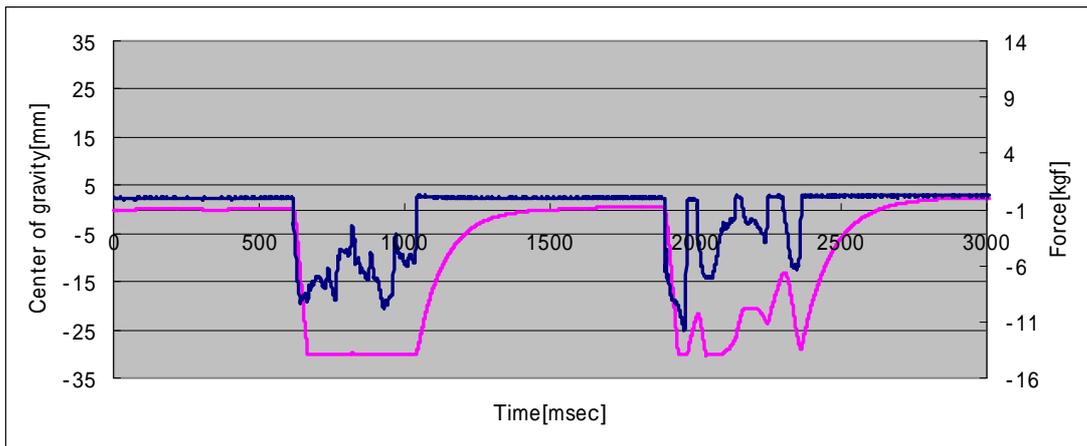


Fig.8.16 Center of gravity and force on Z direction

9. 考察

まず、四脚支持による安定余裕の確保について考察する。この方法は単純であるが、安定余裕をかなり大きく増大させる事ができ、接触や衝突といった、突然のイベントに対して有効でないかとは考えられる。また、その安定余裕の確保と同時に行なわれている位置指令型インピーダンス制御により、衝突による力に対し、柔軟な動きをさせる指令値を生成させる事ができた。実際にこの制御を実機で行う場合、ロボット本体がこの指令値に対し、どれだけ応答できるか、つまり位置制御系の性能によって接触や衝突に対する効果が変わってきてしまうが、応答精度が良いほど、有効な制御が可能だと考えられる。しかしながら、この重心移動量には限界があるため、インピーダンス制御式により、ある程度大きな変位を要求された場合、静的な重心移動制御だけでは対処が困難である。そのため、歩容と組み合わせた、安定余裕確保のアルゴリズムが必要であろう。また、この安定余裕はいくつかある安定余裕候補の最小値であるために、重心の移動可能な領域は、重心の動く方向によって、安定余裕以上に移動させることが可能である。つまり、今後、この安定余裕の以外の安定判別方法を検討する事により、支持脚多角形を効率的に使用する必要がある。

次に軌道変更について考察する。この軌道変更は、側行歩容に与える指令値を、力センサから取得した力と、位置指令型インピーダンス制御式を用いて与えるものであるが、その応答が歩行 1 サイクル分遅れてしまう。従って、この軌道変更だけで、急な接触、衝突等の対処方法には向かない。この軌道変更は、“安定余裕確保のための動作”とし、最初に提案した重心位置を直接制御する位置指令型インピーダンス制御と組み合わせる事が必要である。本研究では、力によって仮想的に作り出される変位の平均値をその歩行サイクルの代表値として使用したが、これは、「ある期間の代表値を何によって決定するのか」という問題になる。そう考えると、平均、ピーク値、中間値など、いくつかの代表値の決定方法があるが、どの方法が有用に使用できるか、また、歩容的にどの値が最適なのかを検討する必要がある。つまり、この軌道計画と重心位置の位置指令型インピーダンス制御の二つをどのようにリンクさせるのが今後の課題である。

10, 結言

本研究は数値シミュレーションによって、以下の方法で四脚歩行ロボットの指令値が生成できる事を示した。

力センサを用いて、衝突、接触等の力情報を読み取り、それに基づいて、位置指令型インピーダンス制御による重心移動制御の指令値が生成できる。なおかつ、安定余裕の概念を取り入れる事で、静的安定な領域内でその指令値を生成できる。

力センサ、及び位置指令型インピーダンス制御式を用いて、側行歩容による軌道変更による指令値が生成できる。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、終始懇切なるご指導賜りました高知工科大学大学院教授井上喜雄教授に謹んで深甚の感謝の意を表します。そして、副指導教員の高知工科大、岡弘一助教授には暖かいご支援と貴重なご助言を賜りました。また、同じく高知工科大学 甲斐義弘助手には制御アルゴリズムやプログラムに対して、非常に貴重なご意見と助言をいただきました。ご両者に深く感謝の意を表します。また、同じ研究室の皆様、私と同じく修士二年の川澤延弘氏、松田拓也氏、松谷融氏、森井康友氏には公私共にお世話になりました。他にも、一緒に研究を進めた、学部四年生の光岡敬晃氏、就職活動中にも関わらず、インピーダンス制御、逆運動学等ご助言いただいた、修士一年戸次亨式氏、シミュレーションプログラムの作成にあたり、強力なサポートをしていただきました中浜昌文氏、その他研究室諸氏に深く感謝します。

参考文献

- 1) 広瀬, 梅谷, "4 足歩行機械の基本的運動調整系の構成と歩行実験", 計測自動制御学会論文集, Vol.16, No.5, pp747-753, 1980
- 2) 滝田, 下井, "YT メカニズムを用いた自立四足歩行ロボットの歩行制御", 日本計測自動制御学会論文集 (C 編), Vol.62, No.593, pp188-193, 1996
- 3) 滝田, "YT メカニズムを用いた自立四足歩行ロボットの振動制御による歩行の安定化", 日本計測自動制御学会論文集 (C 編), Vol.62, No.601, pp3588-3594, 1996
- 4) 小山, 野波, "ニューラルネットワークを用いた四足歩行ロボットの動歩行制御", 日本計測自動制御学会論文集 (C 編), Vol.62, No.596, pp1519-1526, 1996
- 5) 内田, 野波, 千葉, 小山, "最適トラッキング制御に基づく四足歩行ロボットの動的歩行", 日本計測自動制御学会論文集 (C 編), Vol.60, No.575, pp2351-2357, 1994
- 6) 内田, 野波, 小山, "周波数成型最適トラッキング制御による四足歩行ロボットの動的歩行", 日本計測自動制御学会論文集 (C 編), Vol.61, No.589, pp3627-3634, 1994
- 7) 広瀬, 長久保, 外山, "四足壁面移動ロボット NINJA-1 の研究", 日本機械学会論文集 (C 編), 57, 540, pp.2679-2686, 1991
- 8) 遠藤, 広瀬, "ローラーウォーカーに関する研究 システムの構成と基本的動作実験", 日本ロボット学科誌, Vol.18, No.2, pp270-277, 2000
- 9) 広瀬, 有川, "研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN - の開発", 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.8, pp1191-1197, 1999
- 10) 木村, 秋山, 桜間, "神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地歩行", 日本ロボット学科誌, Vol.16, No.8, pp1138-1145, 1998
- 11) 広瀬, 福田, 菊池, "4 足歩行機械の制御システム", 日本ロボット学会誌, Vol.3, No.4, pp.304-323, 1985
- 12) 広瀬, 吉田, 田口, "地図生成システム MARS の研究 (背景光と誘導外乱のキャンセリング)", 日本ロボット学科誌, Vol.4, No.3, pp241-252, 1986
- 13) 広瀬, 吉田, 虎谷, "地図生成視覚システム MARS の研究 (実時間地図構成法の検討)", 日本ロボット学科誌, Vol.6, No.1, pp14-25, 1988
- 14) 五十嵐, 柿倉, "3 次元複雑環境における脚型ロボットの経路計画 -軌道追従歩容の検証-", 日本機会学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 (ROBMEC'02) Jun. 2002
- 15) 五十嵐, 柿倉, "3 次元複雑環境における脚型ロボットの経路計画および歩容パターンプランニング", 平成 13 年電気学会 システム・制御部門研究会 Mar. 2001
- 16) 五十嵐, 柿倉, "3 次元複雑環境における脚型ロボットの経路計画および歩容パターンプランニング", 第 18 回 日本ロボット学会学術講演会予稿集 vol.1, pp.213-214 Sep. 2000
- 17) 佐野, 古荘, 尾関, "離散時間モデルを用いた歩行周期制御に基づく 4 足ロボットの

- ペース歩容", 日本ロボット学科誌, Vol.9, No.7, pp865-876, 1991
- 18) 広瀬, 菊池, 梅谷, "4 足歩行機械の基準旋回歩容", 日本ロボット学科誌, Vol.2, No.6, pp545-555, 1984
 - 19) 広瀬, 横井, "4 足歩行機械の踏み換え歩容に関する研究", 日本ロボット学科誌, Vol.4, No.4, pp354-373, 1986
 - 20) 広瀬, 米田, "4 足歩行機械の静動融合歩容とその連続軌道生成", 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.3, pp267-275, 1991
 - 21) 広瀬, 米田, 塚越, "四足歩行機械の間歇クロール歩容の提案", 日本ロボット学会第 13 回学術講演会予稿集, pp225-226, 1995
 - 22) 塚越, 広瀬, "間歇クロール歩容の提案とその生成原理", 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2, pp301-309, 1999
 - 23) 安達, 小谷内, 新井, 本間, 篠原, 西村, "可動限界到達時の脚踏み換えルールに基づく 4 脚ロボットの操縦型歩行制御", 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3, pp329-336, 1998
 - 24) 榊原, 菅, 和田, 服部, 藤江, "4 脚歩行機構のための低衝撃足先軌道", 日本ロボット学科誌, Vol.18, No.6, pp662-671, 1990
 - 25) 広瀬, 井上, 米田, "ウイスカセンサとその複数信号の伝達", 日本ロボット学科誌, Vol.6, No.2, pp101-108, 1988
 - 26) 安達, 小谷内, 中村, 中野, "脚に設置された力センサを用いた 4 脚歩行ロボットの適応歩容", 日本ロボット学科誌, Vol.9, No.6, pp707-717, 1991
 - 27) 金子, 谷江, 堀内, "路面の変形を考慮した多足歩行機械の一制御方法 交互 3 点支持歩行を中心に", 日本ロボット学科誌, Vol.4, No.3, pp231-240, 1986
 - 28) 広瀬, 米田, 荒井, 井辺, "直動脚 4 足歩行機械 TITAN の開発", 日本ロボット学科誌, Vol.9, No.4, pp445-452, 1991
 - 29) 有川, 広瀬, "3D 荒地用歩行ロボットの研究 (GDA と干渉駆動に基づく最適化歩行)", 日本ロボット学科誌, Vol.13, No.5, pp720-726, 1995
 - 30) 五十嵐, 柿倉, "3 次元複雑環境における脚型ロボットの経路計画 - 光学マウスによる足先のすべり検出および軌道修正 -", 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会 Sep. 2002
 - 31) 米田, 飯山, 広瀬, "4 足歩行機械のスカイフックサスペンション制御", 日本ロボット学科誌, Vol.12, No.7, pp1066-1071, 1994
 - 32) 宮下, 細田, 竹内, 浅田, "反射の組み合わせによる歩行の実現", 日本ロボット学科誌, Vol.18, No.3, pp381-386, 2000
 - 33) 小谷内, 安達, 新井, "脚・腕統合リムメカニズム 腕転用脚機構の運動学解析", 日本ロボット学科誌, Vol.14, No.7, pp968-976, 1996
 - 34) 小谷内, "リムメカニズムの研究", 日本ロボット学科誌, Vol.13, No.7, pp900-903,

1995

- 35) 田川, 相山, 石渡, "脚式移動マニピレータにおける外力印加時のふんばり動作", 機械学会関東支部講演会講演論文集, 2002
- 36) R.B. McGhee, and A.A. Frank: "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits", *Math. Biosciences*, Vol.3, pp331-351, 1968
- 37) [特集]歩行ロボット, 日本ロボット学科誌, 11-3, 1993
- 38) 日本ロボット学会編, "ロボット工学ハンドブック .制御技術編", コロナ社, pp340-341, 1990
- 39) 広瀬, 塚越, 米田, "不整地における歩行機械の静的安定性評価基準", 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8, pp1076-1082, 1998
- 40) 木村, 下山, 三浦, "四足動歩行ロボットの力学的解析", 日本ロボット学科誌, Vol.16, No.5, pp367-377, 1988
- 41) 米田, "脚移動" 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.7, pp897-901, 1998