

平成 14 年度

卒業論文

四足歩行ロボットの接触への対応に関する研究

(重心位置の位置指令型インピーダンス制御)

指導教員

井上 喜雄 教授

甲斐 義弘 助手

高知工科大学 知能機械システム工学科

1030152 光岡 敬晃

目次

第1章	緒言	1
1.1	背景と目的	1
1.2	研究内容	2
第2章	歩行ロボットのモデル	3
2.1	ロボットの座標系	3
2.2	脚機構	4
2.3	逆運動学	5
第3章	歩行の決定	6
3.1	歩行方法	6
3.1.1	静歩行	6
3.1.2	動歩行	6
3.2	歩容	7
3.2.1	代表的な歩容の種類	7
3.2.2	クロール歩容	8
3.2.3	間歇クロール歩容	8
第4章	重心位置の位置指令型インピーダンス制御	11
4.1	位置指令型インピーダンス制御	11
4.2	位置指令型インピーダンス制御の利点	11
4.3	制御式	11
第5章	歩行中に位置指令型インピーダンス制御を行った時の問題点	14
5.1	安定余裕	14
5.2	脚接地による安定余裕の確保	14
第6章	シミュレーション	16
6.1	シミュレーション方法	16
6.2	歩行の生成	16
6.3	安定余裕の計算方法	18
6.4	シミュレーション結果	19
6.4.1	脚接地による安定余裕の確保	19
6.4.2	位置指令型インピーダンス制御による重心移動量	20

第7章 考察	22
第8章 結言	22
謝辞	22
参考文献	23

第1章 緒言

1.1 背景と目的

現在，多くの産業用ロボットが工場などで使われているがそのほとんどは，人間から隔離した環境で使われている．一方，高齢化社会を迎え，オフィス，家庭内，福祉施設，病院など，今後は人間の居住空間で人間と共存し，人間と協調して作業を行うロボットのニーズが増加している．そのため，人間の補助や支援を行うロボットの開発が求められている．

人間の居住空間で人間と協調して作業を行うロボットには人間と共に移動することも考え，ロボットに移動機能を持たせることが必要である．

ロボットの移動機構としては，車輪，クローラ，脚が主に考えられている．車輪は機構および制御が簡単であり，エネルギー効率が良く高速な移動が可能であるが，平坦な路面でなければ移動できない．クローラは円環状の無限軌道履帯と車輪を組み合わせたもので，車輪より高い踏破能力を持っている．これらの2種類の移動機構は，基本的にロボットと地面との接点が連続して確保されなければならない．これに対して，脚ではロボットと地面との接点が離散的であり，着地点を選択できる，さらには着地点の変更なしにロボット本体の位置・姿勢を変更することができるといった特徴を持っている．人間の居住空間で作業を行う場合には，段差や不整地面でも移動可能であることが望まれるため，脚機構を持ったロボットが人間の居住空間で人間と協調して作業を行うのに適していると考えられる．

脚移動ロボットでは，2脚，4脚，6脚といった脚数のロボットが研究されている．2脚では，狭い場所での移動に適しているが，本質的に動的な安定性を確保する必要があり，制御の難しさの問題点を持っている．6脚は状況に応じてさまざまな歩容を採用することができ，安定性や歩行速度においてメリットがあるが，ロボットが大型化するという問題点がある．4脚は，静的な安定性を保ちながら移動できる最低脚数であり，機構上は6脚より有利であるが，同時に2本以上の脚を上げられないため，移動速度や移動アルゴリズムの点で劣っている点も持ちあわしている．人間の居住空間で人間と協調して作業を行うためには，常に安定性を保ちながら移動ができ，人間の居住空間で支障なく作業が行える大きさの4脚の脚移動ロボットが適しているのではないかと考えられる．

また，人間の居住空間でロボットが人間と協調して作業をおこなう際に，人間や障害物への衝突や接触がおこると考えられる．そのような場合，ロボットが衝突や接触によって発生する力に柔軟な動きで対応し，人間や障害物に与えるダメージを緩和する必要があると考えられる．しかし，今までの4脚の脚移動ロボットの研究では，ロボットの機構や歩容など歩行の生成方法について主に研究されており，人間に対する動きについてはあまりされていない．

したがって、本研究では四足歩行ロボットが人間と協調して作業を行う時に起こりうる人間や障害物への接触に柔軟に対応する方法として、ロボットの本体重心位置を位置指令型インピーダンス制御することを提案する。

1.2 研究内容

四足歩行ロボットの本体に柔軟さを持たせるためにロボットの本体重心位置を位置指令型インピーダンス制御することで、人間や障害物への接触に対応する方法とした。四足歩行ロボットに柔軟な動きを持たせるために、ロボット本体にかかる外力に対してインピーダンスより変位を求め、求めた変位をロボット本体の重心位置に付加して重心位置を制御し、歩行中に静的安定性を保ったまま重心位置を制御することができるか検討した。そして、ロボット本体の重心位置を位置指令型インピーダンス制御して、ロボット本体に柔軟さを持たせる動きが可能であることをシミュレーションで示した。

第2章 歩行ロボットのモデル

本研究のシミュレーションで使用している歩行ロボットのモデルは、図 2 に示す東京工業大学の広瀬茂男教授によって開発された普及型四足歩行ロボット TITAN- を元に各リンク長や座標系を設定した。

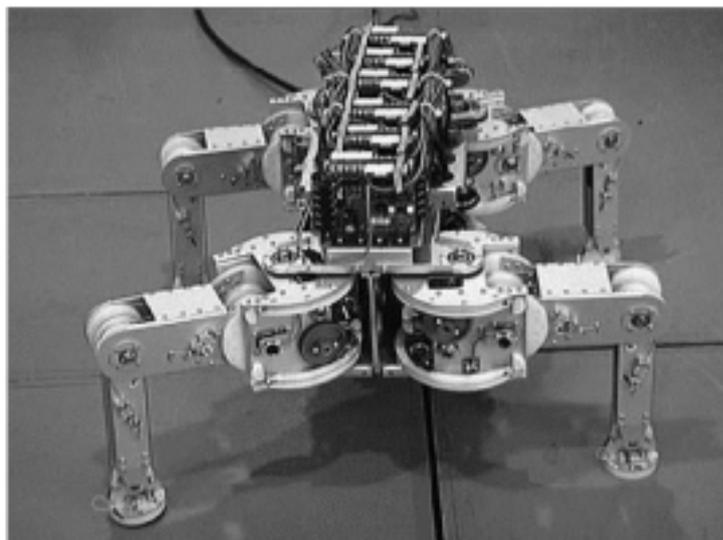


図 2 TITAN- の外観

2.1 ロボットの座標系

シミュレーションで使用する四足歩行ロボットの座標系は図 2.1 に示すとおり、ロボットの進行方向を Y 方向とし、進行方向に対して垂直な方向を X 方向、ロボットの高さ方向を Z 方向とする。また、本体重心位置と脚の位置の関係は、Leg 1 の脚座標系の原点が本体重心位置から X 方向に + 100mm、Y 方向に + 200mm の位置にあり、Leg 2 の脚座標系の原点が本体重心位置から X 方向に - 100mm、Y 方向に + 200mm の位置にあり、Leg 3 の脚座標系の原点が本体重心位置から X 方向に + 100mm、Y 方向に - 200mm の位置にあり、Leg 4 の脚座標系の原点が本体重心位置から X 方向に - 100mm、Y 方向に - 200mm の位置にある。

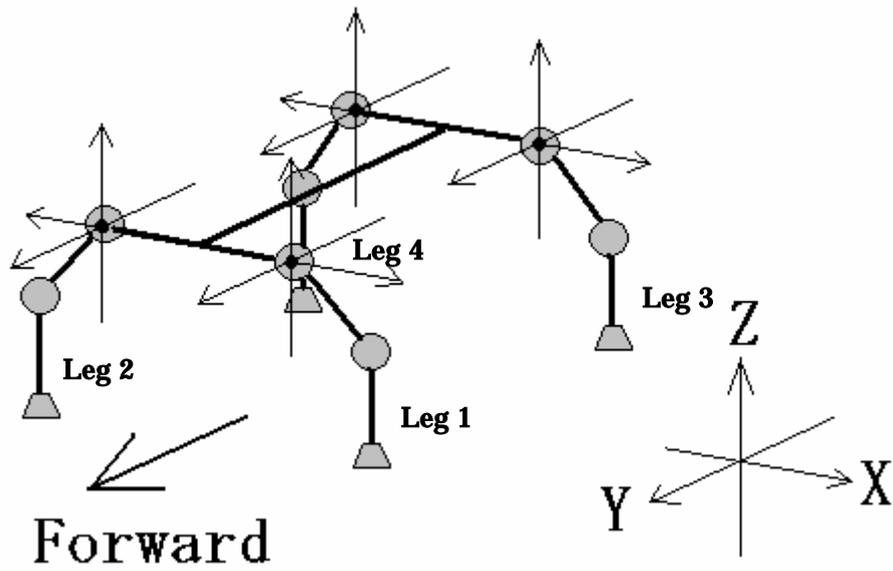


図 2.1 四足歩行ロボットの座標系

2.2 脚機構

TITAN は 3 自由度の脚を 4 本持ち、角度を指令値として与えて脚先位置を変動させて歩行する。シミュレーションで使用する四足歩行ロボットの脚機構も TITAN を元に図 2.2 のようなパラメータを持つ脚機構モデルを設定した。

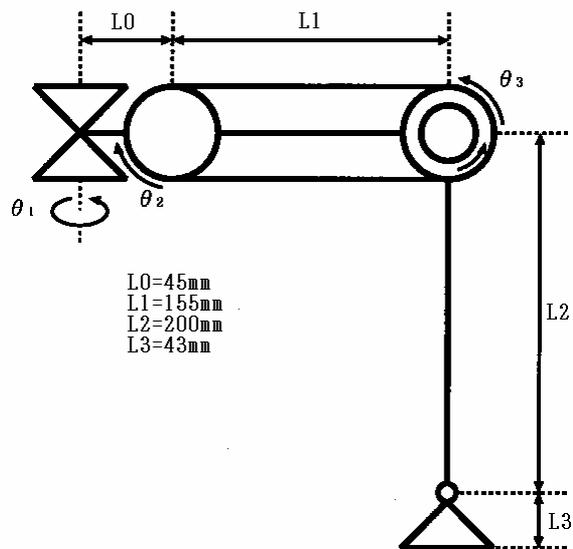


図 2.2 脚機構

2.3 逆運動学

先に述べた脚機構の順運動学を解くと、脚座標系の原点から見た脚先の座標(X, Y, Z)は次のように求められる。

$$X = \cos \theta_1 (L_0 + L_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos \theta_3)$$

$$Y = \sin \theta_1 (L_0 + L_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos \theta_3)$$

$$Z = L_1 \sin \theta_2 + L_2 \sin \theta_3$$

この式を使って逆運動学を解くと、脚座標系の原点から見た脚先の目標座標(X, Y, Z)に対しての関節角度 θ_1 , θ_2 , θ_3 は次のように求められる。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{Z + L_3}{X} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 + (\sqrt{X^2 + Y^2})^2 + (Z + L_3)^2}{2L_1 \sqrt{(\sqrt{X^2 + Y^2})^2 + (Z + L_3)^2}} \right)$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \pi + \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - (\sqrt{X^2 + Y^2})^2 - (Z + L_3)^2}{2L_1 L_2} \right)$$

脚先の目標座標からこの式を使って関節角度を算出して、角度を指令値として与えて脚先位置を目標座標まで、変動させて歩行する。

第3章 歩行の決定

本章では歩行の生成にあたり，歩行方法として静歩行と動歩行について検討し，その後
に本研究に適した歩容の決定について述べる．

3.1 歩行方法

脚移動ロボットの歩行方法には，静歩行と動歩行の二つに分かれる．

3.1.1 静歩行

静歩行とは，静的安定性が常に保持されている歩行のことである．図 3.1(a)に示すように，
ロボットの重心の水平面への垂直投影点が，脚の接地点を結ぶことによってできる支持脚
多角形の内部にある場合，静的安定性が保たれていると言う．従って，歩行を継続するた
めには，常に 3 本以上の脚が接地していることが必要である．

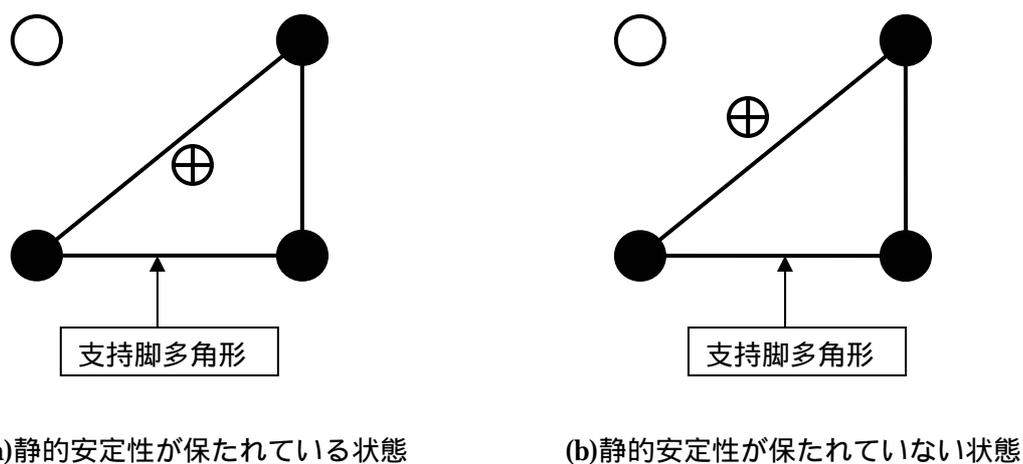


図 3.1 静的安定性についての説明

3.1.2 動歩行

これに対して動歩行とは，図 3.1(b)に示すように，静的安定性が確保することができない
期間を持つ歩行のことである．

動歩行では，高速で効率的な歩行が可能と言われているが，支持脚多角形の中に重心を
保つことなく歩行を行うため，重心の推定が難しく制御が難しい．また静歩行は常に支持
脚多角形の中に重心を保って歩行を行うため，常に 3 本以上の脚が接地していることが必

要であるため、歩行速度は遅くなるが、重心位置の推定が容易で制御がしやすい。

本研究では、四足歩行ロボットの本体に柔軟さを持たせる方法として、ロボット本体の重心位置を位置指令型インピーダンス制御で制御するため、重心位置の推定が容易で制御がしやすい静歩行を用いる。

3.2 歩容

歩容とは、足の浮かせ方の順序やそのタイミングなどについての歩くパターンのことである。

3.2.1 代表的な歩容の種類

クロール歩容

クロール歩容は、四足動物の低速歩行時に見られる歩行パターンである。クロール歩容の特徴としては、

- 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。
- 歩行中、常に3脚以上が接地している。
- 静歩行の中では縦安定余裕が最大である。

などが挙げられる。四足歩行ロボットの歩行パターンではこのクロール歩容が最も広く用いられている。

トロット歩容

トロット歩容は、中速度の歩行時に見られる歩行パターンである。トロット歩容の特徴としては、

- 正規対称歩容である。
- 対角にある2脚が対になって運動する。

などが挙げられる。トロット歩容は静力学的には不安定であるが、転倒しようとする方向の脚が次の支持脚となるため、動力学的な安定化制御を行わなくとも歩行することは可能である。

ペース歩容

ペース歩容は、中速度の歩行時に見られる歩行パターンである。ペース歩容の特徴としては、

- 正規対称歩容である。
- 前後の2脚が対になって運動する。

などが挙げられる。歩行には動力学的な安定化制御が不可欠である。

バウンス歩容

バウンス歩容は、中速度の歩行時に見られる歩行パターンである。4脚すべてが空中に浮き上がる時間が存在する。そのため、バウンス歩容で歩行する際には、動力学的な姿勢

制御が不可欠である。

四足歩行ロボットの歩行パターンでは歩行中，常に3脚以上が接地しているために静的安定性が四つの代表的な歩容のなかで，一番大きいクローラ歩容が最も広く用いられている。

3.2.2 クローラ歩容

静歩行で最も一般的な歩容として，クローラ歩容がある。しかしクローラ歩容は，図 3.2.2 に示すように胴体重心を等速に推進させようとするため，支持脚三角形を切り替える図 3.2.2 の(1)(3)の歩行状態で，著しく安定性が低下するという問題がある。

本研究では，接触により外力がロボットにかかることを前提としているため，図 3.2.2 の(1)(3)の歩行状態の時に外力がかかると転倒する恐れがある。

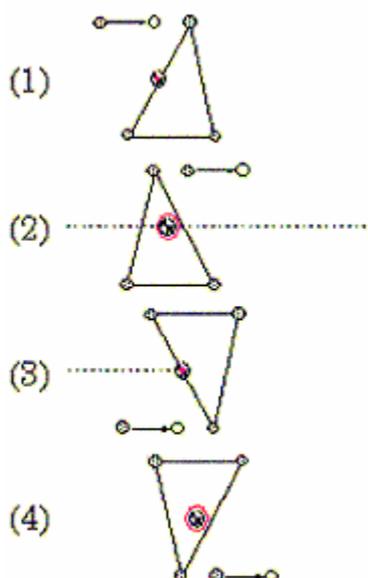


図 3.2.2 クローラ歩容

3.2.3 間歇クローラ歩容

四足歩行ロボットがクローラ歩容を用いて歩行する際には，支持脚三角形が後ろから前へ切り替わる時点で安定性が著しく低下するという問題がある。この問題を解決するため，静的安定性を最大化するように設計されたのが間歇クローラ歩容である。

間歇クローラ歩容はクローラ歩容とは異なり，重心移動が連続的ではない。間歇クローラ歩容の特徴としては，

- 各脚のストロークは等しい．
- 同側の2脚について，後脚の復帰動作の直後に前脚の復帰動作を行う．
- 胴体推進動作は，右側の2脚の復帰動作と左側の2脚の復帰動作の間の四脚支持期のみ行う．
- 四脚支持状態の時，同側の2脚の位置は，それぞれの脚座標において等しい．
- 四脚支持状態の時，左右の脚の位置は，それぞれの脚座標において半ストロークだけずれている．

図 3.2.3 に示すように，この歩容では，まず(1)(2)のように胴体重心を支持脚三角形の中のできるかぎり安定性の大きくなる位置に静止させ，その状態で1脚を復帰運動させる．そして，四脚支持になったときに(3)，重心を次の支持脚三角形の中の安定余裕がもっとも大きくなる位置に移動させる．そしてまた後脚の復帰，前脚の復帰を行い重心移動させるというようにして，その結果，(6)に示すように重心はジグザグな移動軌跡を描きながら前進していく．

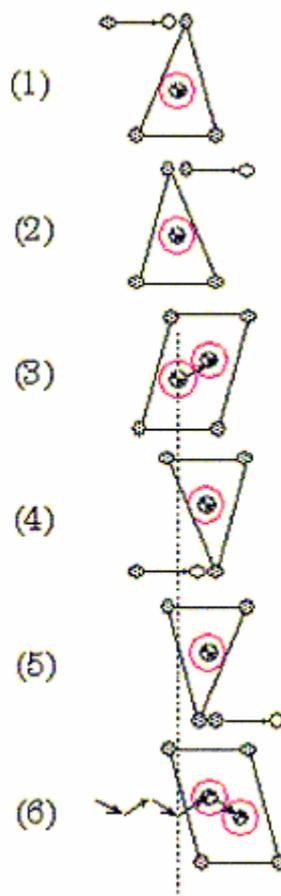


図 3.2.3 間歇クロール歩容

本研究では、接触により外力がロボットにかかることを前提としているため、静的安定性を最大化するように設計された間歇クローラ歩容を歩行パターンとした。また本体重心位置を位置指令型インピーダンス制御で変動させるため、重心移動量を多く確保することを重要とし、四脚支持期での胴体重心の移動は進行方向であるY方向だけとした。

第4章 重心位置の位置指令型インピーダンス制御

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ように設定されている。したがって、柔軟さを持った動きを行うため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で制御を行った。

4.1 位置指令型インピーダンス制御

位置指令型インピーダンス制御とは、制御対象物の外力に対する機械インピーダンスを、目的とする作業遂行に都合のいいように設定することによって、位置を制御する方法で、ロボットにバネやダンパを取り付けなくても仮想的にバネやダンパが作用しているような柔軟な動きを行うことを可能にする制御である。

本研究では、仮想的なバネ、ダンパ、質量を四足歩行ロボットの重心位置に想定した運動方程式を X 、 Y 、 Z 方向それぞれにたて、力から仮想バネ定数、仮想粘性定数、仮想質量の三つのパラメータによって算出した重心の目標位置より重心位置の変位を求めて、重心位置の X 、 Y 、 Z 方向それぞれに付加することで重心位置にあたかもバネやダンパが作用しているような柔軟な動きを持たせた。

4.2 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である。つまり、ロボット本体の機械的インピーダンスをプログラム上で変化させる事が可能である。したがって、仮想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。また、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く、例えば、力センサから入力される力に対してのみ、柔軟な動作を行う仮想インピーダンスによる位置変化量が生成される。それ以外の動作に関しては、ロボットが持つインピーダンス特性で制御が行われる。つまり、歩行ロボットの歩行には、そのインピーダンスの変化が影響しないため、通常どおりに歩行することが可能である。

4.3 制御式

本研究で用いる位置指令型インピーダンス制御の制御式を導出する。

仮想的なバネ、ダンパ、質量を四足歩行ロボットの重心位置に想定した時の運動方程式は、次に示すようになる。

$$F_{n-1} = M \frac{V_n - V_{n-1}}{\Delta t} + C \frac{X_n - X_{n-1}}{\Delta t} + K(X_n - X_0) \quad (4.3.1)$$

ここで、 F_{n-1} : 重心にかかる力、 $\frac{V_n - V_{n-1}}{\Delta t}$: 重心の加速度、 $\frac{X_n - X_{n-1}}{\Delta t}$: 重心の速度、 x_n :

重心の目標位置、 x_{n-1} : 現在の重心位置、 M : 仮想質量、 K : 仮想バネ定数、 C : 仮想粘性定数である。

式(4.3.1)を重心の変位だけで表すために

$$v_{n-1} = \frac{X_{n-1} - X_{n-2}}{\Delta t} \quad v_n = \frac{X_n - X_{n-1}}{\Delta t} \quad (4.3.2)$$

として、式(4.3.1)に式(4.3.2)を代入して重心の目標位置である x_n を算出する式に変形すると、

$$x_n = \frac{F_{n-1} + \frac{M}{\Delta t^2}(2x_{n-1} - x_{n-2}) + C \frac{X_{n-1}}{\Delta t} + Kx_0}{\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{\Delta t} + K} \quad (4.3.3)$$

式(4.3.3)のような位置指令型インピーダンス制御の制御式が導かれる。

式(4.3.3)に四足歩行ロボットの重心位置にかかる力を代入して、仮想バネ定数、仮想粘性定数、仮想質量の三つのパラメータによって導出した重心の目標位置より重心位置の変化量を

$$\Delta X = X_n - X_{n-1} \quad (4.3.4)$$

と求めることができる。

求めた変化量を重心位置の X 、 Y 、 Z 方向それぞれに付加することで重心位置にインピーダンス制御を行った。

図 4.3 に TITAN- を使用した場合の制御系のブロック線図を示す。

上記の制御式に基づいて TITAN から得た力によって、 X を生成し、 X を脚先制御量 Pf に付加し、TITAN の位置制御系に入力して TITAN を制御する制御量 P を生成する。

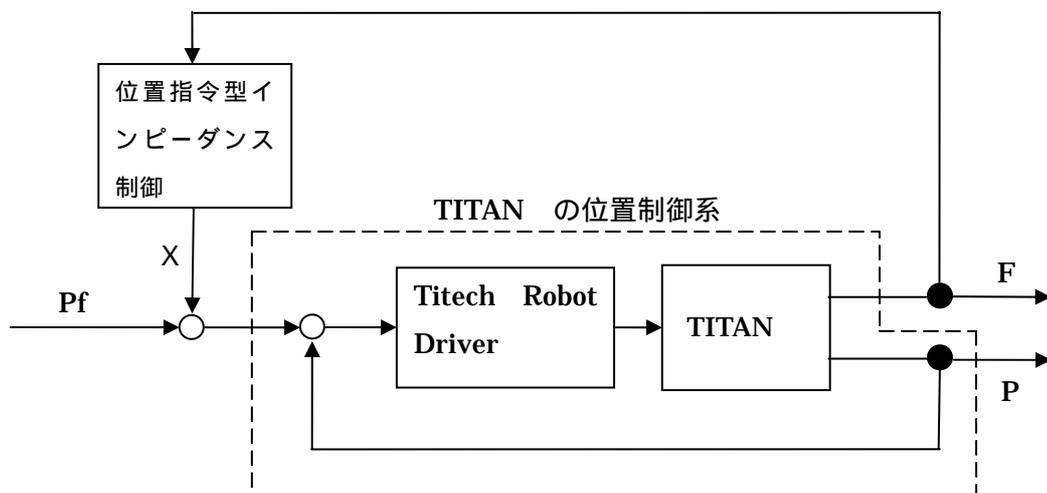


図 4.3 TITAN での制御系のブロック線図

第5章 歩行中に位置指令型インピーダンス制御を行った時の問題点と対策

歩行中にロボットの重心位置を位置指令型インピーダンス制御で制御する場合、脚を遊脚する時に三脚支持になるために、安定余裕が非常に小さくなってしまう。そのため、重心位置を位置指令型インピーダンス制御で変動させられる領域が非常に狭いと言う問題点がある。

5.1 安定余裕

安定余裕とは、歩行ロボットを制御する上での静的安定性の評価基準の 1 つで、歩行ロボットが水平で平坦な地表面を歩行しているとしたとき、歩行ロボットの重心から地表面へ下ろした重心投影点から支持脚によって地表面に形成される支持脚多角形の境界線への距離である。安定余裕が 0 以下になる、つまり重心投影点が支持脚多角形の外に出てしまうと転倒が生じる。

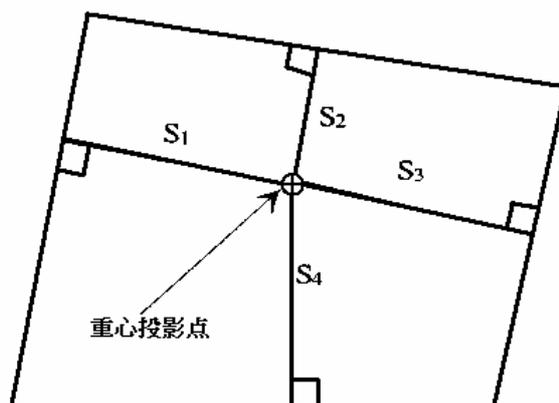


図 5.1 安定余裕

5.2 脚接地による安定余裕の確保

歩行中の安定余裕を大きくして、インピーダンス制御による重心の可動範囲を広くするために、安定余裕を増大させる必要がある。

したがって、本研究では力が加わったら、図 5.2 に示すように遊脚中の脚を地表に接地させて支持脚多角形を広げて、安定余裕を大きくし、インピーダンス制御による重心位置を変動させる領域を大きくした。

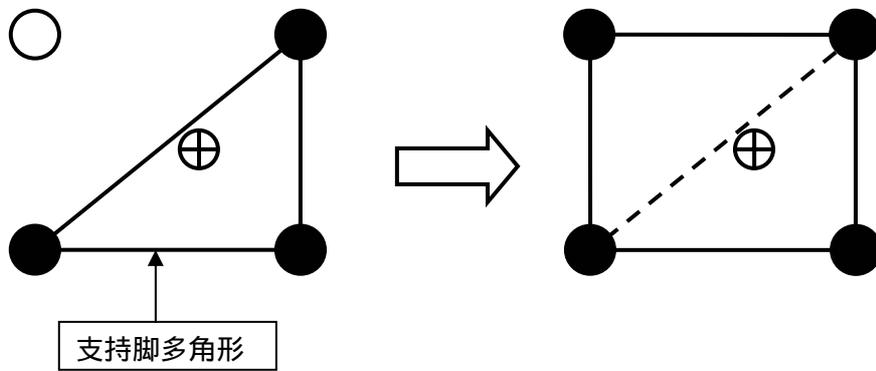


図 5.2 脚接地による安定余裕の確保

第6章 シミュレーション

6.1 シミュレーション方法

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で制御するため，第 4 章で導出したインピーダンス制御の制御式(4.3.3)に代入するロボットの重心位置にかかる力は，ニッタの 6 軸力覚センサ IFS-67M25A50-I40 を使用し，図 6.1 に示すようにそのレーザーボードを通して，シミュレーションを行うコンピュータで処理する．インピーダンスパラメータは $K = 100$ ， $C = 100$ ， $M = 1$ とし，加える力は人間が手で押した程度の力で，センサを直に押して入力した．

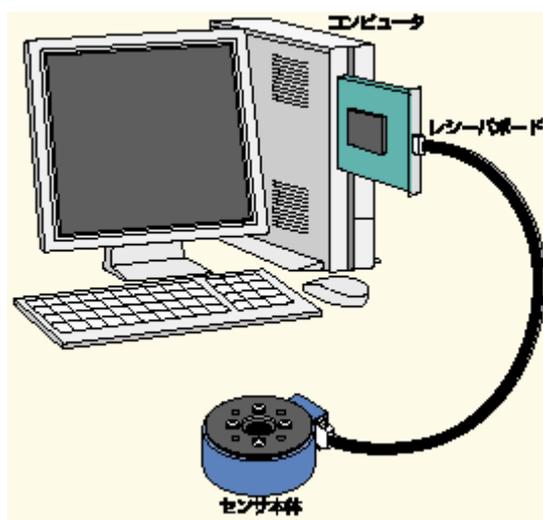


図 6.1 力の入力方法

6.2 歩行の生成

第 3 章で決定した歩行パターンの間歇クロール歩容を導入して，歩行させた時の重心移動を図 6.2(a)に，脚の復帰運動を図 6.2(b)に示す．図は横軸が時間，縦軸が重心移動量 Cg と各脚の Z 方向の変位を示している．この時，歩行中の脚の接地率であるディーティー比は 0.83 とし，脚のストロークは 100[mm]，歩行速度は 0.0167m/s に設定してある．また本体重心位置の高さは 243mm に設定した．

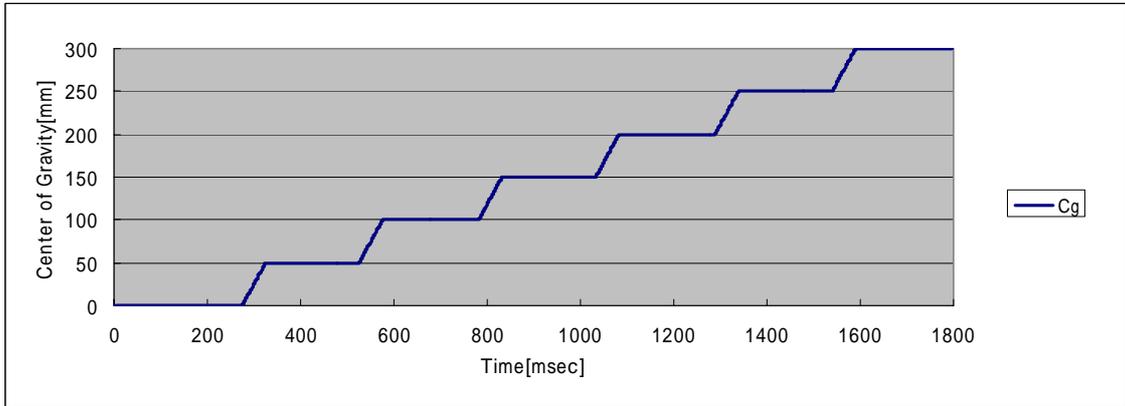


図 6.2(a) 間歇クローラ歩容の重心移動

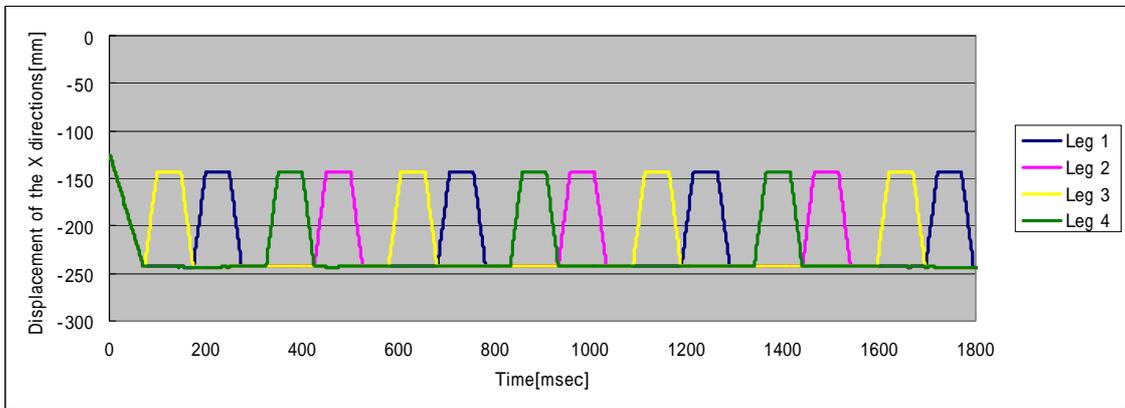


図 6.2(b) 間歇クローラ歩容の脚の復帰運動

6.3 安定余裕の計算方法

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、原点と直線の距離の公式から計算できる。

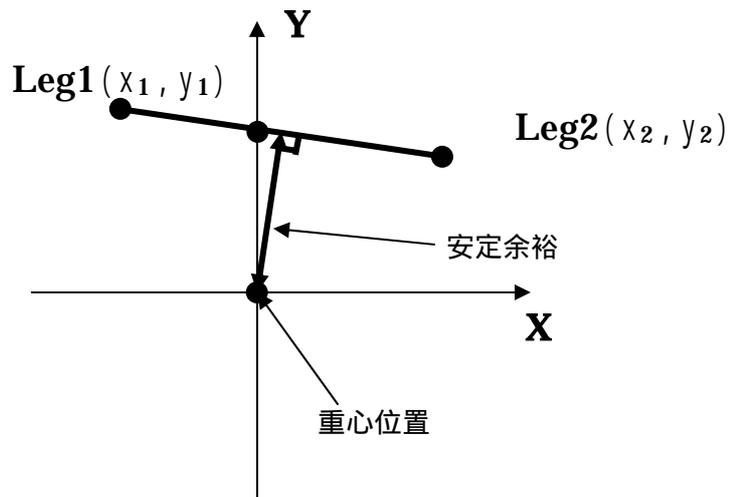


図.6.3 支持脚多角形と安定余裕の関係

図 6.3 に示すように、Leg1 と Leg2 の足先位置を結ぶことのできる支持脚多角形の一辺から重心位置までの距離が安定余裕である。Leg1 と Leg2 の足先位置を結ぶことのできる支持脚多角形の一辺を

$$y = mx + n \tag{6.3.1}$$

とおくことで安定余裕 S_m は点と直線の距離の公式から以下のように求まる。

$$S_m = \sqrt{\frac{n^2}{1+m^2}} \tag{6.3.2}$$

この時、 n は Y 切片： $n = y_1 + mx_1$ 、 m は直線の傾き： $m = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}$ である。

式(6.3.2)より求めた S_m 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 シミュレーション結果

6.4.1 脚接地による安定余裕の確保

第 5 章で, 歩行中にロボットの重心位置に位置指令型インピーダンス制御を行うと, 三脚支持期の時に安定余裕が非常に小さくなってしまいうために重心位置を変動させられる領域を確保できないという問題点があることを述べた。そのために, 力が加わったら脚を地面に接地させ, 安定余裕を大きくして, 重心位置を変動させる領域を確保したことをシミュレーション結果によって以下に示す。

歩行中にロボットの重心位置をインピーダンス制御した場合を図 6.4.1(a)に示す。図は横軸が時間, 縦軸が安定余裕 S_m , 重心移動量 C_g , 重心位置にかかった力 F を示している。

図 6.4.1(a)より, 力が加わった際に重心が動くために安定余裕が小さくなり, 重心位置を変動させる領域が確保できていないことがわかる。そのために力が加わった時に遊脚中の脚を地面に接地させて, 安定余裕を大きくした。その結果を図 6.4.1(b)に示す。

遊脚中の脚を地面に接地させることで, インピーダンス制御で重心位置を変動させる領域を確保できることがわかった。

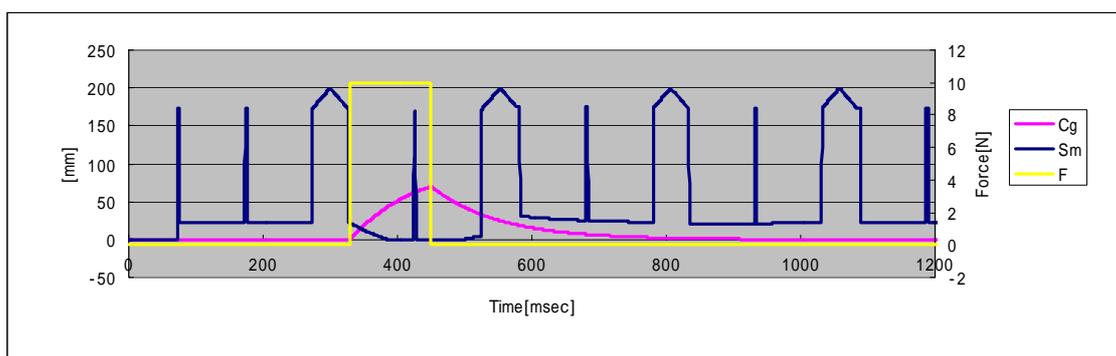


図 6.4.1(a) 歩行中の安定余裕

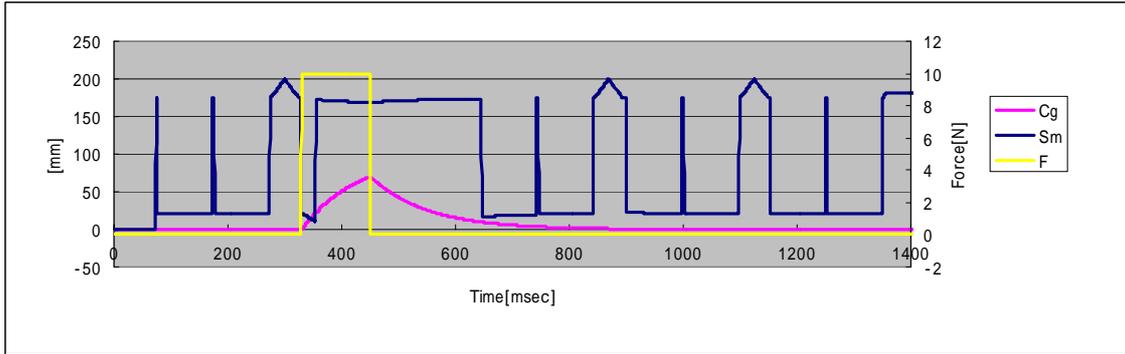


図 6.4.1(b) 脚接地による安定余裕

6.5 位置指令型インピーダンス制御による重心移動量

図 6.5.1~図 6.5.3 に力Fを加えた時のX, Y, Z方向それぞれの重心移動量Cgを示す。重心位置を位置指令型インピーダンス制御で制御することで、図に示すような重心の変動を行うことができた。

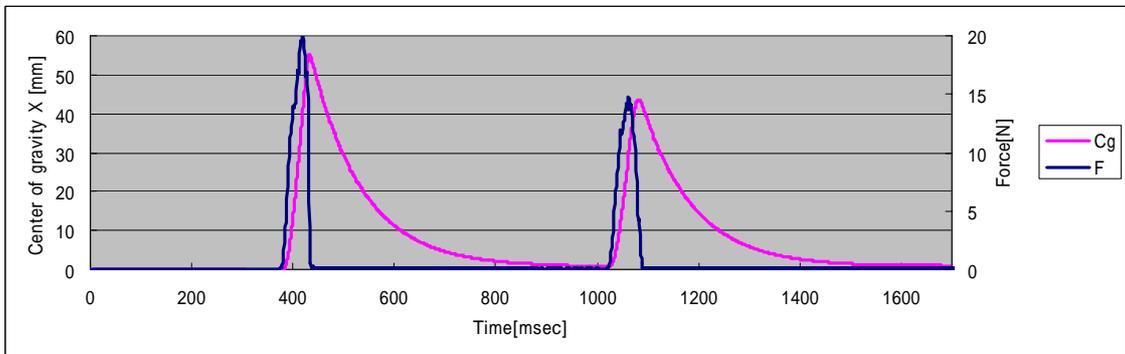


図 6.5.1 X方向の重心移動量

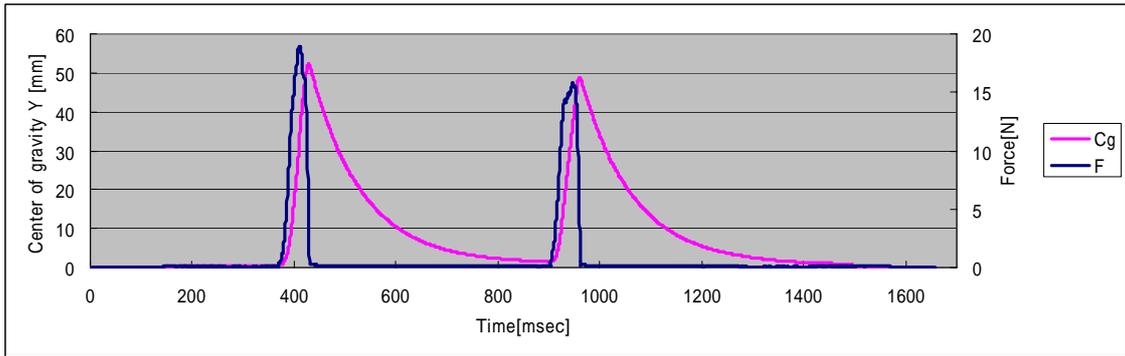


図 6.5.2 Y方向の重心移動量

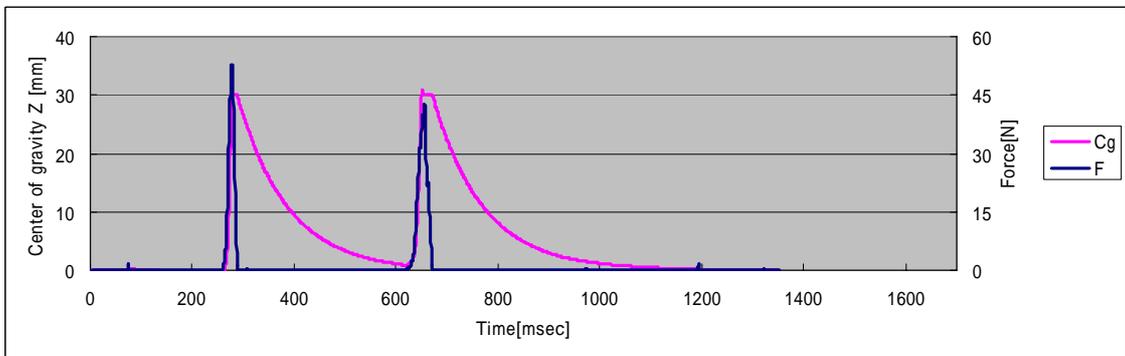


図 6.5.3 Z方向の重心移動量

第7章 考察

安定余裕を確保するために脚を接地させて四脚支持にする手段をとったがシミュレーション結果からも安定余裕をかなり大きく増大させることがわかり，接触に対する対応として有効な手段だと考えられる．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，接触による力に対し，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，ロボットの応答精度によって接触に対する効果が変わってくるが，応答精度が良いほど有効な制御だと考えられる．

しかし，ロボットの機構上，重心移動には限界があるため，ある程度大きな力が加わる場合は重心移動だけでは対処するのは困難なため，歩容と組み合わせた安定余裕の確保の手段が必要であると考えられる．

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，安定余裕以上移動させることが可能である．したがって，この安定余裕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し，重心移動可能な領域を多くとることができると考えられる．

第8章 結言

シミュレーションによって，力が加わった時に安定余裕を確保することで重心位置を変動させる領域を確保し，四足歩行ロボットの本体重心位置を位置指令型インピーダンス制御で制御することが可能であることがわかった．今後の課題として，安定余裕の確保動作の時の脚の接地位置を検討し，その後歩行を継続するための脚の復帰動作をどうするかを考える必要がある．

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，高知工科大学 甲斐義弘助手には研究に対する貴重なご意見と助言を賜りました．ここに深く感謝の意を表します．また，本研究を行うに伴いご助言，ご指導をいただきました知能機械力学研究室大学院生，大田大氏に深く感謝致します．そして本論文をまとめるにあたり，適切にご助言をいただきました知能機械力学研究室大学院生，森井康友氏に深く感謝致します．最後に知能機械力学研究室の皆様へ，この場を借りて厚くお礼を申し上げます．

参考文献

- (1) 広瀬, 米田, 塚越, “ 四足歩行機械の間歇クローリング歩容の提案 ” 日本ロボット学会第 13 回学術講演会予稿集, p225-226, 1995
- (2) 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, p1191-1197, 1999
- (3) 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, p1076-1082, 1998
- (4) 安達, “ 4 脚移動ロボットの歩容制御に関する研究 ” 機械技術研究所報告, No.184, 2000