

2足歩行ロボットの制御

木下, 哲郎 / KINOSHIA, Tetsuo

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010328>

2 足歩行ロボットの歩行制御

WALKING CONTROL OF A TWO-LEGGED ROBOT

木下 哲郎

Tetsuo KINOSHITA

指導教員 渡邊 嘉二郎

法政大学大学院理工学研究科システム工学専攻修士課程

This paper describes walking control of biped robot. Most of conventional two-legged robots are driven using some actuators such as servomotors to each joint. In contrast, in late years a passive walking is noted by researchers. Existing studies of passive-walking are summarizing Dynamics well. However, these studies have not mentioned that based on a human walking. Here, I generate the walk form of the robot based on a human walk in a robot having flexibility and the actuator which are near to a human being in this study.

Key Words : Two-legged robot

1. はじめに

従来の 2 足歩行ロボットの多くは各関節にサーボモーターなどのアクチュエータを用いて駆動し、関節角度の目標軌道に沿って追従するように角度を指定することで歩行を実現している。こういった従来の歩行制御理論では、ロバスト性に優れ安定した歩行を実現できる一方で、エネルギー効率が悪いことや、ロボットの持つ動特性を活かしきれていないという指摘も多い。

これらの問題に対し、従来手法の対極のアプローチとして、身体機構の動特性を利用した受動歩行が注目されている。受動歩行ではアクチュエータを用いないためにエネルギー効率に優れ、機構をうまく工夫することで従来の角度制御によるロボットよりも、生物に近い自然な歩行を実現できる。

近年、フルアクチュエートの 2 足歩行ロボットにおいて、より人間の身体構造を模擬したロボットを用いて人間らしい自然な歩行を目指した研究例や、受動歩行の原理を導入し、より自然な歩容で高エネルギー効率の歩行制御について多く論じられるようになった。特に早稲田大学の WABIAN は、人間の身体構造をより正確に再現し、骨盤の動作を取り入れるなどして従来のロボットでは実現されていなかった膝伸展状態での歩行を実現[5]し、万博などで従来の歩行方法に比べてエネルギー効率に優れていることを示してきた。また、浅野文彦氏らなどによってフルアクチュエートのロボットに対する受動歩行理論の適用法について明らかにされてきている[6]。これらの研究が示すとおり、現在ヒューマノイドロボットにおける歩行の研究はより人間らしい動きや高効率を求

める方向にある。

しかし、受動歩行に関する理論では歩行時の動力学について統一的な体系が整備されているものの、適切な入力トルクや機構設計など、フルアクチュエートロボットにおいて実現の容易でない部分が多い。また適切な初期条件についてよく述べられるが、人間の歩行のように直立静止時から歩行を開始することに関してはこれまでの研究では言及されていない。加えて、早稲田大学の WABIAN の研究が示してきたような、腰の旋回運動による歩行についてはこれまでの受動歩行理論では考えられていない。

また、これまでの研究で扱われてきたヒューマノイドロボットは人間大の大型、またトルクを直接入力として扱える高性能なアクチュエータを利用してきた。近年 2 足歩行ロボットは、学生サークルや個人でも、研究はもちろん趣味の一環として楽しむ方々が増えてきているが、こういった場で扱われているロボットは 40~50cm 程度の小型の物が多く、使用されるサーボモーターはトルクを直接に制御入力として扱えない物が多い。

そこで、本論文ではフルアクチュエートのヒューマノイドロボットに関するこれまでの理論を拡充する意味も兼ねて、小型ロボットやトルクを入力として扱えないアクチュエータを用いることを仮定する。また、直立状態からの歩行や、腰旋回運動を内包した歩行について考えていき、より人間らしい歩行の実現を目指す。この点を踏まえ、本論文ではモデルの設定についてはこれまでの研究とは違った形として考える。これについては後述していく。

2. 人間の歩行を基にした歩行計画

人間の歩行形態をある瞬間ごとに抜き出して感覚的に考えていく。前進運動において、側面から見た簡単な2次元で考えていく。また、上体の運動については考えず、下半身の運動のみを考えていく。直立状態から歩行を開始し、3歩目以降は左右の脚が切り替わるのみで、その運動は周期的になると判断し、2歩目までの歩行パターンを考える。

(1) 歩行第1ステップ

第1ステップは、初期状態から遊脚を振り出す運動である。単純に足を振り上げるだけでなく、股関節の旋回運動によって腰部を前方に押し出していく。また、遊脚を振り上げる初期運動では床面との接触を防ぐために、膝が曲がるように動作する。これらの運動によって身体全体がつま先を支点に前方に転倒運動を開始する。

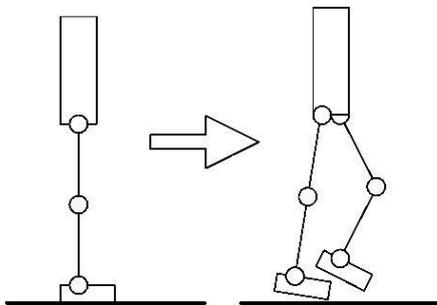


Fig.1 歩行第1ステップ

(2) 歩行第2ステップ

第2ステップでは、第1ステップの運動から継続して腰を旋回させ、遊脚膝を伸ばしつつ、転倒運動によって踵での接地に至る運動である。接地時の脚部は2等辺三角形を形成するとよく言われる。

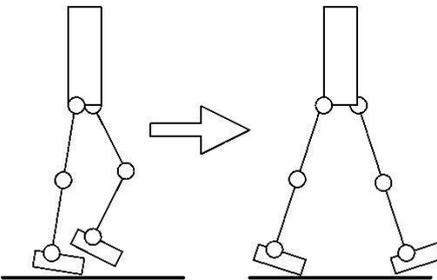


Fig.2 歩行第2ステップ

(3) 歩行第3ステップ

第3ステップは、接地時の慣性力による前方への転倒運動と、股関節の角度を初期状態に戻すことで脚の入れ替えを行う。この時第2ステップまでの支持脚（後脚）は遊脚相に遷移し、床面との接触を防ぐために膝関節を曲げるように動作する。

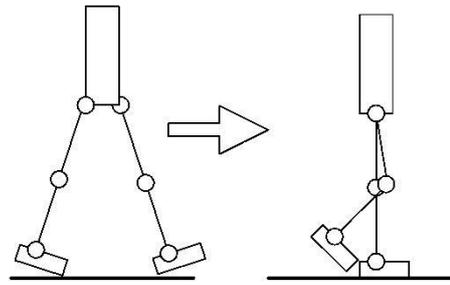


Fig.3 歩行第3ステップ

これ以降の歩行は、第1～3ステップにおいて左右の脚を入れ替えた運動となる。この歩行計画を基に、各関節の角度をそれぞれのステップごとに考えていく。

3. ロボットモデルと運動方程式

3. 1. ロボットモデル

ロボットの簡易的なモデルを用いて運動時における運動方程式や各パラメータについて考えていく。本論文では Fig.4, Fig.5 に示すようなフルアクチュエートの膝付2足歩行ロボットモデルを用いる。

Fig.4 は側面から見た図(x-z 平面)であり、Fig.5 は鉛直上方向から見た図(x-y 平面)である。

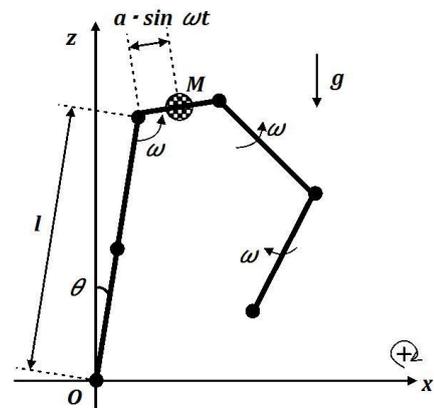


Fig.4 ロボットモデル(x-z 平面)

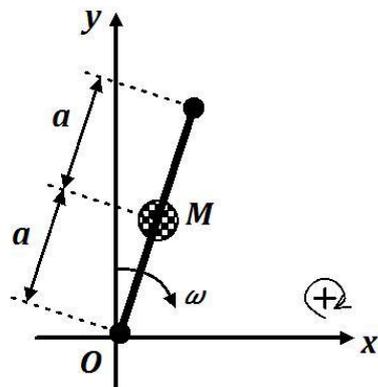


Fig.5 ロボットモデル(x-y 平面)

各パラメータに関して、本論文では特殊な部分もあるため、その詳細を以下にまとめる。

(1) 座標系

まず、座標系において原点 O は支持脚足先の点とする。前進方向を x 軸、左右方向を y 軸、鉛直方向を z 軸として考え、回転方向については時計回りに $+$ 方向とし、 z 軸・ y 軸からの相対角度を取るものとする。

(2) 重心

本論文では、腰運動による初期値の獲得や、大きさの異なる多様なロボットにおいて、その動作を広く考察するため、各リンクやアクチュエータの質量については考えない。つまり、ロボットの全質量は腰に集約され、ロボットの姿勢変化には影響されないものとする。

これは一般的に Simplest Walking Model と呼ばれるモデルの考え方であり、本論文においてのモデルはこれに腰の運動を追加したものである。

このことによって、膝の屈曲などの遊脚の運動は考えることがないが、Fig.4 のモデルでは便宜的に膝の動作についても考えている。

(3) リンク長

膝伸展状態における腰から足先までの長さを l とし、左右の脚で同じ長さとする。また股関節から膝、膝から足先までの長さは同一であるとする。

また腰部中心から股関節までの長さを a とし、これもまた左右同じ長さで対称とする。

(4) 角速度

関節の角速度について本論文ではこれまでの論文と違い、各関節アクチュエータは一定の角速度で動作するものとする。これは、一般的にサーボモーターに一定電圧をかけた場合、瞬間的に高いトルクが発生し、ごく短い時間で角速度が一定の速度に収束することを考慮してのことである。

これは特に小型のロボットに用いられるような、トルクを直接に入力として扱えないサーボモーターを使用することを意識してのものである。

また、膝は屈伸時の動作遅れを考慮して、他のモーターの 2 倍の角速度で動作するものとする。

(5) 足裏

実際のロボットにおいて足裏の形状は直立静止を考慮して平面足を用いるが、本論文のロボットモデルでは足裏については簡単に点接地として扱い、明確なモデル化はしない。ただし、腰を回転させる動作や足を振り上げる動作によって発生する鉛直軸周りのモーメントは考慮しないものとする。

3. 2. 運動方程式

各関節の動作は角速度一定とすると、各関節の出力トルクや負荷については考える必要がなくなる。そのため、転倒角度に関する運動方程式を導出できれば、ある遷移時間で目標状態に到達するための各関節角速度の決定に役立てることができる。

以上の設定を基に、Fig.4 に示すモデルの転倒角度に関する運動方程式を導出すると次式のようなになる。

$$\begin{aligned} & \{l^2 + (a^2 + 2al) \sin^2 \omega t\} \ddot{\theta} \\ & - \{(a^2 + 2al) \sin 2\omega t\} \omega^2 \\ & + \{(a^2 + 2al) \sin 2\omega t\} \dot{\theta} \omega \\ & - \{l \sin \theta + a \sin \omega t \cos(\omega t - \theta)\} g \\ = & 0 \end{aligned} \quad (1)$$

3. 3. 衝突方程式

遊脚が接地する瞬間では Fig.6 のように、左右の脚が鉛直方向に対してなす角度は向きが逆で大きさが等しくなり、腰が地面に水平で重心を中心に姿勢が対称となるものとする。これは、一般的には脚部が 2 等辺三角形を形成すると言われていることによる。

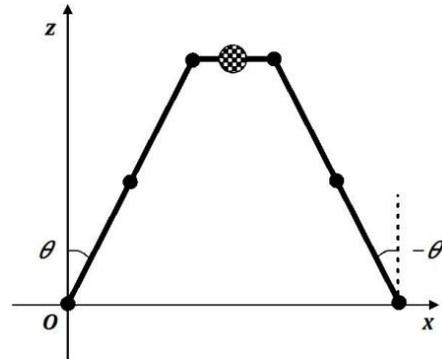


Fig.6 接地時のロボットモデル

接地時に z 軸と支持脚が成す角度 θ は時間 t をかけて転倒した角度（以後、転倒角度と呼称する）であり、股関節の角度に関しては一定の角速度 ω で時間 t だけ動作させた角度（以後、関節角度）である。

以上を踏まえると、接地時の角度と股関節の角度には以下の関係が成り立つ。

$$\omega t - \theta = 0$$

次に、遊脚と床面との衝突は完全非弾性衝突を仮定すると、角運動量保存則より接地時の重心の角速度 $\dot{\theta}^+$ と、衝突直後の角速度 $\dot{\theta}^-$ には以下の関係式が成り立つ。

$$\dot{\theta}^- = \frac{l^2 \cos 2\theta - 2al \sin^2 \theta - a^2 \sin^2 \theta}{l^2 + 2al \sin^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta} \dot{\theta}^+ \quad (2)$$

3. 4. ロボットへの指定角度の考え方

歩行を開始してからある時間 t で Fig.6 の状態に至るものとし、歩行開始から膝を曲げつつ脚を振り上げた状態までその半分の時間で到達するとすれば、動作開始後に膝と股関節に入力すべき角度を ϕ とすれば、以下のようなになる。ただし、前述したとおり、膝関節は他の関節の2倍の速度で動作するものとする。

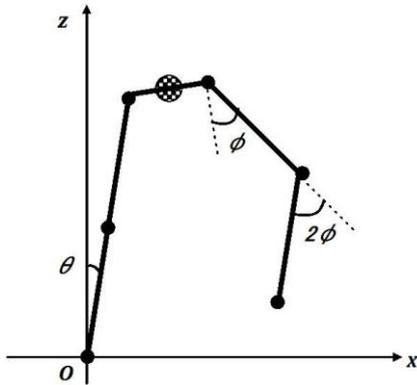


Fig.7 脚振り上げ時の指定角度

$$\phi = \frac{1}{2} \omega t$$

また、脚切り替えの後に転倒角度が0となる時の遊脚膝関節は、地面との接触を防ぐためにも曲げておく必要がある。これも同様の考え方で、接地時の転倒角度の2倍を指定してやれば良いこととなる。

4. 数値シミュレーション

4. 1. モデルの設定

本論文の数値シミュレーションにおけるロボットモデルの各パラメータは、Fig.8 に示す実際の小型ロボットにおいて実現することを念頭に置いて設定する。



Fig.8 使用するロボット

Fig.8 のロボットにおいて、直立時の脚長 l は 20[cm],

腰から股関節までの距離 a は 5[cm]である。数値シミュレーションにはこの数値を用いる。

またサーボモーターは近藤科学社製 KRS-4034 を使用しており、仕様では最大 0.16[sec/60°] (6.545[rad/s]) で動作できる。

初期姿勢は各関節角度と転倒角度が 0[rad]の直立静止状態とする。

4. 2. 一定の角速度でのシミュレーション結果

モーターに一定の角速度を入力して常に動作させるものとし、角速度を変化させた時の系の振る舞いについて調べた。

この時、接地して支持脚が入れ替わった後に鉛直軸と支持脚のなす角度 θ が 0[rad]を乗り越え 2 歩目に至ることができた条件としては、

$$\omega \leq 0.625 \text{ [rad/s]}$$

であった。

$\omega = 0.5 \text{ [rad/s]}$ の時の一歩目のシミュレーション結果を以下に示す。

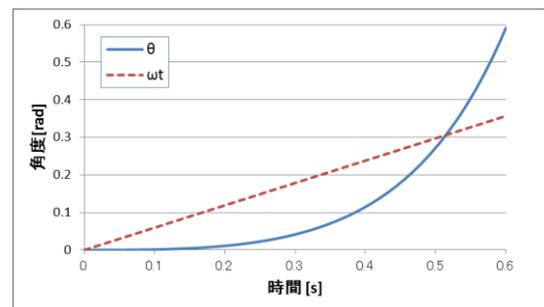


Fig.9 動作開始から接地までの角度

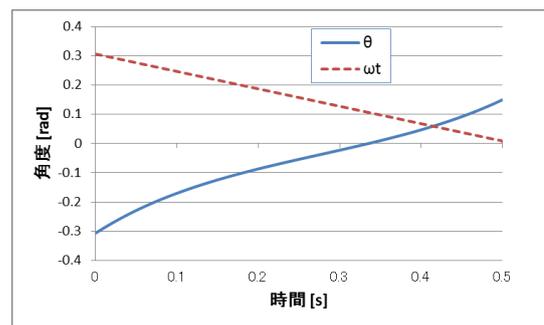


Fig.10 脚切り替え後の角度

Fig.9 は動作開始後の転倒角度 θ と関節角度 ωt の関係を表したグラフである。グラフ中で転倒角度と関節角度が交差する点が接地の瞬間であり、その時間は 0.5135[s]であった。

次に、Fig.10 は接地後脚切り替えをした後の転倒角度と関節角度の関係を表したグラフである。

Fig.10 を見ると、関節角度 ωt が 0 になる（腰関節が元の姿勢に戻る）よりも先に転倒角度 θ が 0 となっている。

そのため、関節角度が 0 になる頃にはすでに転倒運動が始まっており、腰を前に出す、あるいは足を振り上げる前に、そのまま転倒してしまう。よって、2 歩目以降の歩行は不成立となる。

また、関節角速度を限界である $0.625[\text{rad/s}]$ に変化させると、2 歩目の接地に至るが、その後後方に転倒し、2 歩目以降が不成立となる結果に変わりはなかった。その様子を Fig.11 に示す。

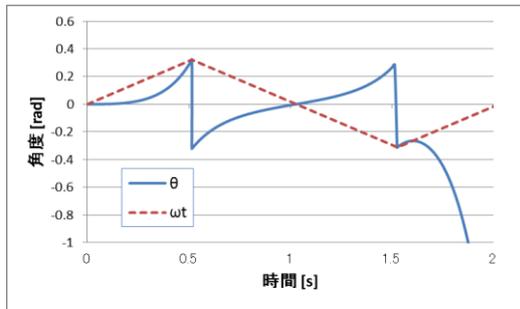


Fig.11 $\omega = 0.625[\text{rad/s}]$ での振る舞い

以上より、(1)式・(2)式で表されるロボットモデルは常に一定の関節角速度を入力した場合には、安定した歩容を獲得するに至らなかった。

4. 3. 動作停止時間の導入

前項に示した通り、一定の角速度を入力し続けた場合では歩行が不成立となる。

そこで、モーターに対して指定角度をあらかじめ設定しておき、短い時間でその角度に到達できる角速度を入力し、指定角度に到達したところで動作を停止することで、ロボットの動作に時間的余裕を与えてやった場合を検証した。

関節の目標角度は 15° ($0.2618[\text{rad}]$) とし、角速度は $2.618[\text{rad/s}]$ 、つまり $0.1[\text{s}]$ で目標角度に到達して動作を停止するものとする。

角速度を入力するタイミングとしては、動作開始直後と接地の瞬間、そして脚切り替えの後に転倒角度が 0 となる瞬間とする。

一歩目のシミュレーション結果を以下に示す。

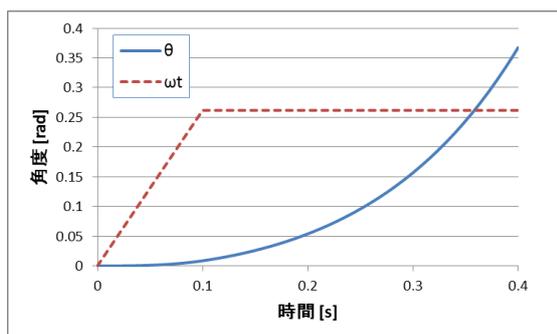


Fig.12 動作開始から接地までの角度

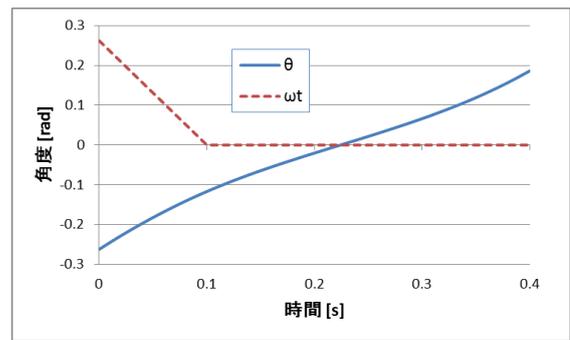


Fig.13 脚切り替え後の角度

前項と同様に、Fig.11 は接地まで、Fig.12 は接地して脚切り替えが起こった後の角度関係を表したグラフである。

Fig.12 を見ると、動作開始から $0.1[\text{s}]$ でモーターを停止させたことによって、常に一定の角速度を入力した場合に比べ、脚切り替え後に転倒角度が 0 になるより前に関節角度が 0 になっており、次の一歩までに時間的余裕が生まれている。

次に、前述した角速度の入力タイミングで歩数を重ねた場合にどうなるかを検証した。3 歩目までの関節角度、転倒角度と時間の関係を Fig.14 に示す。

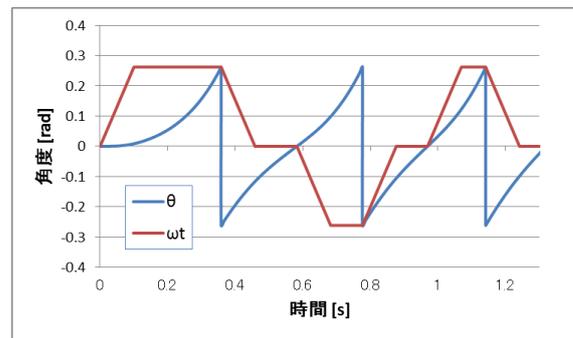


Fig.14 動作停止時間を導入した歩容

また歩数と系全体の角速度 $\dot{\theta}$ の関係を Fig.15 に、歩数と歩行周期の関係を Fig.16 に示す。ただし、角速度 $\dot{\theta}$ は転倒角度 $\theta = 0$ の時のものを、歩行周期は転倒角度 $\theta = 0$ に至るまでの時間として、15 歩目までを計測した。

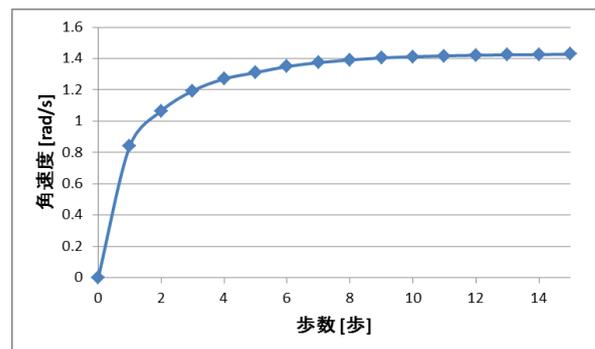


Fig.15 歩数と転倒角速度 $\dot{\theta}$ の関係

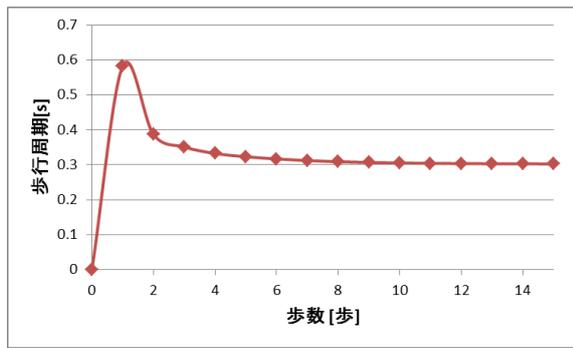


Fig.16 歩数と歩行周期の関係

Fig.14 を見ると、問題となっていた 3 歩目も乗り越え、グラフにはないが、これ以降も歩行が継続できる結果となった。

また、Fig.15 を見ると、歩数が進むごとに転倒角度 $\theta = 0$ における角速度 $\dot{\theta}$ が収束していくことが見て取れる。また、Fig.16 を見ると歩行周期も同様に収束していく様子が見て取れる。

そのため、今回用いた関節角速度の数値においては歩数が進めば安定した歩行へと収束すると言うことができる。

実際のロボットにおいては、入力角度・角速度のほか、動作開始・停止の時間をセンサ等によって獲得するか、適切に設定してやれば安定して歩行することができると考えられる。

5. おわりに

本論文では、これまで積極的に扱われてこなかった、トルクを入力として扱えないモーターを用いた小型のロボットを用いて、受動歩行理論を基にした歩行形態について考察した。特に、腰の旋回運動や直立時から歩行を開始するという条件を取り入れて、より人間に近い歩行形態に近づけることを目的として研究した。その上で、入力として関節のモーター角速度を使用し、これまでの理論をより感覚的に捉えてその動作を数値シミュレーションから考察した。

結果を見ると、常に角速度を入力した場合には歩容生成に至らなかったが、動作停止時間を導入することで、歩容が安定することが確認できた。これは、フルアクチュエートロボットの利点や特性が、その動作を任意に変化させることができる点にあると考えれば、トルクを入力として扱えないロボットでも、受動歩行理論に基づいて安定した歩行パターンの生成が可能であると考えられるに十分な結果であると言える。

しかしながら、本論文では腰の動作を取り入れはしたものの、運動方程式など、その動作の考察に関しては横方向から見た 2 次元動作であり、横方向に関しての動作については考えられていない。また、これまでの理論と同様にモデルパラメータの捉え方に拘束条件が多く、多少強引に映る点も多い。

加えて、結果に関しては、歩容生成に至る入力角速度やその動作時間の関係についての考察は不十分であると言わざるをえず、最適な入力角速度についてより理論的な考察が必要であると考えられる。

一方で本論文は、これまでの理論をより現実的・一般的な形で取扱い、個人が趣味で扱うような、安価なサーボモーターを用いた小型ロボットの動作をより理論的に考察した物である。これは、2 足歩行ロボットのホビーやエンターテインメントとしての側面をより奥深くし、価値を高めることにつながると考えられる。

まだまだ検証・考察していかなくてはならない問題点も多いが、本論文が 2 足歩行ロボットの研究に従事する方々の一助になれば幸いである。以上をもって本論文のむすびとする。

謝辞：本論文を執筆するにあたり、適切なご指導、研究環境を用意して下さった渡邊嘉二郎教授、そして豊かな学生生活を送らせてくれた母に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 梶田 秀司：ヒューマノイドロボット，オーム社，2005
- [2] 高野 政晴：詳説 ロボットの運動学，オーム社，2004
- [3] 吉川 恒夫：ロボット制御基礎論，コロナ社，1988
- [4] 広瀬 茂男：ロボット工学 一機械システムのベクトル解析一，裳華房，1987
- [5] 小椋 優，相川 弘行，日比野 真也：ヒトの歩行を模擬できる股関節・骨盤メカニズムを有する 2 足歩行ロボットの開発，日本機械学会，No.03-28，第 3 回福祉工学シンポジウム講演論文集，p.p.89-92，2003
- [6] 浅野 文彦，羅 志偉，山北 昌毅：受動歩行を規範とした 2 足ロボットの歩容生成と制御，日本ロボット学会，Vol. 22, No. 1, p.p. 130-134，2004
- [7] 浅野 文彦，羅 志偉：股関節二分機構を用いて上体を付加した劣駆動 2 脚ロボットの動歩行解析，日本ロボット学会，Vol. 26, No. 8, p.p. 932-943，2008
- [8] 蜂谷 正泰，鈴木 聡一郎：周期入力による二足準受動歩行ロボットの安定化制御，バイオメカニズム学会，Vol. 33, No.1, p.p. 57-63，2009
- [9] 池俣 吉人，佐野 明人，藤本 英雄：受動歩行における平衡点の安定メカニズムの構造，日本ロボット学会，Vol. 23, No.7, p.p. 839-846，2005