

氏名	平木 雅彦		
授与学位	博士（工学）		
学位授与年月日	平成8年3月26日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）精密工学専攻		
学位論文題目	パラレルクランクスライダ機構を用いた4脚ロボットの トロット歩行に関する研究		
指導教官	東北大学教授 江村 超		
論文審査委員	東北大学教授 江村 超	東北大学教授 箱守京次郎	
	東北大学教授 中野 栄二		

論文内容要旨

不整地への適合度が高い移動機構として、脚を用いたものの研究が多くなされている。阪神大震災のような災害時に瓦礫の上を移動したり、山間部における道路、鉄道工事のような場所での作業など、脚を利用した移動機構の研究成果が期待される場合が多い。そのため、最近では作業と移動を融合した作業移動型ロボットの研究が始まっている。また、脚を用いた移動機構は不整地歩行の目的の他に、動物の歩行のしくみの解明などの点からも研究がなされている。

トロット歩行とは4脚ロボットの対角線上にある前後脚が同時に接地または離地する歩容で、対角の2脚で胴体を支持している状態は倒立振り子と同様に非常に不安定なものとなる。しかし、歩行周期を短くすることにより、歩行の安定性を確保できることが知られている。一方、動物の歩行を観察すると、歩行周期は比較的長く、ゆったりとした歩容をとっていることが分かる。

脚を速く動かすには多くのエネルギーを必要とし、4脚ロボットを移動機械として考えた場合、移動に要するエネルギーは自動車の燃費に相当するため、ロボットを使用する際の経済性に関わってくる。さらに歩行ロボットは、床面に固定されて使用されることが多い工業用のマニピュレータと異なり、外部から継続的にエネルギーを供給することはできない。したがって、歩行ロボットにおいて消費エネルギーを少なくすることは、作業範囲、作業時間の拡大につながることから、歩行時の消費エネルギーについて考える必要がある。

そこで、本論文では歩行時の消費エネルギーの観点から歩行周期について考察し、さらにトロット歩行において、動物のように歩行周期が長い場合の制御手法について論じた。

第1章 緒論

本章では、研究の背景と目的、および各章における研究の内容について述べた。

第2章 実験装置

本章では、実験装置について述べた。図1に示した4脚ロボット実験シス



図1 4脚ロボット実験システム外観

テムは、4脚ロボット本体の他に、4脚ロボットの駆動・各種状態量の処理を行うコントローラ、4脚ロボットの制御を行うコンピュータから構成されている。

この4脚ロボットの特徴は、なめらかな歩行を実現するために各関節はBack-drivabilityを持つように設計されており、股関節にはボールねじを用いたパラレルクランクスライダ機構、膝関節には通常のクランクスライダ機構が用いられている点である。

第3章 関節機構

本章では、本論文で対象とした4脚ロボットの股関節に用いられている関節機構について述べた。図2に示したパラレルクランクスライダ機構は、2組のクランクスライダ機構から構成される2自由度のパラレル機構であり、動物の関節駆動方法に類似していること、剛性の高いコンパクトな構造にすることができることなどの特徴がある。ただし、左右のモータの回転角と、関節の回転角との関係を表す運動学は複雑になる。

逆運動学は容易に計算することができるが、順運動学は非線形連立方程式を解かなければならないため、順運動学を解析的に解くのは困難となる。そこで、逐次代入法と呼ばれる数値計算法に対して新たな漸化式を導入し収束度の向上をはかり、この結果をもとに補間演算を行うことで計算速度の高速化を実現した。さらに、変換誤差が発生する要因の一つとして、組み立て誤差を生じやすい機構部品と運動学の計算誤差との関係を明らかにした。また、本機構の特異点の解析を行い、本機構の可動範囲内には特異点が存在しないことを明らかにした。

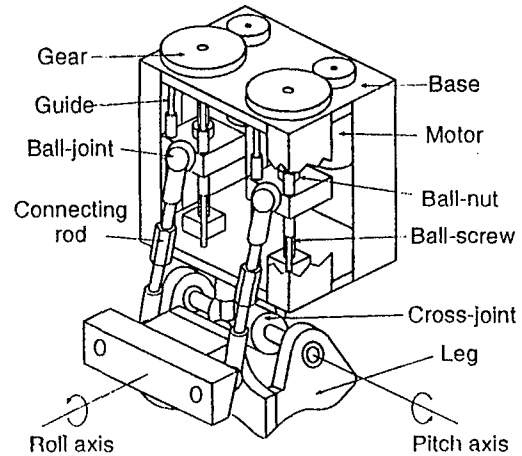


図2 パラレルクランクスライダ機構

第4章 消費エネルギー

本章では、トロッツ歩行を行う4脚ロボットの歩行周期、歩行速度、脚軌道と消費エネルギーの関係について述べた。最初に述べたような理由で、歩行ロボットにおける消費エネルギーの研究がなされており、消費エネルギーを低減する方法がいくつか提案されている。また、動物も歩行速度に応じて歩容を変えることにより、エネルギーを消費しないように移動していることが知られている。

歩行ロボットが消費するエネルギーとして、力学系に与えられる運動エネルギーとモータで発生するジュール熱とを考え、移動体のエネルギー効率の評価基準としてG.Gabrielliらによって提唱された移動仕事率 ϵ を用いた。実際のロボットは12自由度を有するが、解析を容易にするため、膝関節を持たない脚と胴体からなる平面5リンクの簡易モデルを用いて運動方程式を導出した。支持脚、遊脚の脚運びは、それぞれの股関節角を時間の関数として与えることにした。そのときのパラメータとして、胴体の平均速度 \bar{v} 、歩行周期 T_0 、脚切り換え時の関節角速度 ω_0 の3つを用いた。

実際の4脚ロボットのパラメータを用いて、平均歩行速度 \bar{v} に対する最小の移動仕事率 ϵ を計算した結果を図3(a)に示す。(b)、(c)は、そのときの歩行周期 T_0 、脚切り換え時の関節角速度 ω_0 を表している。これより、歩行速度が増すと移動仕事率も増加すること、歩行速度が小さい時には歩行周期を長くした方が良く、脚切り換え時における遊脚のかき込み、支持脚の蹴りだしが移動仕事率の低下に大きく関わることを結論として得た。

一方、馬の脚軌道を観測し、動物も接地時に

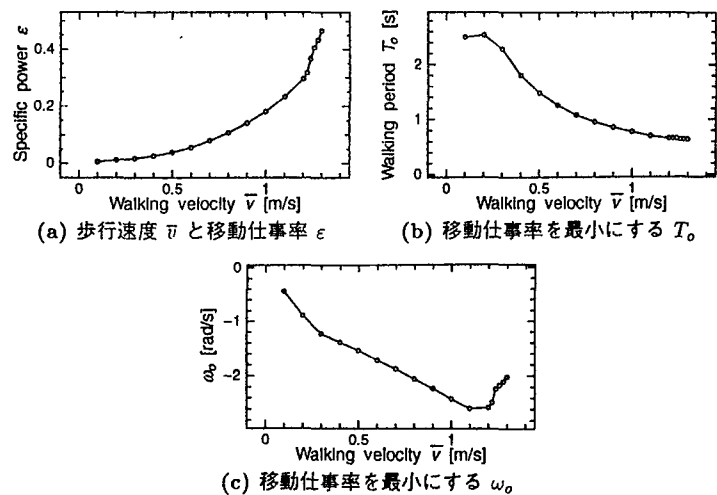


図3 歩行速度と移動仕事率の関係

脚のかき込み、離地時に脚の蹴りだしを行っていることを明らかにした。

第5章 反動車型倒立振子の制御

本章では、 Trot 歩行を行う 4 脚ロボットを反動車型倒立振子とみなした場合の倒立振子の制御について述べた。前章では、極端に歩行周期を長くすることを除けば、同じ歩行速度に対して周期の長い歩行の方が消費エネルギーの点で有利であるという結論を得た。しかし、Trot 歩行において歩行周期を長くすることは、対角の 2 脚で支持する期間を長くすることと等価であり、安定に歩行を行うためには胴体の姿勢制御が必要となる。そこで江村は、この状態にある 4 脚ロボットの胴体と遊脚を反動車、前後の支持脚を振子とみなし、反動車モデルとして胴体の姿勢の安定化をはかることを提案した。したがって、歩行の長周期化の問題は反動車の姿勢を検出し倒立振子を安定に立たせる問題に帰着することになる。

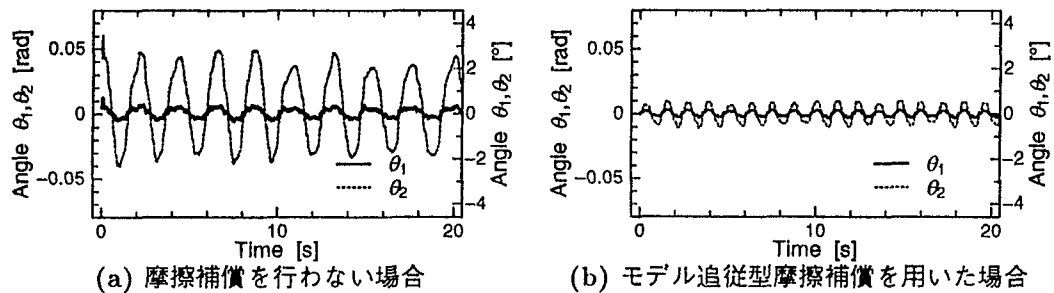


図4 反動車型倒立振子の制御の結果(1)

実際の倒立振子を状態フィードバックで制御した場合の実験結果を図 4 (a) に示す。反動車、振子ともに周期の長い振動が起こっており、シミュレーションの結果、この周期の長い揺動は摩擦の影響によるものと推測された。そこで江村は、理想的な倒立振子モデルに実際の倒立振子を追従させるような制御を状態フィードバック制御に加えることで摩擦補償を行うことを提案した。このモデル追従型摩擦補償法を用いて倒立振子の制御実験を行った結果を図 4 (b) に示す。摩擦補償を行わない場合と比べて、振幅は小さくなっており、この摩擦補償法の有効性が示された。

以上の実験において、反動車の姿勢角すなわち水平面からの絶対角は、反動車に取り付けられた振動型レートジャイロの出力値を積分することにより求めた。このとき問題となるのが、ジャイロのゼロリフトによる積分値のずれである。そこで、傾斜角センサを用いて重力がはたらく方向を検出することで、ジャイロの積分値のずれを補償することにした。傾斜角センサは絶対角度の平均的な値を検出するために用いるため、高い応答周波数は要求されない。そこで、線加速度の影響をなくすために、センサ内部のシリコンオイルを高粘度のもの (1000 cSt) に交換し、カットオフ周波数が 0.1Hz のローパスフィルタをセンサの出力に通している。

以上のジャイロのドリフト補償法とモデル追従型摩擦補償法を用いて、反動車型倒立振子の倒立実験を行った結果を図 5 に示す。ドリフト補償を行わない場合、反動車と振子の相対角 θ_2 が、20 秒間で約 0.03rad ほどドリフトしているが、ドリフト補償を行ったところ、ジャイロ積分によるドリフトが除去されており、傾斜角センサを用いたジャイロのドリフト補償法の有効性が示された。

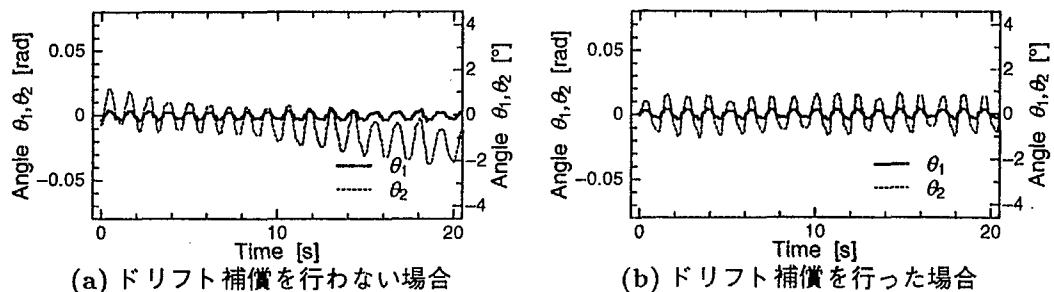


図5 反動車型倒立振子の制御の結果(2)

第6章 4脚ロボットの歩行実験

本章では、トロット歩行において4脚ロボットの胴体の姿勢制御を行った実験について述べた。

まず、歩行周期と歩行の安定性との関係を実験により調べ、胴体の姿勢制御を行わない場合に歩行周期を長くすると非常に不安定になることを確認した。

次に、4脚ロボットを完全に反動車型倒立振子モデルとみなせるようにモデル化制御を行った状態で歩行実験を行ったところ、姿勢制御を行った場合でも胴体角の揺動が大きく、安定な歩行は困難であった。そこで、脚に対して胴体が揺動しないように、対角軸まわり、すなわち反動車の回転軸まわりに対してもあらかじめ位置制御を行い、姿勢制御をそれに付加する方法をとったところ、この方法でも状態フィードバック係数を調整することで倒立振子の安定化が行えることがシミュレーションにより分かった。このことは4脚ロボットの制御において、まず脚軌道を位置制御により決定しておいて、その上で胴体の姿勢制御を行うことに相当する。

歩行周期 $T_0=1.5\text{ s}$ でトロット歩行を行った場合の実験結果を図6に示す。接地スイッチの状態は上側が遊脚相、下側が支持脚相である。このとき胴体の姿勢制御は行っていないため、胴体のロール角は激しく変動し、手を添えてやらないと歩行を続けることは不可能であった。これは4脚支持相が存在するため、計画した支持脚と遊脚の脚軌道の間で矛盾が生じ、4脚支持相から2脚支持相に遷移する際の胴体の初期角度に影響し、その後の姿勢制御が困難となるためである。そこで、4脚支持相の存在を考慮して、脚軌道を計画し直した。

脚軌道を修正し、図6と同じ条件で胴体の姿勢制御を行った場合の実験結果を図7に示す。胴体のロール角は図6と比較して、振幅はそれほど大きくなく安定に制御されていることが分かる。また、接地スイッチの状態を見ても脚1(右前)と脚4(左後)、脚2(左前)と脚3(右後)のそれぞれ対角線上にある脚が交互に支持脚と遊脚になっていることが分かる。また、目標とするデューティ比を0.5よりも少しだけ大きくして4脚支持相を明示的に設定した場合、歩行周期 $T_0=2.0\text{ s}$ でも歩行することが可能であった。

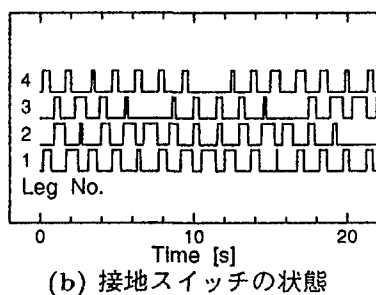
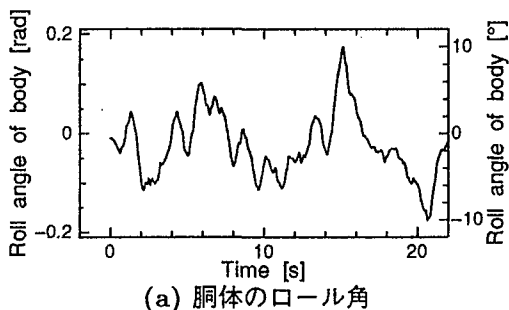


図6 胴体の姿勢制御を行わない場合

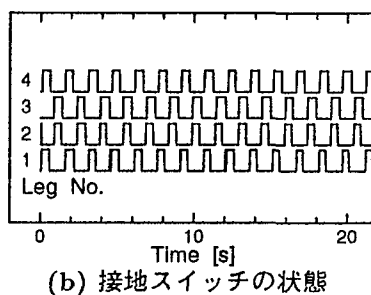
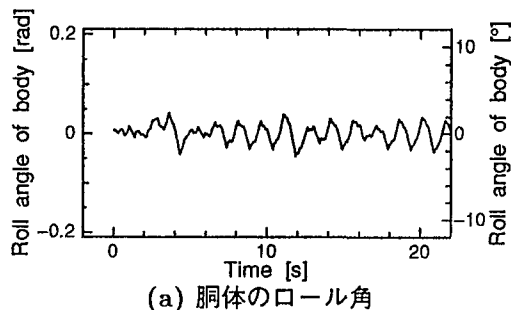


図7 胴体の姿勢制御を行った場合

第7章 結論

本章では、各章で得られた結果をまとめて結論とした。

審査結果の要旨

歩行ロボットにおいては、歩行に伴う消費エネルギーの低減が重要である。本論文は、トロット歩行を行う4脚ロボットにおいて、歩行周期を長くすることが消費エネルギーの低減に有効であることを示し、長周期歩行における姿勢の安定化の研究を行った成果をまとめたもので、全編7章より成る。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、4脚ロボットの長周期化の実験に用いた実験システムについて、ロボット本体とコントローラに分け詳述している。

第3章では、ロボットの関節の駆動に用いたパラレルクランクスライダ機構の解析を行っている。この機構は、剛性が高く、バックドライバビリティを有するなどの優れた特徴を持っているが、モータ回転角から関節角を求める順運動学を解析的に解くことが困難である。そこで、逐次代入法により順運動学の解を得ることとし、独自の漸化式を導入して収束度の向上をはかるとともに、あらかじめ解を求めておき、この結果をもとに補間演算を行うことで、計算速度の問題を解決している。また、パラレル機構の特異点解析を行い、本機構の可動範囲内には特異点が存在しないことを明らかにしている。

第4章では、4脚ロボットの移動に要するエネルギーについて解析し、歩行速度が増すと最小の移動仕事率が増加すること、極端な長周期の歩行を除いて、同じ歩行速度に対して歩行周期の長い方が移動仕事率の点で有利であることを、また脚切り換え時における遊脚のかき込み、支持脚の蹴りだしが移動仕事率の低減に大きく関係していること、などを示すとともに、馬の脚軌道を観測し、動物も接地時に脚のかき込み、離地時に脚の蹴りだしを行っていることを明らかにしている。これは重要な知見である。

第5章では、トロット歩行を行う4脚ロボットを反動車モデルで表し、反動車型倒立振子の制御シミュレーションと制御実験について述べている。また、摩擦補償を行うため、種々の方法を試み、シミュレーションと実験結果がよく合うことを示している。さらに、ジャイロから得られる姿勢信号のドリフト低減のため傾斜計を併用する方法を試み、ドリフトの著しい低減に成功している。

第6章では、4脚ロボットを用いた歩行実験について述べている。はじめに、歩行周期と歩行の安定性との関係を調べ、次に、反動車モデルを用いて4脚ロボットを制御する実験を行っている。また、反動車モデルにより姿勢制御を行うと極めて長周期のトロット歩行が行えることを実験により示している。

第7章では結論である。

以上要するに本論文は、4脚ロボットの歩行エネルギーの低減を目指し、反動車モデルを用い、安定で長周期のトロット歩行の実現を図ったもので、精密工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。