

電磁クラッチによる足首まわりの腱張力操作と 脚ロボットの横方向制御

Lateral motion control of legged robots through tendon tension manipulation around the ankle joint by using electromagnetic clutches

○大畑颯生*, 名倉陸斗*, 千葉優翔*, 加藤慶*, 水戸部和久*

○So Ohata*, Rikuto Nagura *, Yuto Chiba*, Kei Kato*, Kazuhisa Mitote*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード：足首機構(ankle mechanism), 横方向運動制御 (lateral motion control), 電磁クラッチ(electromagnetic clutches), 腱張力(tendon tension), ボールジョイント(ball joint)

連絡先： 〒992-0037 山形県米沢市城南 4 丁目 3-16

山形大学 工学部 機械システム工学専攻 6-500 水戸部研究室

大畑颯生, [Tel:\(070\)4441-4454](tel:07044414454), [E-mail : t243349m@st.yamagata-u.ac.jp](mailto:t243349m@st.yamagata-u.ac.jp)

1. 緒言

近年, 2 足歩行ロボットは高出力・軽量なモータの普及により, 脚の高速な位置決めとリアルタイムな運動生成が可能となり, 性能が飛躍的に向上している. 従来, 人型ロボットにおける動的バランスは運動計画の問題として扱われ, 制御実行段階では各関節モータに与えられた目標角度 (時間軌道) に対する追従制御として実現されてきた. 一方で近年の高性能ロボットは, 足が点接触に近い倒立振子モデルやホッピングロボットの運動を応用した運動生成手法, さらに AI 技術の活用が高いパフォーマンスに寄与していると考えられるが, その詳細は公開されておらず明らかではない. 倒立振子やホッピング脚の運動を用いた代表的

な手法としては, 梶田らによる運動生成法¹⁾や Raibert²⁾によるホッピングロボット制御が知られており, いずれも目標接地点に脚を素早く運ぶ足先運動が重要となる. このため, 脚部を軽量化し, 高速な位置決めができるよう設計されていると推測される. また, 近年の高い運動性能を持つロボットにおいても, こうした高速動作を実現する低レベルモータ制御は, 依然として PD フィードバックを中心とした単純な制御構造であると考えられる.

人型ロボットの運動計画はしばしば ZMP (Zero Moment Point) に基づいて生成される. 制御の実行段階では計画した運動経路に正確に追従することが要求される. しかし, モータレベルの制御が主に PD フ

ードバックで構成される 1 型システムで構成されており，変動する時間軌道に誤差なく追従することは制御系の性質上できない．追従性を高めるために高減速比や高出力モータを用いる方法が一般的だが，脚リンクや伝達機構の重量増加を招き，機構設計と制御性能の間にジレンマが生じる．

さらに，PD ゲインを高めて関節剛性を上げると，外界との接触に対する柔軟性が失われ，床・壁などとの接触制御には，環境認識センサや上位レベルの制御系が必要となり，全体の制御アーキテクチャは複雑化する．これに対し，関節剛性が低いロボットは，比較的単純なコントローラであっても外界との自然な相互作用が可能であり，人間の運動に見られるような汎用性の高い動作を実現する可能性がある．

関節剛性が低い運動機構の代表例として，「受動歩行」が挙げられる．自由関節の脚が緩い下り坂を自然に歩くこの現象は，低剛性と自然な歩行パターンの観点から注目された．しかし，その安定性は非線形システムの周期軌道の局所的な漸近安定性に依存しており，外乱に弱いことから実用的な歩行ロボットには十分応用されていない．また，非線形システム解析では軌道全体の安定性が議論されがちであるが，ロボット応用で重要なのは転倒回避や確実な停止といった実用的安全性である．

本研究は以上の背景を踏まえ，関節剛性の低い歩行ロボットが外乱に対して転倒せず，必要に応じて確実に停止できることを重視した低レベルコントローラの構築を目的とする．本研究により，剛性を必要以上に高めずとも安全かつ汎用的に動作できるロボット制御系の実現を目指す．

2. 腱駆動足部構造の概要

本報告では受動的な足首関節と関節まわりの低剛性な腱によるバランス制御を問題とする．Fig.1, Fig.2 に作成した足部機構の全体図と足首まわりのワイヤ経路図を示す．足首関節にはボールジョイントを取り付け，前後・左右の傾き及び回転を許容する．ふくらはぎ部には電磁クラッチを左右に配置し，各クラッチからワイヤを介して足先部へ張力を伝達する構造となっている．ワイヤはクロス配置されており，右側クラッチを通過したワイヤは左足先へ，左側クラッチを通過したワイヤは右足先へと接続されている．またクラッチ上部にはシリコンチューブを介して以上部へ接続しており，このシリコンチューブの伸縮により前後方向の倒れ動作が可能となる．本機構において，クラッチがオンとなるとワイヤに張力が発生し，足先部にモーメントが作用する．本研究ではこの左右方向の張力によるモーメントを利用し，足部の姿勢変化を制御する．



図 1 Overall diagram of the prototyped ankle joint

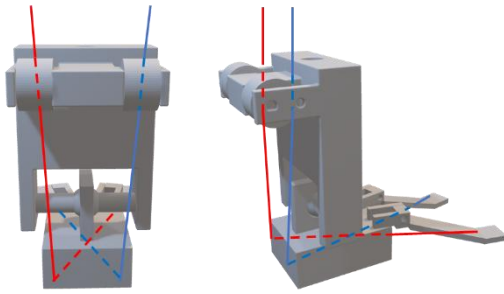


図 2 Ankle Wire Routing Diagram

3. 左右電磁クラッチによる腱張力操作メカニズム

Fig.3 に二本の腱によるバランス制御の考え方を考察するために、後方から見た平面内の単純なモデルを示す．本研究では脚が床及び重力場から受ける，足首関節まわりの前軸方向まわりのモーメント M_{total} を以下の要素で表す．

$$M_{total} = M_L + M_R + M_g$$

ここで， M_L は図中青線で示したワイヤ張力によるモーメント， M_R は赤線で示したワイヤ張力によるモーメント， M_g は重力によるモーメントである．後述する実験では， M_g は M_L および M_R に比べて小さいことを想定し，重力の影響を考慮しない．脚が前方へ倒れ込む運動中に左右クラッチからつま先への腱経路長は伸ばされるため，クラッチが発生する摩擦力は腱張力と相関する．摩擦力が大きいと腱張力は大きくなる．青線の腱張力が大きいと左のつま先点で床から受ける反力 R_L が大きくなる．このため時計回りの M_L （負とする）を発生する．同様に赤線の腱張力は反時計回りのモーメント M_R を発生する．このように電磁クラッチの操作により足首まわりのモーメント M_{total} を操作することができる．このことは歩行ロボットの制御で用いられる

ZMP（床圧中心）によっても説明できる．右のクラッチを ON にすると左つま先の反力 R_L が成長するため ZMP は左がわへシフトし，左クラッチを ON にすると ZMP は右側へシフトする．足そこの踏ん張り位置を左右方向へ操作することにより脚の横方向運動に働きかけバランスを制御することに相当する．

このようにクラッチ切り替えのみで左右の倒れ方向を決定できると考えられる．次章ではこのメカニズムに基づき，クラッチ操作によって実際に左右方向の倒れこみが生じるかを検証する．

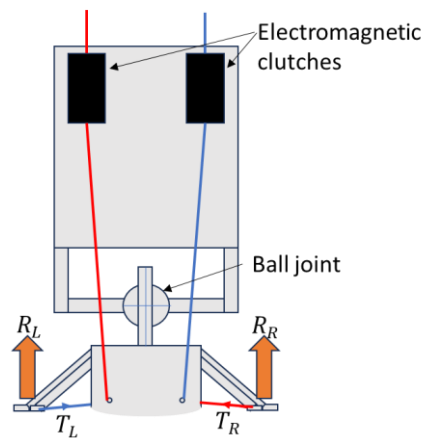


図 3 Model viewed from the rear in the lateral plane

4. 左右張力制御による横方向応答実験

本研究では，前方向へ運動している最中に，左右どちらか一方のクラッチを操作することで，足部を左右方向へ折れ込ませることが可能かを確認する実験を行った．脚の重心部付近に慣性センサ MPU6050 を取り付け，取得した加速度・角速度データを Madgwick フィルタ³⁾により姿勢角へ変換した．フィルタのゲインは反応速度を優先

して高めに設定した。また、取得後の姿勢角データには測定ノイズ低減のため、ローパスフィルタを施し平滑化を行った。

実験では、足部を初期姿勢(前後・左右角度 0°)でジャイロセンサのオフセットを取得した後、一度前後角度 -20° 付近まで下げ、その後おもりによって前方向に初速を与える。初速を与えたのち足首角度 -10 度に達したタイミングでクラッチ制御を行い、クラッチ操作後の左右角度の時間変化を計測した。

Fig.4 にクラッチ ON になった時点に基づいた、各条件(右クラッチ ON, 左クラッチ ON, 両クラッチ OFF)の左右角度の時系列データを示す。青が右クラッチ ON, 赤が左クラッチ ON, 黒が両クラッチ OFFを示す。また Fig.5 には、各条件の実験後に上から撮影した脚部の外観写真を示す。どちらか一方のクラッチを ON にした場合、クラッチ操作後に左右角度が明確に操作側へ倒れこむ挙動が確認された。

なお、クラッチを ON にした直後に、倒れこむ方向と反対側へ一時的に小さな振れが生じることが確認できた。この原因としてはワイヤの軽いたるみによる応答遅延や Madgwick フィルタのゲインを大きく設定しているため、急な加速度のノイズに強く反映してしまうことが考えられる。ただし、いずれの試行においても最終的な左右角度はクラッチ操作側へ収束しており、左右方向の倒れる方向をクラッチ操作によって切り替え可能であることが確認できた。

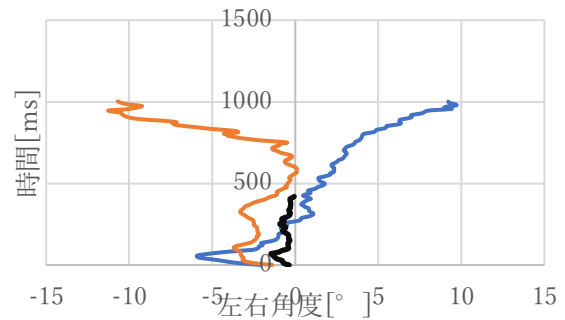


図 4 Time-series response of left-right angles from the start of control

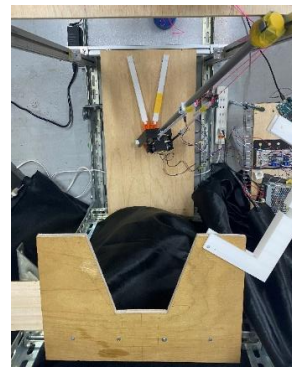


図 5(a) An image after the leg falls forward when the right clutch is activated

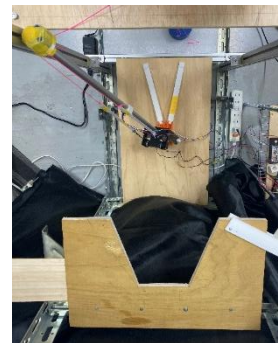


図 5(b) An image after the leg falls forward when the left clutch is activated

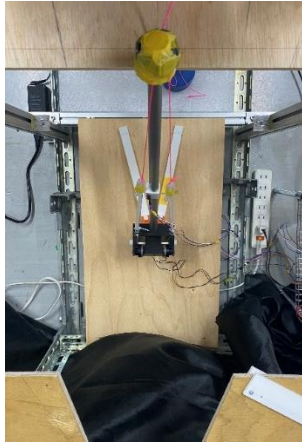


図 5(c) An image after the leg falls forward when both clutches are not activated

5. 結言

本研究では，足部に取り付けたクラッチ機構を片側のみ操作することで，前方向へ運動する脚を，左右の意図した方向へ倒れこませることが可能であることを実験的に示した．クラッチ操作後の左右角度の時系列データから，どちらか一方のクラッチを ON にすると操作側へ明確に倒れ込む挙動が確認され，倒れる方向の切り替えが実現できた．これにより，本足構造が受動的な前方向運動に対しても左右方向の進行を制御可能であることが示唆される．

今後は斜め前方向に初速を与えクラッチを切り替えることで角度を戻すことができるかどうかの実験を行っていく．

参考文献

1)梶田，小林：“位置エネルギー保存形軌道を規範とする動的 2 足歩行の制御”，計測自動制御学会論文集,Vol.23,No.3, pp. 281-287,1987.

2)Raibert, M.H. 1986. *Legged robots that balance*. MIT press.

3) Madgwick, S. O. H., Harrison, A. J. L., & Vaidyanathan, R. (2011).

Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In ICORR 2011.s