

# 柔軟な足首関節と腱張力による ZMP 操作

## ZMP manipulation mechanism by using tendons around a flexible ankle joint

○大山裕慧\*, 水戸部和久\*, 藤波裕二\*

○Oyama Hirosato\*, Kazuhisa Mitobe\*, Yuji Fujinami\*

\*山形大学

\*Yamagata University

キーワード：電磁ブレーキ(electromagnetic brake), 足首関節(ankle joint), 腱張力(tendon tension), ZMP(zero moment point)

連絡先：〒992-0037 山形県米沢市城南 4 丁目 3-16

山形大学 理工学研究科 機械システム工学専攻 6-500 水戸部研究室

大山裕慧, [Tel:\(070\)2224-9013](tel:07022249013), [E-mail : t223779m@st.yamagata-u.ac.jp](mailto:t223779m@st.yamagata-u.ac.jp)

## 1. はじめに

関節毎のギア付きモータで駆動される歩行ロボットは、モータ制御系も関節毎の独特なモータコントローラ単位で実装され、ロボット全体の運動は各関節への目標角度で計画され、制御の実行は計画された軌道への追従制御として行われることが通常である。この場合、実環境下での外乱や環境変化に対する適応能力は、センサ情報に基づく頻回の計画更新により与える方法が現実的な実装方法であり、多くの応用研究が報告されている<sup>1,2)</sup>。

一方で、人間は床からの力を操作して、事前の運動計画ではなく実時間制御により、バランス制御しているように感じられる。加えて、足部や足首関節は床から受ける力を柔軟に吸収しながら、同時に腱からの力の操作により足底の圧力中心(ZMP)を操作している。このような生物模倣の関節

構造や人工筋は歩行ロボットにおいて古くから研究されている<sup>3)</sup>。これをロボットで実装するためには、力を入力として制御問題を考える必要がある。しかし、ギア付きモータはバックドライブ性が低いためモータの出力トルクを実時間のための十分な速さで制御入力として操作するのは難しく、また脚が床から受ける力を足首まわりの自由度に分散して素早く吸収することも難しい。

本研究は上記の観点から、以下の 2 点を目的として歩行ロボットの足部を試作した。

- 1) 床から受ける外力を柔軟に吸収できる足首構造
- 2) ZMP を実時間で操作できる足首まわりの腱駆動法

足首構造は 1 自由度の機械的な回転軸関節の組み合わせではなく、脚リンクと足部品がころがり接触することで、足部の摩擦

を小さくして外力を吸収できるようにし、自由関節にちかい足首関節のまわりの腱張力により ZMP を操作する。この腱張力の発生には、腱が能動的に張力を発生する場面と腱が外力を受けて伸ばされる受動的な場面に分けて考えられる。本研究では受動的な場面での腱張力発生方法に注目して、マイクロ電磁ブレーキを用いた張力操作のメカニズムを提案した。腱が受動的に伸ばされる状態での張力操作は脚ロボットが外力を受ける場面での安定化に有用と考えられる。本発表では、外力を与えた状態での ZMP 操作実験を報告する。そして、本研究の最終目的は、能動的な腱張力の発生機能も追加して、実時間に素早い運動制御をする歩行ロボットの制御メカニズムと制御法である。

## 2. ころがり接触による足首構造

Fig.1 に試作した足首構造の概要を示す。足部品は鞍状の面上で脚部品の下部の円筒面でころがり接触する。前後方向は点接触、左右方向は線接触に近いころがり接触で運動する。足部の摩擦を小さくして外力を吸収できるようになっている。この足首構造の特徴は、人間の足首と同じように可動範囲が制限され、前後方向は前後  $30^\circ$ 、左右方向は左右  $15^\circ$  まで足首を動かすことができることである。

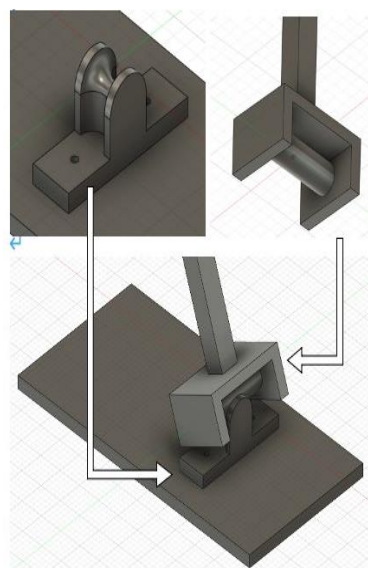


Fig.1 3D CAD image of the ankle joint

## 3. マイクロ電磁ブレーキによる 腱張力操作メカニズム

Fig.2, Fig.3 にマイクロ電磁ブレーキとマイクロ電磁ブレーキによる腱張力操作のメカニズムを示す。ZMP の操作はこの電磁ブレーキを取り付けた前 1 本、後ろ 2 本の合計 3 本の腱の張力を操作することによって行っている。電磁ブレーキへの入力電圧を調整することで、見かけの粘性摩擦を発生することができる。ブレーキ外周に成型した歯付きプーリと腱に挿入したベルトのかみ合いにより、腱の張力を操作する。電圧 0 ではブレーキの摩擦は小さい。入力電圧を PWM 信号とすることでマイクロコントローラからの DUTY 比による指令で容易にブレーキ力を変更できる。腱が受動的に伸ばされる状態で腱の張力をブレーキで調節することができる。

#### 4. 外力下での ZMP 操作実験

脚モデルの足の長さは 0.5m, 足底の大きさは横 0.3m, 縦 0.15mm になっており, 上記に示したマイクロ電磁ブレーキが 3つ付いており, ゴム紐の張力によって軽く引っ張られている駆動ベルトと接続されている. また, 脚リンクの中央にはジャイロセンサが取り付けられており, 脚モデルの姿勢を測定している. 脚モデル頂点にはスポンジボールを取り付け, いろいろな方向からの外力を受けられるようにした. この脚モデルに上から吊るされた重さ 0.13kg, 直径 0.15m のボールを振りとして速さ 2.6m/s で衝突させ, 外力を与えた時の, 前後方向の ZMP と脚モデルの角度の変化を計測した. Fig. 2 のように一本の腱で平面内の単純なモデルで考えれば, 足部品が床に対して静止状態にある場合の ZMP と腱張力の関係が得られる. 腱張力を  $T$ , 床反力を  $F_R$  それぞれの作用する角度  $\theta_T, \theta_F$  を考慮して, 足首まわりのモーメントの釣り合いは次式となる.

$$l_T T \sin \theta_T = l_F F_R \sin \theta_F$$

ここで,  $l_F$  および  $l_T$  は, 足首を基準とした ZMP までの距離および腱までの距離である. 腱張力  $T$  を操作することで ZMP までの距離を制御できると考えられる. このような考え方をとる場合, 足首の摩擦トルクが小さい必要がある. 人間のように小さな関節摩擦はこのような方法を可能すると考えられる.

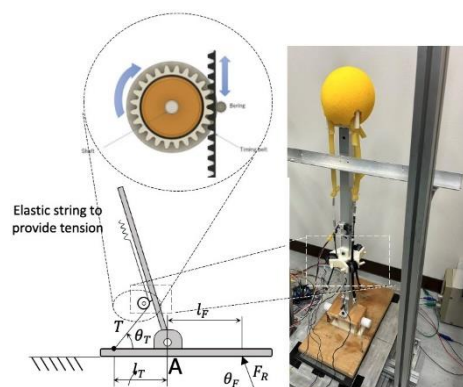


Fig.2 Experimental ankle joint

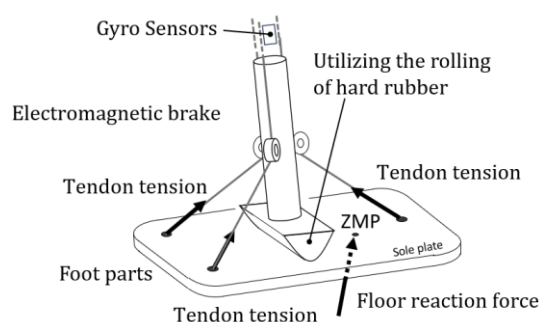


Fig.3 Forces acting to the solo plate

Fig.4 に電磁ブレーキに電圧を与え, 脚モデルにブレーキをかけた時の ZMP の変化, Fig.5 に電磁ブレーキに電圧を与えず, 脚モデルにブレーキを与えなかった時の ZMP の変化を示す. グラフの青の線が X-ZMP, オレンジの線がジャイロセンサで計測した前後方向の角度の変化になっている. それぞれ脚モデルの姿勢の変化はグラフの角度変化として示した.

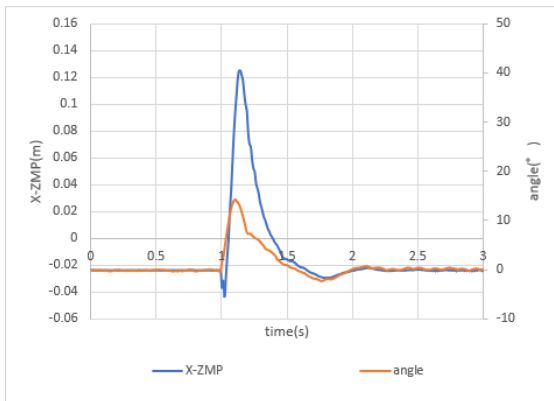


Fig.4 ZMP and angle change when the brake is activated

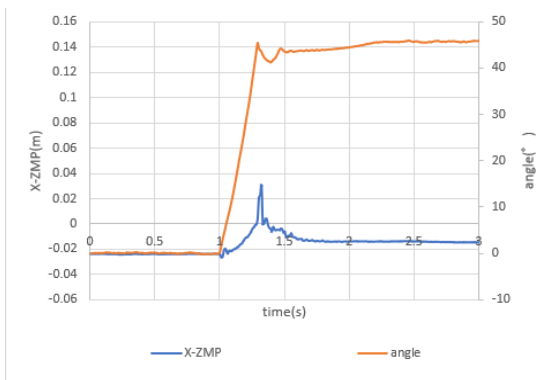


Fig.5 ZMP and angle change without activating the brake

ブレーキがかかっている時は、外力がかかった後少し前に倒れ、ブレーキの影響で元の姿勢に戻っている。ブレーキがかかっていない時は、脚モデルは勢いよく倒れ、壁に衝突したのち一定の姿勢になっている。また、X-ZMPはブレーキがかかっている時は外力が与えられたときに足先に移動しているのに対して、ブレーキがかかっていない時は変化が小さくなっている。この結果から電磁ブレーキによって腱張力を操作することによって脚モデルに外力が与えられた際の前後方向のZMPを操作することができることが分かった。

## 5. まとめ

本論文では、床から受ける外力を柔軟に吸収できる足首構造を試作し、電磁ブレーキによるZMP操作が可能な足首まわりの腱駆動法を提案した。外力を受ける下でのZMP操作実験からブレーキの有無により腱張力の変化を確認した。これによってZMPを操作できることが分かった。

今後はマイクロ電磁ブレーキのPWMを変更しブレーキの大きさを変化させることによって、ZMPの細かな操作が可能であるか確かめるとともに、あらゆる角度から外力を与えられた時に3つの腱の腱張力を変化させることによって、前後左右にZMPの操作が可能であるか実験により確かめたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Farshidian, F., Jelavic, E., Satapathy, A., Giftthaler, M. and Buchli, J., 2017, November. Real-time motion planning of legged robots: A model predictive control approach. In 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids) (pp. 577-584). IEEE.
- 2) Guo, Y., Zhang, M., Dong, H. and Zhao, M., 2021. Fast online planning for bipedal locomotion via centroidal model predictive gait synthesis. IEEE Robotics and Automation Letters, 6(4), pp.6450-6457.
- 3) 成岡健一 and 細田耕, 2012. 筋骨格ヒューマノイドのロコモーション研究. 日本ロボット学会誌, 30(1), pp.8-13.