

解剖学的ロボットモデルによるウマ体内の動力的機序の探究

機械工学専攻 機械工学コース

機械動力学領域 石川・南研究室 小林 有恒

1. 緒言

ウマは、優れた踏破能力、持久力、そして移動速度を備えており、古来より人々の生活において物資の運搬や移動手段として重宝されてきた。このようなウマの優れた運動メカニズムを解明することは、生物学の発展に貢献するだけでなく、工学的にも非常に価値がある。これまで生物学の分野では、筋・腱構造の役割がウマのロコモーションにおいて重要であると示唆されてきた。しかし、運動中における生物の内部構造を観察できないという現状の計測技術の制約により、そのメカニズムは未だ解明されていない。

そこで本研究では、解剖学的ロボットモデルによる構成論的アプローチ（図1）をとることで、これらの制約を打破し、ウマ体内の動力的機序の解明をめざす。そのために、歩行中におけるウマ体内の筋・腱に蓄積される弾性エネルギーを本ロボットモデルのバネの変位から光学的に推定する方法を提案し計測実験を行う。

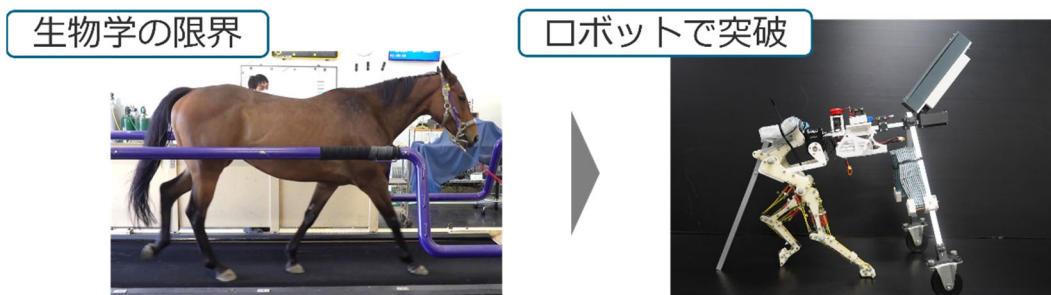


図1：構成論的アプローチにより「作ることによるウマの優れた走行能力の理解」を目指す。

2. ウマの肢が持つ連動性を再現した解剖学的ロボット

本研究では、5つのリンク系、6つの筋・腱で構成されるロボット後肢モデルを開発し、自然死したウマ脚部で観察された関節間の連動性を再現した。歩行実験では1つの関節を動かすと、他の関節も同期するという連動性のみから股関節を周期的に振ることだけでも関わらず支持脚と遊脚が切り替わるウマと類似した脚軌道を生成した。

3. 腱に備わる非線形特性

本ロボット後肢は、剛性の異なる2つのバネを直列に連結することにより、生体の腱に見られる非線形特性[1]を再現している。腱モジュールの動きを図2を交えて説明する。まず、モジュールに力がかかりwireが引かれると、2つのバネ(Spring1 and Spring2)がともに縮むため、腱モジュール全体の

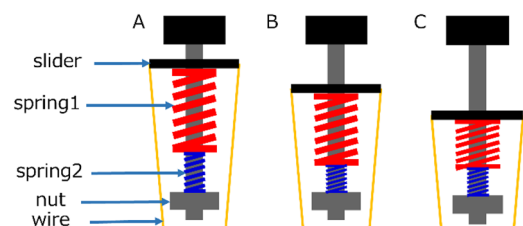


図2: 腱モジュールの動作

バネ定数は小さくなる (A → B)。さらに wire が引かれ、許容たわみ量の小さいバネ (Spring2) が先に縮みきると、もう片方のバネ (Spring1) のみが縮むようになり (B → C)、腱モジュール全体のバネ定数は大きくなる。

本研究では、本モジュールの slider と nut 部にマーカを配置し、それらの距離を求めることでバネの変位を光学的に測定する手法を提案した。そして、予備実験によりあらかじめ変位と弾性エネルギーの関係性を求めておき弾性エネルギーを推定した。

4. 筋・腱に蓄積される弾性エネルギーの可視化

提案手法を用いた計測実験では、動的歩行時における解剖学的ロボットモデルの各筋・腱に蓄積される弾性エネルギーの時間変化の可視化に成功した (図 3)。横軸の Stride time は歩行 1 周期を 100% にしたときの時間経過、縦軸は各筋・腱に蓄積される弾性エネルギーである。まず、支持脚前期 (i) では骨間筋が他の腱に比べ弾性エネルギーを多く蓄積していることから、接地時の衝撃を吸収するサスペンションの働きを持つことが明らかになった。つぎに、支持脚中期 (ii) から支持脚後期 (iii) にかけて、体重支持を行いながらエネルギーを回収し、支持脚後期 (iii) で推進力を得る。さいごに、遊脚期 (iv) では、深趾屈筋が働き各関節を屈曲させることで、遊脚期における脚軌道生成に寄与することが示された。ウマの歩行において、支持脚前期から中期にかけて腱に弾性エネルギーが蓄積され、中期から後期にかけて腱の弾性エネルギーが運動エネルギーに変換されることが優れた走行能力の要因となる。

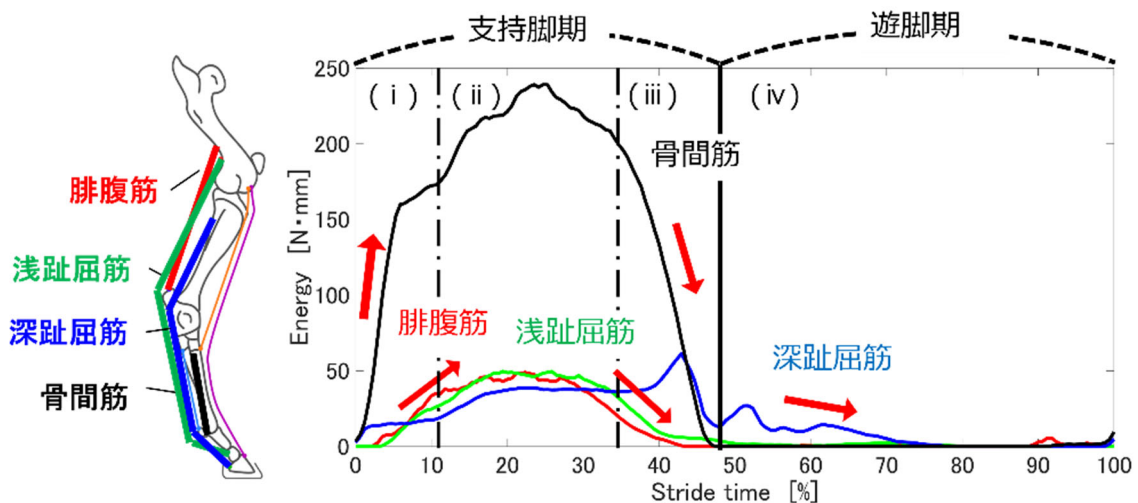


図 3: 歩行 1 周期における各筋・腱の弾性エネルギー時間変化

5. 結言

本研究の成果である各筋・腱に蓄積される弾性エネルギーの可視化によって、これまで行えなかったウマの動的歩行時における計測が行えるようになり、さらなるウマの運動メカニズムの理解への一歩となる。また、本研究で開発した解剖学的ロボット自体を応用することにより生物学、工学、獣医学の 3 つの分野で大きく貢献することができる。

6. 参考文献

- [1] COLLEEN M Pollock and ROBERT E Shadwick. Relationship between body mass and biomechanical properties of limb tendons in adult mammals. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, Vol. 266, No. 3, pp. R1016-R1021, 1994.