

床反力制御による筋骨格ヒト型ロボットの走行

新山 龍馬 (東京大学) 西川 鋭 (東京大学) 國吉 康夫 (東京大学)

Musculoskeletal Force Control for Bipedal Running of an Athlete Robot

*Ryuma NIIYAMA (The University of Tokyo),

Satoshi Nishikawa (The University of Tokyo), Yasuo KUNIYOSHI (The University of Tokyo)

Abstract— The essential component of legged locomotion is control of the ground reaction force. We investigate bipedal running using a musculoskeletal “Athlete Robot”. The configuration of the muscles in the robot is compatible with the human. The spring-like property of the human lower leg during running is modeled as an elastic blade foot based on findings from biomechanics. The motor command is divided into phases extracted from human EMG data. The strength of the activation in each phase is numerically calculated using a model of the musculoskeletal leg. In the simulation results, the robot runs 8 steps with a speed of 3 m/s. We also demonstrate that the real bipedal robot is able to run for several steps.

Key Words: Musculoskeletal System, Soft Landing, Biomechanics, Pneumatic Artificial Muscle

1. はじめに

走行のような動的な脚口コモーションでは、床反力を適切に制御することで、推進力を得ると同時に姿勢を安定化させる必要がある。伸縮脚を備えたホッピング・ロボット [1] は、こうした動的な脚口コモーションの本質を示唆しているが、単純モデルと多関節脚の対応は必ずしも明らかではない。さらには、脊椎動物が備える筋骨格脚で、床反力の制御がどのように行なわれているかは明らかではない。

従来研究では、電磁モータと減速機の組み合わせによる生物とは異なる関節駆動方式を備えたヒューマノイド・ロボットが、多関節脚での走行を実現している [2,3]。また、力制御を基盤とした多関節・脚式ロボットに関する従来研究としては、SARCOS 製のヒューマノイド・ロボットを用いた受動的なバランス制御や [4]、同様に油圧駆動の脚口ロボットである PETMAN や BigDog [5] が挙げられる。しかし、力制御を基盤とした脚式移動の原理が十分明らかになったとは言えない。

本研究では、生物規範の観点から筋骨格系による力制御に注目し、空気圧筋によって駆動される筋骨格ヒト型ロボットを用いて、走行の床反力制御における筋骨格系の役割を明らかにすることを目指す。

2. 筋骨格ロボット

生体の筋骨格系は、筋腱複合体の粘弾性や、単関節筋と二関節筋、腱駆動などのユニークな特徴をもった機構と考えることができる。筋や腱の物理的特性と機能は、バイオメカニクス分野で盛んに研究されている [6]。

二関節筋は、全身運動の遂行の中で力の制御に寄与していることが示されている [7]。さらに、筋で駆動されるリンク機構の静力学的な解析によれば [10]、二関節筋があることで、単関節筋による拮抗駆動だけでは発揮できない方向の力を得られることが知られている。

一方、筋骨格構造のロボットへの応用は部分的なものに限られている。例えば、柔軟な脊椎構造を備えた腱駆動ロボット [11]、空気圧筋拮抗駆動の二脚口ボッ

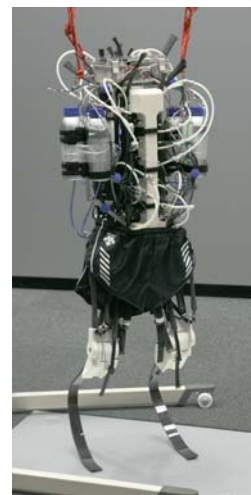


Fig.1 Musculoskeletal Athlete Robot.

ト [12]、空気圧筋を用いて電磁弁による単純な制御によって歩行・ホッピング・数歩の走行を実現した筋骨格ロボットが報告されている [12]。

3. 筋骨格アスリート・ロボット

3.1 概要

筋骨格アスリート・ロボットとは、人工筋骨格系を備えた 2 脚口ロボットで、力制御によるダイナミックな全身運動を実現するために開発された。筋型アクチュエータとしては、俊敏な動作を実現するため、軽量で短時間に大きなエネルギーを発揮できる空気圧人工筋を採用した。短時間利用可能な小型エア・タンクを搭載しているが、主要なエア源および、電源は外部に設置した。

圧力を連続値制御できる、特殊な小型軽量の圧力比例制御弁を用いて空気圧筋の張力制御を可能にした。これは、給排気と閉止の機能しかもたない電磁弁では実現できない。

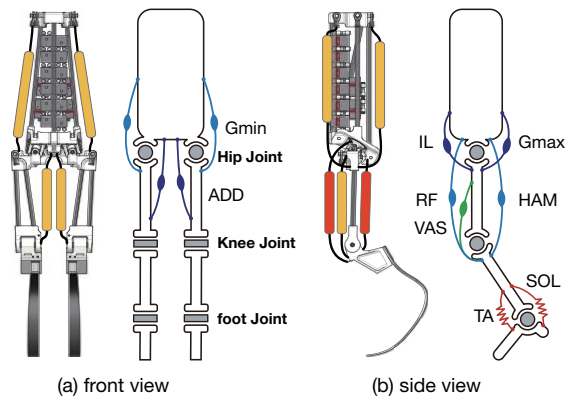


Fig.2 Layout of the muscles.

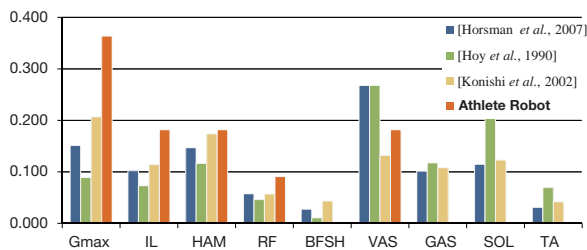


Fig.3 Proportion of the size of muscles.

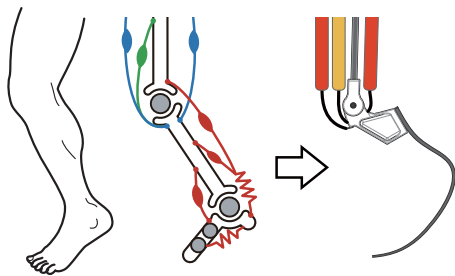


Fig.4 Musculoskeletal system of the human lower leg and simplified foot as blade spring.

3.2 筋骨格系の設計と下腿筋腱複合体のモデル化

アスリート・ロボットの筋骨格系は、人体の解剖学的構造に基づいて設計した (Fig.2, Fig.3)。

人体の各筋の質量や生理学的断面積 (PCSA) に関するデータは、バイオメカニクス分野の文献で報告されているものを用いた [13, 14]。

走行やホッピングの動作で、ヒトの下腿部がバネのように振る舞うことが知られている [15, 16]。そこで、ブレード状の板ばねを用いて下腿の筋腱複合体の物理的特性をモデル化した (Fig.4)。これによって、軽量かつ大きなパワーを発揮することが可能な下腿の機構を実現した。

4. 筋骨格脚の床反力制御

4.1 概要

走行における床反力制御は、走行中のヒトの筋活動データの援用、および望みの床反力に対する筋張力の計算によって行なう。運動指令は、各筋の賦活強度の時

系列であり、実際には空気圧筋の内圧の時系列である。複雑な筋賦活パターンをコンパクトに表現するために、SCA (Sparse Coding of Activation) と呼ぶ運動表現を用いた [17]。これは、複雑な多次元の身体運動を、筋賦活強度の次元で抽象的に表現しようとするものである。同期した基底関数の組み合わせによって複数の筋への運動指令を表現する。ここでは、基底関数として単純なステップ関数を採用し、運動指令を n 個のフェーズにわけている。

走行中のヒトの関節トルク、関節角速度、筋活動のデータ [18] から、接地と筋の進展・収縮の様相から、筋賦活パターンは 5 フェーズに分けた。それぞれのフェーズは、引きつけ期 I, 引きつけ期 II, 踏み込み期, 支持期 I, 支持期 II である。

4.2 筋賦活パターン

遊脚期の筋賦活パターンは、走行中のヒトの筋活動のデータ [18] から決定する。これは、筋骨格アスリート・ロボットが、ヒトの主要な筋に対応する筋を備えていることによる。

支持期の床反力制御は、望みの床反力の大きさと方向から筋張力を求める逆問題と考えられる。得られた筋張力から、各筋の賦活強度を求めることができる。目標となる床反力については、倒立振子モデルによって基礎的な検討を行い、主に計測したヒト走行中の床反力データを用いる。

望みの床反力を得る逆問題は、静力学的な解析に基づいて以下のように定式化した。まず、脚が環境と接触する点における力 F とモーメント M からなる一般化力 Q を考える (eq.(1))。

$$Q = \begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix} \quad (1)$$

脚の発揮する力 Q と筋張力 f は、よく知られた微分運動学と静力学の双対性から以下のように書ける。

$$G^T(\theta)f - J^T(\theta)Q = 0 \quad (2)$$

ここで、 $J(\theta)$ は、脚の接触点における位置・姿勢の、関節角 θ に関するヤコビ行列である。また、 $G(\theta)$ は、アクチュエータ変位の、関節角 θ に関するヤコビ行列である。 $G(\theta)$ の各要素は、この場合、各筋に対応する関節のモーメントアーム長を表している。

望みの床反力 Q_d に対して、必要な筋張力 f は、数値的に求めることができる eq.(3)。最適化のための評価関数としては、各筋の負荷を、筋の断面積 P_i に対する張力の比率という形でを導入した。接地点でのモーメントはゼロとする。最適化では、筋張力の下限 f_{lb} および上限 f_{ub} を考慮する。

$$\begin{aligned} \min_f E &= \sum_{i=1}^n (f_i/P_i)^2 & (3) \\ \text{s.t. } G^T(\theta)f - J^T(\theta)Q_d &= 0 \\ f_{lb} &\leq f_i \leq f_{ub} \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

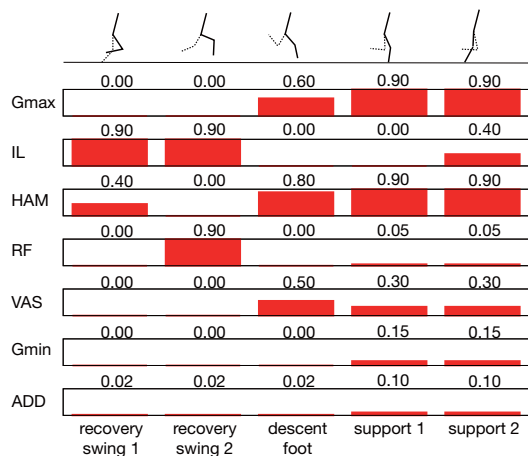


Fig.5 Muscle activation pattern in phases.

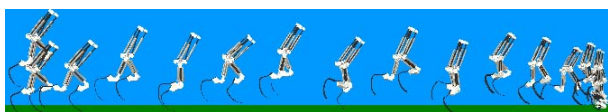


Fig.6 The snapshot of the running simulation.

以上で求めた筋張力のパターンは、2 フェーズの単純な筋賦活パターンによって近似する。つまり、筋骨格系の状態を定める隠れ変数としての筋賦活強度は非常に単純な関数で表現されており、体幹移動と接地の結果として複雑な関節角度と床反力のプロファイルが現れることになる。

5. 動力学シミュレーションによる走行実験

5.1 実験設定

提案手法による走行制御を動力学シミュレーションで検討した。筋骨格アスリートロボットの 3DCAD データから、形状や慣性モーメントなどの物理パラメータが一致するシミュレーションモデルを構築した。動力学シミュレータには OpenHRP3 を用いた。下腿の弾性ブレードは、並進ばねとしてモデル化した。筋の張力は理論式 [20] から実際の損失を考慮して算出した。

5.2 走行のシミュレーション結果

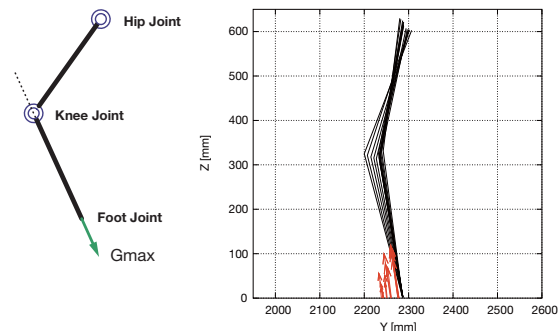
空中から落下させることで初期エネルギーを与え、走行を開始する形式とした。運動指令としての筋賦活パターンは、最適化計算によって得た筋張力を元に、ヒト走行中の筋活動データを整形したものを用いた。この調整は手動で行なった (Fig.5)。

シミュレーション実験では、8 歩の走行が実現した。最大の走行速度は約 3 m/s (10 km/h)、到達距離はおよそ 11 m であった。走行中の連続写真を Fig.6 に示す。結果から、1 周期の中で、弾性ブレード足部が発揮したエネルギーは、筋の発揮エネルギーの 12.8% に達することがわかった。

6. ロボットによる走行実験

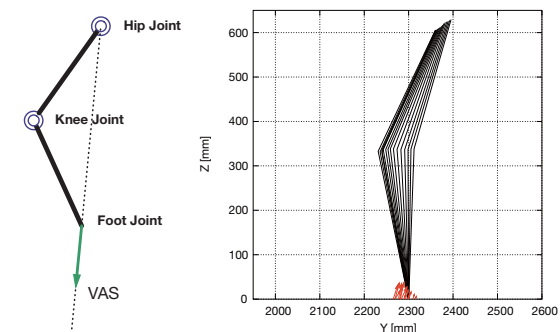
6.1 単筋の賦活

予備実験として、筋骨格アスリート・ロボットを用いて、単一の筋だけを賦活した場合に得られる床反力を、



(a) theoretical force output (b) measured reaction force

Fig.7 Measured ground reaction force for the Gmax muscle.



(a) theoretical force output (b) measured reaction force

Fig.8 Measured ground reaction force for the VAS muscle.

フォースプレートで計測した。

大殿筋 (Gmax) のみを賦活したときの床反力、および大腿広筋 (VAS) のみを賦活したときの床反力を Fig.7, Fig.8 に示す。大殿筋の賦活では膝関節を通る床反力ベクトルが、大腿広筋の賦活では股関節を通る床反力ベクトルが観測され、理論的に計算される床反力の向きと一致した。結果から、筋張力の制御によって、床反力の方向を直接的に制御できることがわかった。

6.2 走行の実験設定

走行実験の初期姿勢・位置はシミュレーション実験と同様に設定した。ロボットは天井梁からクレーンで吊り下げられ、分離装置が作動するとクレーンから切り離される。分離装置の作動を検知して、ロボットは動作を開始する。転倒によるロボットの損傷を防止するため、ラバーローブによって転倒防止を図った。

6.3 実験結果

筋骨格アスリート・ロボットを用いて、提案する筋骨格力制御による走行制御について検証した。ロボットの動作は Vicon モーションキャプチャシステムおよび Kistler フォースプレートを用いて計測した。提案手法によって、弾性ブレードと、多数の筋で制御される多関節脚を備えた実ロボットにおいて、3 歩の走行を実現することができた。ストライドは約 0.5 m、走行の平均速度は 1.2 m/s であった。シミュレーションとの差異としては、衝突によるエネルギーロスのモデル化誤差や、空気圧筋の応答遅れが考えられる。走行実験の連続写真を Fig.9 に示す。



Fig.9 Snapshots of the three steps of bipedal running.

7. 結論

脚口コモーションにおいて重要な支持期の床反力制御を、筋賦活パターンによる単関節筋・二関節筋の張力制御によって実現する方法を提案した。また、人体と対応づけ可能な筋骨格アスリート・ロボットの特長を活かし、ヒト走行中の筋活動データから遊脚期の運動指令を決定した。

提案手法を、2脚の筋骨格アスリート・ロボットのシミュレーション実験および実機実験によって実証した。シミュレーションでは、平均速度 10 km/h の 8 歩の走行が実現できた。その時、下腿弾性ブレードが効率的なエネルギーの回生に寄与していた。実機を用いた予備実験では、筋の張力制御によって、望みの方向の床反力が得られることを確かめ、また、3 歩の走行を実現した。

今後の課題として、筋賦活パターンの自律的な獲得や、センサフィードバックによる姿勢の安定化、ヒト走行動作との比較分析、などが挙げられる。

参考文献

- [1] Marc H. Raibert. *Legged Robots That Balance*. The MIT Press, 1986.
- [2] Ryosuke Tajima, Daisaku Honda, and Keisuke Suga. Fast running experiments involving a humanoid robot. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2009)*, pp. 1571–1576, May 2009.
- [3] Toru Takenaka, Takashi Matsumoto, Takahide Yoshiike, and Shinya Shirokura. Real time motion generation and control for biped robot —2nd report: Running gait pattern generation—. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*, pp. 1092–1099, October 10–15, 2009.
- [4] Sang-Ho Hyon. Compliant terrain adaptation for biped humanoids without measuring ground surface and contact forces. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, No. 1, pp. 171–178, Feb. 2009.
- [5] Marc Raibert, Kevin Blankespoor, Gabriel Nelson, Rob Playter, and the BigDog Team. Bigdog the rough-terrain quadruped robot. In *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control (IFAC)*, 2008.
- [6] R. McNeill Alexander and H. C. Bennet-Clark. Storage of elastic strain energy in muscle and other tissues. *Nature*, Vol. 265, No. 5590, pp. 114–117, Jan 1977.
- [7] Caroline A. M. Doorenbosch and Gerrit Jan van Ingen Schenau. The role of mono- and bi-articular muscles during contact control leg tasks in man. *Human Movement Science*, Vol. 14, No. 3, pp. 279–300, 1995.
- [8] G. J. van Ingen Schenau, M. F. Bobbert, and R. H. Rozendal. The unique action of bi-articular muscles in complex movements. *Journal of Anatomy*, Vol. 155, pp. 1–5, Dec 1987.
- [9] Koji Ito, Toshio Tsuji, and Mitsuo Nagamachi. Motor impedance and inverse kinematics in musculoskeletal systems. In *IEEE Engineering in Medicine & Biology Society 10th Annual Int. Conf.*, pp. 635–636, 1988.
- [10] Toru Oshima, Tomohiko Fujikawa, Osamu Kameyama, and Minayori Kumamoto. Robotic analyses of output force distribution developed by human limbs. In *IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 2000.
- [11] Ikuo Mizuuchi, Yuto Nakanishi, Yoshinao Sodeyama, Yuta Namiki, Tamaki Nishino, Naoya Muramatsu, Junichi Urata, Kazuo Hongo, Tomoaki Yoshikai, and Masayuki Inaba. An advanced musculoskeletal humanoid kojiro. In *Proc. 7th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2007)*, pp. 294–299, November 2007.
- [12] Björn Verrelst, Ronald Van Ham, Bram Vanderborcht, Frank Daerden, Dirk Lefeber, and Jimmy Vermeulen. The pneumatic biped “Lucy” actuated with pleated pneumatic artificial muscles. *Autonomous Robots*, Vol. 18, No. 2, pp. 201–213, 2005.
- [13] M. D. Klein Horsman, H. F. J. M. Koopman, F. C. T. van der Helm, L. Poliacu Pros, and H. E. J. Veeger. Morphological muscle and joint parameters for musculoskeletal modelling of the lower extremity. *Clinical Biomechanics*, Vol. 22, No. 2, pp. 239–247, Feb 2007.
- [14] Melissa G. Hoy, Felix E. Zajac, and Michael E. Gordon. A musculoskeletal model of the human lower extremity: the effect of muscle, tendon, and moment arm on the moment-angle relationship of musculotendon actuators at the hip, knee, and ankle. *Journal of Biomechanics*, Vol. 23, No. 2, pp. 157–169, 1990.
- [15] Tetsuo Fukunaga, Keitaro Kubo, Yasuo Kawakami, Senshi Fukushima, Hiroaki Kanehisa, and Constantinos N. Maganaris. In vivo behaviour of human muscle tendon during walking. *Proc. of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 268, No. 1464, pp. 229–233, Feb 2001.
- [16] G. A. Lichtwark and A. M. Wilson. In vivo mechanical properties of the human achilles tendon during one-legged hopping. *Journal of Experimental Biology*, Vol. 208, No. Pt 24, pp. 4715–4725, Dec 2005.
- [17] Ryuma Niiyama, Kei Kakitani, and Yasuo Kuniyoshi. Learning to jump with a musculoskeletal robot using a sparse coding of activation. In *Proc. ICRA 2009 Workshop on Approaches to Sensorimotor Learning on Humanoid Robots*, pp. 30–31, Kobe, Japan, May 2009.
- [18] 馬場崇豪, 和田幸洋, 伊藤章. 短距離走の筋活動様式. *体育学研究*, Vol. 45, No. 2, pp. 186–200, 2000.
- [19] 長崎高巳, 梶田秀司, 横井一仁, 金子健二, 比留川博久, 谷江和雄. ヒューマノイドのための走行パターンの生成. *日本ロボット学会誌*, Vol. 21, No. 8, pp. 74–80, 2003.
- [20] Hal. F. Schulte, D. F. Adamski, and J. R. Pearson. Characteristics of the braided fluid actuator. Technical Report No.5, The University of Michigan Medical School Department of Physical Medicine and Rehabilitation Orthotics Research Project, 1961.