

筋駆動脚機構による跳躍・着地ロボットの開発

新山 龍馬 (東京大学) 國吉 康夫 (東京大学)

Development of Musculoskeletal Robot for Jumping and Landing

*Ryuma NIIYAMA (The University of Tokyo), Yasuo KUNIYOSHI (The University of Tokyo)

Abstract— To understand the dexterity in motion performed by the musculoskeletal structure, we developed a biped jumping robot. The robot can jump over half of own height and land softly. For jumping and landing, the dynamics of body is as important as the control. The robot is powered by McKibben artificial muscles, the pneumatic actuators similar to biological muscle. In the experiment, our robot achieved the jumping onto a chair. We observed a proximo-distal sequence of joint extension although motor commands are given simultaneously. This sequential joint extension in whole body motion is caused by the natural dynamics of the musculoskeletal system.

Key Words: Musculoskeletal System, Actuator, Artificial Muscle, Mechanical Softness, Biomechanics

1. はじめに

実世界の中で多様な運動を達成できる能力は、知能の重要な基盤である。このような目標に対して、内部処理系による制御の巧みさだけでなく、身体・環境・処理系間の相互作用や、身体特性そのものが果たす機能の重要性が指摘されている [1]。

ロボットの運動制御手法として、多自由度マニピュレータの制御理論を基盤として目標軌道を精確に実現する手法が、産業用ロボットやヒューマノイドロボットの制御などで成果をおさめてきた。目的の運動を明示的に与えることができる場合、ハードウェアは制御目標値への理想的な高速・高精度追従が求められる。

しかしながら、現実には理想的な機構やアクチュエータを得ることはできず、その特性がロボットの運動性能を規定することは明らかである。すばらしい運動能力を持っている動物の身体は、汎用性を保ちながらも決して万能ではなく、生態に沿った合理的な形となっている。実環境での巧みな運動とは、有限な身体の特性をうまく活用することであると言える。

ロボットの場合、静的な単独タスクの実現では工学的に様々な形態を取り得るが、走行や跳躍などの動的な全身運動の実現では生物の身体との共通点が多くなると考えられる [2, 3]。ロボットマニピュレータにおいて、アクチュエータは必要な関節トルクを発生するものでしかない。一方、動物の筋や腱は走行時にエネルギーの蓄積・放出を行うなど、運動に大きな役割を果たしていることが知られている [4]。このように、アクチュエータを含む身体特性と運動能力との関連という観点は重要であり、バイオメカニクスの知見と合わせてロボット設計論への応用が望まれる。運動を支える身体特性について理解を深めることで、巧みな制御系と合わせてロボットの高い運動能力の実現が期待される。

2. 研究目的

本研究の目的は、跳躍・着地ロボットの開発を通じて、ダイナミックな全身動作における身体特性の現れを明らかにすることである。身体の果たす役割が特に注目されるような動作として跳躍・着地を取り上げる。機構だ

けでなく、アクチュエータも含んだ身体の特性にも注目し、筋骨格系のバイオメカニクスに基づく設計論を適用した。開発したロボットによる跳躍・着地実験を行い、そのふるまいについて考察した。

3. 筋骨格系のバイオメカニクス

3-1 ダイナミックな全身運動とエネルギー配分

ヒト程度のスケールでダイナミックな運動ができる動物の脚では体幹から末端に向かって細くなるアクチュエータ配置が広く見られる (Fig.1)。汎用性を持った脚機構の設計にあたり、このような身体の工学的な妥当性について考察する。

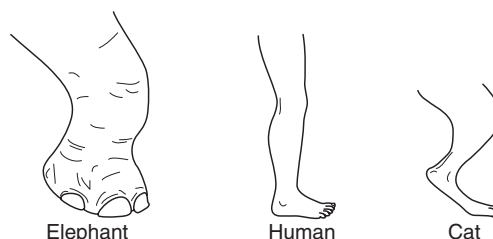


Fig.1 Various limbs of mammals.

スポーツなどの身体運動では、下肢や上肢の動きはおおまかに以下の2種に分解できる。

- ピストン系… 垂直跳び, 重量挙げ, 砲丸投げ
- スイング系… 歩行, 走行, ピッチング, キック

ピストン系の動きでは、複数の質量が直列に連結されたモデルとして脚を考えることができる。この時、全質量が一定であれば、下部質量が小さいほど跳躍高さが向上する。また、自動車サスペンションとのアナロジーから、ばね下質量が小さいほど地面凹凸に対する高速応答が可能である。サイズ・質量に比較して発生力の大きい腱が脚末端部で有効に働くことも説明できる。

スイング系の動きでは、脚を振る際に脚の慣性モーメントが小さいほど少ないエネルギーで脚を動かすことができる。全質量が一定であれば、先細りの形状で慣性モーメントが小さく、有利となる。

3.2 身体・機構の一部としてのアクチュエータ

動物の筋骨格系では、複数の関節にまたがって作用する多関節筋 (Multi-Articular Muscle) が存在し、1 自由度に 1 個のモータが対応することの多いロボットとの類推では効果の理解が困難である。多関節筋の機能の 1 つとして、骨格とともにリンク系を構成することが挙げられる [5]。例えばヒトの大腿の後側にあるハムストリングスは、大腿を前に振り出す動作に対して大腿骨とともに平行リンクを構成し、膝を曲げるように働く (Fig.2)。

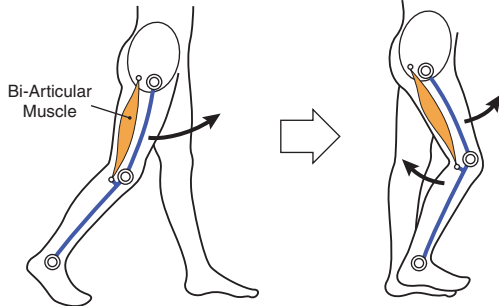


Fig.2 Bi-articular hamstring muscle as parallel linkage.

このような 2 関節筋の働きは、歩行や走行時の遊脚の振りに役立つほか、跳躍・着地のようなピストン系の動作に応用することができる。

4. 跳躍・着地と筋駆動脚機構

4.1 跳躍・着地タスク

跳躍・着地動作には次のような特徴があり、身体的作用が特に注目される動作である。

- 瞬間的に大きな力を発生・吸収することが必要。
- 地面との衝突・摩擦・接触状態のモデル化が困難。

跳躍・着地を周期運動として扱うホッピング・ロボットは盛んに研究されている [6, 7]。しかし、一回きりの過渡運動として扱った研究は少ない。機構面については、タスク分析に基づく特殊な機構が多く、跳躍・着地以外の運動も可能なロボットによる研究は少ない [8]。

4.2 筋駆動脚機構のための McKibben 型人工筋

本研究では、McKibben 型人工筋の生体筋との類似性や高いコンプライアンスといった特性 [9, 10] に加え、大きな瞬発力に着目してダイナミックな運動を行えるロボットへ適用する。運動に必要な発生力とエネルギーを見積もるための人工筋の静特性、およびダイナミックな動作に必要なパワーを見積もるための時定数を明らかにする。

McKibben 型人工筋の静特性を eq.(1) に示す [11]。この式から発生力・収縮率・内圧の関係が導出できる。

$$F = p \{ A (1 - \varepsilon)^2 - B \} \quad (1)$$

$$\text{ここで, } A = \frac{3}{4} \pi D_0^2 \cot^2 \theta_0, \quad B = \frac{1}{4} \pi D_0^2 \operatorname{cosec}^2 \theta_0$$

各記号は、 F [N]: 収縮力、 D_0 [m]: ラバーチューブの初期直径、 p [Pa]: 内圧、 θ_0 [rad]: 軸方向に対する繊維の初期角度、 ε : 収縮率、を表す。静特性から、跳躍・着地

動作を実現するために必要なエネルギーを發揮できる人工筋のパラメータを導出できる。

空気圧系における時定数とは“圧力 P [MPa] および温度 T [K] の空気圧源から有効断面積 S [m²] を流れる音速流れの空気量が、容積 V [m³]・圧力 $p(t)$ [MPa]・温度 T [K] の容器内の空気量と等しくなる時間 t [s]”と定義される [12]。これを人工筋に適用することで時定数を求めた (Fig.3)。

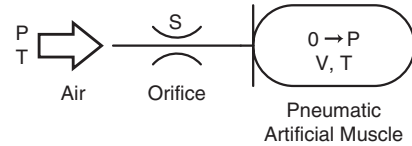


Fig.3 Time constant of McKibben artificial muscle.

人工筋の時定数 t_C [s] は eq.(2) で表される。充填過程の後期は垂音速流れとなるので、実際の時定数 t_C は t より長い。また、ある圧力の空気が充填された人工筋内圧が大気圧まで下がる時間は時定数 t_C よりも長い。

$$t_C = \left(1.285 - \frac{0.1013}{P} \right) t \quad (2)$$

$$\text{ここで, } t = 5.216 \times 10^{-3} \frac{V}{S} \sqrt{\frac{273.16}{T}}$$

時定数から、人工筋の發揮できるパワーを見積もることができる。また、圧力応答の限界が示される。

5. 跳躍・着地ロボット

5.1 ロボット概要

開発した跳躍・着地ロボットの外観と単純モデルを Fig.4 に示す。

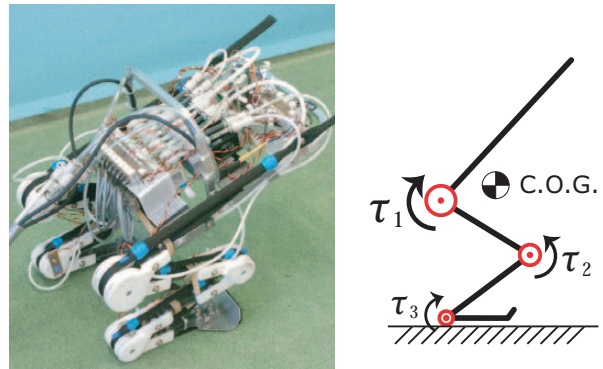


Fig.4 Jumping and landing robot.

開発したロボットの自由度数は 6 自由度 (3 自由度 × 2 脚)、質量は 3 [kg]、脚を伸ばした全長は 875 [mm] で脚の 1 つのリンク長は 180 [mm] である。関節の可動角は 15° ~ 165° である。跳躍高さは全長の 1/2 を上回る 450 [mm] を達成した。

開発したロボットの特徴は以下のようにまとめられる。

- 重心は体幹部にあり、端が地面と接する直列リンク
- 関節角度制御ではなく、トルク制御による運動
- 関節トルクは体幹で大きく、末端で小さい勾配分布
- 収縮にしたがって発生力が減少する筋の特性

5.2 システム構成

ロボットは、関節角を計測するポテンシオメータ、人工筋内圧を計測する圧力センサ、離着陸を検出する足先接地センサを備えている。ロボット上には、人工筋を制御するためのソレノイドバルブと、制御・計測のための回路モジュールが搭載されている。制御・計測は外部のPCから行い、空気圧源・電源は外部供給とした (Fig.5)。

アクチュエータの出力配分や特性を考慮するという観点から、ソフトウェアによる筋特性の模擬や、大出力のアクチュエータを外部に置いてワイヤで動力を伝えて関節を駆動するなどのシステム構成はとらない。

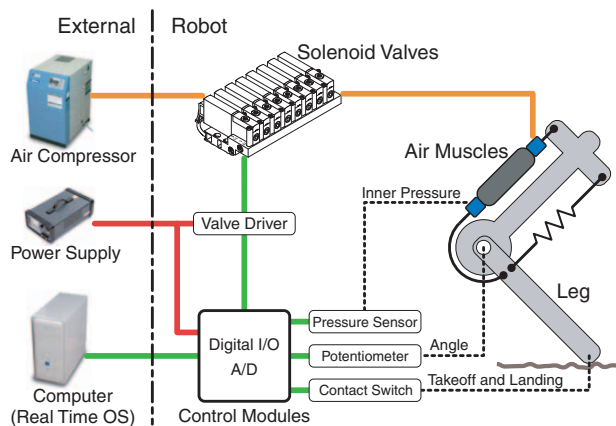


Fig.5 Overview of control and measurement system.

5.3 自由度配置

脚による空間移動の能力から、合理的な能動自由度の数を決定することができる [13]。フレームの構造を Fig.6 に示す。

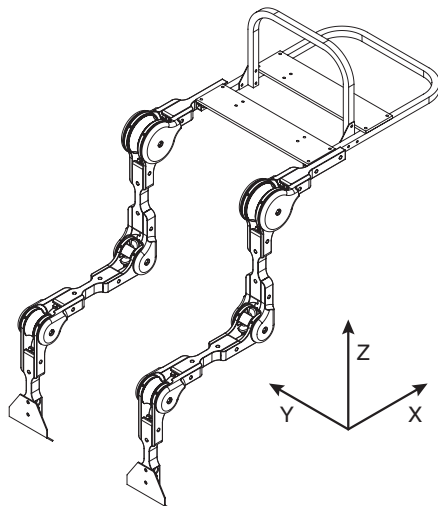


Fig.6 Skeletal structure of the robot.

機構の簡略化のため、回転関節からなる Sagittal (XZ) 平面上の脚を考える。足先を平面上で動かすための2自由度と、立って X 方向のバランスを取る重心の並進1自由度を合わせて、1脚は3自由度とした。これを Y 方向に拡張して3次元の2脚ロボットとした。脚幅を十分広くすることで Y 方向の重心の並進自由度を不要としている。

5.4 筋配置と発生エネルギー

跳躍・着地ロボットの筋配置を Fig.7 に示す。運動に有利な先細り型のアクチュエータ配置と、関節トルクを連関させる2関節筋をとり入れている。動物の脚では抗重力筋が発達している。開発したロボットでは、脚を伸ばす抗重力筋には空気圧人工筋を用いている。拮抗筋には機構を簡略化するために受動弾性要素を用いた。

準静的な過程を仮定すれば、eq.(1) から人工筋の発生エネルギーを算出できる。跳躍時には、人工筋内圧の立ち上がり遅れのために発生エネルギーは約 1/2 となる。さらに、全ストロークを使えないことや機構での損失などを含めると、理論的に発生できるエネルギーの約 1/4 が実際の仕事になる。開発したロボットの発揮できるエネルギーは 16 [J] 程度と見積もられ、実際の跳躍高さ 450 [mm] が妥当な値であることが分かる。

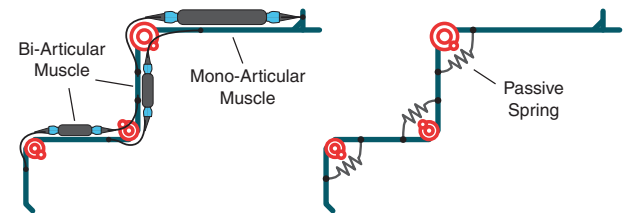


Fig.7 Main muscles and antagonistic springs.

6. 実験

6.1 椅子への跳び乗り

実際の動作として、椅子への跳び乗りを行った。人工筋の圧力制御によって実験を行った。関節角や人工筋の内圧、足先の接地を実時間で計測し、全身の動きはビデオ撮影によって記録した。椅子への跳び乗りの様子を Fig.10 に示す。また、この時の関節角度および制御入力である人工筋の内圧を Fig.8, Fig.9 に示す。跳躍して地面から離れた瞬間に脚を縮めることで高さ 400 [mm] の座面への跳び乗りを達成している。

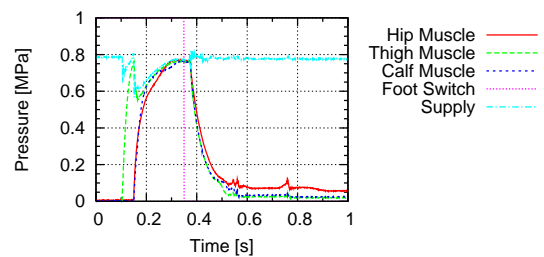


Fig.8 Pressure (control input) at jumping onto chair.

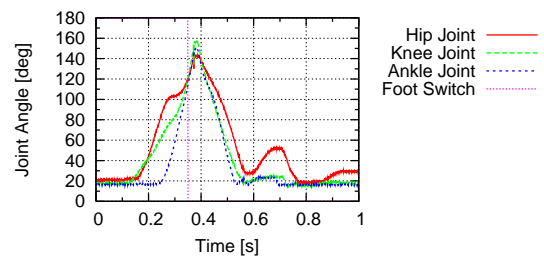


Fig.9 Joint angle at jumping onto chair.

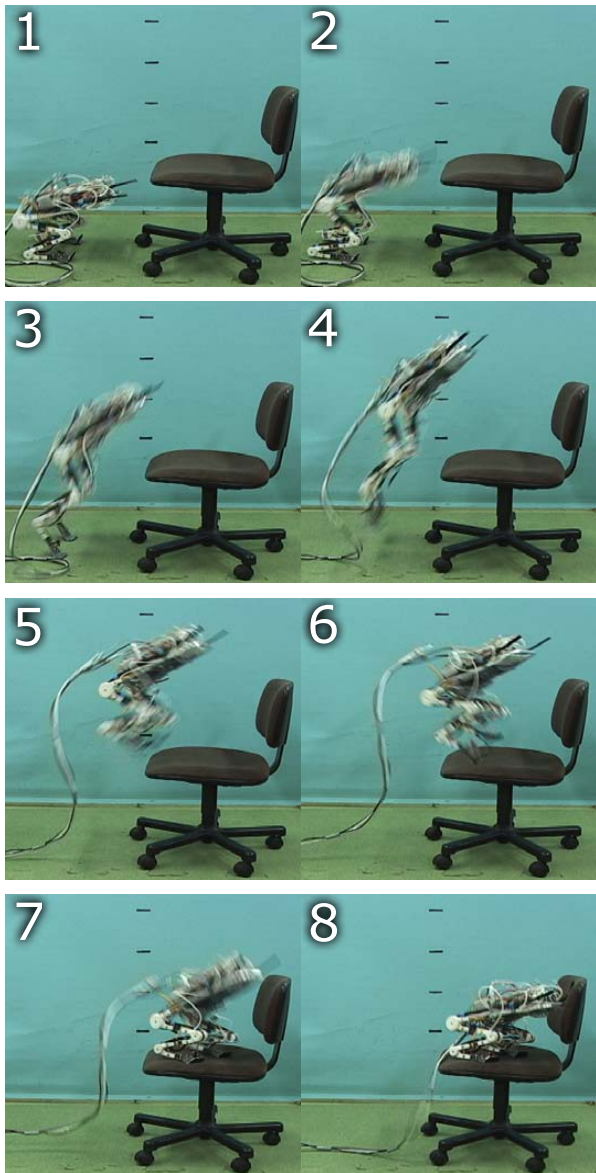


Fig.10 Jumping onto a chair with a height of 400mm.

6.2 考察

汎用性を持った多自由度脚機構でありながら、高い跳躍を実現できることが確かめられた。また、着地の際にはアクチュエータの持つコンプライアンスによって衝撃吸収ができ、ダイナミックな動作においても壊れにくい。

実験では、脚の伸び上がりに腰関節 ⇒ 膝関節 ⇒ 足首関節という一定の順序が共通して見られた。この時、制御入力ほぼ同時に与えており、脚の順序を指令していない。このことから、工学的妥当性を持った構成の筋骨格系の特性が、脚伸び上がりの一定順序として現れたことが分かる。

7. 結論

本研究では、ダイナミックな全身動作にける身体特性の現れを明らかにするため、アクチュエータを含む身体特性を考慮した設計を提案し、筋駆動脚機構による跳躍・着地ロボットを開発して実験を行った。

設計では、機構だけでなく身体の一部であるアクチュエータを重視し、アクチュエータの特性を明に取り込ん

だ設計論として筋骨格系のバイオメカニクスという観点から以下の2点に注目した。

- 運動に有利なアクチュエータ配置
… 体幹から末端に向かって小さくなる勾配分布
- 機構の一部としての2関節筋
… 関節トルクを連関させる

開発したロボットによって跳躍・着地実験を行い、身体特性の現れについて考察した。その成果は以下のようにまとめられる。

- 跳躍・着地というダイナミックな全身動作が可能で、しかも壊れないロボットが実現できた。
- 身体特性に規定された運動の具体例として、一定順序の脚伸び上がりが現れることを示した。

今後の課題として、モデルに基づく検証や、開発したロボットで跳躍・着地以外の動作実験を行うことなどがあげられる。

参考文献

- [1] Rolf Pfeifer and Christian Scheier: *Understanding Intelligence*, The MIT Press, 1999.
- [2] Thomas A. McMahon, John Bonner, John Tyler Bonner: *On Size and Life*, Freeman Press, 1983.
- [3] Yasuhiro Fukuoka, Hiroshi Kimura, Avis H. Cohen: "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped ROBOT on Irregular Terrain Based on Biological Concepts" *International Journal of Robotics Research*, Vol.22, No.3-4, pp.187-202, 2003.
- [4] R. McNeill Alexander: "Tendon elasticity and muscle function", In *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Comparative Physiology*, Vol. 133, Issue 4, pp. 1001-1011, 2002.
- [5] Eric R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell: *Principles of Neural Science*, 4th ed., Appleton & Lange, 2000.
- [6] 松岡清利, "跳躍・走行機構に関する基礎的研究", 日本機械学会論文集 (第1部), Vol. 43, 376 (昭52-12), pp. 4501-4509, 1977.
- [7] Marc H. Raibert. *Legged Robots That Balance*, The MIT Press, 1986.
- [8] 中野栄二, 大久保宏樹, "跳躍ロボット全般について", 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 40-45, 1993.
- [9] Glenn K. Klute, Joseph M. Czerniecki, Blake Hannaford, "Artificial Muscles: Actuators for Biorobotic Systems", *International Journal of Robotics Research*, Vol.21, No.4, pp.295-309, 2002.
- [10] 則次俊郎, "空気圧ソフトアクチュエータと人間親和メカニズム", 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 7, pp. 26-30, 2003.
- [11] Ching-Ping Chou and Blake Hannaford: "Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 1, pp. 90-102, 1996.
- [12] 中西 康二: 基礎から学ぶ空気圧技術, オーム社, 2001.
- [13] 米田 完, 空閑 融: "4足歩行ロボットの省駆動軸構成", 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.7, pp.946-952, 2004.