

筋骨格系のバイオメカニクスに基づく跳躍・着地ロボットの開発

Development of Musculoskeletal Robot for Jumping and Landing

新山 龍馬, 國吉 康夫

東京大学 大学院 情報学環・学際情報学府

Ryuma NIYAMA, Yasuo KUNIYOSHI

The University of Tokyo

Abstract— To understand the dexterity in motion performed by the musculoskeletal structure, we developed a biped jumping robot MOWGLI. 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, Biomechanics, Pneumatic Actuator, Artificial Muscle, Mechanical Softness

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]。

物理的実体である生物やロボットでは、理想的な機構やアクチュエータを得ることはできず、その特性が運動性能を規定することは明らかである。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。また、巧みな運動を実現する身体特性の理解とその設計論が求められている。

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]。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]。このような、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、筋骨格系のバイオメカニクスに基づいた跳躍・着地ロボットの開発を通じて、瞬発的な全身動作における身体特性の現れと役割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、特にアクチュエータも含んだ身体の特性に注目して跳躍・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 Explosive Movement と汎用機構としての筋骨格系

跳躍と着地、投擲(ピッチング、砲丸投げ)、打撃(キック、パンチ)のような瞬発的な動作は Explosive Movement と呼ばれる。Explosive Movement には次のような特徴があり、ロボットでの実現が難しいタスクである。

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

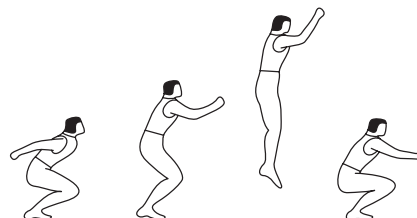


Fig.1 Vertical jumping.

ヒトによる垂直跳びの場合 (Fig.1) 離陸までの動作は 400ms 程度で完了するが、生体の神経系フィードバックは最短でも 40ms 程度を要する [8]。そこで、運動制御における筋骨格系の役割が注目される。ロボットでは計算速度を上げるというアプローチもある。しかし、有限な資源という観点からは、ハードウェアが持つ機能を活用することは工学的に妥当なロボット・アーキテクチャだと言える。

Explosive Movement をこなし、実世界できびきび動くためには、汎用性と高い運動性能の両立が求められる。しかし、これまで開発されてきた跳躍・着地ロボットの多くは専用機械であった [5, 6, 7]。そこで、コンプライアンスを備えた筋で駆動される、汎用機構としての筋骨格系に注目した。

3.2 運動に適した脚と筋配分

脚の機能は、体幹の支持・駆動と遊脚期の素早い踏み出しである。動物の中でも高い運動能力を持つ種の脚では先細り形状が広く見られる (Fig.2)。脚機構の設計にあたり、アクチュエータである筋が、大きさと質量を持った有限な物理的実体であることを考慮し、その合理的な配置について考察する。

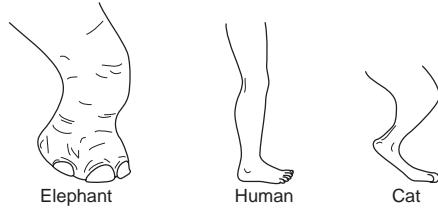


Fig.2 Various limbs of mammals.

スポーツバイオメカニクスによれば、下肢や上肢の動きはおおまかに以下の2種に分類できる。

- 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

跳躍では、合計質量が一定であれば末端リンクの質量が小さいほど跳躍高さが向上する。また、歩行や走行では慣性モーメントが小さいほど少ないエネルギーで脚を振り出すことができる。つまり、末端に向かって細くなる質量分布の脚は、運動に適した形状であることがわかる。一般にアクチュエータの出力は質量に比例するので、運動に適した脚形状におけるアクチュエータの出力配分は、体幹から末端に向かって小さくなるのが導かれる。

3.3 機構としての筋骨格系

動物の筋骨格系では、2関節にまたがって作用する2関節筋が多く存在し、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。2関節筋の直観的な理解として、骨格とともにリンク系を構成することが挙げられる [9]。Fig.3のように、2関節筋による機構 (B) は、各関節を独立に駆動する機構 (A) と各関節を平行リンクでつなぐ機構 (C) の中間に位置する

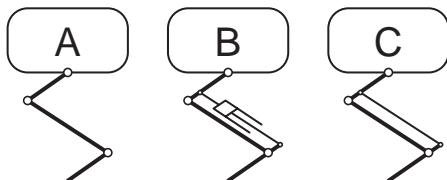


Fig.3 Bi-articular muscle as parallel linkage.

2関節筋は、リンク末端での操作性や剛性調節に役立っていることや、出力の向上に貢献していることが知られている [10]。

3.4 回転関節による多リンク系の跳躍モデル

本研究で扱う、汎用性を持った回転関節による多リンク系のモデルを Fig.4 に示す。これまで、跳躍に特化したモデルとロボットに関しては多く研究されているが [5]、本研究で対象としているような多自由度リンク系によるロボットの跳躍運動についての研究は少ない [11, 12]。また、バイオメカニクス分野においても生体を対象とした多自由度系の研究は多いが、工学的な実現を考慮したモデルはほとんどない [13]。

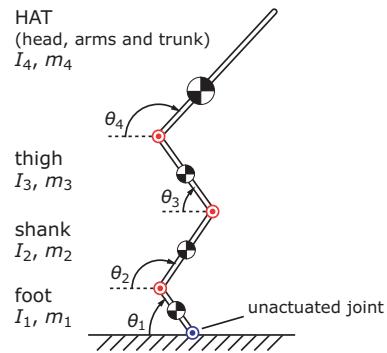


Fig.4 Four-segment model for the vertical jumping. m_1, m_2, m_3 are the lumped masses of the segment. I_1, I_2, I_3 are the moments of inertia of the segment.

このモデルでは、Sagittal 面上の動きだけを考えている。つま先でのスリップはないものとして非駆動関節として扱う。このようなモデルは Acrobot としてよく知られている劣駆動ロボットと同様の特徴を備えている。跳躍動作とは、初期姿勢 $\theta(0)$ と初期条件 $\dot{\theta}(0) = \ddot{\theta}(0) = 0$ に対して、離陸時刻 t_{off} で望みの重心速度 v と角速度 ω が得られるように関節トルクの時系列を与えることである。特に通常の跳躍では空中で回転しないために時刻 t_{off} で角運動量をゼロにすることが目標である。

4. 開発した跳躍・着地ロボット

4.1 ロボット概要

開発した跳躍・着地ロボット MOWGLI の外観を Fig.5 に示す。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。各関節の可動角は15~165 [deg] である。跳躍高さは全長の1/2を上回る500 [mm] を達成した。

筋骨格系のバイオメカニクスに基づき、汎用性を備えた筋駆動脚機構を採用し、筋の大きさ (\propto 発生力) は体幹で大きく末端に向かって小さくなる配分とした。また、2関節筋を備えている。跳躍・着地を可能とするアクチュエータには空気圧アクチュエータの一種である McKibben 型人工筋を用いた。

脚の質量分布を決定するのはアクチュエータの配分である。アクチュエータが有限の物理的実体であって、その質量配分が出力配分を決定するという観点から、ソフ

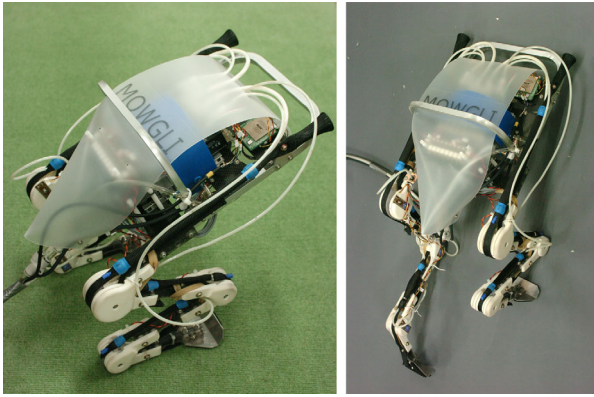


Fig.5 Jumping and landing robot MOWGLI.

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。

4.2 システム構成

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.6)。システムの動作する空気圧力は 0.75 [MPa]、消費電力は約 60 [W] である。

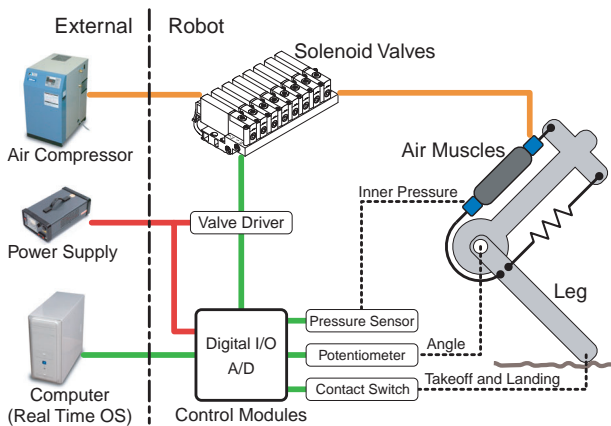


Fig.6 Overview of control and measurement system.

ロボットは、関節角を計測するポテンショメータ、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。

4.3 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 [14, 15] に加え、大きな瞬発力に着目して Explosive Movement を実現す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 [16]。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]: ラバークューブの初期直径、 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 [17]。これを人工筋に適用することで簡略的に時定数を求めた (Fig.7)。

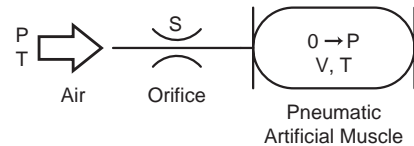


Fig.7 Time constant of McKibben artificial muscle.

人工筋の時定数 t_c [s] は eq.(2) で表される。充填過程の後期は亜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、圧力応答速度の限界が示される。

4.4 筋配置と発生エネルギー

跳躍・着地ロボットの筋配置とモーメントアームを Fig.8 に示す。運動に有利な先細り型のアクチュエータ配置と、2 関節筋をとり入れている。開発したロボットでは、抗重力筋には空気圧人工筋を、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。

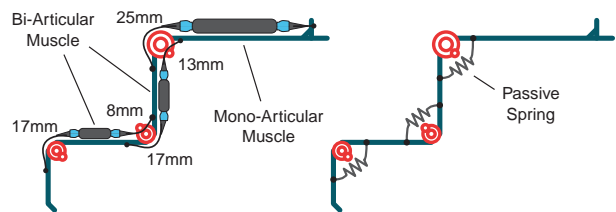


Fig.8 Main antigravity muscles and antagonistic springs.

脚の 2 関節筋は内径 $\phi 6$ mm 有効長 90mm、単関節筋は内径 $\phi 10$ mm 有効長 190mm である。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. 開発したロボットの実験から計測された跳躍高さは最大 500 [mm] で, 理論的に発生できるエネルギーの約 1/4 が実際の仕事になっていると見積られる. これは, 短い時間で完了する跳躍動作では人工筋内圧の立ち上がり遅れのために筋の発生エネルギーが約 1/2 になること, さらに, 全ストロークを使えないことや機構での損失によるものと考えられる.

4.5 骨格と自由度配置

跳躍・着地ロボットのフレーム構造を Fig.9 に示す.

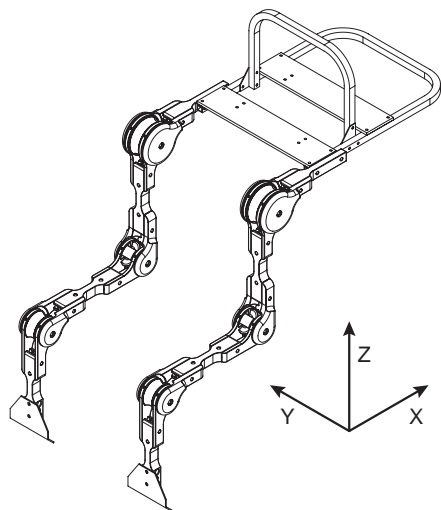


Fig.9 Skeletal structure of the robot.

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 1 脚は 4 リンク 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. 脚の合理的な能動自由度の数は, 空間移動の能力から, 検討することができる [18].

跳躍・着地動作のような Explosive Movement では, アクチュエータばかりでなく骨格や関節の構造に対しても強度と質量の面で厳しい要求がある. 開発したロボットでは, 軽量で耐衝撃性の優れた樹脂材料や樹脂ベアリングを多用している.

5. 実験

5.1 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.12 に示す.

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.10, Fig.11 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. この時, 最大跳躍高さは約 500 [mm] で, 成功率は約 9 割であった.

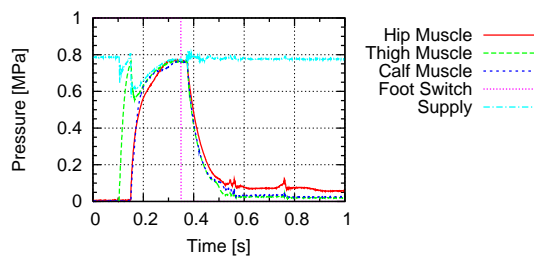


Fig.10 Pressure (control input) at jumping onto chair.

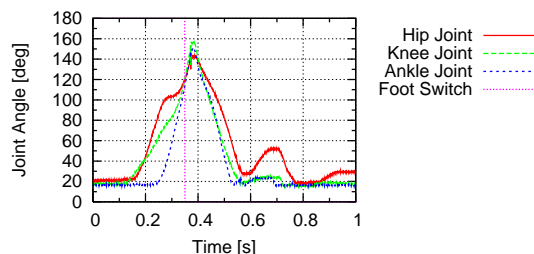


Fig.11 Joint angle at jumping onto chair.

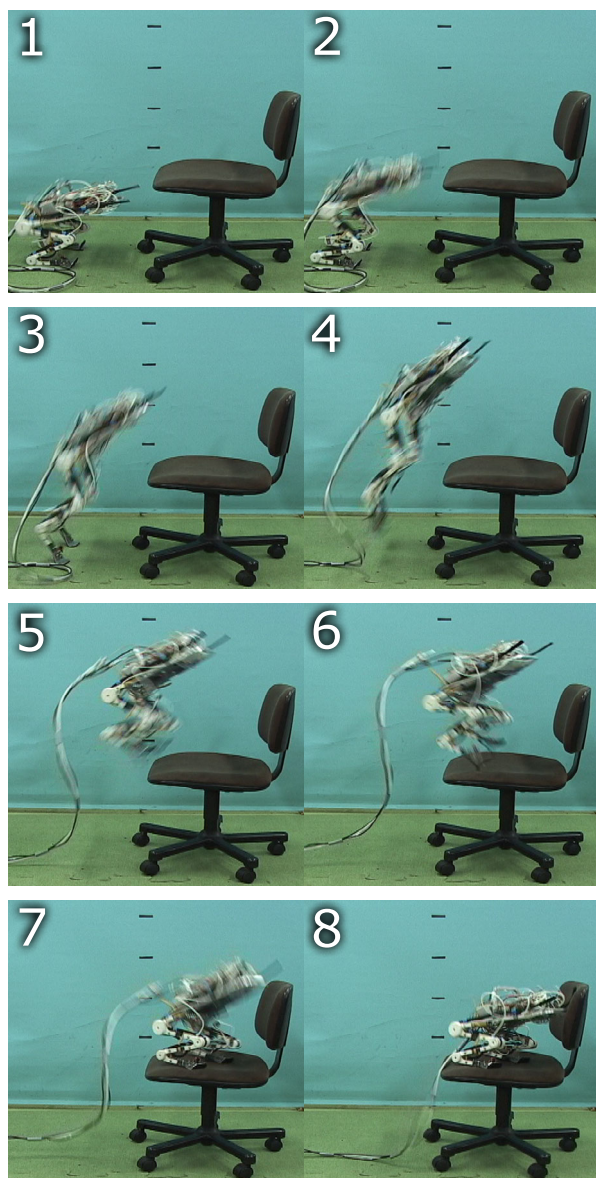


Fig.12 Jumping onto a chair with a height of 400mm.

5.2 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はいない。

関節伸展の順序を考察するために鉛直方向の運動だけを考えた Fig.13 のモデルを用いる。質量は胴体に集中しており、脚の質量は無視できるほど小さい。跳躍運動の運動方程式は $m\ddot{x} = F(t) - mg$ となり、跳躍高さは離陸時刻 T_{off} までの力積 $\int_0^{T_{off}} (F(t) - mg)dt$ で決まる。脚は、関節の直列接続からなるため、変位は各関節変位の和であり、各関節の発生力はつり合う。より高い跳躍のため、関節の出力を最大限利用する動作について考える。

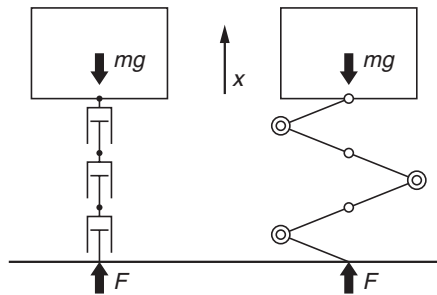


Fig.13 Tandem actuator models of jumping.

胴体を支えるために、関節が鉛直方向に出せる力の下限 $F_{min} > mg$ であると考えられるので、準静的な跳躍動作 ($\ddot{x} = 0$) では関節の伸展に順序はない。

各関節出力の上限が等しい場合、運動指令によって伸展に順序をつけると、同時に伸展させた場合よりも床反力が小さくなって跳躍高さは低下する [20, 19]。

各関節出力の上限が異なる場合、関節が負の仕事をしたためには、先に伸展できるのは発生力が最大の関節のみで、他の関節は物理的拘束力によってつり合いを保つ。伸展にともない、アクチュエータの特性に従って関節発生力が減少すると他の関節が順次伸展できるようになる。この時、床反力は単調減少となる。

以上より、最大跳躍のための関節伸展順序は、アクチュエータの出力配分によって決まることが分かる。しかも、物理的実体としてのアクチュエータの運動に適した出力配分は 3.2 節のように根拠が与えられる。

跳躍における関節の伸展に腰 ⇒ 膝 ⇒ 足首という一定の順序が現れる条件は次のようにまとめられる。

- 胴体に質量が集中した倒立振り子モデル
- 直列に接続された駆動関節からなる脚
- 出力の異なるアクチュエータ (体幹 > 末端) の配置
- 加速度の大きいダイナミックな運動

以上の議論が成り立たないのは、アクチュエータが負の仕事を生産できる場合や、発生力を最大限まで使わずに運動する場合である。

6. シミュレーション

6.1 開発したロボット筋骨格系のシミュレーション

バイオメカニクス分野で取り扱われる生体とは異なった、工学的に実現された筋骨格系を持つ跳躍・着地ロボットの動力学シミュレーションを行った。開発したロボットの筋と骨格のモデルを含んだシステムを Fig.14 に示す。2 関節筋の効果も考慮されている。

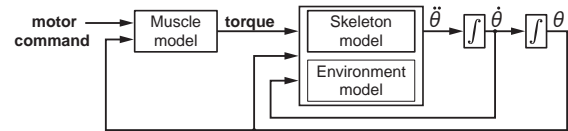


Fig.14 Simulation model of musculoskeletal system.

垂直跳び動作のシミュレーション結果を Fig.15 に示す。開発した実機とほぼ同じ動作が再現でき、モデルの妥当性が確かめられた。また、水平面上での動作と全く同じ運動指令を与えた場合でも、 ± 5 [deg] の勾配がある地面上で破綻することなく垂直跳び動作ができた。

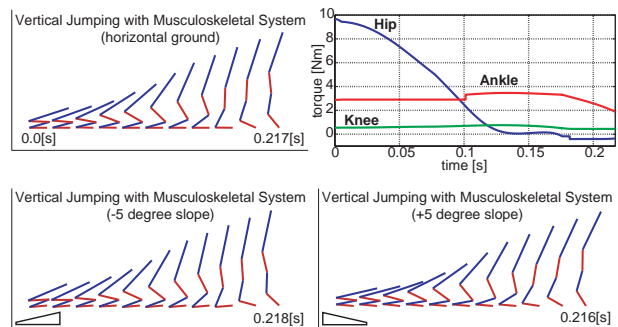


Fig.15 Simulation of vertical jumping on level ground.

6.2 筋骨格系によるフィードバック制御

跳躍・着地では動作時間が短く、フィードバック制御に多くの計算資源を要する。これに対し、生体では運動指令をフィードフォワードに与えた時、筋骨格系が高速なフィードバック制御系として働くことが指摘されている [8]。筋骨格系の制御への貢献について調べるため、前節のシステムから筋モデルを除いて、直接関節トルクの時系列を与えるオープンループ制御システム (Fig.16) のシミュレーションを行って比較した。

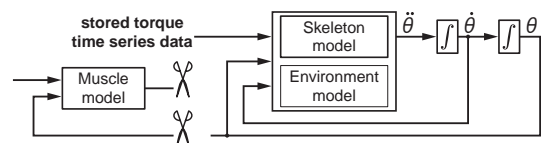


Fig.16 Simulation model of openloop control system.

前節で行った跳躍シミュレーションの関節トルクを記録し、オープンループ制御のための関節トルクの時系列

とした．そのため，外乱がなければ両者は同じふるまいをする．外乱として胴体リンクに屈曲方向の初期角速度 $-1[\text{rad/s}]$ を与え，筋骨格系を介した運動と，単純なオープンループ制御による運動を比較した結果を Fig.17 に示す．動作開始時に完全に静止することは現実的ではないので，外乱は妥当なものである．

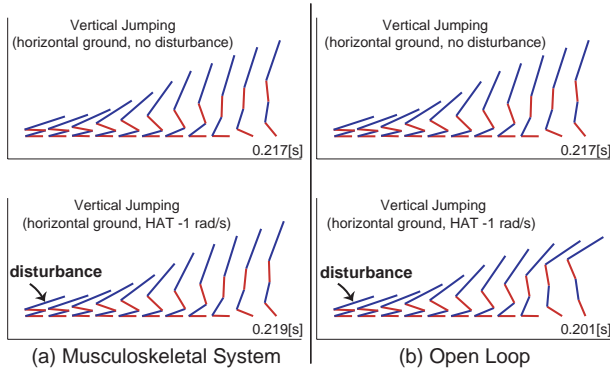


Fig.17 Simulation of vertical jumping with disturbance.

外乱がない場合の跳躍動作では，関節トルクの時系列は一致するので2つの制御モデルで違いはない．外乱を与えた場合，筋骨格系を介した制御では筋骨格系の特性によって関節トルクが調整される．外乱を加えた場合でも筋骨格系モデルがほぼ同じ跳躍動作を達成しているのに対し，オープンループ制御モデルでは外乱の影響で姿勢が崩れ，離陸が早くなってしまう．この結果から，筋骨格系が瞬発的な動作における物理的なフィードバック制御系として働くことが分かる．

7. 結論

本研究では，専用機械ではない多自由度ロボットによる跳躍・着地の実現を目指し，実際に筋骨格系を持った跳躍・着地ロボットを開発して実験と解析を行った．

まず，バイオメカニクスの観点から Explosive Movement としての跳躍・着地動作の特徴を明らかにし，アクチュエータの物理的性質から末端に向かって細くなる脚形状や2関節筋の有用性について述べた．

工学的な実装にあたっては，McKibben 型空気圧人工筋と樹脂を多用した骨格を採用し，2脚の跳躍・着地ロボット MOWGLI を設計・製作した．実験では椅子への跳び乗りを実現し，500mmの跳躍高さが得られた．これは，多自由度ロボットとしては非常に大きい値である．

実験において，運動指令に関わらず関節の伸展に腰 ⇒ 膝 ⇒ 足首という一定の順序が見られた．これを説明するため，単純化された跳躍モデルを考え，アクチュエータの物理的性質から導いた筋の配分が関節伸展順序の原因となっていることを示した．これは，身体のダイナミクスから運動を理解する一つの手がかりである．

さらに，ロボット筋骨格系の制御への貢献についてシミュレーション解析した．外乱への応答をオープンループ制御モデルと比較することで，動作が完了するまでの

時間が非常に短い動作においても，筋骨格系が物理的なフィードバック制御系として有効に働くことを示した．

今後の課題として，情報が不確かな地面への着地制御や跳躍・着地前後の姿勢制御の検討，他の動作の実現が挙げられる．

謝辞 本研究は文部科学省科学研究費の補助を受けて行われた．開発にあたっては産業技術総合研究所の長久保晶彦博士から貴重な助言を受けた．ここに厚く感謝の意を表す．

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] 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.
- [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] Arthur J. van Soest and Maarten F. Bobbert: "The Contribution of Muscle Properties in the Control of Explosive Movements", *Biological Cybernetics*, Vol.69, No.3, pp.195-204, 1993.
- [9] Eric R. Kandell, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell: *Principles of Neural Science*, 4th ed., Appleton & Lange, 2000.
- [10] 辻敏夫, 高橋利影, 伊藤宏司, "筋運動制御系のインピーダンス調節機構と手先操作性", *計測自動制御学会論文集*, Vol. 24, No. 4, pp.385-392, 1988.
- [11] 有川敬輔, 美多勉, "多自由度跳躍ロボットの設計—基本設計と計算機シミュレーション—", *日本ロボット学会誌*, Vol. 20, No. 2, pp.92-100, 2002.
- [12] Naoyuki SHIRAIISHI, Yasuyuki KAWAIDA, Yuji KITAMURA, Shigeki NAKAURA, Mitsuji SAMPEI, "Vertical Jumping Control of an Acrobat Robot with Consideration of Input Timing", *Proc. of the 41st SICE Annual Conference (SICE2002)*, Vol. 4, pp.2531-2536, 2002.
- [13] : "An Optimal Control Model for Maximum-Height Human Jumping", *Journal of Biomechanics* Vol.23, No.12, pp.1185-1198, 1990.
- [14] Glenn K. Klute, Joseh M. Czerniecki, Blake Hannaford, "Artificial Muscles: Actuators for Biorobotic Systems", *International Journal of Robotics Research*, Vol.21, No.4, pp.295-309, 2002.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 中西康二: 基礎から学ぶ空気圧技術, オーム社, 2001.
- [18] 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.
- [19] R. McNeill Alexander: "Sequential Joint Extension in Jumping", *Human Movement Science*, Vol.8, Issue 4, pp.339-345, 1989.
- [20] Gerrit Jan van Ingen Schenau: "From Rotation to Translation: Constraints on Multi-Joint Movements and the Unique Action of Bi-Articular Muscles", *Human Movement Science*, Vol.8, Issue 4, pp.301-337, 1989.