

非対称拮抗駆動と二関節筋をふくむ人工筋骨格系ロボット による高所からの着地

新山 龍馬 (東京大学) 國吉 康夫 (東京大学)

Musculoskeletal Robot with Anti-Gravity Muscle and Bi-Articular Muscle

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

Abstract— The musculoskeletal system gives animals the ability to move in a huge variety of environments. The artificial musculoskeletal system proposed here is based on the engineering concept of using biological structures as guidelines for robot architecture. The design method for the multi-joint actuator-link system is derived from kinetic analysis. Our experimental system is a pneumatically actuated bipedal robot. The robot's artificial musculoskeletal system consists of McKibben pneumatic muscle actuators and two legs with hip, knee, and foot joints. We demonstrate the physical ability of the robot in soft landing after drop from one-meter-high.

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

1. はじめに

動物がもつ、実世界において多様でダイナミックな運動を行う能力は、知能の身体的基盤として、また、より優れたロボットを作るために注目されている。

これまで開発されてきた跳躍ロボットなどのダイナミックな身体運動を行うロボットは、動きの多様性に欠ける省自由度の専用機械が多く [12][10][17]、走る・跳ぶなど動物に匹敵するダイナミックな多自由度全身運動を行えるロボットは実現していない。

脊椎動物が採用している筋骨格アーキテクチャは、ダイナミックな身体運動を可能にし、様々なスケールの身体と多様な生態を支えている [11]。生物規範の観点から、筋骨格系を工学に応用することが考えられる。例えば、基礎医学において運動器の機能解剖学が筋の付着と形態を明らかにしている [19]。また、バイオメカニクス分野では、筋や腱の数理モデルやその特性の果たす機能、スポーツ動作などが活発に研究されている [1][13][20]。しかし、ロボットへの応用例は少ない [8][6]。

生体の筋骨格系をロボット・アーキテクチャに応用しその設計論を構築することで、ヒトをふくむ動物の身体運動についての知見や、高い運動能力をもったロボットの実現が期待される。

2. 研究目的

本研究では、人工筋骨格系の概念を提案し、その設計について議論する。従来のロボット・アーキテクチャでは実現が難しい高所からの落下と着地を取り上げ、空気圧人工筋を用いた筋骨格ロボットによる実験を行って筋骨格アーキテクチャの妥当性を示す。

3. 人工筋骨格系

人工筋骨格系 (Artificial Musculoskeletal System) とは、脊椎動物だけのものであった筋骨格系を、工学的に実現しようとするロボット・アーキテクチャの一種である。特定の実装を仮定しないモデル化を試みる。

3-1 アクチュエータ-リンク系としての運動器

関節トルクのレベルでは、多関節ロボットや動物の筋骨格系は、回転関節で接続された直列リンク系として統一的に扱うことができる。しかしながら、運動性能を大きく左右するアクチュエータの特性や駆動様式、アクチュエータ配置とリンク質量の関係などは考慮されていない。

そこで、直列リンクモデルに関節駆動のアーキテクチャを加えたアクチュエータ-リンクモデルを考える。アクチュエータとは様々な形態のエネルギーを運動エネルギーに変換する変換器である。特殊な例として、アクチュエータが筋、リンクが骨格のとき、これは筋骨格モデルである。

3-2 人工筋骨格系の構成要素と特長

人工筋骨格系は、回転関節で接続された直列リンク系と、以下の要素から成り立つ駆動系によって特徴づけられる。

- 張力のみを伝える伝動要素 (腱、ワイヤ、ベルト)
- 大出力アクチュエータによるダイレクトドライブ

腱駆動は、アクチュエータを関節部から分離できるためロボットアームなどに使われる [16][3]。腱駆動によって、多関節の同時駆動や干渉駆動、座屈に耐える必要がない駆動系の軽量化、腱をガイドする関節面の形状とモーメントアームの設計などが可能になる。

慣性や摩擦などの内部抵抗が少ない大出力アクチュエータを用いたダイレクトドライブによって、高速大出力と、高いバックドライバビリティ (back-drivability) が得られる。腱のダイレクトドライブは DD ロボット [2] の利点もふくんでいる。

3-3 アクチュエータ-リンク系の運動表現

ヒトの運動学的解析では、筋骨格系の作業空間・関節空間・筋空間のマッピングから主に上肢の運動インピーダンスが調べられてきた [21][9]。

ここでは、運動学・静力学的な運動記述を、より一般

的なアクチュエータ-リンク系に拡張する。

微分運動学と静力学の双対性より、関節角速度 $\dot{\theta}$ をリンクエンドの速度に変換するヤコビ行列 $J(\theta)$ によってリンクエンドに働く力 Q と関節トルク τ の平衡は eq.(1) で表せる。

$$\tau = J(\theta)^T Q \quad (1)$$

ここで、関節角速度 $\dot{\theta}$ をアクチュエータの速度 (直動アクチュエータの場合) または角速度 (回転アクチュエータの場合) に変換するヤコビ行列 $G(\theta)$ を考える。この時、並進力とトルクから成るアクチュエータの出力 F と関節トルク τ の平衡は eq.(2) で表せる。

$$\tau = G^T(\theta) F \quad (2)$$

行列 $G(\theta)$ の各項は、ある姿勢 θ におけるモーメントアーム (直動アクチュエータの場合) または伝動比 (回転アクチュエータの場合) と回転方向を表している。

以上より、アクチュエータ-リンク系における、作業空間、関節空間、アクチュエータ空間の静力学的関係が記述できた。このことによって、アクチュエータの種類や伝動形式に依存せず、複数アクチュエータが多関節に作用する場合も含めた議論が可能になった。

3.4 下肢アクチュエータ-リンク系の特性解析

アクチュエータ-リンク系の具体的な例として、二関節筋をふくんだ 10 筋で駆動される 2 次元平面上の 3DOF 脚 (Fig. 1) を取り上げる。

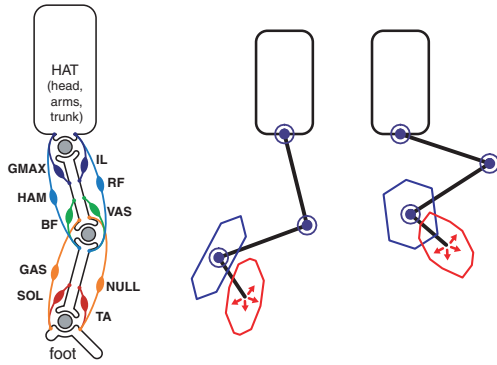


Fig.1 Kinetic analysis of the musculoskeletal leg. Symbols in the diagram are: gluteus maximus muscle (GMAX), iliopsoas (IL), hamstrings (HAM), rectus femoris (RF), short head of biceps femoris (BF), vastus (VAS), gastrocnemius (GAS), no name (NULL), soleus (SOL), tibialis anterior (TA).

アクチュエータの出力ベクトル F を eq.(3) のように定義する。張力 T の添字は筋の名称を表している。

$$F = [T_{GMAX}, T_{IL}, T_{HAM}, T_{RF}, T_{BF}, T_{VAS}, T_{GAS}, T_{NULL}, T_{SOL}, T_{TA}]^T \quad (3)$$

モーメントアームや各筋の張力は姿勢によらず一定で単位量 1, 関節トルク $\tau = [\tau_{hip}, \tau_{knee}, \tau_{foot}]^T$ は Fig. 1 における反時計まわりとすると、ヤコビ行列 G は eq.(4) のように書ける。

$$G^T = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

実際に eq.(1), eq.(2) から足先での出力を計算した。異なる姿勢での、足関節および足先端で発揮し得るカベクトルの、全方向での最大出力分布を Fig. 1 に示す。2 関節 6 筋の最大出力分布は六角形になることが知られているが [5], 3 関節の脚先端では複雑な多角形となる。

4. 人工筋骨格系の設計

ここでは、人工筋骨格系の設計について以下の設計原理を導き、具体例を示す。

- 重力場に適した非対称拮抗駆動
- 運動に有利な脚の質量特性:
筋の近位側リンク (体幹に近い側) への配置

4.1 有限な身体資源と非対称拮抗駆動

実世界における運動は、有限な身体資源によって規定される。そこで、アクチュエータ群によって発揮できる運動エネルギーの総量が有限であるとき、アクチュエータの合理的な配分を考えてみよう。

ヒトの上肢と下肢の筋断面積を比較すると、下肢では体幹を支えながら重力に打ち勝って運動するために抗重力筋が発達している。また、他の動物でも同様の筋配分がみられる [4]。

本研究では、発達した抗重力筋による拮抗駆動を非対称拮抗駆動と呼び、人工筋骨格系の設計論に応用する。適用例として、下肢のモデルにおいて、単関節筋と二関節筋を完備した 10 筋モデルと、抗重力筋が発達した 5 筋非対称拮抗駆動モデルの足先の出力分布を比較した (Fig. 2)。

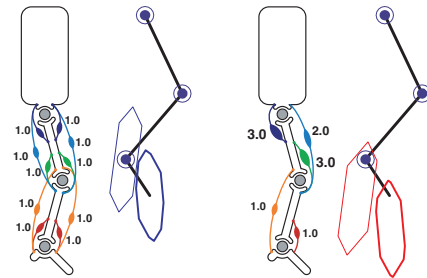


Fig.2 Comparison of the force distribution between the full muscle and anti-gravity muscles.

筋力の総和が等しいにも関わらず、抗重力筋の発達した非対称拮抗駆動では重力場に適応した脚特性が得られている。以上より、有限な身体資源という観点から、非対称拮抗駆動を用いた筋骨格系の設計手法を示した。

4.2 質量分布とアクチュエータ配置

筋骨格ロボットの設計では、ある関節を駆動する筋は遠位側リンクと近位側リンクのどちら側にも配置でき、同じ作用をする筋の配置にも冗長性があることがわかる (Fig. 3)。

ヒトの運動器では、ある関節を駆動する筋は必ず近位側の骨格に沿うことが知られており、唯一の例外は“ビー

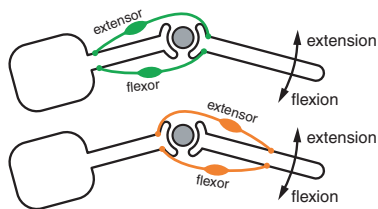


Fig.3 Redundancy of the muscle layout.

ル持ち上げ筋”と呼ばれる腕橈骨筋 (brachio radialis) である [19][18] . これは、循環器系などとの関連の他、身体運動に有利な形態と質量という観点から説明できる .

下肢の動作はおおまかにピストン系 (垂直跳び) とスイング系 (走行, キック) に分けられ, どちらの動きに対しても, 慣性モーメントが小さい (末端質量が小さい) 先細りの脚が有利である . 脚や腕の質量は筋と骨格に占められているため, 近位側リンクに筋を配置する方が身体運動に有利であることがわかる .

以上より, 身体運動に適した脚の質量特性という基準から, 筋配置の冗長性を解決する指針が得られた .

4.3 跳躍・着地ロボットへの応用

人工筋骨格系の設計原理に基づいたロボットの実例として, 筆者らは脚をもった筋骨格ロボット “Mowgli” を開発し (Fig. 4), 多自由度の脚式ロボットとしては非常に高い跳躍を実現した [14][15] .

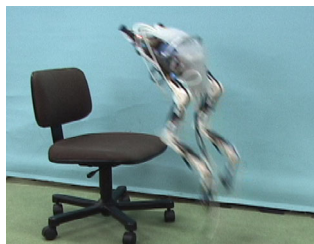


Fig.4 Mowgli: a bipedal jumping and landing robot.

ロボット Mowgli の筋骨格系は跳躍を実現する最小限度の空気圧人工筋で構成され, 大きな抗重力筋を備え, 跳躍・着地動作に適した脚の特性を与えられている (Fig. 5) . そのため, 最大跳躍高さは自身の全長の半分を超える 0.5[m] を達成できた .

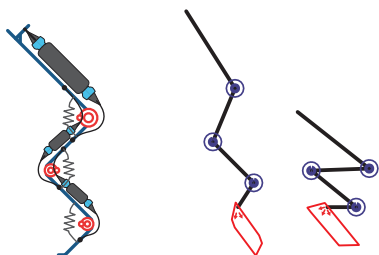


Fig.5 Antigravity muscles and antagonistic springs.

5. 筋骨格ロボットによる高所からの着地

5.1 ロボットの概要

実験に使用する人工筋骨格系ロボットの外観を Fig. 6 に示す . ロボットの自由度数は 8 自由度 (4 自由度 × 2 脚) , 質量は 10[kg] , 脚を伸ばした直立時の全高は 1.2[m] , 脚長は 0.64[m] である .

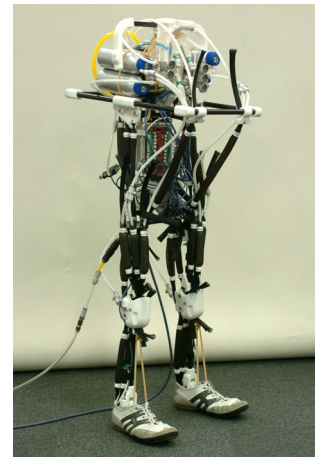


Fig.6 Musculoskeletal robot.

空気圧人工筋を用いており, 高度な運動制御を実現するために流量比例制御弁を採用した軽量な電空システムを構成し, 搭載している . センサとしては, 関節角を計測する非接触式回転センサ, 人工筋内圧を計測する半導体圧力センサがある .

ロボットの骨格と筋配置を Fig. 7 に示す . 筋骨格構造に特有の仕組みを活かし, 発達した抗重力筋と, 2 関節筋にまたがって作用する 2 関節筋を備えている .

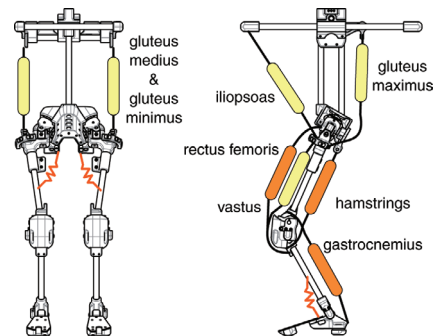


Fig.7 Layout of muscle.

骨格や関節機構には, 軸受けもふくめて軽量で耐衝撃性に優れた樹脂材料やカーボン FRP を多用している .

5.2 高所からの落下と着地の実験

跳躍にともなう着地や, 移動での飛び降りを想定して, 高所からの落下と着地の実験を行った (Fig. 8) . 各筋の内圧を一定に制御した状態でロボットの足裏から地面までの距離が約 1[m] の高所から自然落下させた . 着地後の定常状態で直立静止するフィードバック制御はないため, 着地動作の完了後には実験者が補助している .

高所からの落下と着地では 1.0[m] という非常に高い位置からの落下でもソフトな着地を実現した . 筋骨格構造のバックドライバビリティと空気圧人工筋のコンプライアンスが有効に働いたと考えられる .

5.3 実験の考察

着地時刻や着地場所の不確かさをふくみ高速な運動調節が必要な, 高所からの着地を実現した . 二関節筋をふくむ筋骨格系は, 末端での剛性に等方性を与えられることが知られおり [7] , 本実験はその工学的な応用となっている .

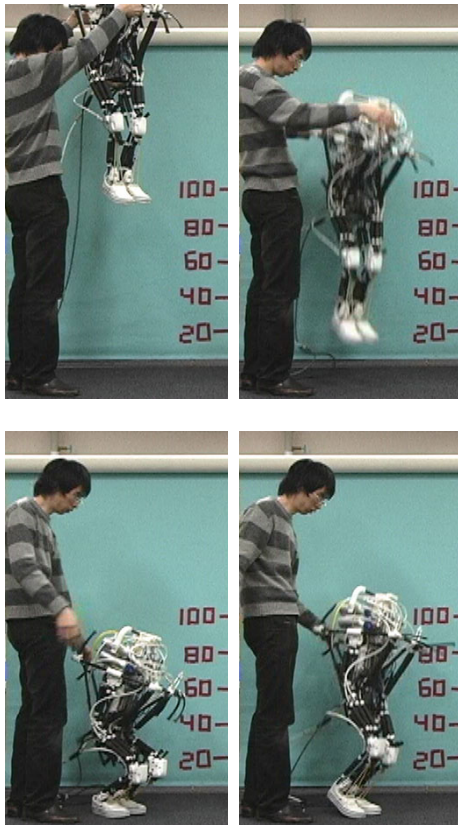


Fig.8 Soft landing from 1.0[m] high.

6. 結論

本研究では、ヒトをふくむ動物の運動能力の理解と工学的実現を目指し、人工筋骨格系の概念とその設計指針を、アクチュエータ-リンク系の静力学解析と実機実験によって示した。

運動器をアクチュエータ-リンク系として扱うことで、作業空間・関節空間・アクチュエータ空間における力の平衡を回転・並進アクチュエータを統一的に扱う形で記述した。また、筋骨格系の設計原理として、重力場に適応した非対称拮抗駆動と、筋の近位側配置を、バイオメカニクスの知見と静力学解析から導いた。

筋骨格系の利点が活かされるタスクとして、着地時刻や着地点のあいまいさを含み、高速な運動調節が必要な“高所からの落下と着地”を取り上げた。人工筋骨格系を備えたロボットで実験を行い、これまでのロボット・アーキテクチャでは実現が難しかったタスクを実現することで、計算コスト・ハードウェアコストに優れた筋骨格系の利点を示した。

人工筋骨格系の受動的な特性（運動指令が一定）を論じたが、運動制御との組み合わせとダイナミクス、筋や腱の特性とその役割についての精密な議論が課題である。

参考文献

[1] R. McNeill Alexander. Tendon elasticity and muscle function. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Comparative Physiology*, Vol. 133, No. 4, pp. 1001–1011, 2002.

[2] 浅田春比古. DD ロボット入門：開発史・機構・設計・制御技術. 工業調査会, 1987.

[3] Aaron Edsinger-Gonzales and Jeff Weber. Domo: A force

sensing humanoid robot for manipulation research. In *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Humanoid Robotics*, Vol. 1, pp. 273–291, 2004.

- [4] 藤川智彦, 大島徹, 熊本水頼. 動物の筋配列による四肢先端の運動学的解析. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 65, No. 635 (1999-7), pp. 237–244, 1999.
- [5] 藤川智彦, 大島徹, 熊本水頼, 横井信安. ヒト上肢における系先端の出力と拮抗筋群の協調活動. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 65, No. 632 (1999-4), pp. 253–260, 1999.
- [6] Yasuhiro Fukuoka, Hiroshi Kimura, and Avis H. Cohen. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts. *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 22, No. 3–4, pp. 187–202, 2003.
- [7] Neville Hogan. The mechanics of multi-joint posture and movement control. *Biological Cybernetics*, Vol. 52, No. 5, pp. 315–331, 1985.
- [8] Sang-Ho Hyon and Tsutomu Mita. Development of a biologically inspired hopping robot –kenken. In *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2005 (ICRA 2005)*, Vol. 4, pp. 3984–3991, 2002.
- [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] 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.
- [11] Thomas A. McMahon and John Tyler Bonner. *On Size and Life*. Freeman Press, 1983.
- [12] 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.
- [13] Donald A. Neumann. 筋骨格系のキネシオロジー. 医歯薬出版, 2005.
- [14] 新山龍馬, 國吉康夫. 筋駆動脚機構による跳躍・着地ロボットの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005 (Robomec2005), 2P1-N-046, 2005.
- [15] Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, and Yasuo Kuniyoshi. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system. In *Proc. of the 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, pp. 2546–2551 (ThC5.2), 2007.
- [16] 大鐘大介, 兵頭和人, 小林博明. 非線形バネ要素を持つ 7 自由度制御アームの機構と制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 8, pp. 68–75, 1996.
- [17] Marc H. Raibert. *Legged Robots That Balance*. The MIT Press, 1986.
- [18] Johannes W. Rohen, 横地千仞, Elke Lütjen-Drecoll. 解剖学カラーアトラス. 医学書院, 第 5 版, 2004.
- [19] Clem W. Thompson and R.T. Floyd. *Manual of Structural Kinesiology*. McGraw-Hill, 14th edition, 2000.
- [20] 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.
- [21] 辻敏夫, 伊藤宏司, 長町三生, 池本貴志. 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.