

ニューマティック人工筋骨格系によるダイナミック・ロボットの開発

A Dynamic Robot with a Pneumatic Artificial Musculoskeletal System

学 新山 龍馬 (東京大学) 正 國吉 康夫 (東京大学)

*Ryuma NIYAMA, The University of Tokyo, niyama@isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp

Yasuo KUNIYOSHI, The University of Tokyo

To understand dexterity in motion performed by animals, we developed a bipedal dynamic robot with a pneumatic artificial musculoskeletal system. 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. In our work, pneumatic artificial muscles are used for the muscular system. In the experiment, the robot achieved the high jumping, softlanding and kicking football. Our results demonstrate the contribution of the artificial musculoskeletal system as a physical feedback loop in explosive movements.

Key Words: Artificial Musculoskeletal System, Pneumatic Artificial Muscle, Bipedal Robot, Biomechanics

1. はじめに

身体をもった知能という観点から、内部処理系による制御の巧みさだけでなく、運動において身体が果たす役割が注目されている。有限な身体が運動能力を規定することは、アスリートによる激しい身体運動を考えれば明らかである。さらに、身体は単に運動を担うだけでなく、運動制御などに重要な役割を果たすことが“Morphological Computation”という概念で指摘されている [1]。身体ダイナミクスを利用した受動歩行機械はよく知られている [2]。また、バイオメカニクス分野では、筋や腱が走行に重要な役割を果たしていることや [3]、筋骨格系が垂直跳び時の高速な運動調節に寄与していることが知られている [4]。以上をふまえ、身体の活用が求められる動作として跳躍と着地、走行、打撃などのダイナミックな身体運動を取り上げる。

従来ロボットの一般的な運動制御では、多自由度マニピュレータのハードウェアと制御を基盤として、目標軌道を高精度に実現する手法が成果をおさめてきた。しかし、大トルク低速起動・低トルク連続運転にむいた電磁モータを用いる従来のロボット・アーキテクチャでは、接触をふくむ激しい運動は非常に困難であり、工学的な妥当性も薄い。

多自由度な自立ロボットによるダイナミックな身体運動の実現を考えると、生物と同様の厳しい制約条件のもとで設計解は狭まり、ロボットの身体は生物との共通点が多くなると考えられる [5, 6]。一方、限定された環境中での単一タスクであれば、工学的な設計解は多数あり、生物とかけ離れた様々なロボット・アーキテクチャを選ぶことができる。本研究では、生物規範の立場から動物の筋骨格系に着目する。

ダイナミック・ロボットの先行研究としては、跳躍・着地やホッピングを行うロボットがあげられる [7, 8, 9]。これらのロボットでは、アーキテクチャの工夫や生物規範アプローチ [10] がみられるが、跳躍以外の運動も可能な多自由度ロボットによる研究は少なく [11, 12, 13]、また、多自由度ロボットでは高い運動能力の実現が困難であった。

動物に匹敵する運動能力をもった自立ロボットはこれま

で実現されていない。筆者らは、筋骨格構造をもった跳躍・着地ロボットを開発し、椅子への跳び乗りなどを実現してきた [14]。これを発展させ、ダイナミックな運動が可能な筋骨格系を工学的に実現することで、ヒト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

ヒト身体運動の理解と工学的実現を目指して、本研究の目的は、多自由度ダイナミック・ロボットを実現するニューマティック人工筋骨格系の提案と、それを備えたロボットの開発である。

3. ダイナミックな身体運動と筋骨格系

3.1 Explosive Movement をふくむ身体運動

走行からの跳び乗り (図 1) のようにダイナミックな身体運動の例を考えると、そこには地面との衝突や脚のスイング、過渡的な跳躍と着地などがふくまれている。

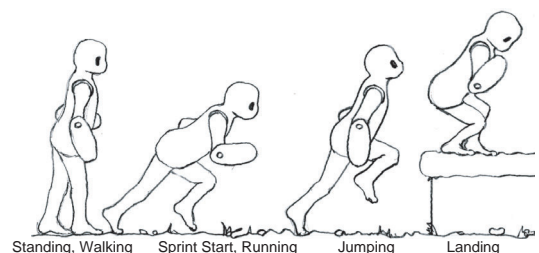


Fig. 1 Super Dynamic robot.

ダイナミックな運動の要素である、跳躍・着地、打撃 (パンチ, キック), 投擲 (ピッチング, 砲丸投げ) などの瞬発的な動作は Explosive Movement と呼ばれ [4]、以下のような要求からロボットでの実現が難しい。

- 大きな瞬発力と耐衝撃性
- 短時間で完了する動作の高速な調節
- 接触, 衝突の許容

地面をけて宙に飛び出すため、アクチュエータには高い出力/重量比が求められる。また、続く着地を行うためには関節のバックドライバリティと機械的なコンプライアンスが重要である。このように、ダイナミックな身体運動の実現には身体の活用が必要となり、これを解決する新しいロボット・アーキテクチャが求められる。また、衝突をふくむ動作では実ロボットによる実験が有効である。

3.2 筋骨格系のバイオメカニクス

ダイナミックな身体運動を実現する仕組みとして動物がもつ筋骨格系に着目し、バイオメカニクス分野の知見を、ロボット設計に応用する。具体例のひとつとして、動物の中でも優れた走行能力をもつ種に広く見られる先細り形状の脚(図2)の工学的妥当性を導く。

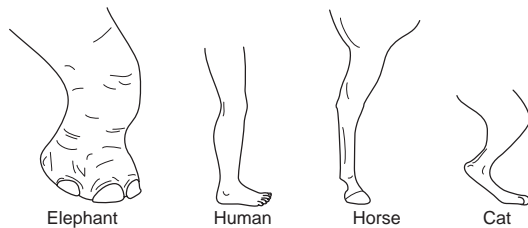


Fig. 2 Various limbs of mammals.

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。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大まかにピストン系とスイング系の2種に分類できる。ピストン系の動きである跳躍では、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、歩行や走行の脚スイングでは、脚の慣性モーメントが小さいほど省エネルギーである。筋肉が脚の質量特性を決めるということとを考慮すると、身体運動に有利な先細りの脚形状がアクチュエータである筋の配分を規定していることがわかる。

4. 人工筋骨格系

ここで提案するニューマティック人工筋骨格系 (Pneumatic Artificial Musculoskeletal System) は、ダイナミックな動作を実現する多自由度ロボットのためのロボット・アーキテクチャである。瞬発力と耐衝撃性を空気圧人工筋による筋骨格構造で実現し、身体運動のための空気圧制御を電空システムによって解決する。

4.1 人工筋骨格系のためのアクチュエータ

アクチュエータの代表的な原理は、電磁力と流体圧で、その他のニューアクチュエータは用途に限られるか、または実用段階にない。ロボット・アクチュエータとしては利便性と優れた性能から電磁モータが圧倒的に多く使われている。しかし、電磁モータは低トルク連続運転にむくが、瞬発的な動作にむいているとはいえない。そこで、油圧に比べて取り扱いが容易な空気アクチュエータの中でも瞬発力が得られ高い出力/重量比をもった空気圧人工筋を利用する。

接触の許容と耐衝撃性には関節のバックドライバリティが重要で、大出力の筋によって関節をダイレクト・ドライブする筋骨格系では容易に得られる。これは、減速機を要

する電磁モータではむずかしく、また、ダイレクト・ドライブ (DD) 電磁モータは重量とサイズに難がある。

4.2 空気圧人工筋

本研究では、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に加え、高い出力/重量比や瞬発力に着目して、空気圧人工筋を人工筋骨格系のためのアクチュエータとして利用する。空気圧人工筋にもいくつかの種類があるが、ここでは McKibben 型を用いた。設計に必要な空気圧人工筋の基礎特性について以下に述べる。

McKibben 型人工筋の静特性は式 (1) で表される [15]。ただし、この古典的な特性式は実際よりも 15% 程度高い出力を示すことが知られており、摩擦や弾性チューブの変形などを考慮したモデルが提案されている。

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

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

各変数は、 $F(t)$ [N]: 収縮力、 D_0 [m]: ラバーチューブの初期直径、 $p(t)$ [Pa]: 内圧、 θ_0 [rad]: 軸方向に対する繊維の初期角度、 $\varepsilon(t)$: 収縮率、を表している。

短時間に完了する瞬発的な動作では、人工筋の内圧上昇に遅れがあるために上記の静特性から計算されるエネルギーを十分に利用できないことが考えられる。そこで、配管やバルブをふくめた空気圧システム全体で発揮できるパワーを見積もるため、空気圧人工筋の時定数を求める。膨張した時の空気圧人工筋を容器と考えると(図3)、その充填過程における時定数は t [sec] は式 (2) で表される [16]。

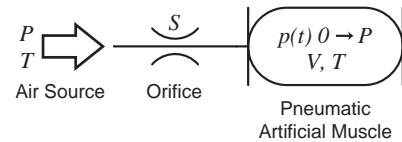


Fig. 3 Time constant of McKibben artificial muscle.

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

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

各変数は、 P [MPa]: 空気圧源の圧力、 V [m³]: 人工筋の容積、 S [m²]: 空気圧源からの経路の有効断面積、 T [K]: 空気圧源の温度、を表している。以上では充填過程を議論したが、ある圧力の空気が充填された人工筋の内圧が大気圧まで下がる時間は充填に必要な時間よりも長い。

5. 筋骨格ダイナミック・ロボット

5.1 ロボット概要

開発したロボットの外観を図4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。

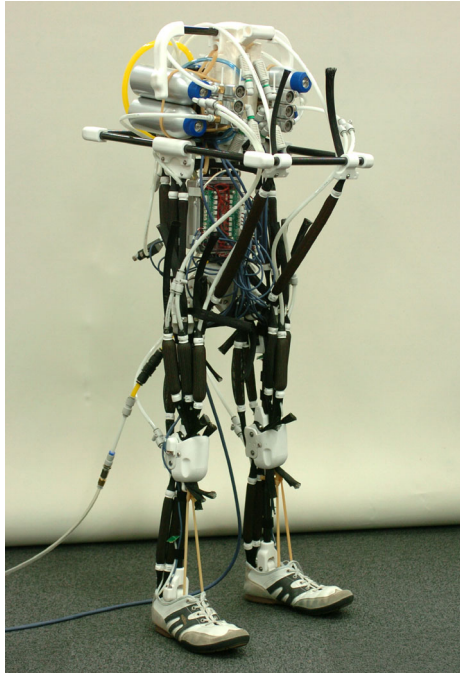


Fig. 4 Super dynamic robot.

5.2 電空システム

空気圧人工筋が古典的なアクチュエータであるにも関わらずロボットへの適用が少ない理由として、コンパクトな数値制御システムをつくるのが難しかったことが挙げられる。そこで、比較的新しい機器である流量比例制御弁を採用し、かつ軽量化して用いることで、高度な運動制御を行える軽量の電気-空気システムを構築した(図5)。

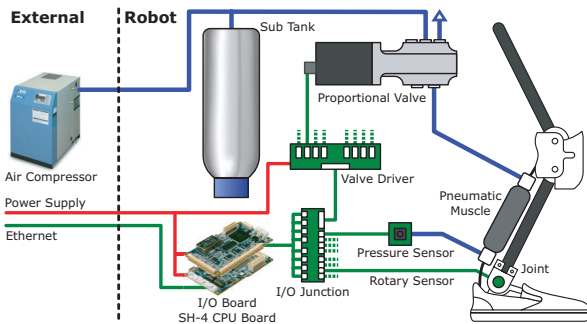


Fig. 5 Overview of electro-pneumatic control system.

電空システムはロボットに搭載されているため、電源およびエアの供給に必要な配線・配管はコンパクトで、ダイナミックな運動を妨げない。また、ロボット上には補助タンクが搭載されており、間欠動作であれば外部装置を必要としない自立型空気圧ロボットを視野に入れている。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。

5.3 筋系および骨格系

ロボットの骨格と筋配置を図6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。

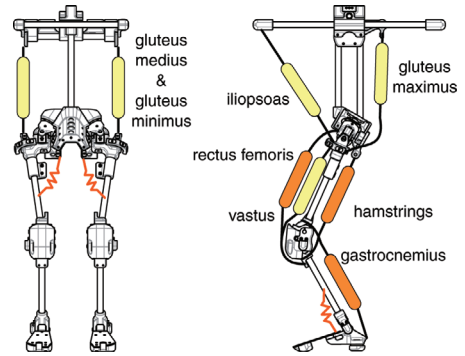


Fig. 6 Layout of muscle.

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。

6. ダイナミック運動のための基礎実験と考察

人工筋骨格系によって実現される運動能力を示すため、ダイナミックな身体運動のための基礎実験を行った。

6.1 直立

一般的な PID フィードバック制御を適用し、単関節の角度制御を行った。空気圧系のためゲインを高くできないが、PID 制御のみで角度制御を実現できた。次に、単関節の角度制御を基礎に、全関節の角度制御を行い、直立静止の実験を行った。足裏基底が狭く、コンプライアンスの高い空気圧ロボットだが、転倒までに 30[sec] の直立を実現した(図7)。

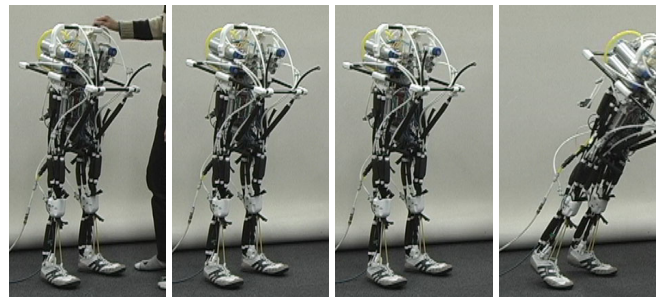


Fig. 7 Standing 30[sec].

直立時に計測した足首関節角度を図8に示す。目標値は 0[deg] 一定である。完全な直立静止ではなく、周期 2[sec] 程度の小さな揺れが観察され、転倒の原因となった。

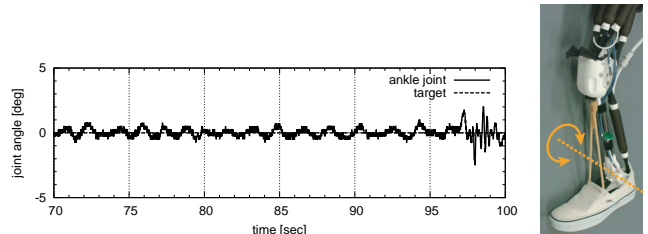


Fig. 8 Angle of foot joint.

このような重心揺動は、ヒトの直立の姿勢維持でも観察される。健常者では重心揺動は小さいが、片麻痺患者や視覚フィードバックがない場合はヒトでも重心揺動が大きくな

る [17] . 関節剛性が低いことに加え , 視覚や姿勢センサをもたないことが , 重心揺動の要因と考えられる .

6.2 垂直跳びおよび高所からの落下・着地

ニューマティック人工筋骨格系によって得られる瞬発力と耐衝撃性を示す実験を行った . 関節の動作は Sagittal 面上に限定した . シャガみ姿勢からの垂直跳びを図 9 に示す .

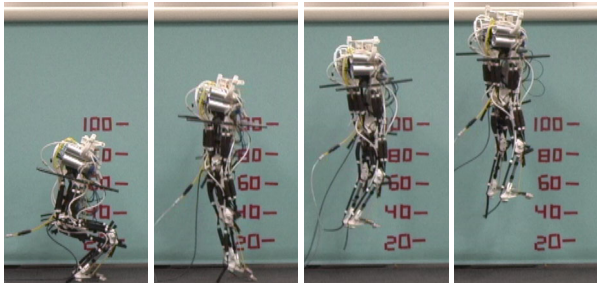


Fig. 9 Vertical Jumping.

次に , 跳躍にともなう着地や , 移動での飛び降りを実験して , 高所からの落下と着地の実験を行った (図 10) . 各筋の内圧を一定に制御した状態で高所から自然落下させた .

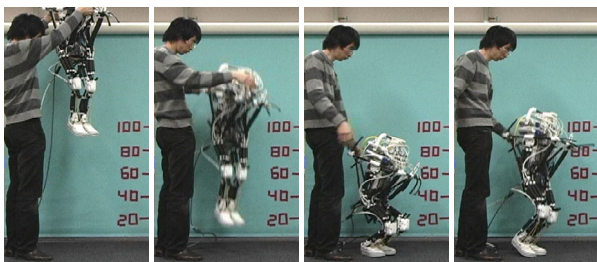


Fig. 10 Softlanding from height 1.0[m].

垂直跳びでは跳躍高さが 0.5[m] に達した . これは , 身長比で比較するとヒトよりも優れている . 脚の引き寄せを行うことで跳び乗り高さはさらに向上すると考えられる . 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 .

6.3 キック

ヒトに近いスケールを活かし , フットボール公式球を用いてインパクトをふくむ動作であるキック動作を行った .

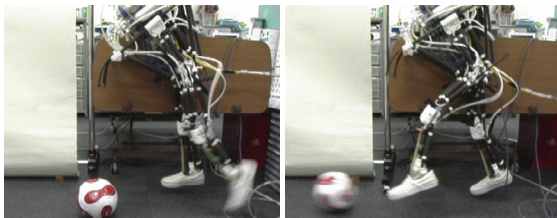


Fig. 11 Kicking FIFA inspected football (size 5).

走行や跳躍・着地では特に膝関節に大きな角速度とトルクが求められる . キック動作で計測されたひざ関節角速度は脚の振りおろし時に 10.5[rad/s] となり , ヒトの走行時遊脚ひざ関節角速度とほぼ同じ角速度が得られた .

7. 結論と課題

本研究では , ヒト身体運動の理解と工学的実現を目指し , 筋骨格構造をもったロボットを開発して実験を行った . 多自由度身体と瞬発力・耐衝撃性の実現のため , 生物規範の立場から空気圧人工筋を用いたニューマティック人工筋骨格系 (Artificial Musculoskeletal System) の概念を提案した . 人工筋骨格系を備えたロボットによる実験として直立静止 , 垂直跳びと高所からの落下と着地 , フットボールのキックを行った . 実験によってダイナミックな身体運動を実現する能力の一端を示した . また , 姿勢制御についてはバイオメカニクスの知見からヒトとの比較・考察を行った . 今後の課題としては , 身体ダイナミクスのモデル化と解析 , 要素技術の洗練 , 多様な動作の実現などがある .

文 献

- [1] Rolf Pfeifer, Fumiya Iida, and Gabriel Gómez, “Morphological computation for adaptive behavior and cognition”, In *International Congress Series*, Vol. 1291, pp. 22–29, 2006.
- [2] Tad McGeer, “Passive dynamic walking”, *The International Journal of Robotic Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 62–82, 1990.
- [3] R. McNeill Alexander, “Tendon elasticity and muscle function”, *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Comparative Physiology*, Vol. 133, No. 4, pp. 1001–1011, 2002.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Thomas A. McMahon and John Tyler Bonner, *On Size and Life*, Freeman Press, 1983.
- [7] 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.
- [8] Marc H. Raibert, *Legged Robots That Balance*, The MIT Press, 1986.
- [9] Hideyuki Tsukagoshi, Masashi Sasaki, Ato Kitagawa, and Takahiro Tanaka, “Numerical analysis and design for a higher jumping rescue robot using a pneumatic cylinder”, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 127, No. 2, pp. 308–314, 2005.
- [10] Sang-Ho Hyon and Tsutomu Mita, “Development of a biologically inspired hopping robot –Kenken”, In *Pro. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2005)*, Vol. 4, pp. 3984–3991, 2002.
- [11] 有川敬輔, 美多勉, “多自由度跳躍ロボットの設計”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 2, pp. 92–100, 2002.
- [12] 但馬竜介, 菅敬介, “1 脚ロボットによる跳躍動作の実現”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会 予稿集, 2F16, 2006.
- [13] Naoyuki Shiraishi, Yasuyuki Kawaida, Yuji Kitamura, Shigeki Nakaura, and Mitsuji Sampei, “Vertical jumping control of an acrobat robot with consideration of input timing” In *Proc. of the 41st SICE Annual Conference (SICE2002)*, Vol. 4, pp. 2531–2536, 2002.
- [14] 新山龍馬, 國吉康夫, “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”, 第 11 回ロボティクス・シンポジウム予稿集, pp. 50–55(1C1), 佐賀, March 2006.
- [15] 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.
- [16] 中西康二, 基礎から学ぶ空気圧技術, オーム社, 2001.
- [17] 中村隆一, 齋藤宏, 長崎浩, 基礎運動学, 医歯薬出版, 第 6 版, 2003.