

解 説

空圧駆動によるヒューマノイド

著 者 紹 介



ほそだ こう
細田 耕

大阪大学大学院情報科学研究科
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
E-mail : koh.hosoda@ist.osaka-u.ac.jp

1993 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。大阪大学工学部助手。同大学大学院工学研究科准教授を経て、2010 年同大学大学院情報科学研究科教授。現在に至る。生物型ロボットの研究に従事。日本ロボット学会、日本機械学会、IEEE などの会員。博士(工学)。



図1 マッキベン型空気圧人工筋

1. はじめに

ヒューマノイドロボットとは、ヒトに類似の形態を持つロボットである。ヒトと同じような形であることによって、例えば、人間と同じ環境で作業したり、人間と自然なコミュニケーションをしたり、あるいはヒトの身体構造の理解のための研究に使われるなどの目的に使用される。

本稿では、空圧駆動によって実現されるヒューマノイドロボットの移動に焦点を絞って解説する。ヒューマノイドロボットの移動様式は、二足による歩行、走行、跳躍である。これらを実現するために、著者らは、空気圧によって駆動される人工筋を用いてきた。

2. マッキベン型空気圧人工筋

まず、本解説で紹介されるヒューマノイドに使われている、マッキベン型空気圧人工筋(図1)について触れておく。この人工筋は、ゴムチューブが、ナイロン繊維で包まれた構造をしており、空気を供給すると、ゴムチューブが膨らむ力が、ナイロン繊維によって長手方向に変換される。サイズや構造によって異なるが、例えば、著者らの研究グループで作成しているものについては、7 気圧程度の圧縮空気を供給することによって、およそ 20~30 パーセントの収縮率、800N 程度の力を出すことができる。

マッキベン型空気圧人工筋の、もっとも特質すべき性質は、その柔軟性である。作動流体である空気の圧縮性と、ゴムチューブがもたらす弾性によって、この人工筋は、外部からの力に応じて弾性変形する。

この弾性が、ある程度、生体の筋肉に似た特性であり、後述するように、二足移動を実現するために重要な役割を果たす。

マッキベン型空気圧人工筋は、生体の筋肉のように、細長い形をしていて、長手引っ張り方向のみに力を発生することができる。このような性質を利用すると、ヒトに類似した骨格構造のロボットを作り、人工筋を付加することによって、ヒトの筋骨格構造をある程度再現したロボットを作ることができる。ヒトの筋骨格構造が、行動とどのような関係にあるのか、まだ生物学やスポーツ力学でも解明されていない点が多数存在しており、このようなヒト型のロボットを作ることによって、その行動原理や、背後に存在する力学的原理が明らかになることも期待されている。

これまでに開発されてきたヒューマノイドロボットの多くは、電気モータによって駆動されている。モータを用いることで、各軸について精密な制御を適用することができるからである。これに比べると、マッキベン型空気圧人工筋は、摩擦によるヒステリシスなどの非線形性が強く、流体による作動のための時間遅れが大きいなど、制御性という意味では電気モータの後塵を拝する。しかし、電気モータは、それを制御するコンピュータとともに、排熱が大きな問題となっている。空気圧人工筋の場合、このようなオーバーヒートの問題がなく、ヒューマノイド

のように、人間と同じ環境内で、長時間駆動する必要がある場合には、有利である。また、前述のように本質的に柔軟なので、衝突や衝撃に強く、衝突時に過大な力を生じにくい。それ以外にも、主要な部品を誘電性のない素材で作ることができるため、誘電が問題となる局面に使用しやすく、動作による電磁ノイズも発生しにくいなどの利点もある。

3. 空気圧人工筋を用いた歩行

3.1 受動歩行と空気圧人工筋

電気モータを使って、二足歩行を実現する場合、モータが出力することができるトルクが小さいため、歯車やハーモニックドライブなどで減速し、各軸を駆動することがほとんどである。その場合、減速機には大きな摩擦が生じるため、各リンクにかかる力によって逆にモータを動かすことは難しい（バックドライバビリティが低い）。このような制御対象の場合には、歩行を実現するために、あらかじめ（あるいはオンラインで）重心移動を計算しておき、それを実現するための各軸の目標軌道を計画、これに各モータが追従するような制御則を適用するケースがほとんどである。こういった制御則に基づいてロボットを動かすと、各モータへの軌道追従制御や、バランス制御、あるいは地面と衝突した時の力制御の計算量が莫大になり、しかもロボットがバランスを崩さないためには、非常に速い処理が必要となる。

一方で、各関節の軌道追従ではなく、ロボット自体の動特性、つまりリンクが受ける重力と慣性力によって、軸からの駆動を受けずに、緩やかな斜面を下る受動歩行と呼ばれる歩行が、McGeer らによって提案されている¹⁾。受動歩行は、重力と慣性力のみでロボットが駆動されるため、斜面を下ることしかできないが、これに駆動力を加えることによって、平面や上り坂でも歩行させることができる。この時に使われる駆動様式には、さまざまな方法が考えられるが、空気圧人工筋を使うと、純粋に重力のみによって動く相と、人工筋によって駆動力を加えられている相を作りやすい。このような考え方に基づいて、オランダ、デルフト大学の Wisse らは、二足歩行ロボット「Mike」²⁾、「Max」³⁾、「Denise」³⁾を、筆者らの研究グループでは、空気圧人工筋駆動二足ロボット「空脚」⁴⁾、「Pneuman」⁵⁾、「Pneumat-BT」⁶⁾などを開発した（図2）。

これらの研究の中でも、特に興味深いのは、空気圧人工筋の特性を利用した、拮抗の変化による速度の調整⁷⁾である。これまでの二足歩行ロボットの歩行速度を変化させるためには、重心の速度を定義し、その動きにしたがった、幾何学的計算から、各関節

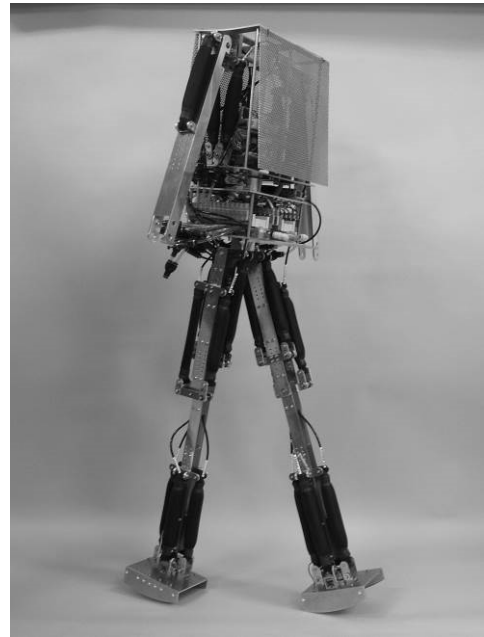


図2 空気圧人工筋駆動二足ロボット Pneumat-BT⁶⁾

の軌道を算出、これに各モータを追従させることによって実現していた。しかし、空脚の場合、駆動するための人工筋と拮抗関係にあるもう一本の筋肉が発生する力を調整することによって、直接的ではなく、間接的にロボットの歩行速度を変化させることができる⁷⁾。

なお、著者が知る限り、空気圧人工筋によって動く二足歩行ロボットには、これら以外にブリュッセル自由大学の Verrelst らによる「Lucy」⁸⁾があるが、このロボットの場合、ロボットの動きから各関節の動きを設計し、空気圧人工筋を使った追従制御を適用するという、従来の電気モータによる制御と大差ない制御則を使っている。電気モータを用いた人工筋を使って歩行ロボットを作る研究もあるが、フルードパワーの範疇から外れるため、ここでは割愛する。

3.2 空気圧人工筋による下肢筋骨格構造の実現

一つの回転関節を動かすには、二本の空気圧人工筋を拮抗に配置すればよい。矢状面内（足を振りだす方向を含む面内）を運動する下肢を作るためには、腰、ひざ、足首の三関節が必要なので、計6本の人工筋が最低限必要となる。しかし、ヒトの場合には、これ以外にも二つの関節をまたがる二関節筋と呼ばれる筋肉が存在し、関節間の力の伝達や連動をつかさどっていると言われている。空気圧人工筋はヒトの筋肉のような形状をしているため、このような二関節筋を含む冗長な筋骨格系を、工学的に再現し、その機能を詳細に調べることができる。このような設計思想に基づいて、片足当たり5対9筋の構造を

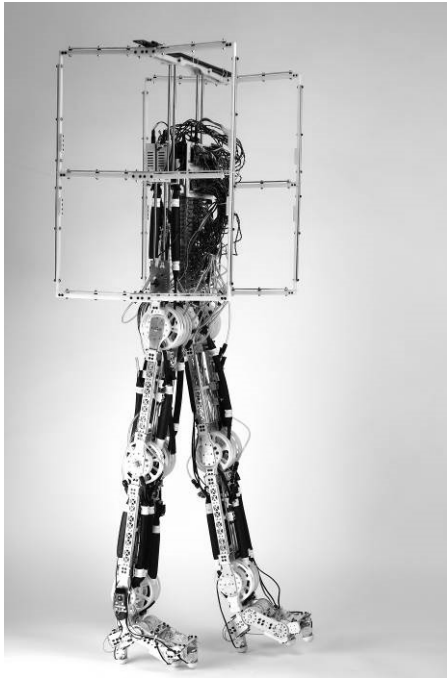


図3 ヒトと類似の筋骨格構造を持つ空気圧人工筋駆動二足ロボット Pneumat-BB⁹⁾

持つ二足ロボット「Pneumat-BB」⁹⁾ (図3),

「Pneumat-BR」¹⁰⁾を開発した. 二関節筋の強度 (= 空気量) を調整することによって, 関節間の連動, とくにひざと足首の連動を変化させることができ, ひざを曲げることによって, 足首を自動的に背屈(つま先を上にあげる方向に曲げる)させることができる. 各関節の軌道を詳細に設計し, 制御する必要がなくなるという意味で, 非常に興味深く, また実際の生物でも同様のことが起こっているのではないかという重要な知見を得ることができた.

4. 空気圧人工筋を用いた跳躍・走行

4.1 関節の柔らかさと跳躍・走行

各関節が, 電気モータと減速機によって駆動されるロボットによって, 跳躍や走行を実現するためには, 着地時の衝撃力を瞬時に計測し, それに対する各関節の応答を計算, 計算された軌道に沿って各モータを制御するという, 非常に計算コストの高い方法を使わざるを得ない. また, 過大な衝撃力がかかった時には, モータや減速機が破損するという危険性もある.

空気圧人工筋は, 本質的にやわらかいため, 外力に対して計算コストなしに, ばねのような応答を示すことができる上, 用いられているナイロン繊維の強度は, 大きい衝撃力でも破断することはない. そして, このような空気圧人工筋を, 各関節に拮抗に配置し, あらかじめ適度な弾性を持たせておくこと

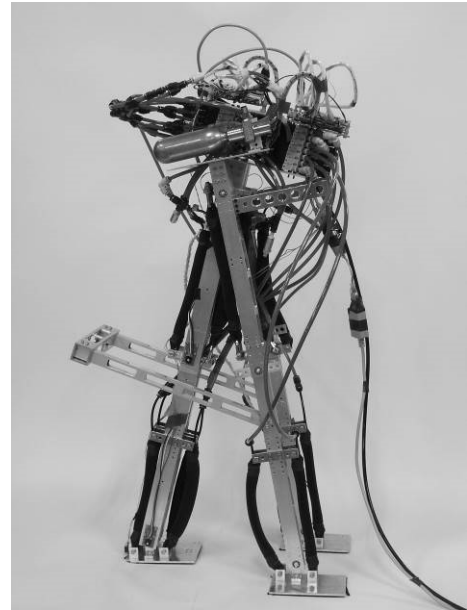


図4 空気圧人工筋駆動ロボット 空脚¹¹⁾

によって, ロボットに跳躍や走行をさせることができる. このような考え方に基いて, 二足ロボット「空脚 R」(図4)を設計し, 関節が持つ弾性と, 歩行, 走行, 跳躍などの移動様式の関係について明らかにした¹¹⁾.

ここでの問題点は, 走行, 跳躍を実現するために, 各人工筋の駆動のための弁操作をどのように設計するかである. 著者らのグループでは, ロボットの自立性を確保するために, 各人工筋の駆動には, 体積と重量が大きくなってしまふ比例弁や圧力弁ではなく, ON/OFF 弁を用いている. 各人工筋への給気は, 流体による作動の遅れなどがあり, 数百ミリ秒の時間遅れが生じる. このような遅れにもかかわらず, ロボットを走行, 跳躍させるためには, 各弁を開閉するタイミングを設計する必要があるが, 結果的に速度の速いフィードバックなしの制御則でも走行が可能なのは, 人工筋の拮抗構造からもたらされる柔軟性のおかげである.

4.2 ヒトに似た下肢筋骨格構造と跳躍

空脚 R は, 各関節の連動を, 弁の開閉タイミングの詳細なプログラムによって生み出すことで, 跳躍, 走行することはできたが, そのような連動を, 前述したような, 二関節筋を含む複雑な筋骨格系で実現できないか, という問題に取り組んだのが, 次に紹介する「空脚 K」である (図5). 歩行について研究した経緯と同様に, 各関節に拮抗する二本の筋を配置しただけの空脚 R に, 関節間の連動を生み出すために, 二関節筋を付け加えたような構造を作った¹²⁾. 歩行のためのロボットと同様に, このロボットにも

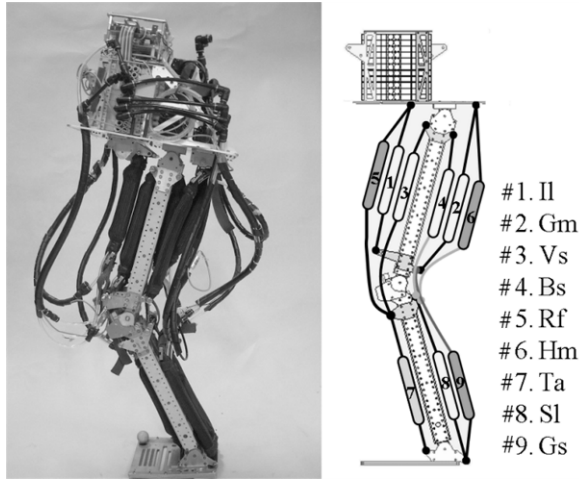


図5 空気圧人工筋駆動ロボット の空脚K¹²⁾ のと筋配置

5対9筋と呼ばれる、ヒトの下肢が持っている基本的な筋構造と同等の構造を持たせた。各関節の連動タイミングは、二関節筋に、あらかじめある程度の空気を供給しておき、これが自動的に生み出す連動を利用する。

図6に、二関節筋の一つ、腓腹筋(図5の#9の筋)の強度を変化させたときの、跳躍方向の変化についての実験結果を示す。実際のロボットの動きを、モーションキャプチャで観察した。下のグラフほど、腓腹筋に空気を供給する弁を開ける時間を長く、つまりより腓腹筋を緊張させたときの実験結果である。腓腹筋が緊張することにより、ひざと足首の間には強い連動が起こる。その結果、跳躍姿勢が変化していることが、この実験結果の重要な点である。跳躍するためのエネルギーは、ほかの筋のよって供給され、しかも、それらについての弁の操作は変化しないにもかかわらず、腓腹筋の強度のみを変化させることによって、跳躍方向を変えることができるということは、これまでのロボットのように、跳躍方向を変えるためには、それをもたらす各軸の軌道を再計算し、追従するための各軸制御を適用する、という方法論とは全く異なる。

5. おわりに

マッキベン空気圧人工筋は、材料に起因する柔軟性を持ったフルードアクチュエータであり、制御しにくい特性にもかかわらず、ヒューマノイドの歩行、跳躍、走行といったさまざまな移動様式を実現するために有効であることが、これらの実験結果から理解いただけたのではないと思う。また、科学的にも興味深いのは、ヒトに似た筋骨格系を持つロボットを作ることにより、各筋の機能に関する知見を得られることである。

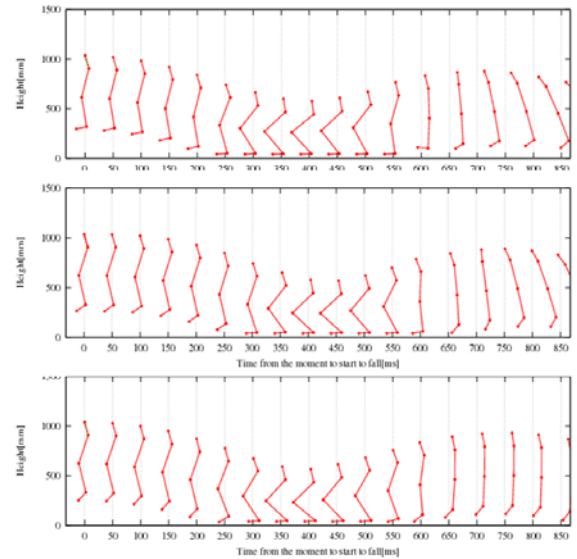


図6 腓腹筋の強度を変えたときの空脚Kの跳躍姿勢の変化¹¹⁾。下の方がより腓腹筋の強度が高い。

参考文献

- McGeer, T.: Passive Dynamic Walking, The International Journal of Robotics Research, Vol.9, No.2, p.62-68 (1990)
- Wisse M., van Frankenhuyzen, J.: Design and Construction of MIKE; a 2D autonomous biped based on passive dynamics walking, Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (2003)
- Wisse, M.: Three additions to passive dynamic walking: actuation, an upper body, and 3D stability, IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots (2004)
- Takuma, T., Hosoda K.:Controlling the Walking Period of a Pneumatic Muscle Walker, International Journal of Robotics Research, Vol.25, No.9, p.861-866 (2006)
- Hosoda, K., Takuma, T., Ishikawa, M.:Design and Control of a 3D Biped Robot Actuated by Antagonistic Pairs of Pneumatic Muscles", Proceedings of 3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines (2005)
- Narioka, K., Hosoda, K.: Designing Synergistic Walking of a Whole-Body Humanoid Driven by Pneumatic Artificial Muscles: An Empirical Study, Advanced Robotics, Vol.22, No.10, p.1107-1123 (2008)
- Takuma, T., Hosoda, K.: Controlling Walking Behavior of Passive Dynamic Walker Utilizing Passive Joint Compliance, 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p.2975-2980, (2007)
- Verrelst, B. et al.: The Pneumatic Biped "Lucy" Actuated with Pleated Pneumatic Artificial Muscles, Autonomous Robots, 18, p.201-213 (2005)
- Narioka, K., Homma, K., Hosoda, K.: Roll-over shapes of musculoskeletal biped walker, AT - Automatisierungstechnik, Vol. 61, No. 1, p.4-14 (2013)
- 細田耕：発見的バイオリボティクスアプローチと適応的2足歩行, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.4, p.479-484 (2010)
- Hosoda, K., Takuma, T., Nakamoto, A., Hayashi, S.: Biped robot design powered by antagonistic pneumatic actuators for multi-modal locomotion, Robotics and Autonomous Systems, Vol.56, No.1, p.46-53, (2008)
- Hosoda, K., Sakaguchi, Y., Takayama, H., Takuma, T.: Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure, Autonomous Robots, Vol.28, Issue 3, p.307-316 (2010)

(原稿受付：20XX年X月XX日)