

# 空気圧人工筋と人間型関節を装備した 三次元二足歩行ロボット Pneumat-BRP の開発

## Development of 3D Biped Walker “Pneumat-BRP” with Pneumatic Artificial Muscles and Anthropomorphic Joints

坂口 雄紀 (大阪大) 正 細田 耕 (JST, 大阪大)

Yuki SAKAGUCHI, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka  
Koh HOSODA, JST, Osaka University

One of the challenging issues of biped robot study is to develop a robot that can not only walk, but run and jump. This paper describes new design of a biped robot that can walk, run, and jump. We adopted anthropomorphic open joints and antagonistic pneumatic drive. Preliminary experiments are conducted to demonstrate the ability of the developed robot.

**Key Words:** pneumatic artificial muscles, anthropomorphic joints, 3D biped walking

### 1 緒言

歩行運動と走行運動の違いの1つは、走行運動では大きな衝撃が発生する点である。現在二足歩行を実現しているロボットの多くはアクチュエータとして電動モータを使用している<sup>1, 2)</sup>。しかし、電動モータは減速器を併用することから駆動関節の剛性が高く、跳躍や走行における衝撃で減速器を破損する可能性が高い。また関節には一般にシャフトとボールベアリングが用いられている。この関節機構では応力集中が起こりやすく衝撃で電動モータだけでなく関節も破損する恐れがある。安定な走行を実現するにはロボットは走行の衝撃に耐えられる構成であることが必要であると考えられる。

本研究ではマッキベン型空気圧人工筋と人間型関節を装備し、走行の衝撃に耐えられる構成を有するロボットの開発と開発したロボットによる直立静止・歩行・走行の実現を目指す。マッキベン型空気圧人工筋と人間型関節を装備した2足ロボット Pneumat-BRP を試作し、歩行・跳躍実験を行う。Pneumat-BRP の主な特徴は5つある。第1の特徴はアクチュエータにマッキベン型空気圧人工筋<sup>3)</sup>を使用したことである。マッキベン型空気圧人工筋は軽量かつ、電動モータに比べ高出力であることから重量/出力比が小さい。さらに固有の弾性により人工筋を拮抗配置した関節はダイナミックな動作によって生じる衝撃を吸収できる。これらの特徴からマッキベン型空気圧人工筋はダイナミックな動作に適したアクチュエータであると考えられる。第2の特徴は下肢の各関節に人間型関節機構を使用したことである。使用した関節機構はシャフトを用いないシンプルな機構である。この構成は応力集中を避けられる構造となっているため、シャフトとボールベアリングを用いた従来の機構に比べ衝撃に強く、ダイナミックな動作による衝撃に耐えられる。第3の特徴は受動歩行を規範としていることである。受動歩行ロボットは緩やか下り坂を駆動力なしで下ることができる<sup>4)</sup>。そこに僅かな駆動力を与えることで平地においても歩行を実現できるという考えに基づいた設計を行った。第4の特徴はヒール形状の足裏を使用したことである。これにより従来の準受動歩行ロボットの円弧形状の足では実現が難しかった直立姿勢の維持と爪先で地面を蹴る動作が可能である。第5の特徴は人工筋の長さ調節機構を使用したことである。人工筋の長さ調節機構はバックルとベルトを用いた登山用品で用いられるベルト締結

機構である。これによりアクチュエータの長さや剛性の調整を容易にすることができる。

歩行実験では直立可能なヒール形状の足裏を使用しパラメータチューニングにより歩行を実現した。そして走行の予備実験として行った跳躍実験ではパラメータチューニングにより跳躍を実現した。その結果、膝と足首の駆動開始時間の差が跳躍の実現に関わっていることが分かった。

実験により Pneumat-BRP が直立・歩行・跳躍を実現可能であることが分かった。本研究で行った実験の結果を考慮することでマッキベン型空気圧人工筋と人間型関節を装備した2足ロボットによって3次元走行を実現することが可能であると期待できる。

### 2 Pneumat-BRP の構成

#### 2.1 ロボット概要

試作したロボットの外観を Fig.1 に示す。ロボットは全高約 1.08[m]、全幅約 0.16[m]、脚長約 0.7[m]、重量約 8.5[kg] である。自由度は足首ピッチ軸・ロール軸、膝ピッチ軸、腰ピッチ軸・ロール軸、肩ロール軸の計 12 自由度である。

#### 2.2 マッキベン型空気圧人工筋

マッキベン型空気圧人工筋は、軸方向に収縮力を発生する直動アクチュエータである。マッキベン型空気圧人工筋は素材に由来して 40g 程度と非常に軽量でかつ柔軟である。また高出力、弾性に富み、空気の供給量で剛性が可変である。このような性質を持ち合わせていることから跳躍や走行といったダイナミックな動作を実現するためのアクチュエータとしてマッキベン型空気圧人工筋は有効であると考えられる。

試作したロボットでは下肢の各関節にはマッキベン型空気圧人工筋を拮抗に配置した (Fig.2)。特に股、膝、足首の前後の筋肉については Fig.3 のように名付ける。片側の人工筋に空気を供給すると Fig.2 のようにリンクが回転する。拮抗に配置された2本の人工筋の内圧を調整することで関節角度や剛性を操作できる。肩部は関節の片側のみ空気圧人工筋を配置し、腕の上げ下げを操作できる。

#### 2.3 人間型関節機構

一般的なロボットの関節はボールベアリングによって支えられたシャフトによってリンク同士を接続する機構である。しかしこの構成では走行における衝撃で関節を破損する可能性がある。そこで今回 Pneumat-BRP では

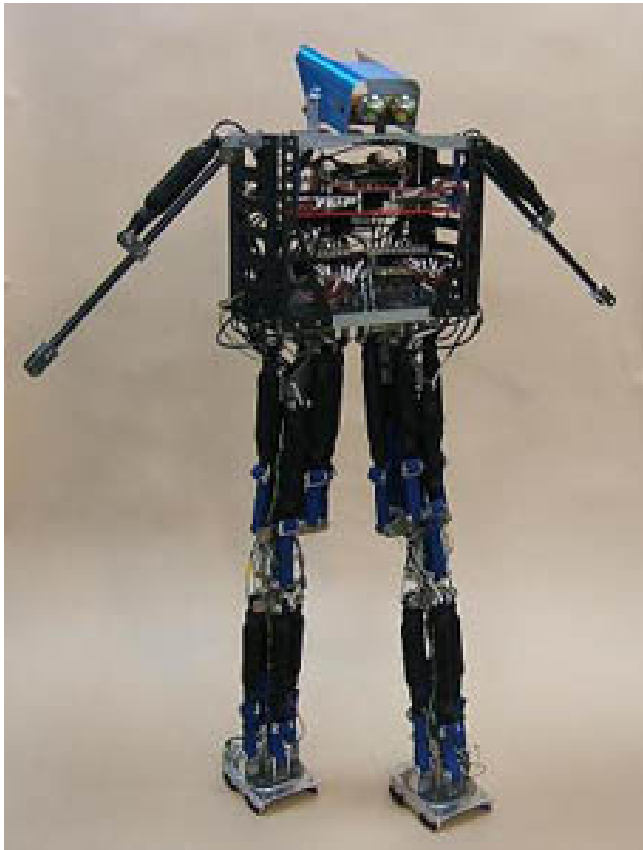


Fig.1 Pneumat-BRP

Fig.4 に示す新しい関節機構を使用した．この機構は人間の関節に似た形状をしており，従来の関節機構のようにシャフトとボールベアリングを用いない．軸と軸受がそれぞれ低摩擦のオイレスアラミド M(芳香族ポリアミド樹脂)で作られている．この関節は広い面で力を支えるため特定の支持点を持たず，応力集中を避けられるので衝撃に強い．また構造がシャフトを用いた場合に比べてシンプルになるという利点もある．しかし，固定ができないため容易に軸が軸受から脱落するという問題点がある．1 自由度の膝関節では Fig.4 の機構を応用して作成した Fig.5 に示す関節を使用し，2 自由度の股関節や足首関節では Fig.4 の機構を 3 次元に拡張した Fig.6 に示す関節を使用した．



(a) Anthropomorphic joint appearance (b) Anthropomorphic joint parts

Fig.4 Anthropomorphic joint mechanism

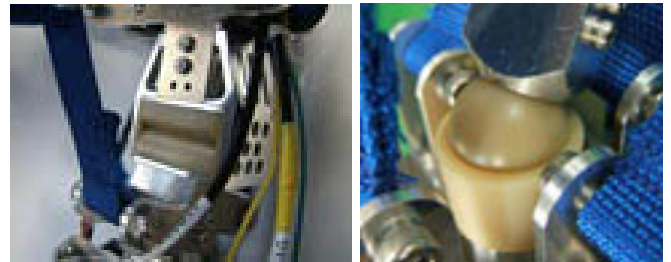


Fig.5 2D joint

Fig.6 3D joint

#### 2.4 足裏形状

受動歩行を規範としたロボットの多くは足裏の形状が円弧形状 (Fig.7) であるが今回，Pneumat-BRP ではヒール形状の足裏 (Fig.8) を使用した．ヒール形状の足裏を基に円弧の一部を取り去り作成した．この足裏を使用するとロボットは直立することが可能となった．ヒール形状の足裏は平板の両側にそれぞれの足裏の形状に合わせた板を取り付けた構造となっている．

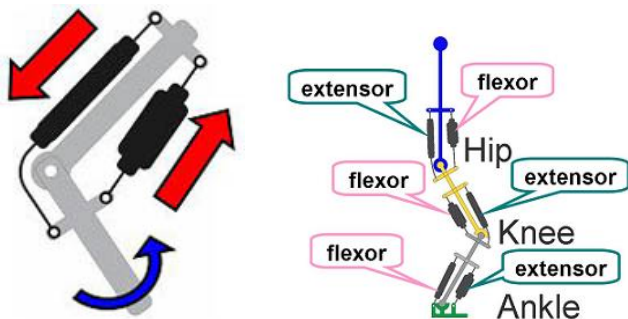


Fig.2 Antagonistic pair of pneumatic hip, knee and ankle muscles Fig.3 Flexor and extensor around pair of pneumatic hip, knee and ankle muscles

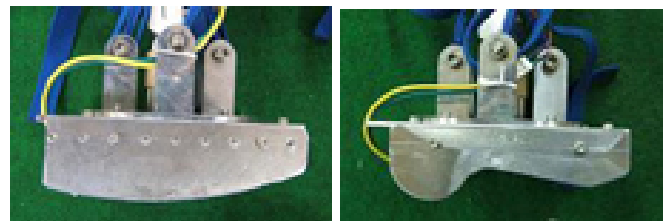


Fig.7 Round sole

Fig.8 Heeled sole

#### 2.5 人工筋の長さ調節機構

人工筋の全長に対する収縮率は歩行・走行時の脚の運動に対して非常に大きく影響を及ぼす．しかし，使用して

いるマッキベン型空気圧人工筋は個体差が大きく、同一規格であっても全長に最大で10mm程度の差がある。そこで、Fig.9に示す人工筋の長さ調節機構(以下、アジャスタ)を提案・試作した。アジャスタはアルミニウム製のバックル部(Fig.10)とポリプロピレン製のベルト部から構成されており、登山などで用いられているベルト締結法を採用している。ベルトにより容易に長さを調節することができるので、人工筋ごとに新しい部品を作る必要がなく、さらに関節の剛性も調節することができる。ベルトを強く締めるとベルトの締結は緩むことなく再現性が損なわれない。Pneumat-BRPでは下肢の全ての人工筋にアジャスタを取り付けた。

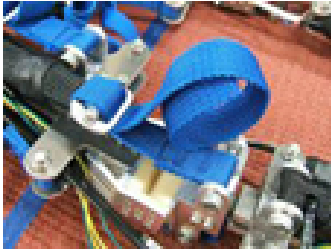


Fig.9 Adjuster



Fig.10 Adjuster buckle

## 2.6 システム構成概要

Fig.11にシステム構成概略図を示す。ロボットの胴部には空気圧人工筋に圧縮空気を給排気するための電磁弁、電磁弁の開閉を制御するマイクロコントローラ H8/3069、マイコンと電磁弁の電源としてリチウムポリマー電池が搭載されている。頭部には空気供給源として小型の高圧二酸化炭素ボトルが設置されている。両脚の足裏には接地を感知する接地センサが設置されている。ロボットは完全自立歩行可能な構成となっている。実験時は作業効率

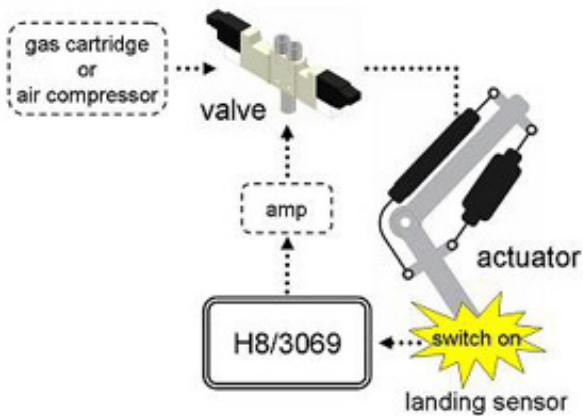


Fig.11 System of Pneumat-BRP

を考えて二酸化炭素ボトルの代わりに常に一定の圧力の圧縮空気を供給できる外部エアコンプレッサを使用した。

## 3 実験

### 3.1 歩行実験

接地センサで感知した遊脚の接地の瞬間を基準として、予め定めたタイミングで電磁弁の開閉操作を行うフィードフォワード制御を行う。拮抗配置された人工筋の一方を一定の圧力に保っても人工筋のバネ特性を利用することで、他方に圧縮空気を給排気することで関節を駆動さ

せることができる。これにより供給する空気量を減らすことができることからエネルギー効率を上げることができる。この原理を股関節、膝関節のピッチ軸周りの運動に適用した。また肩関節、股関節ロール軸周りの運動、足首の運動は歩行中給排気を行わず固定した。よって制御パラメータは歩行開始前の初期給気量と歩行中の股関節伸筋と膝関節屈筋に対する給排気量とタイミングである。空気圧人工筋を装備したロボットにどのような動作をさせると歩行を実現できるかに関する知見は存在していない。そこで制御パラメータを試行錯誤的に探索した。脚の伸筋屈筋への給排気のタイミングとロボットの理想的な動作との関係を Fig.12 に示す。なお、Fig.12における股関節および膝関節の伸筋、屈筋は股関節、膝関節の前後の筋肉を指し、共に Fig.3 に示す。

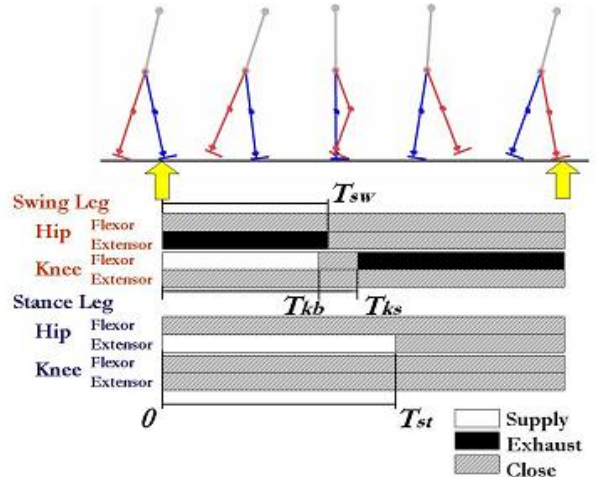


Fig.12 Relationship between valve operations and whole body motions in walking experiment

ヒール形状の足裏で、陸上競技で用いられるタータントラック上において歩行実験を行った。その結果、パラメータを試行錯誤的に探索し、11歩の歩行に成功した。Fig.13に歩行の様子を示す。さらにパラメータを探索していくことによってより安定で連続的な歩行を実現することができると思われる。



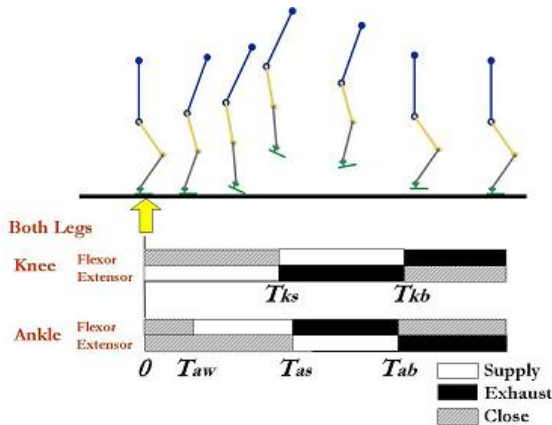
Fig.13 Sequential image of walking

### 3.2 跳躍実験

股関節を固定し足首関節の底屈による蹴り出しと膝の伸展を行い、跳躍を試みた。ロボットが中腰体勢で静止した状態を初期姿勢とし実験者がスイッチを押した瞬間を基準に、予め定めたタイミングで電磁弁の開閉操作を

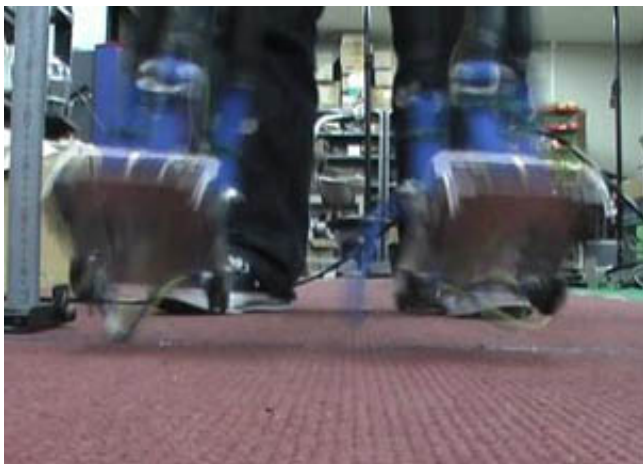


行うフィードフォワード制御を行う。脚の伸筋屈筋への給排気のタイミングとロボットの理想的な動作との関係を Fig.14 に示す。なお、Fig.14 における膝関節および足首関節の伸筋、屈筋は膝関節、足首関節の前後の筋肉を指し、共に Fig.3 に示す。



**Fig.14** Relationship between valve operations and ankle and knee motions in jumping experiment driving both knees and ankles

より高い跳躍を目指し、歩行実験を行った時よりも 1.2kg の軽量化を行い実験をした。その結果、3cm 程度の跳躍を実現した。Fig.15 にそのスナップショットを示す。上体を上腿に固定したため跳躍時にロボット全体のバランスが保てず、斜め上方に跳躍した。 $T_{aw}$  は膝と足首の筋肉



**Fig.15** Jump motion(snapshot)

の駆動開始時間の差である。 $T_{aw}=0$  の時は跳躍することができなかった。また  $T_{aw} =$  の時は膝のみを駆動させた跳躍と等しく跳躍することができない。しかし、 $T_{aw}$  に 80msec 程度の適当な値を与えると跳躍できるようになった。よって跳躍の実現の為に膝と足首の筋肉の駆動開始時間の差に最適な値が存在することが分かった。

#### 4 結言

直立静止・歩行・走行の実現を目指し、マッキベン型空気圧人工筋と人間型関節を装備した 2 足ロボット Pneumat-BRP を試作し、歩行・跳躍実験を行った。本研究では耐衝撃性を重視した構成のロボットを製作した。そして、歩行だけでなく跳躍というダイナミックな動作を、壊れる

ことなく実現できることを確認できた。また、跳躍実験では膝と足首の筋肉の駆動開始時間の差に最適な値が存在するという結果が得られた。足裏のヒール形状にすることで直立静止可能となったことから、今後、直立静止状態からの歩行の開始の実現が期待できる。そして歩行、跳躍を実現できたことからさらに 3 次元走行の実現が可能であると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 黒木義博, 石田健蔵, 長阪憲一郎, 山口仁一. 高度統合運動制御機能を有する小型二足歩行エンターテインメントロボット SDR-4X. 第 20 回ロボット学会学術講演会予稿集, 2002. 1C17.
- [2] Shuuji Kajita, Takashi Nagasaki, Kenji Kaneko, Kazuhito Yokoi, and Kazuo Tanie. A running controller of humanoid biped hrp-2lr. In *Proceedings of the 2005 IEEE international Conference on Robotics and Automation*, pp. 618–624, April 2005.
- [3] 則次俊郎. 空気圧アクチュエータ. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 355–359, 1997.
- [4] Tad McGeer. Passive Dynamic Walking. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, April 1990.