高速走行に向けた空気圧駆動式四脚ロボットの開発

Development of a Pneumatically-driven Quadruped Robot for Fast Locomotion

○ 成岡 健一 (阪大) 稲田 健人 (阪大)
Andre Rosendo (阪大) 正 細田 耕 (阪大)

Kenichi NARIOKA, Osaka University, narioka@ist.osaka-u.ac.jp
Taketo INADA, Osaka University
Andre ROSENDO, Osaka University
Koh HOSODA, Osaka University

In this paper, we describe the design of the quadruped robot “Ken” with the minimalistic and lightweight body design for achieving fast locomotion. We use McKibben pneumatic artificial muscles as actuators, providing high frequency and wide stride motion of limbs, also avoiding problems with overheating. We conducted a preliminary experiment, finding out that the robot can swing its limb over 7.5 Hz without amplitude reduction, nor heat problems. Moreover, the robot realized a several steps of bouncing gait by using a simple open loop controller, indicating that the robot can generate enough torque to kick the ground and limb contraction to avoid stumbling.

Key Words: Quadrupedal robot, Leg mechanism, Pneumatic actuator

1. 緒言

イヌなどの四足動物が見せる適応的かつ高速なロコモーションの背景には、脳神経系による運動制御に加え、筋骨格系身体による形態学的演算が存在する。したがって、四脚ロボットに動物のような高い運動性能をもたらすためには、脳、身体、環境の相互作用を十分に考慮した上でロボットの身体を設計しなければならない^{?)}。特に身体のコンプライアンスは、接地衝撃の吸収やエネルギー回生に寄与する重要な特性である。例えば、脚に直動バネを有する Scout II^{?)} や、PD 制御による仮想的バネダンパを組み込んだ Tekken^{?)} は、脚部のコンプライアンスを利用して走行を達成している。

四足動物は、多リンク系、冗長な筋群、多関節筋を含む複雑な筋骨格構造を有し、その構造が生み出す脚軌道や非線形コンプライアンス特性が動的運動に果たす役割は小さくないと考えられる。ところが、このような構造をロボットに忠実に再現しようとするれば、ロボットの自由度が指数関数的に増大し設計や制御が極めて困難になってしまう。これに対し、Sproewitz et al. はパンタグラフ機構と多関節を跨ぐバネを組み合わせることで脚先の適切な軌道と非線形コンプライアンス特性を有する脚を設計し、Oncilla robot に実装して動的な走行動作を実現している^{?)}。ロボットの各脚は3セグメントを有し、2つの電動モータとワイヤで駆動される。脚は非常に軽量であるため素早い振り出しが可能であるが、モータのオーバーヒートの問題から、高速で長時間駆動させることは困難であった。

本研究では、Oncilla robot の機構をベースにした、マッキベン型空気圧人工筋（以下、空気圧人工筋）駆動による四脚ロボットを開発する。空気圧人工筋は機械的柔軟性を備え、出力重量比が高く、高速駆動させてもオーバーヒートの問題が生じないことから、走行に適したアクチュエータであると考えられる^{?)}。開発した小型、軽量、コンプライアントな四脚ロボットをプラットフォームとして用い、適応的な高速走行を実現することを目的とする。本稿では、ロボットの設計、脚振り周期と屈伸可動域の調査、および周期的筋駆動による走行実験について報告する。

2. 空気圧駆動四脚ロボット

開発した空気圧駆動四脚ロボット “Ken” の外観を図1に、設計図面を図2にそれぞれ示す。関節構造やリンク長などのパラメータは基本的に *Oncilla robot* を踏襲している。主なサイズおよび重量を表1に示す。高速走行実現の必要条件のひとつは高速な脚の振りであるが、そのためには脚の質量をなるべく軽くし、近位関節（前脚の肩関節、後脚の股関節）回りの脚の慣性モーメントを小さくすることが望ましい。そこで、3D プリンタ（ストラタシス社製）を用いて ABS 樹脂で脚部構造を製作し、前後脚ともに1本あたり70 g 程度に抑えた。体幹部と脚の一部は、空気圧人工筋が生じる張力を受け持つ必要があるため、比較的軽量で剛性の高いマグネシウム合金を用いて製作した。マイクロコントローラ、Li-Po バッテリ、電磁弁、空気圧人工筋、空気配管、センサ類は体幹部に収納し、ロボットの全重量は1.86 kg 程度である。尚、実験時には圧縮空気は外部コンプレッサから給気されるが、短時間であれば、液体二酸化炭素を封入した小型タンクを用いて駆動させることができる。

Fig.1 Pneumatic quadruped robot “Ken”. One of the main objective of this robot is to realize its fast locomotion utilizing the characteristics of the pneumatic artificial muscle.

Fig.4 Experimental setup. The trunk is mechanically fixed to the environment. The right hindlimb is extended and flexed periodically by sending periodic signal from micro controller to the solenoid valve. State A and state B of the valve is switched alternately at $T/2$ [ms] intervals. Frequency f of the limb swinging becomes $f = 1/T$ [Hz]. Air pressure supplied from the external compressor is set to be 0.5 MPa. Moment arm of hip joint D_h is 30 mm.

3. 動作実験

3.1. 脚振り実験

ロボット高速な走行を実現するためには、高周波数の脚振りが必要となる。一方で、周波数を高くしすぎれば関節可動域は減少してしまう。また、可動域と関節トルクはトレードオフの関係にあり、トルクが過度に小さくなれば地面を蹴る力も弱まり十分な推進力が得られない。そこで、周波数、振幅、トルクの関係調べながら、開発したロボットの動作性能を検証する。

まず、周波数と振幅の関係を調査するために、図4に示す実験環境を準備した。体幹および両前脚は鉄製フレームに機械的に固定されている。右後脚の振り出し用バルブに周期的な制御信号を送り、脚を空中で前後に振り出す運動をさせた。状態 A では屈筋に給気して伸筋から排気する、状態 B では反対に、屈筋から排気して伸筋に給気する。これらの状態を $T/2$ [ms] 毎に切り換える。供給圧は 0.5 MPa に設定し、モーメントアーム $D_h = 30$ mm とした。脚の動きはハイスピードカメラ（カシオ計算機株式会社製 EX-F1）を用いて記録し、マーカ位置から股関節角度を算出した。

振動周期 T を変えながら股関節の最大角と最小角を計測した結果を図5に示す。横軸は周期 T 、縦軸は股関節角度 θ_h を表す。各 T における最大値と最小値が直線で結ばれている。 $T \geq 200$ ms のとき関節角の最大と最小の差は 130 度以上となり、十分な可動域が確保されていると言える。伸展の最大振幅は $T = 130$ ms で記録され、 T の値がそれ以下になるにつれ振幅も減少する傾向にあることが確認された。 $T = 130$ ms 付近では共振現象が生じていると考えられ、高い周波数と大きな振幅を両立させるため、高速走行に活かせる可能性もある。尚、 $T > 130$ ms において最大屈曲角が 67 度付近に留まっているのは脚が体幹部に衝突しているためであり、今後機構的な見直しを要する。

3.2. 走行試験

次に、周期的なオープンループ制御^{2,3)}を用いて走行を目指した。各筋は図6に示す給排気パターンに従って周期的に駆動される。状態1から状態5まで時間的に切り替えられ、前後脚がほぼ逆位相になるよう駆動されている。また、前脚、後脚ともに左右の脚は同期させている。脊椎はストライドが伸びるようなタイミングで伸展させた。

Fig.5 Relationship between period and range of motion. The horizontal axis represents the period T and the vertical one represents the angular amplitude of the oscillation. Maximum value and minimum value are connected with a straight line for each parameter T . While the period is higher than 200 ms, angular amplitude is more than 130 deg (max $> +67$, min < -64).

Fig.6 Valve operation pattern. Each joint is driven oscillatory according to the pre-defined muscle activation pattern. There are five states that are switched in rotation when time shown beside the arrow in the figure passed.

周期 $T = 210$ に設定してトレッドミル上に置いたところ、図7に示すような走行運動が実現された。つまづきを防ぐ脚の短縮が機能し、全身が飛び上がる程度に強いトルクが発生していることが確認された。ただし、推進力に適切に利用されず、上方に力が逃げているため、高速走行には至っていない。

4. 結言

本研究では、空気圧駆動式四脚ロボット Ken の設計および基礎的動作実験について述べた。各脚はパンタグラフとバネを用いたミニマルな設計になっており、非常に軽量である。空気圧人工筋を用いて駆動することでオーバーヒートを回避しつつ、高速かつ広可動域な脚運動を実現した。また、各脚および脊椎を周期的に駆動させるオープンループ制御によって、安定な走行動作を実現した。十分なトルクと可動域が備わっていることが示されたが、現段階では高速な歩容は実現されていない。また、今回は整地での走行に限定している。今後は、関節可動域や筋弾性などの身体構造と、筋駆動パターンやセンサフィードバック等の制御方策の両面を見直し、適応的かつ高速な走行運動実現を目指す。

Fig.7 Running behavior of “Ken”. The robot run on the treadmill with a open-loop controller. All muscles are activated periodically, while the activation pattern of the right forelimb and the left forelimb is set to be the same, and also that of the right hindlimb and t he left hindlimb is set to be the same.

謝辞

本研究の遂行にあたり，科学研究費補助金（基盤研究 (S):課題番号 23220004，特別推進研究:課題番号 24000012，および若手研究 (B):課題番号 23700233）の補助を受けた。また，Alexander Sproewitz 氏 (EPFL) の多大なる協力に感謝の意を表する。