胴体の前後非対称性を有する アクティブサスペンション型4脚走行ロボット

Active-Suspension-based 4-Legged Running Robot with Anteroposterior Asymmetry in Body

○学 西村今日子（龍谷大） 非 咲尾 真司（龍谷大）
非 溝口 正徳（龍谷大） 正 渋谷 恒司（龍谷大）
正 堤 一義（龍谷大）

Kyoko NISHIMURA, Ryukoku University, knishimura@relax.mecsys.ryukoku.ac.jp
Shinji SAKIO, Ryukoku University
Masanori MIZOGUCHI, Ryukoku University
Koji SHIBUYA, Ryukoku University, koji@rins.ryukoku.ac.jp
Kazuyoshi TSUTSUMI, Ryukoku University, tsutsumi@rins.ryukoku.ac.jp

We have been studying 4-legged robots with active-suspension-based leg modules with spring elements. Our 4-legged robot doesn't have knees, but has a linear motion mechanism. It has two or three DC motors per leg for swinging and jumping, and runs by controlling them. This time, aiming to improve the velocity of movement, we designed and prototyped a new robot with 10 pcs motors. We analyzed the torque required for each leg, and gathered that stronger torque was necessary for rear legs' movement. As a result of analysis, we designed a robotic body with anteroposterior asymmetry. We also considered anteroposterior asymmetry in the body at the robotic control. We present the design details and running experiment.

Key Words: 4-Legged Robot, Anteroposterior Asymmetry, Linear Motion Mechanism

1. 緒言

自然界には様々な生物が生息している。中でも犬や馬などのような4脚動物は、移動中における安定性も高く、多種の歩容[1][2]を持っており、地形や移動速度に応じて消費エネルギーが最小となるように歩容を選択できる。よって、4脚動物は、他の多脚動物よりも高い移動能力を持っているといえる。我々は4脚動物の動きや特性をモデルとした、より効率的で高速な脚式移動が可能な移動ロボットを開発することを本研究の目的としている。

2. 機体の設計

2.1 跳躍運動について[3][4]

機体の跳躍時についてのモデルを図1に示す。これは1脚分を示しており、ばね要素を持つ脚と質量 m [kg] の質点が角度 θ [rad] で飛び出すときを想定している。ばね定数を k [N/m]、跳躍の初速度を v_0 [m/s]、速度の水平成分を v_x [m/s]、つりあいの位置からの高さ(図1参照)を h [m]、重力加速度を g [m/s²]、脚振り角度を θ [rad] とする。

質点とばねとのつりあいの位置から x [m] だけばねを縮めて飛び出すとき、ばねのポテンシャルエネルギーと飛び出す瞬間の運動エネルギーとの関係は次式で表される[5]。

Fig.1 Jumping model

$$\frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (1)$$

また、初速 v_0 で飛びだしてから機体が最高点に達したときのエネルギーの関係は、

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_x^2 + mgh \quad (2)$$

ここで、 $v_x = v_0 \sin \theta$ で表されることから、(2)式を整理すると、

$$v_0^2 = \frac{2gh}{\cos^2 \theta} \quad (3)$$

以上の式よりばねの伸縮量は、次式で表されることになる。

$$x = \sqrt{\frac{2mgh}{k}} \frac{1}{\cos \theta} \quad (4)$$

2.2 脚振り運動について

脚振り運動のモデルを図2に示す。図2はバウンド歩容時の(a)前脚または(b)後脚が着地した時の様子を模式的に表している。紙面右側の方向に機体が進んでいくとする。まず前脚が着地する場合について、前脚が着地した時に、後半身が下がってくるが、この時のトルクの向きはモータが脚を振ろうとする動きを阻害しない動きとなっている。しかし後脚については、着地時に下がってくる前半身のトルクの向きが脚振り用モータの動きを阻害する向きに働いているため、後脚の脚振り用モータはこのトルクをキャンセルするためのトルクを出す必要があると考えた。このトルクは後述の(8)式で表されている。機体の加速度を a [m/s²]、前後の脚間距離を d [m]、脚長を l [m]、前半身の質量を m_1 [kg]、後半身の質量を m_2 [kg]、脚振り角度を θ [rad] とする。前進するために必要な力は、

$$ma = F \cos \theta \Leftrightarrow F = \frac{ma}{\cos \theta} \quad (5)$$

前進するためのトルクは、

Fig.2 Swinging model

$$T_1 = \frac{m_2 a}{\cos \theta} l \quad (6)$$

後脚部を支えるためのトルクは、

$$T_2 = m_2 g l \sin \theta \quad (7)$$

前半身を支えるためのトルクは、

$$T_3 = m_1 g d \quad (8)$$

よって脚振り用モータにかかるトルクは、

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \\ = \frac{m_2 a}{\cos \theta} l + m_2 g l \sin \theta + m_1 g d \quad (9)$$

以上のような式から、後脚には余分に T_3 だけの力が必要となるので、これらの式を基に計算を行い、脚振り用モータと各種部品の選定を行った。

3. ロボットの製作

今回製作した4脚走行ロボットの画像を図3(a)に、サイズを表1に示す。

一般的にロボットの腕や脚は多関節で、各関節部にモータを用いて制御を行なっているが、本研究で用いている4脚ロボットは、膝などの関節のない直動機構を有していることが特徴のひとつである。

さらに、モータのみではなく動物の脚の「ばね」の特性に着目し、脚部にばね要素を取り入れたアクティブサスペンション

Table 1 Size of 4-legged robot

前後脚幅	385mm
左右脚幅	375mm
胴体長	555mm
脚長	250mm

ン型脚モジュールを採用していることも特徴である。これにより、着地時の衝撃を緩和させることができるだけでなく、モータのみでは出しきれない走行時の瞬発力と脚力を出そうと考えている。着地時にDCモータが圧縮コイルばねを圧縮させ、着地時に機体にかかる衝撃を和らげるとともにそのエネルギーの一部を蓄え、そしてそのエネルギーを脚振り・跳躍時に瞬時に開放することによって、瞬発力・脚力を補助するという一連の動作を行なう。

本研究で用いる機体はアクティブサスペンション機構を搭載しているものの、どうしても着地時の衝撃は発生し、機体に伝わってくる。よって、今回設計・製作した機体は、衝撃に耐えられるように図3(c)に示すような剛性のあるブロックを用いた部品を製作し、各部品同士のはめあいを意識した。さらに、脚部については比較的簡単にメンテナンスを行えるように、図3(b)に示すようなモジュールタイプにし、胴体と完全に切り離せるようにした。また、モータに関しては第2章で述べたような計算を行い、跳躍用、脚振り用のモータを選定した。その結果、図3(b)に示すように、後脚の脚振り用モータについては二つずつ用いることにした。

Fig.3 Details of the robot

また、足先には着地判定用モジュールを設計・製作し、組み込んだ。その画像を図 3(d)に示す。足首の円管の中に、無給油ブシュ、スイッチを押すための軸、軸を押し戻すためのばね、スイッチ、スイッチを留めるための固定具が組み込まれている。この機構により、スイッチは脚がどの角度で着地しても壊れることなく反応することが出来るようになっている。

4. 走行実験

4.1 前後の跳躍量の調節

走行実験での前後の跳躍量を求めるために用いたモデルを図 4 に示す。これは前脚が跳躍する時を表している。第 2 章での変数に加えて、跳躍する側の脚部における、支持脚の脚先回りのモーメントの法線と垂直軸の角度を ϕ [deg]、脚を縮める量を x_i [m] ($i=1,2$) とする。跳躍によるモーメントは、

$$N_a = dkx_1 \cos \theta \quad (9)$$

前脚部によるモーメントは、

$$N_b = -m_1 g \sin \phi \sqrt{l^2 + d^2 + 2ld \sin \theta} \quad (10)$$

後脚部によるモーメントは、

$$N_c = -lm_2 g \sin \theta \quad (11)$$

これらのモーメントの総和は、

$$\begin{aligned} N_1 &= N_a + N_b + N_c \\ &= dkx_1 \cos \theta - m_1 g \sin \phi \sqrt{l^2 + d^2 + 2ld \sin \theta} - lm_2 g \sin \theta \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 ϕ は

$$\sin \phi = \frac{d + l \sin \theta}{\sqrt{l^2 + d^2 + 2ld \sin \theta}} \quad (13)$$

で求めることが出来るから、前脚跳躍時に生じるモーメントは(12)式を整理して、

$$N_1 = d(kx_1 \cos \theta - m_1 g) - (m_1 + m_2)lg \sin \theta \quad (14)$$

となる。後脚が跳躍する際のモーメント N_2 は(9)~(14)式と同様の考え方で、以下のように表せる。

$$N_2 = d(kx_2 \cos \theta - m_2 g) + (m_1 + m_2)lg \sin \theta \quad (15)$$

跳躍するための最低限の条件は、 $N_1 > 0, N_2 > 0$

安定した跳躍をするためには、 $N_1 = N_2$

以上より脚の圧縮量を求める式は、次式で表される。

$$x_1 = x_2 - (m_2 - m_1) \frac{g}{k \cos \theta} + (m_1 + m_2) \frac{2lg}{dk} \tan \theta \quad (16)$$

$$x_2 = x_1 + (m_2 - m_1) \frac{g}{k \cos \theta} - (m_1 + m_2) \frac{2lg}{dk} \tan \theta \quad (16)$$

4.2 実験結果

Fig.4 Model for control

(15)、(16)式から求めた実験条件を以下に示す。なお、跳躍時の脚振り角度については基本 0deg とするが、姿勢の変化やギアのバックラッシュ等による脚振り中心角のずれを考慮して脚振り角度がある場合についても想定している。

Table 2 Experiment condition

前後の非対称性について	跳躍時の脚振り角度[deg]	前脚圧縮量[mm]	後足圧縮量[mm]
考慮しない		15	15
考慮する	-5	15	22.9
	0	15	21.9
	5	15	20.9

歩容はトロット歩容を用いた。実験結果を図 5 に示す。

前後非対称性を考慮しない制御の移動速度より前後非対称性を考慮した制御の方が速く測定された。後脚の跳躍量を大きくするにつれ、脚の伸縮が大きくなった分、機体の姿勢の変化が大きくなり歩容も不安定となった。前後の非対称性を考慮した制御をさらに有効にするためには機体の姿勢を考慮した制御も行っていくことが必要であると考えられる。

5. 結言

今回、モデルを用いて走行の為に必要となるトルクを検討した結果、前脚よりも後脚の方が必要トルクが大きいと考え、それに基づいたロボットを設計・製作した。その結果、後脚の脚振り用モータを前脚よりも多く用いることとなり、重心が後ろ寄りになっている 4 脚ロボットが完成した。制御においても、前後非対称であることを考慮して走行実験を行なった結果、考慮していない場合よりも移動速度が速くなった。しかし、後脚の跳躍量が多すぎると逆に姿勢が崩れ、歩容が乱れやすくなり、少なすぎると後脚で躓きが発生することから、さらに詳細な跳躍量の検討が必要であると考えられる。また、我々の 4 脚ロボットはアクティブサスペンション機構により着地の衝撃を吸収する機能はあるものの、やはり衝撃は避けられないという点、モータの性能上跳躍時にモータが負荷となってしまっている点も改善すべき所である。よって、モータの接続を一時的に切り離して柔らかく着地させ、着地の衝撃を次の動作に活かすためのクラッチ機構を搭載することで更に機体の性能を向上させることを考えている。

参考文献

- [1] 加藤一朗, 動物のメカニズム, 朝倉書店(1980)
- [2] 伊藤宏司, 歩行運動とリズム生成, 日本ロボット学会誌(1993) Vol.11 No.3 pp320~325
- [3] 川崎晴久, ロボット工学の基礎, 森北出版株式会社(2010)
- [4] 大久保宏樹, 中野栄二, 木村浩, ばねとアクチュエータによる跳躍機械の構成法, 日本ロボット学会誌(1992)Vol.10 No.7 pp948~954
- [5] 小寺忠, 矢野澄雄, 演習で学ぶ機械力学, 森北出版株式会社(2005)