

下肢に直動バネを有する四脚走行ロボットの開発

Development of a Quadruped Running Robot with Linear Springs at each Lower Limb

○学 森川慎一朗（京工織大） 正 木村 浩（京工織大）

Shinichiro MORIKAWA*, Hiroshi KIMURA*

*Kyoto Institute of Technology

Four legged animals transite a gait to other gaits according to moving speed like walking to running. In particular, walk-trot transition is very important because it coincides with walking-running transition. Many investigators have researched gait transition with quadruped robots and some of them demonstrated walk-trot transition. But trot gait in their research is not running. For resolving this issue, we developed the quadruped robot "Kurama". Kurama has linear springs at each lower limb for jumping. In this paper, we show specifications of Kurama. Next, we demonstrate jumping experiments in a pronk gait and confirm its jumping ability. Spec. and movies of Kurama can be seen at <http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/kurama/index-j.html>.

Key Words: Quadruped robot, Jumping robot, Walking and Running robot

1 緒言

一般に、ネコやウマなどの四足動物は自身の移動速度に合わせて walk から trot, gallop と歩容を遷移させることが知られている。中でも、walk から trot への歩容遷移は歩行から走行への遷移、すなわち跳躍期 (flight phase) が発生する非常に重要な遷移である。この歩容遷移について、これまでに四脚ロボットを用いて数多くの研究が行われてきた。Aoi ら [1] は脚の接地情報に基づく位相リセットにより walk-trot 間の自律的歩容遷移を、Owaki ら [2] は CPG への脚負荷フィードバックに基づく位相調節により walk-trot-gallop 間の自律的歩容遷移を実現した。しかし、いずれの walk-trot 間遷移も歩行としての trot 歩容への遷移であり、走行への遷移に伴う trot 歩容への遷移実現には至っていない。

そこで我々はまず跳躍期を有する trot 歩容を実現するため、下肢に直動バネを有する四脚走行ロボット "Kurama" の開発を行った。本ロボットは走行時の運動エネルギーを一時的に下肢の直動バネに蓄え、離地時に開放することで跳躍期を実現する。本稿では Kurama の諸元を紹介し、また trot 歩容に先駆けて pronk 歩容による跳躍実験を行いその跳躍能力および安定性を評価する。

2 四脚ロボット "Kurama"

2.1 諸元

図 1 に本実験で用いる四脚走行ロボット "Kurama" の外観を、表 1 にその諸元を示す。Kurama の各脚は腰ロール・腰ピッチ・膝ピッチの三つの能動回転関節と下肢の直動バネを持つ受動直動関節から構成される。各回転関節のトルクは PD 制御により調節される。直動関節の変位はリニアエンコーダにより計測される。その他、各脚に一軸の力センサ、胴体に角速度・加速度センサを搭載している。

Kurama の動力は外部の安定化電源より供給される。搭載した制御用 PC により 1ms ごとに PD 制御を行い、実験データは外部 PC 上で数値計算ソフト MATLAB により処理される。動力の供給および外部 PC との通信は Kurama に接続されたケーブルを介して行われるが、ケーブルには十分な長さがあり、ケーブルが実験時に悪影響を与えることはない。

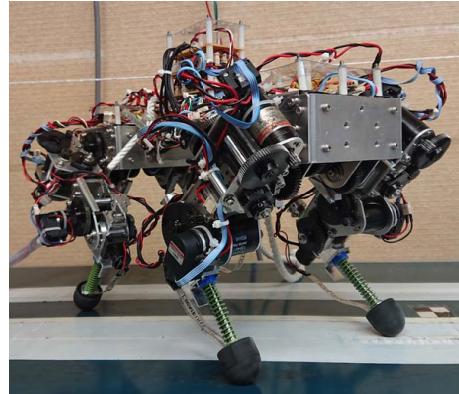


Fig.1 Quadruped robot "Kurama".

Table 1 Specifications of Kurama

size	250mm(W)×400mm(D)×220mm(H)
joints (each leg)	hip roll, hip pitch, knee pitch(active) linear spring (passive)
segment	upper limb:85 mm
length	lower limb:120.5 mm
mass	6.5kg
motor	MAXON RE25 20[W] (all joints)
gear ratio	97.6(all joints)
spring	SWY12.5-60 (MISUMI) stiffness: 1.03 N/mm
sensors	encoder, rate gyro (pitch&roll) 3 axes accelerometers 1 axis force sensor

2.2 脚制御器 (Leg Controller)

Kurama のピッチ面内歩行制御システムは CPG モデルの構成法 [3]に基づき、脚制御器 (Leg Controller) といわれる制御器が各脚の運動を司る。その概要は図 2 のとおりである。脚制御器は二つの状態、遊脚 (swing, sw) と支持脚 (stance, st) を有し、その遷移は脚負荷情報 (leg load) f_n を基準に行われ、条件は図 2 のとおりである。また、各状態では step distance \hat{D} や直立時の地面から腰関節までの高さ \hat{H} などを元に脚先の目標軌道が決定され、各関節の制御が行われる。

3 跳躍実験

3.1 手法

Kurama の跳躍能力およびその安定性を確認するために pronk 歩容による跳躍実験を行う。pronk 歩容で実験を行うのは、各支持脚により構成される安定域内に常に重心が入るため安定性が高く、跳躍能力のみを評価できるためである。

実験では直立静止状態の Kurama に手動でエネルギーを加えることで、跳躍動作を開始させる。跳躍動作の安定後、各跳躍の最高到達点（跳躍高さ）を計測する。本実験では目標跳躍高さを 60 mm としその実現の可否により跳躍能力を、連続的かつ安定な跳躍の実現の可否により安定性を評価する。ここで、目標跳躍高さは跳躍期間中に脚を前方に進めることが可能な高さを基準に決定した。なお、跳躍高さの計測はビデオカメラによる目視で行う。

3.2 結果

跳躍実験時の姿勢角および各脚の状態の時間変化を図 3 に示す。直立での姿勢安定後の時刻 2.4s～2.5s(図 3 緑部)において手動でエネルギーを加えたところ、2.8s に最初の跳躍が発生、その後連続して跳躍運動を行った。また、図 3(b) のピッチ面の振動から、4 回目の跳躍(図 3 ハッキング部)以降では跳躍動作が安定していることがわかる。

続いて、各跳躍での跳躍高さを表 2 に示す。表より徐々に跳躍高さが大きくなり、29 mm に収束したことがわかる。本結果により現在の Kurama の PD 制御のみによる跳躍能力が 29 mm であることがわかる。

4 課題と今後

実験により、Kurama が pronk 歩容において連続的かつ安定な跳躍動作を実現できることが分かった。一方で、跳躍高さは目標の 60 mm には届かず跳躍能力は不十分であった。この問題の主な原因として、以下の二つが考えられる。

一つ目は直動バネの脚部での衝突によるエネルギー損失である。現在、直動バネの変位が最大許容たわみ量に達しており、脚部において衝突が発生、エネルギーの損失が生まれている。したがって適切な剛性のバネを選定し、衝突を防ぐことで跳躍高さが増加する可能性がある。

二つ目は支持脚期での制御とバネの周期運動のタイミングの不一致である。現在、支持脚期ではバネの収縮に伴う脚の屈曲の修正が PD 制御の主な対象である。今後は、バネの周期運動に合わせた PD 制御を行い、かつ、能動的なエネルギー注入を行うことで跳躍高さを増加させる。

5 結言

本稿では下肢に直動バネを有する四脚走行ロボット "Kurama" の諸元を紹介した。また実験を通してその跳躍能力の確認を行った。実験の結果、Kurama は連続的かつ安定な跳躍が可能であることを確認した。一方で跳躍高さは目標とする 60 mm には至らず、跳躍能力は不十分であると分かった。今後は適切な剛性のバネおよび制御則を導入し、跳躍能力の増加を図る。また、trot 歩容での走行の実現を目指す。

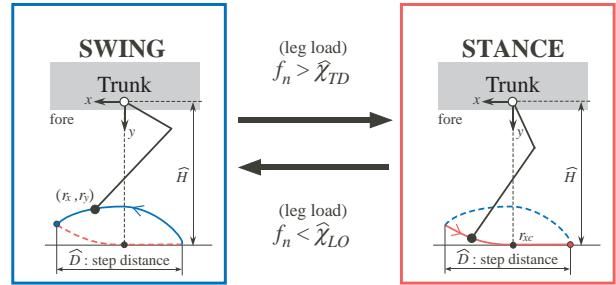


Fig.2 Overview of Leg Controller. $\hat{\chi}_{TD}$ is the threshold for touch down (TD) and $\hat{\chi}_{LO}$ is the threshold for lift off (LO). In this paper, $\hat{\chi}_{TD}$ is 5.0 N and $\hat{\chi}_{LO}$ is 2.0 N.

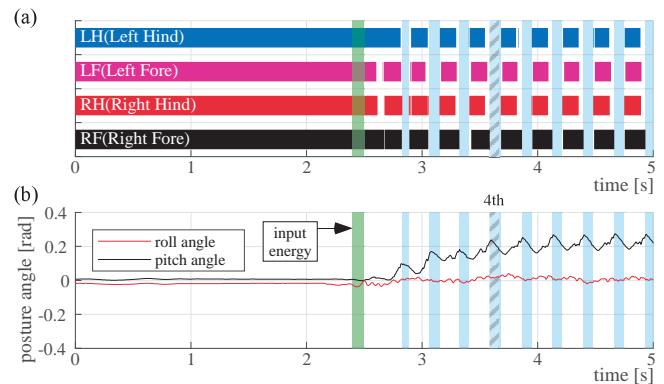


Fig.3 Result of flight experiment in a pronk gait. (a) Gait pattern. Solid line means stance phase and blank line means swing phase (LH:blue, LF:magenta, RH:red, RF:black). (b) Posture angle in pitch plane and roll plane. In both graphs, cyan line means flight phase.

Table 2 Jumping height in each jumping.

number of jumping	jumping height[mm]
1	18
2	23
3	25
4-8	29

参考文献

- [1] Aoi, S., et al., "A stability-based mechanism for hysteresis in the walk-trot transition in quadruped locomotion", J. Royal Soc. Interface, Vol.10, [doi:10.1098/rsif.20120908], 2013.
- [2] Owaki, D. & Ishiguro, A., "A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions from Walking to Trotting to Galloping", Sci. Rep., Vol.7, [doi:10.1038/s41598-017-00348-9], 2017.
- [3] Maufroy, C., et al., "Integration of posture and rhythmic motion controls in quadrupedal dynamic walking using phase modulations based on leg loading/unloading", Autonomous Robots, Vol.28, pp.331–353, 2010.