

下肢の直動バネを利用した四脚走行ロボットの pronk・trot 歩容の実現

○森川 慎一郎, 木村 浩 (京工繊大)

Pronk and Trot Gait of a Quadruped Running Robot Utilizing a Linear Spring at each Lower Limb

○ Shinichiro MORIKAWA, and Hiroshi KIMURA (Kyoto Institute of Technology)

Abstract : In gaits of quadruped animals, walk-trot transition is interesting because it coincides with walking-running transition. For trot gait running, we developed the quadruped robot "Kurama" with linear springs for jumping. Currently, we achieved pronk gait running. In this paper, we show control methods and experimental results of it, and mention walk and trot gaits in the future.

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応じて walk から trot, gallop へ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。

四脚ロボットの走行制御は Raibert ら³の研究が有名である。Raibert らは一脚・二脚・四脚ロボットそれぞれの走行を実現するにあたり、その制御を跳躍高さ制御・姿勢制御・前進速度制御の3つに分解し、四脚ロボットにおいては安定な trot, pace, bound 走行を実現した。また、Waldron ら⁴は離地時の脚先-腰ピッチ関節間の相対速度を制御することで、二次元平面拘束下でのシミュレーションおよび実験において安定な pronk・trot 走行を実現した。

以上の先行研究を受け、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。本ロボットは着地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エネルギー効率良く実現することを目指している。本稿では trot 走行に先駆けて行った pronk 走行制御手法の詳細およびその結果を述べ、最後に trot 歩容・walk 歩容への展望を述べる。なお、pronk 歩容を選択

した理由は、pronk 歩容が trot 歩容と比較して単純かつ安定性が高い歩容であり、走行制御における Kurama の特性の理解に適しているからである。

本研究において用いられる記号と表記法を表1と表2にまとめる。特に上付記号 $\hat{\cdot}$, $\bar{\cdot}$, \sim はそれぞれ変数のノミナルな (名目上の) 値, 計測された値, 目標値を表す。

Table 1 Abbreviations.

AEP, PEP	anterior, posterior extreme position
CPG	central pattern generator
LF, RF	left and right fore legs
LH, RH	left and right hind legs
HR, HP, KP	hip roll, hip pitch, knee pitch joints
SL	shank linear passive joints
LO, TD	lift off and touch down
st, sw	stance and swing
ipsi, cntr	ipsilateral and contralateral legs

2. 四脚走行ロボット Kurama

2.1 構成

図 1-(a) に本実験で用いる四脚走行ロボット Kurama の外観を、図 1-(b) にその胴体姿勢角座標の定義を示す。Kurama の各脚は腰ロール (HR)・腰ピッチ (HP)・膝ピッチ (KP) の三つの能動回転関節とバネを持つ下肢受動直動関節 (SL) から構成される。直動バネのバネ定数は 1.03 N/mm (1.05 kgf/cm) であり、その変位はリニアエンコーダにより測定される。その他、各脚先には 1 軸の力センサ、胴体には 2 軸の角速度センサ・3 軸の加速度センサを搭載している。

Table 2 Indexes and notations. The suffix i is omitted when we consider a single leg. In this paper, “*” is used as a wildcard character.

i	Leg index (superscript) $i \in \{LF, RF, LH, RH\}$
j	Joint index (subscript) $j \in \{HR, HP, KP, SL\}$
p	Leg phase index (subscript) $\in \{sw, st\}$
$\hat{*}, \bar{*}, \tilde{*}$	Represent respectively the nominal value, the measured value and the reference value of a single variable
\tilde{f}_n^i	Normal direction leg load measured by force sensors.
Θ^i	Joint angle vector: $[\Theta_{HP}^i \ \Theta_{KP}^i]^T$
θ_{BR}, θ_{BP}	Body roll and pitch angle
v_{fwd}	Forward velocity
T_{st}^i	Stance phase period
\mathbf{r}^i	Position vectors of the foot in the referential fixed to the trunk and centered at the hip joint: $[r_x^i \ r_y^i]^T$
D	Step distance
H	Height of the hip joint from the ground
L, W	Distance between hip joints of ipsi legs and cntr legs, respectively
Γ^i	Joint torque vector: $[\Gamma_{HP}^i \ \Gamma_{KP}^i]^T$
$\mathbf{K}_P^i, \mathbf{K}_D^i$	Diagonal matrixes for PD control gains
\mathbf{F}_{thr}^i	Thrusting force at the leg contact point given by joint torque.

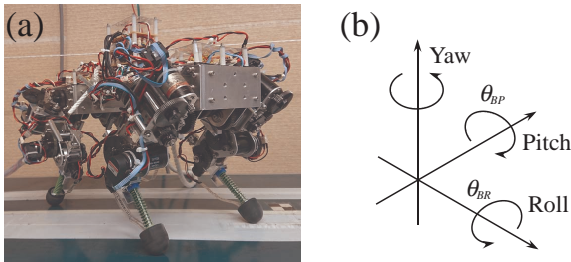


Fig. 1 (a) Overview of Kurama. (b) Definition of body posture angle coordinate.

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 ごとに制御を行い、実験データは実験終了後に外部 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、ケーブルは柔軟でかつ十分な長さがあり、ケーブルが実験に与える影響は小さい。

また、Kurama の詳細な構成および実験動画は著者らの研究室の web ページ (<http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/kurama/index-j.html>) から閲覧できる。

2.2 脚制御器

Kurama のピッチ面内歩行制御は CPG モデルの構成法⁵に基づき、脚制御器 (図 2) が各脚の運動を司る。脚制御器は 2 つの状態、遊脚期 (swing, sw) と支持脚期 (stance, st) を有し、その遷移は脚負荷値 (leg load): \tilde{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、HP 関節と KP 関節の目標角度・角速度が計算される。HR 関節の目標角度・角速度は固定されている。この目標角度・角速度に対して各能動関節 (HR, HP, KP) は PD 制御される。また、受動関節 SL は変位の計測のみを行っており、制御は行っていない。図 2 には脚先力の $t-n$ 座標系も図示されている。

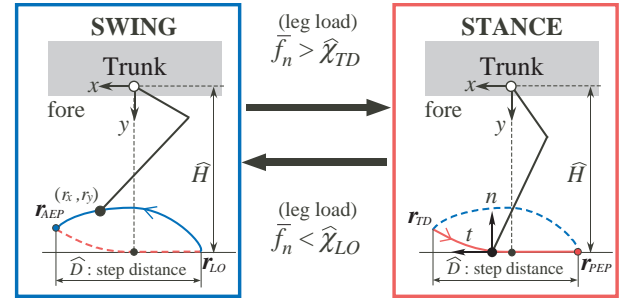


Fig. 2 Overview of Leg Controller. $\hat{\chi}_{TD}$ is the threshold for touch down (TD) and $\hat{\chi}_{LO}$ is the threshold for lift off (LO).

3. 手法

3.1 pronk 走行制御の概要

Kurama における主要な pronk 走行制御手法は以下の式 (1) と式 (2) である。

$$\tilde{r}_{AEP,y}^i[k] = \hat{H} + \text{sgn}(i) \frac{L}{2} \tan(\bar{\theta}_{BP}[k-1]) \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Gamma_{st}^i = K_P^i(\tilde{\Theta}^i - \bar{\Theta}^i) + K_D^i(\dot{\tilde{\Theta}}^i - \dot{\bar{\Theta}}^i) + J^T \tilde{F}_{thr}^i \\ \tilde{F}_{thr}^i = \begin{bmatrix} \tilde{F}_t^i \\ \tilde{F}_n^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ K_{thr} \left(\frac{\tilde{f}_n^i + \tilde{f}_{cntr}^i}{2} \right) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式 (1) は着地 (TD) 時の脚先位置 y 座標に着目したピッチ面内胴体姿勢制御である。ここで、 $\bar{\theta}_{BP}[k-1]$ は Kurama が $[k-1]$ 回目に TD した時に計測した胴体ピッチ角であり、 $\text{sgn}(i)$ は脚 i の関数 (表 3) である。 $\tilde{r}_{AEP,y}^i[k]$ は脚 i が次の $[k]$ 回目に LO する時に計算される遊脚脚先到達点 y 座標である。式 (1) とピッチ面内胴体姿勢制御の関係は 3.2.1 で述べる。

式 (2) は支持脚期にロール面内胴体姿勢制御を行う。ここで、上式右边第 1 項と第 2 項は PD 制御を表す。第 3 項は目標推力: \tilde{F}_{thr}^i をヤコビアン: J により関節トルクに分配する。目標推力は、脚 i と対側脚 $cntr$ の脚負荷 (\tilde{f}_n^i と \tilde{f}_{cntr}^i)、および、ゲイン: K_{thr} により下式で計算される。式 (2) とロール面内胴体姿勢制御の関係は 3.2.2 で述べる。

さらに、式 (2) は跳躍高さ制御も同時に行い、その跳躍高さはゲイン: K_{thr} により決定される。式 (2) と跳躍高さ制御の関係は 3.3 で述べる。

Table 3 Reference of $\text{sgn}(i)$.

i	fore leg	hind leg
$\text{sgn}(i)$	-	+

3.2 胴体姿勢制御

胴体姿勢制御の目的は、胴体ピッチ角 (θ_{BP}) および胴体ロール角 (θ_{BR}) を水平に保つことである。

3.2.1 ピッチ面内胴体姿勢制御と着地 (TD) の同期

一般に、bound 歩容とは異なり trot 歩容や pronk 歩容では胴体ピッチ面内運動は小さいが、前後脚間での TD のタイミングのズレにより胴体ピッチ面内運動が拡大する。

そこで、pronk 歩容においても遊脚期と支持脚期の両方において別個に胴体ピッチ面内運動を抑制するための制御を行う。

遊脚期では、各脚の TD のタイミングの同期のために式 (1) を用いる。計測された胴体ピッチ角 ($\bar{\theta}_{BP}[k-1]$) を用いて、脚先到達点 $\tilde{r}_{AEP}^i[k]$ の y 座標を調節する。これにより、跳躍時に胴体ピッチ面内運動がある場合でも TD 時の鉛直方向脚先位置の脚間相違が小さくなるため、TD のタイミングのズレを小さくすることができ、結果、胴体ピッチ面内運動を抑制することができる。

支持脚期では、 $\tilde{r}_y^i = \hat{H}$ (図 2) となるように PD 制御が行われ、これが胴体ピッチ角の水平維持に寄与する。

3.2.2 ロール面内胴体姿勢制御

跳躍期の胴体ロール面内運動は、特に LO 時の法線 (鉛直) 方向推力に左右脚間で差がある場合に発生する。そこで式 (2) を用いて、支持脚期における各脚 HP 関節と KP 関節のトルクを調節し、LO 時の左右脚間推力の差を小さくする。式 (2) の下式では、脚 i の法線方向目標推力に脚 i の脚負荷のみでなく対側脚 $cntr$ の脚負荷も用いることで、左右脚間推力の均一化を図っている。ゲイン: K_{thr} は次で述べる跳躍高さ制御のためのパラメータである。

3.3 跳躍高さ制御

跳躍高さ制御の目的は十分な遊脚期間を確保できる跳躍高さを発生させることである。跳躍高さの変更は式 (2) におけるゲイン: K_{thr} を調節して行う。これにより、推力およびバネに与えるエネルギーを調整し、跳躍高さを制御する。この際、実際の脚負荷値を基に推力を発生させることで、上記のロール面内胴体姿勢制御を妨げることなく、特に支持脚期前半、すなわち、バネの圧縮時にバネにエネルギーを与える。

TD 時の衝突や胴体の前進速度の低下によるエネルギー損失が存在するため、一般にセンサ情報を用いて目標跳躍高さに収束させる制御⁴を精度よく実現することは簡単ではない。しかし、損失の値は高さに対して単調であるため、推力の値に対して固有のつり合い跳躍高さが存在する³。したがって、ある K_{thr} の値に対して発生する跳躍高さはほぼ一定であり、試行回数を重ねて十分な跳躍高さを実現できる K_{thr} を決定した。

3.4 前進速度の目標値と推定値

走行では跳躍期と支持脚期で前進速度 (forward velocity) が異なることが予想されるが、現時点では跳躍期での前進速度を計測する手段がない。そこで、支持脚期の前進速度のみに着目し、式 (3) で目標値を設定し、式 (4) で実験時の前進速度を推定する。

$$\tilde{v}_{fwd} = \frac{\tilde{D}}{\hat{T}_{st}} \quad (3)$$

$$\bar{v}_{fwd} = \frac{1}{4} \sum_{i=LF}^{RH} \frac{\bar{D}^i}{\bar{T}_{st}^i} \quad (4)$$

式 (3) において、Kurama の目標前進速度: \tilde{v}_{fwd} を step distance: \tilde{D} により設定する。ここで、Kurama の支持脚期間 T_{st} はバネ-質量系の固有周期に依存し、pronk 歩容では前進速度に関係なくほぼ一定の値である。式 (4) において、実験時の前進速度 \bar{v}_{fwd} を各脚の前進速度の平均より推定する。

4. 結果

4.1 pronk 走行実験

図 3 に $K_{thr} (= 2)$ と $\tilde{D} (\approx 0)$ を固定した時の pronk 走行実験結果を示す。図 3-(a) より、実験開始直後に全ての脚がほぼ同時に遊脚となり pronk 歩容での跳躍 (水色部) が発生していることがわかる。また、跳躍は連続して発生しており、図 3-(b)・(c) から各跳躍期における最高跳躍高さと前進速度の推定値 (式 (4)) がほぼ一定であることがわかる。

4.2 姿勢制御

図 3-(a) において前後同側・左右対側脚間で TD の同期がほぼ行われ、結果、図 3-(d) において胴体ロール角はほぼ 0 rad で水平を維持しており、ロール面内胴体姿勢制御が有効であると言える。一方で胴体ピッチ角は、実験開始直後から 0.2 rad (約 11.5 度) 程度の定常偏差が発生しており、ピッチ面内胴体姿勢制御は不十分である。これについては 5.1 で検討する。

4.3 跳躍高さ制御

図 4 に跳躍高さ実験の結果を示す。実験では式 (2) のゲイン: K_{thr} を支持脚期の回数により変化させた。8 回目の

支持脚期と跳躍期において関節トルクによる推力 F_n^{LF} と最高跳躍高さが増加している。図 4-(c) では、支持脚期に推力 F_n^{LF} が脚負荷値 \bar{f}_n^{LF} とほぼ同位相の波形をしており、特にバネの圧縮時 (支持脚期前半) にバネにエネルギーを与えている。また、バネの伸展時 (支持脚期後半) において $\bar{f}_n^i < 20$ N の条件下では $\bar{F}_n^i = 0$ N としてバネの伸展を妨げない。

4.4 前進速度

図 5 に前進速度実験の結果を示す。図 5-(b) では実験開始後 1 s から 2 s において目標速度を約 0.3 m/s まで増加させたところ、推定値は約 0.1 m/s まで増加した。しかし、目標値である 0.3 m/s には届いていない。また、図 5-(c) では前脚と後脚で前進速度の推定値が大きく異なっている。これについては 5.2 で検討する。

5. 課題と今後

5.1 ピッチ面姿勢角の定常偏差

胴体ピッチ角定常偏差の原因としては後脚の TD が早く、前脚の TD が遅いことが挙げられる。すなわち、左右同側・前後対側脚間で TD の同期が不十分である。Kurama の支持脚期間はバネ-質量系の固有周期に依存するため、早期に TD した後脚では前脚より早くバネの伸びと LO が発生する。その結果、前傾姿勢のまま跳躍期に遷移する。ただし、式 (1) を行わない場合は、前後脚間での TD のタイミングの大きなズレにより、大きな振幅の胴体ピッチ角振動が発生する。したがって、式 (1) によるピッチ面内胴体姿勢制御は有効であり、かつ、多少の前傾姿勢は pronk 走行に悪影響を及ぼさない。いずれにしても遊脚期での胴体ピッチ角制御は不可能であり、支持脚期に定常偏差をなくす制御は下肢に受動直動バネ関節を持つ Kurama においては容易ではない。

5.2 前進速度の推定

図 5-(c) の各脚ごとの前進速度では、前脚が約 0.2 m/s まで増加しているのに対し、後脚は約 0 m/s にとどまっている。後脚の推定前進速度が遅い理由は現在不明であるが、これにより図 5-(b) において前進速度の目標値と推定値に大きな差が生まれている。跳躍期の前進速度をカメラ等を用いて計測する点を含めて、前進速度の計測と制御は今後の大きな課題である。

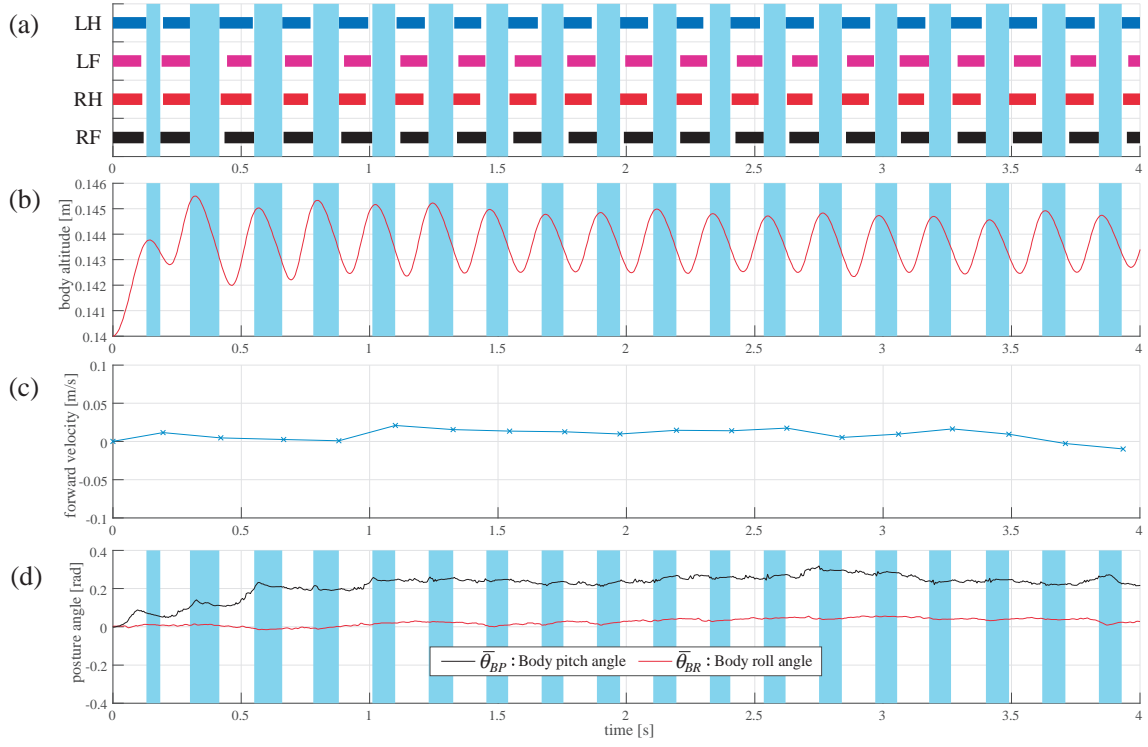


Fig. 3 Result of the pronk running experiment with fixed parameters ($K_{thr}=2$, $\tilde{D}=0.001\text{m}$). The value of gain K_{thr} is determined considering the several experimental results. (a) Gait pattern. Solid line means stance phase and blank means swing phase. Vertical light blue line means the flight phase. (b) Body altitude from the ground. (c) Forward velocity calculated by $\bar{v}_{fwd} = \bar{D}/\bar{T}_{st}$. (d) $\bar{\theta}_{BP}$ and $\bar{\theta}_{BR}$: Posture angle in the pitch plane and the roll plane.

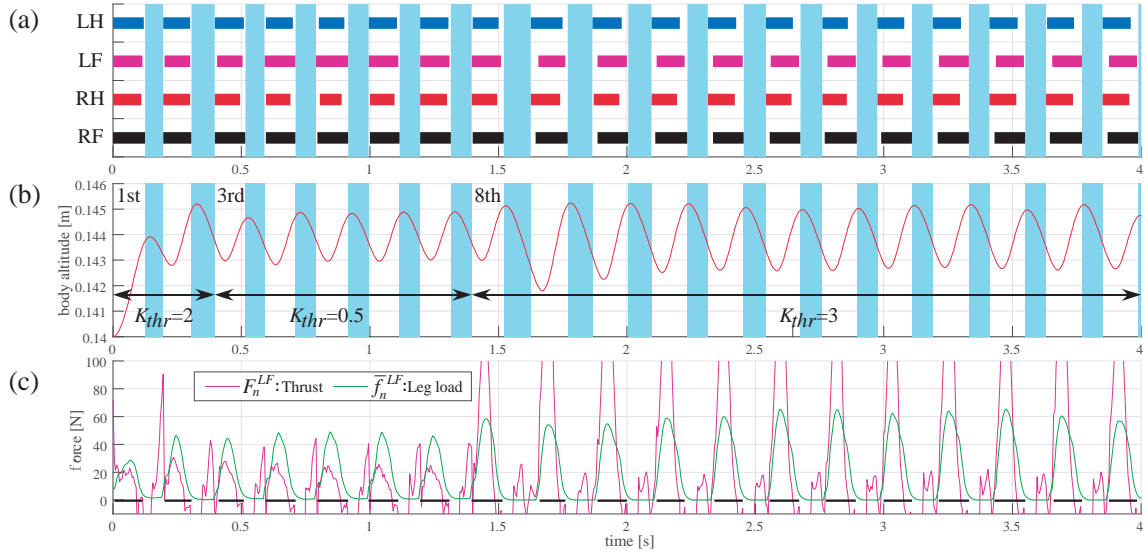


Fig. 4 Result of the flight altitude experiment with varying K_{thr} , which starts from 2, is changed to 0.5 on the 3rd stance phase and is changed to 3 on the 8th stance phase. (a) Gait pattern. (b) Body altitude from the ground. (c) Thrust force F_n^{LF} calculated by using $F_n^i = (J^T)^{-1}\Gamma_{st}^i$, which includes torque by PD control in eq.(2). Horizontal black thick lines represent stance phases.

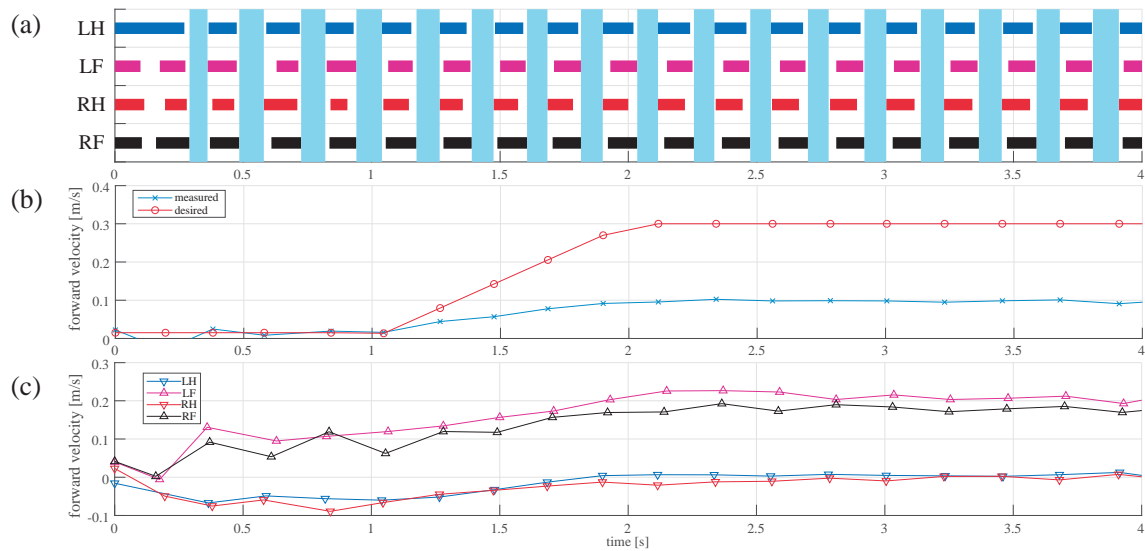


Fig. 5 Result of the running velocity experiment with varying desired forward velocity: \tilde{v}_{fwd} , where \tilde{D} is increased linearly from 0.001 m to 0.02 m between 1 s and 2 s and is fixed afterwards. (a) Gait pattern. (b) Forward velocity. (c) Forward velocity of each leg. The desired velocity and the measured velocity are calculated by eq.(3) and eq.(4), respectively.

5.3 trot 走行実現への展望

trot 走行は, pronk 走行制御手法を対となる対角脚間に適用することで実現可能であると考えている. また, trot 歩容では pronk 歩容より胴体ロール面内運動の制御がより重要であることが予想されるため, 現在は使用していない HR 関節を用いて遊脚着地角制御³を行い, 胴体ロール面内運動の安定化を実現する.

6. 結言

本稿では四脚走行ロボット Kurama の pronk 走行制御手法について述べた. 実験においては, 胴体ピッチ面内運動で前傾姿勢ではあるが, 胴体ロール面内運動を含めて姿勢制御に関しては定常的で安定な pronk 走行を実現した. また, 支持脚時の推力を決定するゲインの変更により跳躍高さが制御可能であることを確認した. しかし, 前進速度の推定と制御についてはいくつかの課題が残った. 今後は前進速度における課題を解決し, その後 trot 走行および walk 歩行の実現を目指す.

付録 A Kurama のパラメータ

Kurama の物理パラメータと実験パラメータを表 4 に示す.

Table 4 Physical and experimental parameters of Kurama.

limb length	85 mm (upper), 120.5 mm (lower)
mass	6.5kg
L, W	0.25 m, 0.16 m
$\hat{\chi}_{LO}, \hat{\chi}_{TD}$	5 N, 7.5 N
\hat{H}	0.16 m
\hat{T}_{st}	0.0667 s

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] Raibert, M. H. : "Legged Robots That Balance", MIT Press(1986).
- [4] Estremera, C. & Waldron, K. J. : "Thrust Control, Stabilization and Energetics of a Quadruped Running Robot", Int. J. Robotics Res., Vol.27, pp.1135-1151, [doi:10.1177/0278364908097063], (2008).
- [5] 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).