

## 二輪車に着想を得た

### 四脚ロボットの動的バランス制御方法

#### Dynamic Balance Control Method for Quadruped Robots

#### Inspired by Bicycle

○服部祥英<sup>\*</sup>, 鈴木朱羅<sup>\*\*,\*\*</sup>, 福原洸<sup>\*</sup>, 加納剛史<sup>\*</sup>, 石黒章夫<sup>\*</sup>

○Shoei Hattori<sup>\*</sup>, Shura Suzuki<sup>\*\*</sup>, Akira Fukuhara<sup>\*</sup>, Takeshi Kano<sup>\*</sup>, Akio Ishiguro<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>東北大学, <sup>\*\*</sup>大阪大学, <sup>\*\*\*</sup>日本学術振興会

<sup>\*</sup>Tohoku University, <sup>\*\*</sup>Osaka University,

<sup>\*\*\*</sup> Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)

キーワード: 四脚ロボット (quadruped robot), 動的バランス制御 (dynamic balance control),

二輪車 (bicycle), 高速ロコモーション (high speed locomotion)

連絡先: 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学 電気通信研究所 本館 4階 M457 号室

服部祥英, Tel.: (022)217-5465, Fax.: (022)217-5464, E-mail: s.hattori@riec.tohoku.ac.jp

## 1. 緒言

四脚動物は、獲物や捕食者の挙動や障害物など様々な状況や地形に応じて、高速移動中にも姿勢を崩さず即時適応的な動きが可能な優れたバランス感覚の持ち主である。その優れたメカニズムを工学的に実現できれば、森林や荒地など険しい地形を素早く俊敏に移動できるこれまでにないモビリティの実現につながる。そのため、これまで数多くの四脚ロボットのバランス制御の研究が行われてきた。

信頼性の高い動的バランス制御方法として、詳細なロボットの物理パラメータに基づき所望の床反力を得られる脚関節トルクを算出す

る、厳密な力学計算に基づくモデルベースのアプローチが知られており、安定した動歩行が実現されている<sup>2),3)</sup>。しかし、モデルベースの方法は計算コストが多いため、高速走行や機動性の発揮には限界がある。動物に比肩する俊敏性を備えた四脚ロボットを実現するためには、低い計算コストで高い動的安定性を実現する方法が必要である。

そこで本研究では、静的に不安定な系でありながら、安定した高速走行および旋回が可能な二輪車の動的バランス制御原理に着目した。近年、二輪車の安定メカニズムについては研究が進んでおり、走行中の二輪車の安定性を生む主な要因は、車輪によるジャイロ効果ではなく、

適切なハンドル操舵によって生じる遠心力であることが明らかになっている<sup>4)</sup>。もし、この原理を脚ロボットに適用できれば、二輪車のように高速・高機動性を備えた四脚ロボットが実現可能であると考えられる。

本稿の目的は、四脚ロボットに二輪車の動的バランス制御則を適用することが可能かを検証することである。そのために、脚と車輪の両性質を備えたリムレスホイールを用いたモデルにより、二輪車のバランス制御原理の有効性を検証する。

## 2. 方法

### 2.1 二輪車の姿勢制御メカニズム

二輪車の姿勢制御のコツを一言で言うならば「倒れる方向にハンドルを切る」と表せる。これは、二輪車の姿勢ロール角 $\theta$ に応じて倒れる方向にハンドル角度 $\phi$ を制御することで、姿勢を復帰する方向に遠心力が作用するためである<sup>4)</sup>(Fig. 1)。具体的には、目標ハンドル角 $\bar{\phi}$ を、(1)で表される値となるように制御する。

$$\bar{\phi} = -k\theta \quad (1)$$

ここで $k$ は正の比例定数である。二輪車の単純化力学モデル<sup>5)</sup>によれば、走行速度が十分大きく、かつ、(1)の $k$ が速度およびモデル情報によって定まる一定値よりも大きい場合、姿勢ロール角 $\theta$ が漸近安定となる<sup>5)</sup>。

### 2.2 四脚ロボットへのアプローチ

上記制御則を四脚ロボットに適用しようとする場合、脚と車輪では以下の点が大きく異なると考えられる。

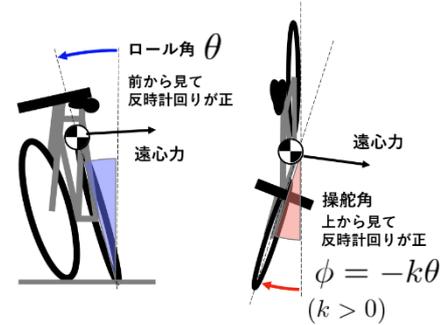


Fig. 1: 二輪車の姿勢制御メカニズム

- 脚は、常に地面の上を転がり続ける車輪と異なり、離地と接地を繰り返す離散的な接地様式である。
- 脚はほとんどの場合、接地部が車体の正中線を通る二輪車の車輪と異なり、異なるタイミングで接地を行う左右非対称な接地様式を取る。

接地様式は、ロボットと地面の力学的な相互作用そのものであることから、上記の脚の特徴を踏まえた接地様式で移動するモデルにおいて二輪車の姿勢制御則の有効性を検証することで、二輪車の姿勢制御メカニズムが四脚ロボットに適用可能かを明らかにすることができると考えられる。

### 2.3 モデル

二輪車の姿勢制御メカニズムを適用する、脚の接地様式で移動するモデルの詳細について以下で述べる。

#### 2.3.1 機構系

車輪の双方の特徴を備えたモデルとしてリムレスホイールが知られている<sup>6)</sup>。リムレスホイールは、車輪のリムを支えるスポークと

呼ばれる突起が直接地面と接地し、転がりながら脚のように順番に接地と離地を繰り返す。本稿では、制御が車輪と同様のため単純であり、スポークの本数や配置構造を工夫することで脚の接地様式を容易に再現可能であることから、リムレスホイールを使用したモデルでの検証を行う (Fig. 2)。

本研究で検証に使用するロボットは、二輪車の前輪と後輪の代わりにそれぞれリムレスホイールを備える。自由度は、ハンドル関節と、前後のリムレスホイールの回転自由度の合計3つである。

リムレスホイールの形状は、四脚ロボットと接地様式がほぼ等価となるように、隣接するスポークが左右に分離して配置される、十字型の形状とする。前後のリムレスホイールは同じ形状である。ロボットの構造を Fig. 3 に示す。

また、各スポークには直動方向に受動変形可能な粘弾性変形バネを設置した。これにより接地時の衝撃を吸収し、少ないスポーク本数であってもスムーズな転がりが可能となる。

### 2.3.2 制御系

ハンドル関節に対して、2 輪車の姿勢制御メカニズムに基づいた姿勢制御則を適用する。ハンドル関節へ与えるトルク  $\tau_\phi$  を次に示す。

$$\tau_\phi = -k_p(\phi - \bar{\phi}) - k_d\dot{\phi} \quad (3)$$

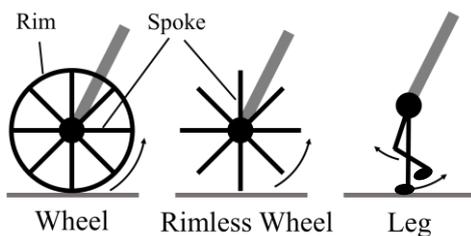


Fig. 2: リムレスホイールの導入

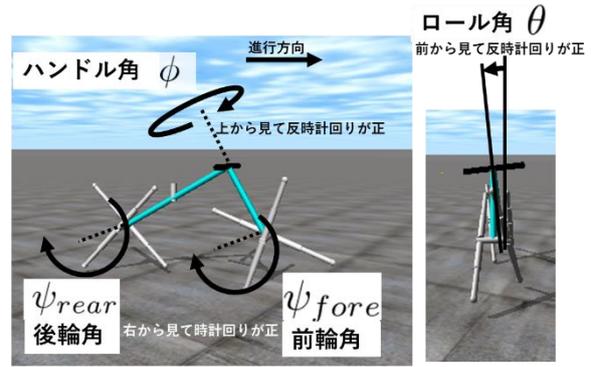


Fig. 3: 実験で使用したリムレスホイールを備えたロボット

$$\bar{\phi} = -\theta \quad (4)$$

ここで、 $\phi$  はハンドル角度、 $\bar{\phi}$  はハンドル角度の目標値、 $\theta$  は姿勢のロール角、 $k_p$ 、 $k_d$  は比例定数である。

前後のリムレスホイールに対しては、一定の速度で回転させるための角速度制御を行う。立ち上がりを緩やかにするために、一次遅れ系の制御とする。リムレスホイールへ与えるトルク  $\tau_{\psi_i}$  を以下に示す。

$$\dot{\tau}_{\psi_i} = \gamma(-\alpha(\dot{\psi}_i - \omega) - \tau_{\psi_i}) \quad (5)$$

ここで、 $\psi_i$  はリムレスホイールの回転角度、 $\omega$  は目標角速度、 $\gamma$ 、 $\alpha$  は比例定数である。

## 3. 実験

### 3.1 実験方法

提案モデルの走行時における安定性を検証するために、ロボットの動作検証において広く用いられる 3 次元物理シミュレーション環境である Open Dynamics Engine (ODE)<sup>7)</sup>を用いて実験を行った。静止した状態からシミュレーションを開始後、4.0[s]の時点から 0.5 秒間、様々な大きさの一定の横力を外乱としてハン

ドルの中心に印加し、計 15[s]の走行を記録する。安定性の評価は、実験終了時点での走行状態で判断する。具体的には、実験終了までの5秒間の速度記録に基づき安定走行時と比較を行い、走行状態か転倒状態か否かを判断する。

### 3.2 実験結果

まず、リムレスホイールの目標角速度  $\omega$  が 10[rad/s]、外力 30[N]を印加したときの姿勢ロール角とハンドル角の変化を Fig. 4 に示す。ハンドル角  $\phi$  が姿勢ロール角  $\theta$  に比例して変化していることが確認された。また、外乱によって姿勢が崩れた後、一定範囲内に姿勢ロール角が収束していることから、接地様式の違いに関わらず、二輪車の姿勢制御則が有効であると考えられる。

次に、様々な走行速度での安定性の検証結果を Fig. 5 に示す。目標角速度  $\omega$  が 9[rad/s]以上の場合に、定常走行が可能となること、および、 $\omega$  が上昇するにつれて、外乱への耐性を増すことが確認された。また、 $\omega$  が大きいほど走行速度は上昇することから、提案制御則を使えば、高速時の方が転倒の危険が減少することを示している。

## 4. 結言

四脚ロボットと接地様式が等価であるリムレスホイールモデルに二輪車のハンドル制御則を適用し、安定性を検証した。その結果、四脚ロボットの接地様式のモデルに対しても、ロール方向の姿勢制御について有効性が示された。速度が速いほど安定性が増加する性質を持つ二輪車の姿勢制御メカニズムを四脚ロボットに適用できれば、動物に比肩する高速走行可能な四脚ロボットの実現に大きく近づく。今後は、本モデルの接地様式を参考に、実際の脚ロボットの設計および検証を

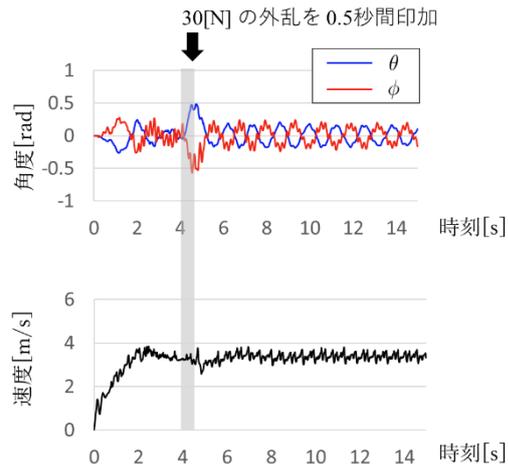


Fig. 4: 目標角速度  $\omega$  が 10[rad/s]であるときのデータ。上段) 姿勢ロール角  $\theta$  とハンドル角  $\phi$  の変化。下段) 走行速度。

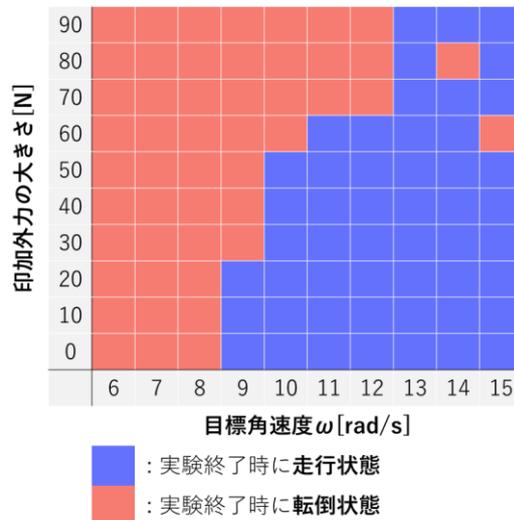


Fig. 5: 走行速度と安定性の関係

行ったのち、実機による実証実験を行い、二輪車の姿勢制御則の四脚ロボットへの有効性をさらに詳しく検証していく予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (JP-19K21974) の支援を受けたものである。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Hildebrand, Milton. "Motions of the running cheetah and horse." *Journal of Mammalogy* 40.4: 481-495. (1959)
- 2) Park, Hae-Won, Patrick M. Wensing, and Sangbae Kim. "High-speed bounding with the MIT Cheetah 2: Control design and experiments." *The International Journal of Robotics Research* 36.2: 167-192. (2017)
- 3) Gonzalez, Carlos, et al. "Line Walking and Balancing for Legged Robots with Point Feet." *arXiv preprint arXiv:2007.01087* (2020).
- 4) Kooijman, J. D. G., et al. "A bicycle can be self-stable without gyroscopic or caster effects." *Science* 332.6027: 339-342. (2011)
- 5) Åström, Karl J., Richard E. Klein, and Anders Lennartsson. "Bicycle dynamics and control." *IEEE Control Systems Magazine* 25.4: 26-47. (2005)
- 6) 池俣吉人, 佐野 明人, 宮本 裕貴, 大竹 朋生, 藤本 英雄, "バネ付きリムレスホイールによる受動走行の基礎的研究 (機械力学, 計測, 自動制御)." *日本機械学会論文集 C 編* 76.766: 1532-1538. (2010)
- 7) Smith, Russell. "Open dynamics engine.": 3-2. (2005)