

四脚走行ロボットの視覚適応シミュレーション

Simulation of Quadruped Robot Running with Visual Adaptation

○学 菊川 韶 (京工織大) 学 岡田 奈津希 (京工織大) 正 木村 浩 (京工織大)

Hibiki KIKUKAWA*, Natsuki OKADA*, Hiroshi KIMURA*

*Kyoto Institute of Technology

Full et al. mentioned that it is important to use two dynamic models for considering principle about legged locomotion of "Target" like animals or legged robot. One is the simplest model of Target without any accessories like muscles, and is called "Template". It must exhibit targeted behavior. Another is called "Anchor", more similar to Target. It must have characteristics of behavior of Template. We target "Kurama", the robot we developed, and simulate that running robot avoids obstacles like hole with SLIP model. That assumes using visual adaptation. And we consider about the relation between stability of forward speed and the placement of loading leg and control of attacking angle of leg. We propose the method of avoiding obstacles, last evasion fore or hind and avoid 1-step before. It is Template simulation. So, it is needed to simulate Anchor model. We carry out simulation of Kurama using "Webots".

Key Words: Quadruped robot, Template and anchor, SLIP model, Visual adaptation

1 緒言

1.1 はじめに

Full ら [1] は、脚式ロコモーション研究対象の動物やロボット ("Target") の原理を議論するために、"Template" と "Anchor" と呼ばれる 2 種類の力学モデルを構築することが重要であると述べた。Template とは、Target の運動を表現・解析する最もシンプルなモデルである。解析を簡単にするための簡略化モデルであるが、対象の運動やその特性を十分再現可能であり、かつ、制御手法の設計指針を提供することができる。Anchor とは、「脚数や関節数などの形態」や「感覚一行動制御」の観点から、Target となる動物とロボットに近いモデルであることが望ましい。また、その一方で Anchor は Template が示す運動の特性を備えている必要がある。そこで我々は、Target として四脚ロボット "Kurama" (図 1)[2] の走行を対象に、次のような研究手法を用いる。まず、Anchor よりも簡単な力学モデルとなる Template として Blickhan[3] が提案した SLIP モデルを用い、前進速度の安定化・視覚適応などの解析や力学シミュレーションを行い、簡単な戦略を発見し、その戦略を Anchor に適用してより詳細な力学シミュレーションを行い、その戦略の妥当性を確認する。さらには、その結果を Target の実験結果と比較することが最終的な目標である。

SLIP モデルのような一脚モデルの走行の速度安定化は遊脚着地角制御 [4] により行われるが、視覚を前提とした障害物回避 (着地点選択) は走行速度安定化への外乱となる。我々は SLIP モデルを用いたシミュレーションにより、着地点選択と遊脚着地角制御による前進速度安定化の関係を考察した。さらに、Template である SLIP モデルの振る舞いの特性を備え、Target である Kurama の形態に近い、Anchor にあたる物理モデルをシミュレーションソフト Webots を使用して作成した (図 2)。この物理モデルを使用して、Template のシミュレーションから得られた戦略の妥当性を評価していく。

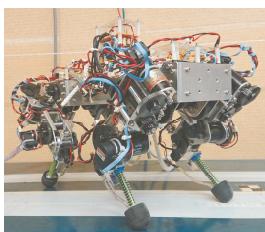


Fig.1 Kurama

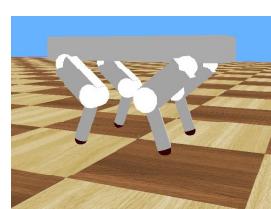


Fig.2 simulation model

2 SLIP モデルシミュレーション環境

2.1 SLIP(Spring Loaded Inverted Pendulum) モデル

SLIP モデル [3] とは、図 3 に示す質点 (○) で表される胴体と質量なしバネ脚により構成される一脚走行 (図 4) のためのモデルである。脚の質量がないので衝突によるエネルギー損失はなく、全体のエネルギーは常に保存される。ここで、y 方向最高跳躍点 (図 4, HP) での「位置エネルギー」と「前進 (x) 方向運動エネルギー」の和は一定であり、それらの比は変化する。遊脚 (swing) 相および支持脚 (stance) 相での運動方程式 [3] をルンゲクッタ法により積分し、走行シミュレーションを行う。また、本シミュレーションでは LO → 遊脚期 → TD → 支持脚期の一連の流れを 1step とする。

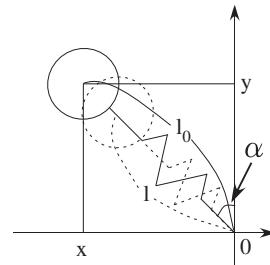


Fig.3 SLIP model coordinate

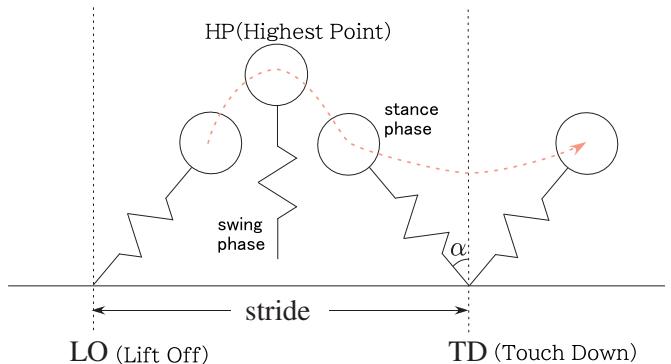


Fig.4 SLIP model and running
"α" means touchdown angle.

2.2 遊脚着地角制御

遊脚着地角制御 [4] とは、走行中の姿勢安定と前進速度を支配する着地角を遊脚期に決定する制御であるが、本シミュレーションのモデルは胴体が質点であるため姿勢制御は必要ない。よって、遊脚着地角制御は前進速度制御を行うこととする。ここで、遊脚相は自由落下運動なので x 方向速度 v_x は一定とする。支持脚相は着地 (TD) 時の脚角度、つまり着地角 α を初期値とする倒立振子運動であり、離地 (LO) 時の x 方向速度が次の遊脚相の v_x^* となる。走行の各ステップで v_x が目標速度 v_x^* に収束するように、次式の遊脚着地角制御 (式 (1)) を用いて次の着地角 α を計算する。中立点 [4] に対応する着地角 α_0 は v_x^* を用いてバネなし倒立振子モデルから計算される。

$$\alpha = \alpha_0 + \text{gain} \times (v_x - v_x^*) \quad (1)$$

2.3 障害物回避のための遊脚着地角計算

図 5 の①と②を用いて障害物回避問題の設定を説明する。定常走行時、ある HP:1 で式 (1) より遊脚着地角が計算され、本来の着地点 (original foot placement, OFP) が決定される。ここで、OFP の前後に大きさ Δx の溝 (緑線) が視覚によって検出されると仮定する。そこで障害物を回避できる着地点 (溝の手前または奥) を考慮し、新たな遊脚着地角 α_{ob} を計算する (図 5 の TD:② では奥が選ばれている)。具体的には、回避着地点の x 座標を図 4 の stride を用いて

$$\text{stride}_{ob} = \text{stride} \pm \Delta x (-, + \text{ は手前と奥に対応})$$

するとき、質点の自由落下後・着地時座標 (x_{TD}, y_{TD}) を近似計算により求め、新たな遊脚着地角 α_{ob} を式 (2) から得る。

$$\alpha_{ob} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{stride}_{ob} - x_{TD}}{y_{TD}} \right) \quad (2)$$

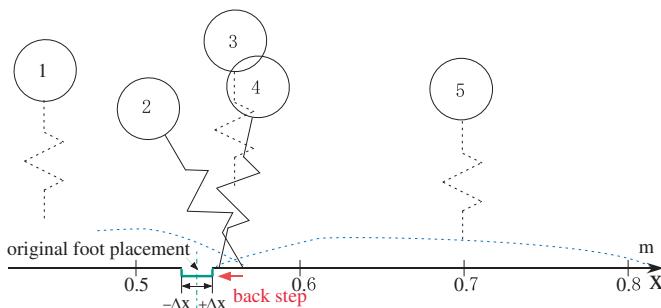


Fig.5 Back step in obstacle avoidance

3 SLIP モデルシミュレーション結果

3.1 設定

以下すべて $v_x^* = 0.8(\text{m/s})$ とする。2.3 節で述べた、着地角の変更により障害物を超えるシミュレーションで $gain$ の調整を行った。目標速度への到達度合い、障害物の回避能力を考慮した結果、OFP の前 17(mm) 後 27(mm) に回避する性能をもつ $gain=0.6(\text{rad}\cdot\text{s}/\text{m})$ に設定した。またこの結果は次節での着地点選択に使われる。

3.2 直前に障害物を検知した場合

簡単のため、直前の HP で視覚により障害物として OFP から前後同じ大きさ Δx の溝が検出されると仮定する。3.1 節の結果から手前と奥の着地点の一方のみが可能であればそちらを選ぶ。両方可能な場合には何らかの選択基準が必要である。興味深い例として図 5 を示す。 $\Delta x=9(\text{mm})$ であり、TD:②で OFP より奥 27(mm) に大きな着地角で着地した。次の支持脚相・倒立振子運動で重力により、胴体速度の x 成分が減速され、HP:③では v_x が小さく跳躍高さが大きくなかった。このため、次の遊脚着地角は式 (1) より負となり、TD:④のように前回よりも後ろに着地するバックスステップが発生する。次の支持脚相では逆に重力により、

胴体速度の x 成分が加速され、HP:⑤では v_x が大きく跳躍高さが小さくなった。その後、何回かの跳躍により定常走行に戻る。これと同等なバックスステップは、Raiert の 2 次元 1 脚走行ホッピングマシン [4] でも実現されているため、この結果は妥当だといえる。

3.3 1-step 前に障害物を検知した場合

3.2 節で手前の着地点も奥の着地点も不適切なときに、図 6 のように直前ではなく 1-step 前の HP から 2 つ先の OFP にある障害物を検知して 1-step 前の着地点を Δx_1 変更することで回避が可能となる場合がある。前後 $\Delta x_0=54(\text{mm})$ でシミュレーションした結果、1-step 前の着地では OFP より $\Delta x_1=10(\text{mm})$ 奥に着地点を選択し、直前の着地で障害物中心より $\Delta x_0=54(\text{mm})$ 手前に着地点を設定することで転倒なく障害物を飛び越えることができた。

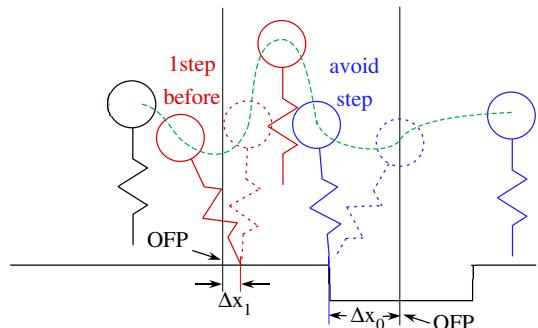


Fig.6 Avoid 1-step before

3.4 回避性能

表 1 に本シミュレーションの結果を示す。回避性能として、直前回避 (手前) < 直前回避 (奥) < 1-step 前回避の順で高いことが分かった。

Table 1 Summary of obstacle avoidance methods

$\Delta x_0(\text{mm})$	Last evasion (fore)	Last evasion (hind)	Avoid 1 step before
0~17	○	○	○
18~27	—	○	○
28~54	—	—	○
55~	—	—	—

4 Anchor のシミュレーションにむけて

Kurama の走行を Target として、Template にあたる SLIP モデルを用いて行ったシミュレーションを行った。このシミュレーション結果の妥当性を検討するために、より Kurama の形態に近いモデルを作成し、Anchor にあたるシミュレーションを行う必要がある。そこで、図 2 に示す物理モデルをシミュレーションソフト Webots で作成した。

5 結言

SLIP モデルを使用して視覚を前提とした障害物回避のための着地点選択問題と遊脚着地角制御による前進速度安定化の関係を考察した。それは Template にあたるシミュレーションであるため、得られた結果を戦略として Anchor に適応し、妥当性を検討する必要がある。

参考文献

- [1] R.J. Full, D.E. Koditschek, Templates and Anchors: Neuromechanical Hypotheses of Legged Locomotion on Land, *J. of Exp. Biol.*, vol.202, pp.3325–3332, 1999.
- [2] 森川, 木村, 下肢に直動バネを有する四脚走行ロボットの開発, ロボメカ講演会 2020(発表予定), 2020.
- [3] R.Blickhan, The Spring-mass Model for Running and Hopping, *J. of Biomech.*, vol.22, pp.1217–1227, 1989.
- [4] M.H. Raibert, *Legged Robot That Balance*, MIT press, 1986.