

## 6 脚作業移動ロボットの走行に関する基礎研究 Fundamental Study on Running of Working Six-Legged Robots

○竹田 祥紀, 井上 健司  
○Yoshiki Takeda, Kenji Inoue

山形大学  
Yamagata University

キーワード: 脚ロボット (Legged-robot), 走行 (Running),  
動力学シミュレータ (Dynamics simulator), 摩擦 (Friction)

連絡先: 〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16  
山形大学大学院理工学研究科応用生命システム工学専攻 井上健司  
TEL&FAX: 0238-26-3335, E-mail: inoue@yz.yamagata-u.ac.jp

### 1. はじめに

災害現場などの危険な場所でロボットが活動するためには、一台が高い移動能力と作業能力を併せ持つ必要がある。そこで著者らは、6 脚モード、水平4 脚2 腕モード、垂直4 脚2 腕モードを切り替えることで高い移動能力・作業能力を発揮する6 脚作業移動ロボットを開発し、平地での歩行や急斜面登り等を実現してきた[1-4]。

本研究では、6脚作業移動ロボットの機能拡張を目的として、これまでの歩行より速い移動を可能にする走行法を提案する。この走行法は、4足動物のハーフバウンド走行をモデルとし、前脚2本と後脚4本を交互に動かして力強い蹴りを実現する。動力学シミュレータを用いて脚の最適軌道を求め、実機による走行実験を行い、走行能力を検証する。

### 2. 6 脚作業移動ロボット

開発中のロボットを図1に示す[1]。直方体のボディの下面四隅に4本の脚を、上面の二隅に2本の脚を配置している。脚の自由度は3、よってロボットの自由度は18である。関節には、ROBOTIS社のサーボモータDynamixel DX-117とRX-28を使用した。外部のコンピュータでロボットの動作を生成し、RS-485を介して関節角指令値サーボモータに送り、ロボットを動かす。脚先にはゴム製の半球を取り付けた。ボディのサイズは、

157[mm]×215[mm]×58[mm]、脚の長さは314[mm]、重量は2.73[kg]で、外部直流電源14.8[V]を用いて駆動する。



図1 6脚作業移動ロボット

### 3. ハーフバウンド走行をモデルとする走行法

ロボットが走行するには、地面を強く蹴って前方に飛び出す必要がある。図1のように、著者らが開発している6脚作業移動ロボットは、ボディ前方に2脚、後方に4脚を配置している。よって、後方4脚を一斉に動かせば、強い蹴りが可能になる。後脚で力強く地面を蹴って前方へ飛び、前脚、後脚の順に着地する動作を繰り返す走行法をハーフバウンド走行という。

本研究では、前2脚と後4脚を用いた6脚作業移動ロボットハーフバウンド走行を目

指す。1周期の様子を図2に示す。なお、動物のハーフバウンド走行では左右の脚の位相がずれているが、簡単のため左右の脚は同位相で動かすこととした。

#### 4. 脚の最適軌道の算出

##### 4.1 探索空間

ハーフバウンド走行を実現するには、前脚・後脚の軌道と両者の位相差が重要である。そこで、動力学シミュレータ ODE を用い、全探索を行ってこれらの最適値を求める。

全探索とは、変数の全ての組合せに対して評価値を計算し、最適値を求める方法である。本研究では、図3のように前脚・後脚の軌道は同じ楕円とし、その水平方向の半径  $a$ [mm]、垂直方向の半径  $b$ [mm]、前脚軌道に対する後脚軌道の位相差  $\theta$ [deg] を変数とする。

水平半径  $a$  と垂直半径  $b$  は、ロボットが実現可能な範囲  $4.7\sim 75$ [mm]、 $3.1\sim 50$ [mm] を 16 分割した値を、位相差  $\theta$  は  $0\sim 350$ [deg] を 36 分割した値を取る。1 周期の時間は  $0.54$ [s] に固定した。変数  $(a,b,\theta)$  の全ての組合せについて、5 周期走行したときの走行距離  $D$ [m] を動力学シミュレータ ODE で計算し、走行距離  $D$  が最大となる変数の組合せを最適軌道とする。

##### 4.2 シミュレーション結果

床の摩擦係数  $\mu$  を  $0.6\sim 1.0$  まで  $0.1$  刻みで変化させたときの最適軌道  $(a,b,\theta)$  と走行距離  $D$  を表1に示す。図4は、研究室の床の摩擦係数  $\mu=0.6$  における最適軌道の動力学シミュレーションの結果である。各摩擦係数について、3変数  $(a,b,\theta)$  のうち2変数を最適解に固定し、残りの1変数を変化させたときの走行距離  $D$  の変化を図5~7に示す。グラフが滑らかでない理由は、摩擦や衝突を伴う現象のシミュレーションによる計算と考えられる。

表1と図5~7は、どの摩擦係数  $\mu$  においても同様の傾向を示し、脚の最適軌道に対する摩擦係数の影響は少なかった。また、軌道によっては、ロボットが後方に進む現象が見られた。ロボットが前方に進む場合は、図4のように後脚が後ろに蹴り出す際に前脚が浮き上がっており、図2と同じ動作になっている。一方、後方に進む場合は、図8のように前脚を前に戻す際に後脚が浮き上がっており、前進と反対の動作になっている。

図5, 6は、水平半径  $a$  と垂直半径  $b$  が大きいほど遠くまで進むことを意味しており、合理的な結果と言える。

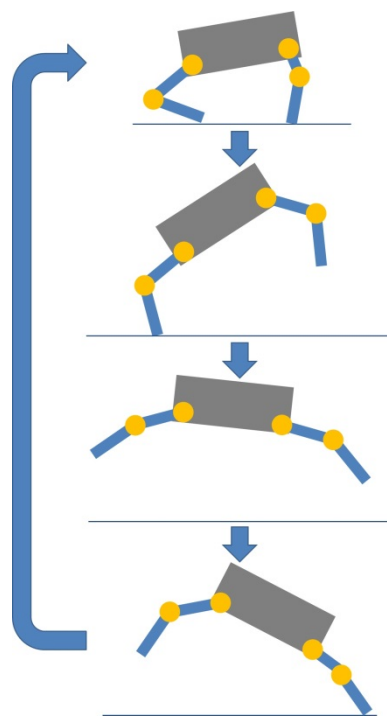


図2 走行法

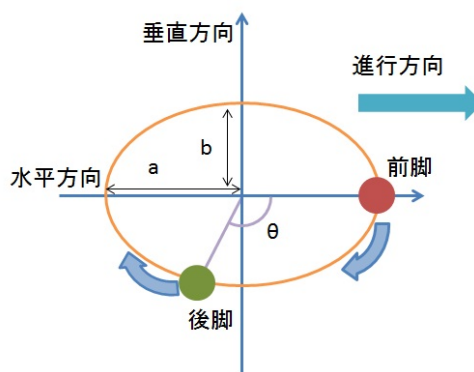


図3 脚先軌道

表1 最適軌道のシミュレーション結果

摩擦係数 $\mu$	水平半径 $a$ [mm]	垂直半径 $b$ [mm]	位相差 $\theta$ [deg]	走行距離 $D$ [m]
0.6	75.0	46.9	200	0.595
0.7	75.0	40.6	210	0.535
0.8	70.3	46.9	210	0.503
0.9	70.3	50.0	220	0.491
1.0	75.0	46.9	190	0.520

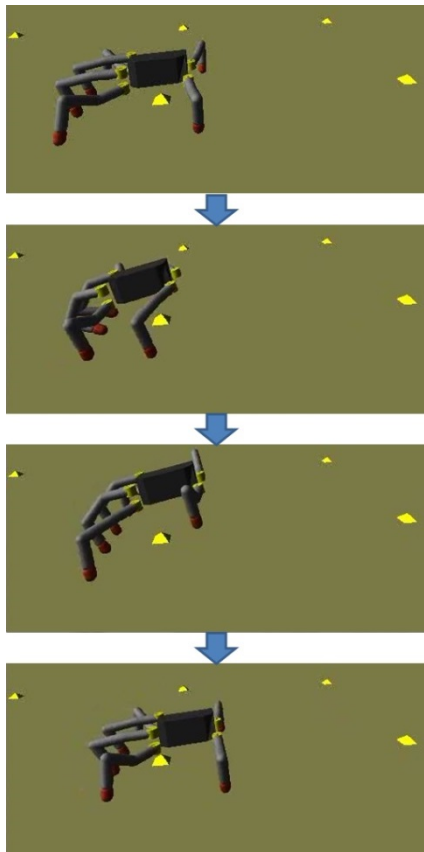


図4  $\mu = 0.6$ における最適軌道のシミュレーション結果

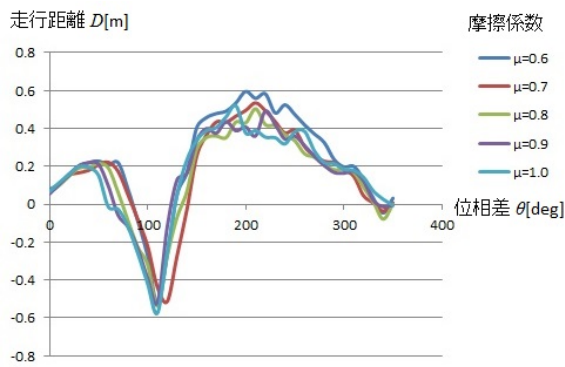


図5 位相差 $\theta$ を変化させたときの走行距離(シミュレーション)

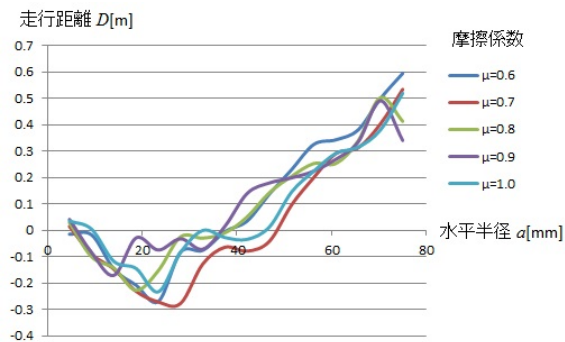


図6 水平半径 $a$ を変化させたときの走行距離(シミュレーション)

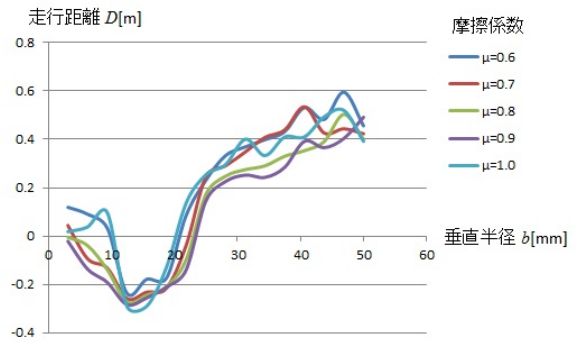


図7 垂直半径 $b$ を変化させたときの走行距離(シミュレーション)



図8 後退の例

## 5. 走行実験

実験は、研究室の床、ゴムマット、人工芝の3種類の床面で行った。軌道1周期の時間はシミュレーションと同じ0.540[s]で、5周期走行する。制御周期は0.015[s]とした。

はじめに、走行実験の再現性を調べるため、摩擦係数 $\mu=0.6$ のときの最適軌道を用いて5回走行し、走行距離 $D$ の違いを計測した。その結果、表2に示すように、0.035~0.050[m]程度の誤差で再現できていた。

シミュレーション結果から、水平半径と垂直半径を最大値 $a=75$ [mm]、 $b=50$ [mm]に固定し、位相差 $\theta$ のみを0~340[deg]まで20[deg]おきに変えて実験した。

走行距離 $D$ の測定結果を図9に示す。図には、摩擦係数 $\mu=0.6$ のときのシミュレーション結果も載せてある。図10は、研究室の床における最適軌道の実験結果である。図から、研究室の床とゴムマット、およびシミュレーションは、特に最大距離、最小距離付近で似たような結果となった。一方、人工芝は、他の床面・シミュレーションとは差があった。これは、人工芝の摩擦係数が、極端に小さかったためと考えられる。

表 2 走行実験における走行距離  $D$  の再現性

	研究室の床 [m]	ゴムマット [m]	人工芝 [m]
1回目	0.48	0.44	0.55
2回目	0.50	0.44	0.53
3回目	0.49	0.42	0.55
4回目	0.465	0.41	0.56
5回目	0.475	0.39	0.58

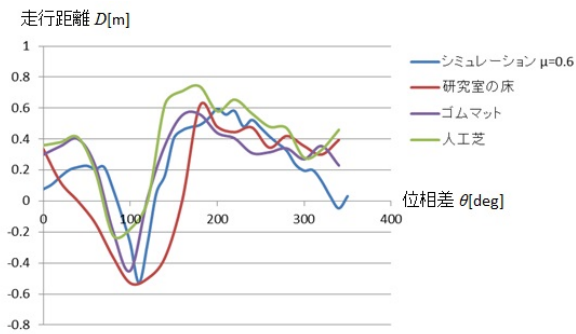


図 9 位相差  $\theta$  を変化させたときの走行距離(実験)

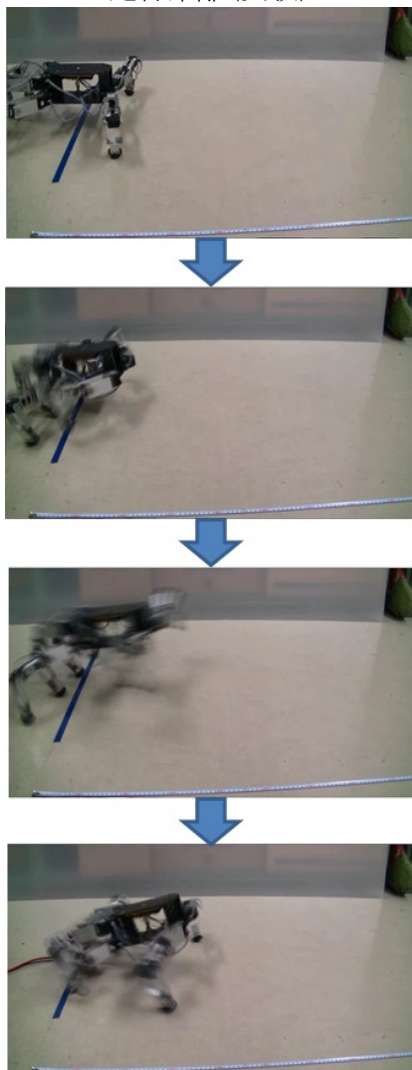


図 10 研究室の床における最適軌道の実験

## 6. おわりに

ハーフバウンド走行をモデルとする 6 脚作業移動ロボットの走行法を提案し、動力学シミュレーションと実験により、走行能力を検証した。実験の結果、研究室の床における脚の最適軌道は、水平半径  $a=75$  [mm]、垂直半径  $b=50$  [mm]、位相差  $\theta=180$  [deg] で、走行距離  $D=0.615$  [m] であった。動力学シミュレーションの結果、軌道と走行距離の関係に、実験と同様の傾向を見ることができた。

動力学シミュレーションと実験の結果は、完全には一致していない。今後はシミュレーションのモデル化誤差を減らし、最適軌道に寄与するパラメータを明らかにする、また、人工芝の実験結果の原因を詳細に検討する。

## 参考文献

- [1] 井上, 大江: 3つのモードを切り替え可能な 6 脚作業移動ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 1A1-E04, 2008.
- [2] 大江, 菊地, 井司: 6 脚作業移動ロボットの段差登り能力の解析, 第 51 回自動制御連合講演会, pp.796-799, 2008.
- [3] 余, 李, 井上: 脚先に超音波センサを搭載した 6 脚作業移動ロボットの障害物回避, 日本機械学会東北支部第 47 回秋季講演会, pp.106-107, 2011.
- [4] 上之郷, 李, 井上: 4 脚 2 腕ロボットによる急斜面登り, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会, pp.673-674, 2012.