

## 群知能アルゴリズムを応用した歩行ロボットの研究

○佐藤 雄貴\*<sup>1</sup> 奥山 寿康\*<sup>1</sup>  
入江 寿弘\*<sup>2</sup> 新宮 清志\*<sup>3</sup>

キーワード：群知能 アルゴリズム ロボット 歩行

### 1. はじめに

近年様々な分野においてロボットの有用性は認められ、利用価値が高まっている。ロボットの移動手段として、二脚歩行は不整地な場所や不連続な足場でも歩行ができる。また、人間の生活空間にも対応し、人間が居住する建築空間の中でロボットと共存する場合には都合が良い。現在、様々な二脚歩行ロボットが研究開発されているが、未だエネルギー効率が良いとは言えないのが現状である。そこでエネルギー効率を改善するために、アクチュエーターとしてモーターとばねの併用を検討する。ばねを使用することでロボットの着地時の衝撃を吸収し、次の動作のエネルギーに活用できると考えられる。

本研究は、エネルギー効率の良い二脚歩行ロボットの開発を目標としている。本稿では、モーターとばねを併用した試作機を設計し、群知能アルゴリズムによる最適化シミュレーションの手法について検討する。

### 2. 機構について

二脚歩行ロボットの開発において使用するアクチュエーターの選定と制御は重要である。二脚歩行ロボットは歩行した時、不安定になりやすい。安定な歩行を実現させるためには高出力のアクチュエーターが必要となる。また、脚部には高い自由度が必要となるためアクチュエーターの数が多くなってしまふ。高出力のアクチュエーターは大きくなり当然質量も大きくなるので、機体の質量が大きくなる傾向がある。

そこで二脚歩行ロボットのアクチュエーターとして、モーターとばねを併用することにした。ばねを使用することで、外力を加えることなく自立させることが可能になり軽量化にも繋がる。また、二脚歩行ロボットが静止状態のときは必要なモーターの出力が小さく済み、歩行時には歩行動作が柔らかく、着地時の衝撃を吸収できると考えている。

### 3. 試作機が自立するための原理

設計した試作機のトルクのつり合いを図1に示す。

ねじりコイルばねを膝と足首の Pitch 軸の取り付け、モーターを腰の Pitch 軸、足首の Roll 軸に配置している。

この構造によって、ねじりコイルばねによる各ジョイントのトルクは重力によるトルクと釣り合うことにより、ロボットは外力がなくても自立する。

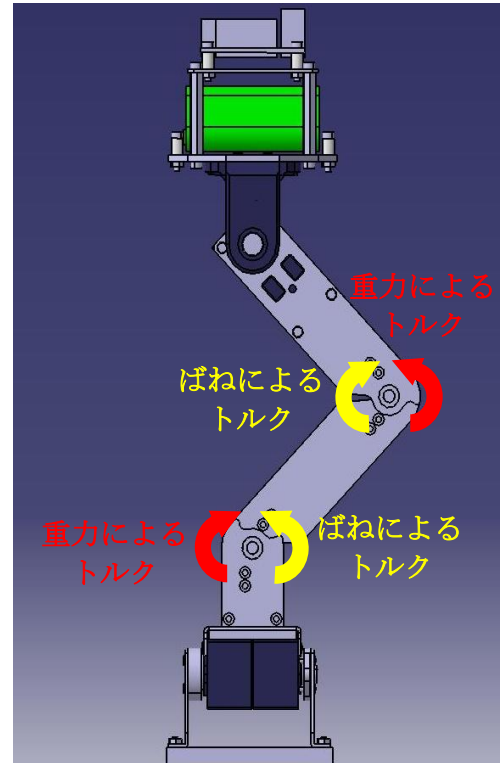


図1 試作機のトルクのつり合い

### 4. 試作機

試作機の座標軸は図2のようになっている。

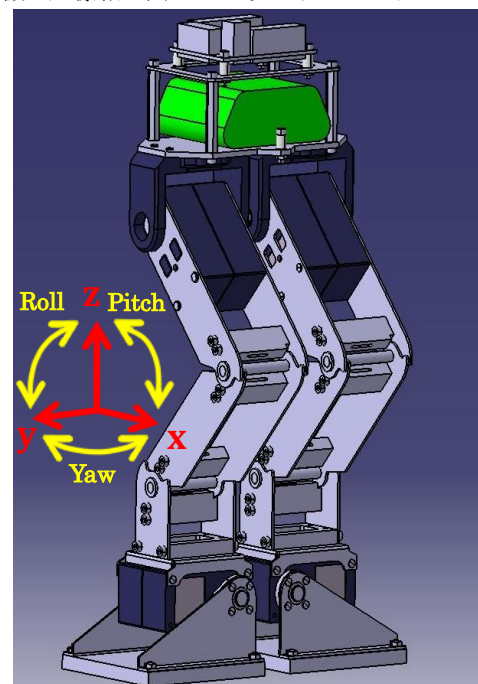


図2 試作機の座標軸

各フレームの材料として、曲げ加工しているものは A5052, 曲げ加工をしないものは A2017 を使用する.  
試作機の質量・各寸法は表 1 に示すとおりである.

表 1 試作機の質量と各寸法

|             |             |
|-------------|-------------|
| 総質量[kg]     | 0.575       |
| 自立状態での全長[m] | 0.267       |
| 脚の幅[m]      | 0.050       |
| 大腿部の長さ[m]   | 0.065       |
| 脛部の長さ[m]    | 0.065       |
| 足裏の寸法[m]    | 0.056×0.056 |

またアクチュエーターとして近藤科学製のサーボモーターを使用している. その仕様を表 2 に示す.

表 2 サーボモーターの仕様

| KRS-2552RHV ICS |       |
|-----------------|-------|
| 最大トルク [N・m]     | 0.014 |
| 最高速度 [s/60°]    | 0.14  |
| 最大動作角度 [°]      | 270   |
| 最大消費電流 [A]      | 1.3   |
| 定格電圧 [V]        | 11.1  |

### 5. ばね定数

試作機にはねじりコイルばねを各ジョイントに使用しているが, そのねじりコイルばねのばね定数がどのような値であれば, 歩行に適しているかを計算により求めた. 実際に使用できるばねの材質や線径に考慮しつつ, ねじりコイルばねの選定をした.

ねじりコイルばねのばね定数は式(1)で表される.

$$k = \frac{M}{\phi} = \frac{Ed^4}{64DN} \quad (1)$$

$d$  : 材料の直径[m]                       $D$  : コイルの中心径[m]  
 $N$  : 巻数                                       $E$  : 縦弾性係数[N/m<sup>2</sup>]  
 $k$  : ばね定数[N・m/rad]               $\phi$  : ばねのねじれ角[rad]  
 $M$  : ばねに作用するトルク[N・m]

ロボットが歩行するには地面から足を上げられることが最低条件である. 本研究の試作機が足を地面から上げる動作は, 足首の Roll 軸のサーボモーターを回転させて足を上げている. その際, 試作機の重心が足裏の真上にある状態で, もう片方の脚の足裏が地面から離れる必要がある.

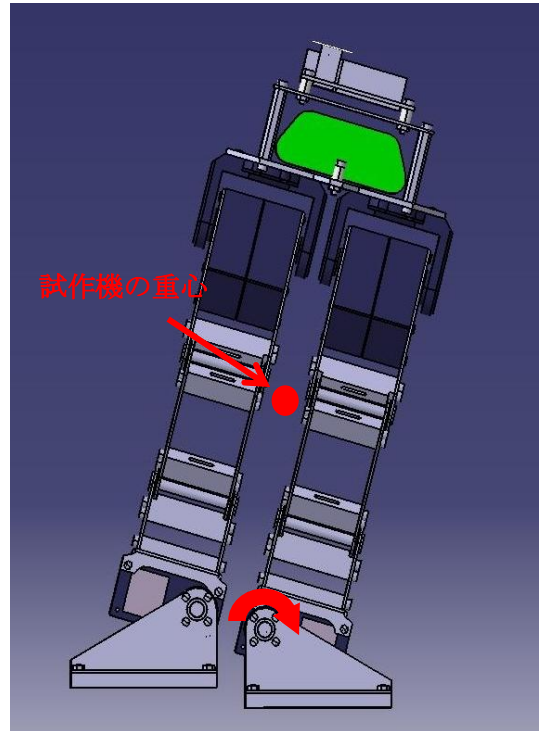


図 3 試作機の脚を上げる動作

試作機の重心が足裏の上にあるとき, 足首の Roll 軸の角度は 4.5~20[°] である. また, この角度のとき膝と足首の角度が固定である場合, 足裏から地面までの距離は  $2.118 \times 10^{-3} \sim 9.235 \times 10^{-3}$  [m] となっている.

以下より, 歩行するのに適切なばね定数の範囲を計算により求める.

図 3 の姿勢のときの右膝の状態を計算により求める.

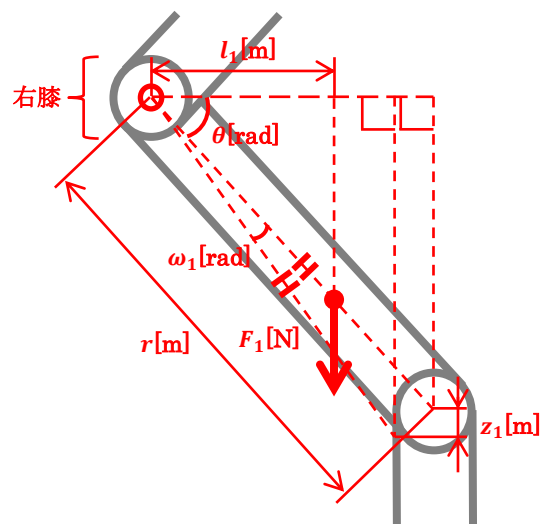


図 4 右膝周りの力

図 4 より, 右膝の軸周りのモーメント  $M_1$  [N・m] は

$$M_1 = F_1 \times l_1$$

となる.

右すねの角度の変位量 $\omega_1$ [rad]は

$$\omega_1 = \frac{M_1}{k}$$

となり、z軸方向の変位量 $z_{11}$ [m]は

$$z_1 = \{r \times \sin(\theta + \omega_1)\} - r \times \sin \theta$$

となる。

同様にして、左膝と左足首周りのz軸方向の変位量 $z_2, z_3$ とすると、図3のように右脚を持ち上げたとき右の足裏の変位量 $Z$ [m]は、式(2)となる。

$$Z = z_1 + z_2 + z_3$$

$$= r \times \{\sin \theta + \sin(\theta + \omega_1) - \sin(\theta - \omega_2) - \sin(\theta - \omega_3)\} \quad (2)$$

$Z$ [m]が $2.118 \times 10^{-3} \sim 9.235 \times 10^{-3}$ となるときはばね定数 $k$ [N·m/rad]は式(2)より1.25~5.34となった。

よって実際に試作機に使用するばね定数はこの範囲内の数値であればよい。本研究ではばねの材料に縦弾性係数は $E = 193 \times 10^9$ [N/m<sup>2</sup>]であるSUS304を使用する。ばねの線径 $d=0.003$ [m]、中心径 $D=0.012$ [m]、有効巻き数6としたとき、ばね定数 $k$ [N·m/rad]は式(1)より、 $k \approx 3.392$ となり、適切と言える。

## 6. ねじりコイルばねの振動の周期

膝の軸を回転軸としたときの、膝のねじりコイルばねの振動の周期を求める。

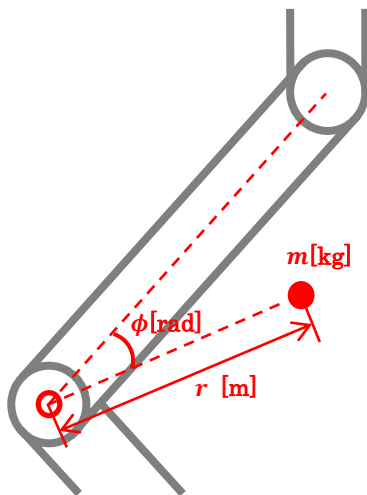


図5 側面から見たロボットの歩行時の重心と距離

ロボットの歩行時の重心を質点とみなし、ねじりコイルばねの振動の周期を式(3)に示す。

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{mr^2}{k}} \quad (3)$$

$T$  : 周期[s]                       $\omega$  : 角振動数[rad/s]  
 $m$  : 質量[kg]                       $r$  : 軸から質点までの距離[m]  
 $k$  : ばね定数[kg·m/rad]

よって、質量 $m=0.434$ [kg]、軸から質点までの距離 $r=0.0447$ [m]、ばね定数 $k=0.346$ [kg·m/rad]より、膝の振動の周期は $T \approx 0.315$ [s]となる。

## 7. 歩行方法

本研究では以下の①~⑥の動作を繰り返すことで歩行を試してみる。図5にその流れを示す。

- ①重心を右に移動し、左足を持ち上げ半歩前に出す
- ②左足をさらに半歩前に出す
- ③右足を半歩後ろに下げ左足を着地させる
- ④重心を左に移動し右足を持ち上げ半歩前に出す
- ⑤右足を更に半歩前に出す
- ⑥左足を半歩後ろに下げ右足を着地させる

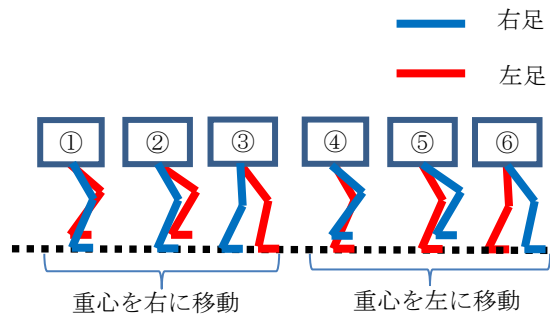


図6 歩行方法

## 8. シミュレーションの手法

本研究では歩行動作を、

- ①歩行の周期
- ②腰のサーボモーターの回転量
- ③足首のサーボモーターの回転量
- ④足首と腰のサーボモーターの周期のずれ

の4つのパラメータからなるものとして分解し、設定することで動的モデルを歩行させる。動的モデルのシミュレーションには物理計算エンジン Open Dynamics Engine (ODE) を使用する。

ODE には、動力学計算と衝突検出計算が独立に実装されているという利点がある。これにより、様々な衝突検出計算ライブラリを簡単に ODE に組み込むことができる。

例えば、動力学計算だけが必要なパーツは衝突検出計算を実装することなくシミュレーションを行うことができるため、計算速度の高速化、実装の省略化により、シミュレーションが容易になる。

## 9. 動的モデルの設計

本研究で対象にしている歩行パターンを行うことのできる基本的な二脚歩行ロボットの動的モデルを図6に示す。

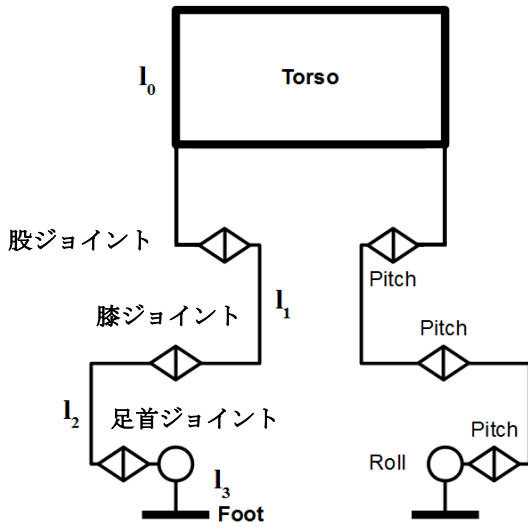


図7 脚部のリンク機構

脚部の自由度は股ジョイント 3, 膝ジョイント 1, 足首ジョイント 2 の合計 6 自由度となっている。また、各ジョイントにはモーターと並列に回転ばねが取り付けられるようになっている。

ばねのみで自立するよう設計した二脚歩行ロボットの動的モデルの各ジョイントのパラメーターを表 3 に示す。

表 3 動的モデルの各ジョイントのパラメーター

|                                 |       | 自立姿勢の<br>関節角度 [rad] | ばねの取付け<br>角度 [rad] | ばね係数<br>[N・m/rad] |
|---------------------------------|-------|---------------------|--------------------|-------------------|
| 股<br>ジ<br>ョ<br>イ<br>ン<br>ト      | Pitch | $\pi/4$             | 0                  | 0                 |
|                                 | Roll  | 0                   | 0                  | 0                 |
| 膝<br>ジ<br>ョ<br>イ<br>ン<br>ト      | Pitch | $-\pi/2$            | $-\pi/2$           | 3.4               |
|                                 | Roll  | 0                   | 0                  | 0                 |
| 足<br>首<br>ジ<br>ョ<br>イ<br>ン<br>ト | Pitch | $\pi/4$             | $\pi/4$            | 3.4               |
|                                 | Roll  | 0                   | 0                  | 0                 |

### 10. 最適化手法

群知能アルゴリズムを用いて歩行動作の最適化を試みる。これは自然界での生物の集合的な群れの行動を模倣したアルゴリズムの総称である。本研究は歩行動作という複雑な関数に対し、群知能アルゴリズムの中の1つである Particle Swarm Optimization アルゴリズムを用いる。

### 11. 評価式

動的モデルに PSO アルゴリズムを適用する。式(4)に評価値を求める式を示す。

評価式

$$f = x + \left| \frac{y}{2} \right| \quad (4)$$

$f$  : 評価値[m]

$x$  : x 軸方向の移動距離[m]

$y$  : y 軸方向の移動距離[m]

評価値は動的モデルの移動距離としているが、なるべくまっすぐ歩行する歩行パターンを探索するため y 軸方向への移動距離より x 軸方向の移動距離の重みを大きくする。

### 12. 考察

ここでは、設計した試作機の歩行の周期について考察する。歩行時の膝のねじりコイルばねによる振動の周期は  $T \approx 0.315$ [s] である。これは試作機が周期  $T$  で歩行した場合、膝のねじりコイルばねの変位が大きくなることを示す。

ばねの弾性エネルギーは  $E = -1/2kx^2$  である。よって、ばねの変位が大きくなる  $T \approx 0.315$ [s] の周期で歩行した場合、より大きい弾性エネルギーを得られ、エネルギー効率の良い歩行ができると考えられる。

しかし留意点として、膝のばねの周期を計算した際、簡単なモデルにして計算したため、実際の試作機の最適な歩行周期にずれがあると考えられる。そのため、シミュレーションによる歩行周期の探索は  $T \approx 0.315$ [s] を基準として、探索するのが適切と考えられる。

### 13. まとめ

サーボモーターとねじりコイルばねを併用した二脚歩行ロボットの設計をし、計算により  $T \approx 0.315$ [s] の周期で歩行したとき、最もエネルギー効率の良い歩行ができるという結果が得られた。また、群知能アルゴリズムによる歩行パターンの最適化手法について検討した。

### [参考文献]

- 1) 猪原知俊, ABC アルゴリズムを用いた 2 脚機構ロボットの研究—目的に応じた 評価関数の定式化—, 日本大学大学院理工学研究科精密機械工学専攻修士論文, 2014 年 2 月
- 2) 布健二・吉田陽, 群知能アルゴリズムを用いた二脚歩行ロボットの研究—ばねとモーターを用いた歩行方法の検討—, 日本大学理工学部精密機械工学科卒業論文, 2014 年 2 月

\*1 日本大学大学院理工学研究科 精密機械工学専攻 大学院生

\*2 日本大学理工学部精密機械工学科 教授 博士(工学)

\*3 日本大学 名誉教授 工学博士