

# 遺伝的アルゴリズムを用いた 弾性外殻を有する円形ロボットの跳躍姿勢の最適化

○松野孝博（立命館大学） 平井慎一（立命館大学）

## 1. 緒言

障害物などが多く存在する不正地を効果的に走破するために、弾性外殻を有する円形ロボットが提案された[1][2]。円形ロボットはその外郭を変形させ、跳躍や回転動作を実現できる。構造が単純であり、軽量であることが特徴として挙げられる。障害物などを走破するために用いる跳躍動作の一例を図1に示す。まず弾性外殻を変形させ、弾性エネルギーを蓄える。この形状を跳躍姿勢とする。その後、変形のための拘束を解くと、円形ロボットの外殻が自然状態へ戻る。この過程においてロボットが床面を押し、その反力でロボットが跳躍する。

ロボットの跳躍において、その姿勢の形状が跳躍の高さに大きく影響することが確認されている[2]。そのため、既存の研究では複数の跳躍形状を定義し、シミュレーションで得た跳躍高さの計算結果から、最も跳躍した形状を効果的な姿勢として選択している[2]。ただし、この手法では跳躍姿勢の最適化は実現できていない。そこで本報告では、単位エネルギー当たりの跳躍高さを最大にする跳躍姿勢を遺伝的アルゴリズムを用いて導出する。

## 2. 円形ロボットの跳躍と最適化の方法

### 2.1 円形ロボットの跳躍と跳躍姿勢最適化

本報告では、単位エネルギー当たりの跳躍高さを最大にする跳躍姿勢を、遺伝的アルゴリズムを用いて導出する。まず、円形ロボットを近似的にモデル化する。次に跳躍姿勢を仮定し、跳躍の動作をシミュレーションする。このシミュレーションで、跳躍姿勢に必要な弾性エネルギーと跳躍高さを求める。最後に仮定した跳躍姿勢を評価し、遺伝的アルゴリズムに従い跳躍姿勢を変更する。

### 2.2 円形ロボットの離散モデル

本稿で用いる円形ロボットの離散モデルを図2(a)に示す。モデルは  $n$  個の剛体リンクと関節で構成される。各関節には、ばね剛性  $k$  のトーシヨンばねを設置する。モデルの  $i$  番目の関節角度を  $\theta_i$ 、各関節

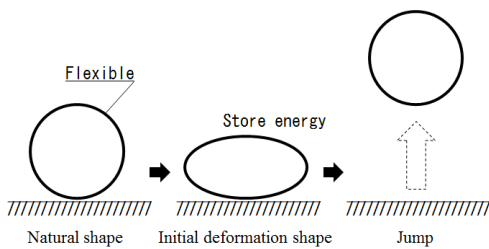


図1 円形ロボットとその跳躍動作

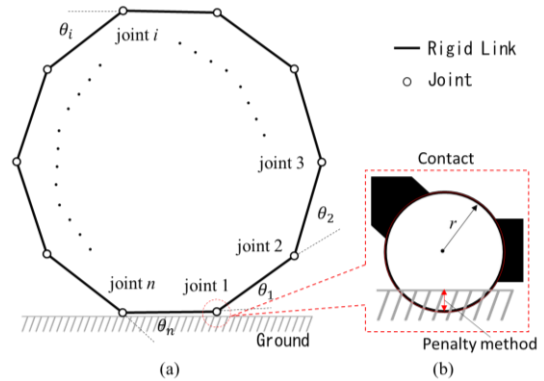


図2 円形ロボットの離散モデル

の自然状態の角度を  $\theta_0$  としたとき、円形ロボット全体に蓄えられる弾性エネルギーを次式より得る。

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} k (\theta_i - \theta_0)^2 \quad (1)$$

また、モデルの各関節位置を  $p_i(x_i, y_i)$ 、各剛体リンクの重心位置を  $p_{mi}(x_{mi}, y_{mi})$  とし、円形ロボット全体の重心位置  $p_c(x_c, y_c)$  を次式より得る。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} x_{mi} \\ y_{mi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

以降、本報告では円形ロボット全体の重心位置  $p_c(x_c, y_c)$  をロボットの位置として扱う。

同様に、床面のモデルを図2(b)に示す。円形ロボットの各関節に半径  $r$  の球体状の接触領域を設け、ペナルティ法に基づき床面からの反力を計算する。

### 2.3 円形ロボットの跳躍姿勢と跳躍動作

跳躍姿勢をとるために、本シミュレーションでは離散モデルの各関節に直接拘束トルクを付加する。 $i$  番目の関節に加える拘束トルクを  $\tau_i$  とする。シミュレーション開始時から時刻  $t_1$  まで拘束トルクを加え、時刻  $t_1$  にすべての関節の拘束トルクを  $0$  とし解放する。このとき円形ロボットの外殻が自然状態の円形に戻ろうとし、この過程でロボットが床面を押し、前節でモデル化した床面からの反力を受け、ロボットが跳躍する。このシミュレーションを時刻  $t_2$  で終了させ、これを1回分のシミュレーション結果とする。

以上の1回分のシミュレーションにおいて、ロボットの跳躍姿勢に必要な弾性エネルギー  $U'$  と、ロボットの跳躍高さ  $h$  を求める。跳躍姿勢の弾性エネルギー  $U'$  は、時刻  $t_1$  の直前の各関節角度から式(1)を用いて計算する。跳躍高さ  $h$  は時刻  $t_1$  後に到達した最大高度とし、次式より得る。

$$h = \max_{t \geq t_1} y_c(t) \quad (3)$$

## 2.4 跳躍姿勢最適化のための評価関数

前節で得た 1 回分のシミュレーション結果を評価する。本報告では、円形ロボットの単位エネルギーあたりの跳躍高さを評価関数  $f$  とし、次式で示す。

$$f = \frac{h}{U} \quad (4)$$

本報告では、評価関数  $f$  の最大化を目的とし、跳躍姿勢のための拘束トルク  $\tau_i$  を最適化する。最適化には遺伝的アルゴリズムを用いる。全関節の拘束トルクの値  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]$  を 1 個体とし、 $N$  個の個体の集合を 1 世代とする。第 0 世代の値は全て乱数で生成し、遺伝的アルゴリズムに従い次世代の集合体を生成する。この操作を  $G$  世代繰り返すものとし、最後の世代における最適値を解とする。

## 3. 跳躍姿勢の最適化結果

### 3.1 シミュレーションセットアップ

前章で述べた最適化を MATLAB/Simulink<sup>®</sup> の Simscape<sup>™</sup> を用いて行う。本報告では、モデルの離散数  $n=10$ 、リンク長さ  $d=32.49$  mm、自然角度  $\theta_0=0.628$  rad、関節の弾性係数  $k=1$  Nm/rad、接触領域  $r=0.5$  mm とする。また遺伝的アルゴリズムでは、1 世代の個体数  $N=100$  とし、50 世代まで計算する。

### 3.2 遺伝的アルゴリズムによる最適化結果

本節では跳躍姿勢の最適化結果について述べる。まず図 3 に、各世代の評価関数の平均値と最適値を示す。世代を増すごとに平均値と最適値がともに向

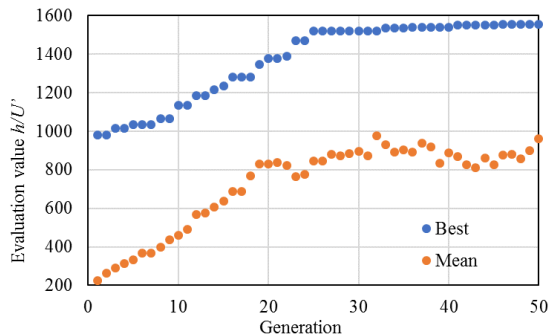


図 3 各世代における評価関数の最大値と平均値

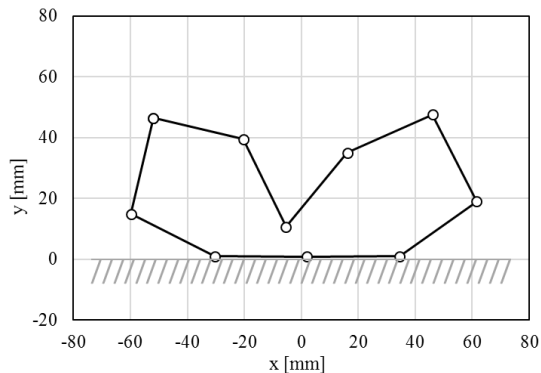


図 4 円形ロボットの最適な跳躍姿勢

上することが確認できる。次に、拘束トルクの最適化結果と跳躍姿勢を表 1 と図 4 に示す。図 4 より、跳躍に適した姿勢は、円形ロボットの底部を床面に沿わせた形状であることを確認できる。この姿勢での弾性エネルギーは 1.933 J である。最後に図 5 に跳躍時の動作を示す。ロボットを実線、重心位置の軌跡を一点鎖線で示す。このシミュレーションにおいて跳躍高さは 2787 mm となった。以上の方法により、遺伝的アルゴリズムを用いることで、跳躍に適した円形ロボットの姿勢を得た。

表 1 跳躍姿勢のための拘束トルク

$\tau_1$ [Nm]	$\tau_2$ [Nm]	$\tau_3$ [Nm]	$\tau_4$ [Nm]	$\tau_5$ [Nm]
-0.560	-0.073	-0.600	-1.374	-1.284
$\tau_6$ [Nm]	$\tau_7$ [Nm]	$\tau_8$ [Nm]	$\tau_9$ [Nm]	$\tau_{10}$ [Nm]
-0.362	1.903	-0.825	-1.514	-1.463

## 4. 結言

本報告では、円形ロボットの跳躍姿勢に着目し、単位エネルギーあたりの跳躍高さを最大にする跳躍姿勢について遺伝的アルゴリズムを用いて導出した。シミュレーションでは、円形ロボットの弾性外殻を離散モデルで近似し、離散モデルの各関節に拘束トルクを与え跳躍姿勢へ変形させる。その後、拘束トルクを解除することで、ロボットは跳躍する。このとき、跳躍姿勢時の弾性エネルギーと跳躍した高さを記録し、結果を単位エネルギーあたりの跳躍高さで評価する。遺伝的アルゴリズムに従い拘束トルクを最適化することで、単位エネルギーあたりの跳躍高さが最も高くなる跳躍姿勢を得た。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19H05337 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 杉本勇太, 平井慎一: “柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍”, 日本ロボット学会誌, vol. 24, no. 3, pp. 378-387, 2006.
- [2] 松山吉成, 平井慎一: “ボディの変形による跳躍の力学”, 日本ロボット学会誌, vol. 26, no. 7, pp. 833-840, 2008.

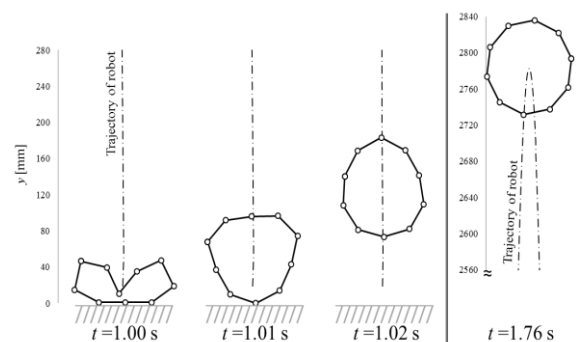


図 5 円形ロボットの跳躍動作