532 脚式ロボットの移動ルートにおける足先着地点決定のための 組合せ最適化アプローチ

A Combinatorial Optimization Approach to Determine a Stepping Point Sequence in Movement Route of Legged Robot

○ 学 佐野 祐太 (信州大学)
学 河村 英 (信州大学)

学 大越 孝紀 (信州大学)
正 中村 正行 (信州大学)

Yuta SANO, Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano, 380-8553

Kouki OKOSHI, Faculty of Engineering, Shinshu University, ditto

Suguru KAWAMURA, Faculty of Engineering, Shinshu University, ditto

Masayuki NAKAMURA, Faculty of Engineering, Shinshu University, ditto

This paper proposes a searching method of optimum stepping point sequence for legged robot in obstacle environment. Four legged walking robot is assumed and the leg is composed by two links with joint motors at the hip and the knee. Walking robot traces a combination of stepping points in movement route toward the goal. An optimum stepping point sequence is determined by minimizing the energy consumption and the moving time. The combinatorial optimization problem is solved by application of the genetic algorithm.

Key Words: Waking Robot, Optimization, Stepping Point, Genetic Algorithm, Obstacle Environment

1. はじめに

近年, ロボットの歩行について多くの研究が進められている。将来, 歩行ロボットが日常空間や工事現場などで作業するようになると障害物を回避する動作が必要不可欠となる。また, 障害物環境下をロボットが歩行する時, 足先の着地点によって消費エネルギーが変化する⁽¹⁾ことから, 障害物上も含めて歩行時の最適な足先着地点を探索することは消費エネルギー削減に繋がると考えられる。ロボットの普及が進む中ではエネルギー効率を高める研究も重要であると言える。

本研究は移動ルートにおける足先着地点を消費エネルギー最小, 所要時間最短の下で決定することを目的とする。そのために, 障害物を含む移動ルート上の足先位置座標を設定し, その着地点の組合せで歩行を実現する。ここでは, 着地点列を求める問題を組合せ最適化問題に帰着させて, 遺伝的アルゴリズム⁽²⁾を用いて解く方法について述べる。

2. 着地点列最適化問題

2.1 ロボットモデル 本研究で扱う歩行ロボットはFig.1に示すように4脚を有し, 腰部と膝部に関節モーターをもつ2リンク型機構である。また, ロボットの歩容は安定性を考慮して静歩行の一つであるクロール歩容を仮定する。

2.2 足先着地点列の最適化問題 ロボットが目標地点まで歩行する時, 足先をどこに着地して前に進むかによって歩行時の消費エネルギーは変化する⁽¹⁾。そこで, 消費エネルギーと移動時間に関する評価関数を設定し, 消費エネルギー最小かつ移動時間最小となる4脚の着地点列の最適な組合せを求める。

最適化問題を次のように定義する。

$$\text{評価関数} \quad W = \sum_{i=1}^{S_e} (c_1 E_i + c_2 T_i) \quad (1)$$

$$\text{最小化} \quad W \rightarrow \min \quad (2)$$

$$\text{制約条件} \quad X_{\text{toe}} \in X_{\text{alw}} \quad (3)$$

Fig.1 Model of quadruped robot

Fig.2 Stepping points

最適化パラメーター

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1i} & \cdots & X_{1g} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2i} & \cdots & X_{2g} \\ X_{31} & X_{32} & \cdots & X_{3i} & \cdots & X_{3g} \\ X_{41} & X_{42} & \cdots & X_{4i} & \cdots & X_{4g} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで, 4脚の動作を一周期として, S_e は解析終了周期数, E_i は*i*周期目の4脚の熱損失エネルギー, T_i は*i*周期目の移動時間, c_1, c_2 は重み係数とする。 X_{toe} は足先X座標, X_{alw} は足先着地可能領域, X_{mi} ($m=1\sim4, i=1\sim g$)は*m*番目の足が*i*周期目に着く足先の位置座標を表す。

3. 遺伝的アルゴリズムの適用

3.1 着地候補点 足先の着地候補点の座標をFig.2のように, 最適化範囲内 X_e 内にて刻み幅 s で a 個とる。また, ロボットの初期姿勢をFig.2に示すように, クロール歩容に基づ

き右前足から踏み出す順に番号をつける。

3.2 遺伝的アルゴリズムの適用 4脚の着地候補点の組合せを考え、目標地点までの着地点列の最適な組合せを遺伝的アルゴリズムを用いて求める。4脚の着地点の組合せを遺伝子として表現し、目標までの遺伝子の並びを解の候補とする⁽³⁾。

3.3 遺伝子表現 Fig.3に示すように、コーディングは4脚それぞれの着地候補点番号を列挙し、その組合せに対して通し番号を割り振る。通し番号の整数値を遺伝子とする。足1本につき a 個ずつのパターンがあるので、組合せの総数は $a^4 \equiv N_c$ となる。遺伝子列の並びの順番に目標地点までの着地点を辿っていくことになる。

デコーディングでは、遺伝子の整数値から4脚着地点の組合せを求め、それに対する着地点座標を求める。デコーディングの手順を以下に示す。

$$\left. \begin{aligned} N_c / a^3 &= Q_1 \cdots r_1 \\ r_1 / a^2 &= Q_2 \cdots r_2 \\ r_2 / a &= Q_3 \cdots r_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= Q_1 + 1 \\ P_2 &= Q_2 + 1 \\ P_3 &= Q_3 + 1 \\ P_4 &= r_3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} P_4 &= a, P_3 = Q_3 \quad \text{when } r_3 = 0 \\ Q_3 = 0 \quad \text{then } P_3 &= a, P_2 = Q_2 \\ Q_2 = 0 \quad \text{then } P_2 &= a, P_1 = Q_1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$X_m = s(P_m - 1) \quad (m = 1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

ここで、 N_c は整数、商を Q 、余りを r 、候補点番号を P 、着地点座標を X 、着地候補点の刻み幅を s とする。

3.4 適応度関数 遺伝的アルゴリズムの適応度 f を次式のように定義する。

$$f = \frac{1}{W} \prod_{i=1}^n \pi_i \quad (9)$$

ここで、 W は式(1)に示す評価関数、 π_i はペナルティーを表す。ペナルティーは実行可能でない組合せを含む個体の適応度が低くなるように設定する。

4. 実行可能解

Fig.3のように組合せ数を全て列挙すると、ロボットの機構から実現できないものや、安定性を考えてとるべきではないものが含まれる。そこで、足先着地点列として除外する条件をまとめる。

[1]遺伝子列の中で一周期間のみに関係がある場合

この場合は以下のパターンが考えられる。

・4脚全てまたは片側のみ同じ位置に着地するとき

$$X_1 = X_4 \text{ or } X_2 = X_4 \text{ or } X_1 = X_2 = X_3 = X_4 \quad (10)$$

・Fig.4のように後脚が前脚より前に着くとき

$$X_1 < X_4 \text{ or } X_2 = X_3 \quad (11)$$

・Fig.4のように前後の脚の距離が大きく開くとき

$$X_1 - X_4 > l_{\text{side, max}} \text{ or } X_3 - X_2 > l_{\text{side, max}} \quad (12)$$

・左右の前脚の距離が大きく開くとき

$$|X_1 - X_3| > l_{\text{front, max}} \quad (13)$$

					N_c
1	1	1	1	→	1
1	1	1	2	→	2
1	1	1	3	→	3
			⋮		
1	1	2	1	→	
			⋮		
1	2	1	1	→	
			⋮		
a	a	a	a	→	a^4

Fig.3 Gene expression

Fig.4 An example of excepted pattern

Fig.5 Keep out areas near obstacle

[2]遺伝子列間で二周期間に関係がある場合

この場合は以下のパターンが考えられる。

・次の一歩で脚が後退する場合と前進しない場合

$$X_{mn} \geq X_{mn+1} \quad (m = 1, 2, 3, 4) \quad (14)$$

・歩幅が定めた数値より大きくなる時

$$X_{mn+1} - X_{mn} > X_{s, \text{max}} \quad (m = 1, 2, 3, 4) \quad (15)$$

[3]障害物付近の制限領域に入る場合

Fig.5の範囲を考える。

$$X_{01} - l_1 < X < X_{01} + l_2 \text{ or } X_{02} - l_3 < X < X_{02} + l_4 \quad (16)$$

5. おわりに

4脚歩行ロボット歩行時の足先着地点列を求める組合せの最適化問題を解くため、遺伝的アルゴリズムを適用する方法を検討した。4脚の組合せの表現や、遺伝子列の評価を行うための適応度を定義した。また、実行可能解の判定条件について検討した。

参考文献

- (1) 柳澤岳志, 須田芳子, 佐野祐太, 中村正行, 4足歩行ロボットの障害物環境下での足先着地点最適化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08講演論文集, (CD-ROM), (2008).
- (2) 萩原将文, ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書, (1994), pp.143-160.
- (3) 中村正行, Excel VBAによる光学多層膜のシミュレーション技術と最適設計, 技術情報協会, (2002), pp.67-105.