

1-312 GAを用いたカニ型ロボットの段差乗り越え運動

Motion for Passing over Step of Crab Type Robot using Genetic Algorithm

○ 清水智之 (福井大) 朝倉俊行 (福井大) 浪花智英 (福井大)
長谷川純 (福井銀螺) 猪飼佳久 (福井大)

Tomoyuki SHIMIZU, Faculty of Engineering, Fukui University, 3-9-1 Bunkyo, 910-8507 Fukui
Toshiyuki ASAKURA, Fukui University
Tomohide NANIWA, Fukui University
Jyun HASEGAWA, Fukui Byora Co
Yoshihisa IKAI, Fukui University

This paper approaches the motion for passing over step of 6 legs walking robot on the model of the crab. The walking robot can walk various roads such as a rough road and the stair. But the generation of walking pattern is difficult. So this research proposes a generation technique of the walking pattern by genetic algorithm. Through simulation and experiments, it is demonstrated that the crab type robot can walk over stair based on obtained walking pattern.

Key Words: Genetic Algorithm, 6 legs walking robot

1. 緒言

現在ロボットは様々な場所での利用が期待されており、一般家庭や、建築土木、農業作業、あるいは火星探査や地雷撤去などの野外作業の分野において積極的な導入が検討されている⁽¹⁾。このような分野ではロボットが作業しやすいように環境を整備することができない。そのため、様々な環境に適應できるロボット、未知の環境においても行動のできるロボットが必要とされている。様々な環境への適應性という面から見れば車輪式ロボットよりも脚式ロボットの方が適應性が高いと考えられる。脚式ロボットの研究は、単脚、2脚、4脚、6脚、多脚と多岐に渡わたって展開されている⁽²⁾⁽³⁾。その中でも6脚ロボットは静歩行が容易で安定性が良く実作業に適しているため様々な研究がなされているが、そのほとんどが胴体の左右に3脚ずつを配し前後方向に進む昆虫をモデルとしたロボットである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし移動性能という面からみると昆虫の歩行機構が最も優れたものであるとは限らない。昆虫は羽根を持つため歩行がメインの移動手段ではない種も多い。むしろカニのように岩場や砂浜、波打ち際などの歩行に困難な環境で進化してきた生物のほうが優れた歩行機構を獲得していると考えられる。

そこで本研究では、カニをモデルにした横歩きのカニ型ロボットを用いて足先の軌道をリアルタイムに生成することで、様々な環境に適應できる歩行ロボットを提案する。本手法では最適解の探索技法であるGAを用いた探索シミュレーションをコンピュータにより行い、環境に合った歩行パターンを歩行中に決定する。それにより、未知なる環境でも移動可能な歩行ロボットを目指す。まず本報告では段差を含む環境を取り上げ、GAにより段差を乗り越える歩行パターンが探索されていることを示し、提案する手法の実機への適用を目指す。

2. カニ型ロボットの歩行パターン探索モデル

Fig.1にカニの写真を示す。ここで、L1, L2, L3, L4はカニ

の左足の第一脚から第四脚をR1, R2, R3, R4はカニの右足第一脚から第四脚をそれぞれ示している。カニの足は左右それぞれ4本ずつで計8本であるが、カニの歩行を観察するとL4, R4はほとんど歩行には関係していない。またL1とL3, R1とR3は歩行中はほぼ同じ動きをしている。さらに1本の脚に注目すると各足は4つの関節を持っているが歩行に深く関係しているのは付け根の関節と付け根から2番目のAの部分の関節のみである。そこで本研究では2リンクでL1, L2, L3, R1, R2, R3の6本の足から成る6脚歩行ロボットをモデルとする。Fig.2にカニ型ロボットを示す。寸法は胴体の長さが120mm、また第一リンクの長さを70mm、第二リンクの長さを90mmと設定した。歩行パターンの探索シミュレーションには幾何モデルを用い、質量やトルクなどによる影響は考慮しないものとする。

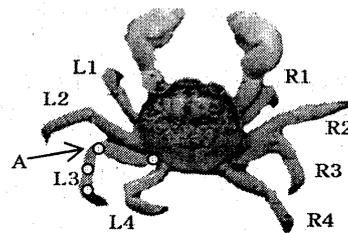


Fig.1 The form of a crab

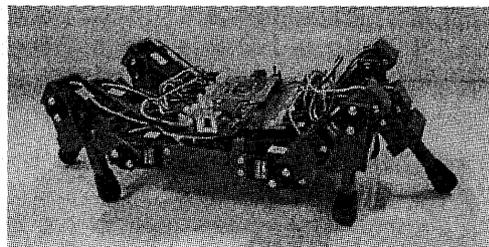


Fig.2 Crab type robot

3. 段差乗り越えシステム

Fig.3に段差乗り越えシステムの概要を示す。まず、段差からロボット胴体までの距離が大きければ水平路面の歩行

パターン生成手法により 1 周期分の歩行パターンを探索し、その歩行パターンを繰り返すことで歩行を行う。そして、段差からロボット胴体までの距離が指定値よりも小さくなれば段差路面での歩行パターン生成手法により段差の高さや距離に合わせた歩行パターンを 1 周期ごとに探索する。このとき、ある程度世代探索を行っても良好な個体が得られなければ、探索する歩行パターンの長さを 2 周期分に拡張する。

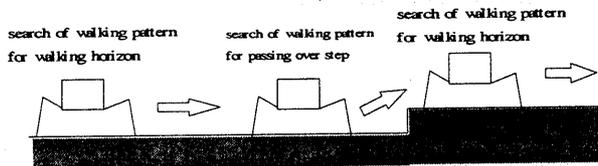


Fig.3 Motion for passing over step

4. GA による歩行パターン探索

Fig.4 に歩行パターン探索のモデルを示す。各関節の 3 つの目標角度を GA で探索する事で、歩行パターンの生成を行う。一本の足には 2 つの関節があり、Fig.1 の L1 と L3, R1 と R3 は同じ動きをするので合計 8 つの関節の目標角度を探索する。GA により探索された目標角度の各足先は Position1 から Position3 までの 3 つの目標位置となり、この 3 点を経由する運動を周期的に繰り返す。

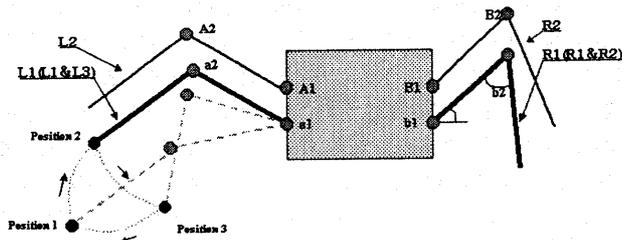


Fig.4 The crab type robot's simulation model

GA により探索されたそれぞれの目標角度の間の移動は、遊脚の時は等角速度運動を行う。しかし、足が接地脚となるときには各関節を等角速度運動させたのでは足先が滑る可能性が出てくる。実機ではシミュレーションと全く同じように滑ることは考えられず、シミュレーションと実機との間に移動距離の誤差が生じる可能性がある。段までの距離に大きな誤差が出た場合、段にぶつかり乗り越えることができない可能性が出てくる。そこで、足先の滑りをなくすために関節の動きに制限を加える。Fig.5 の様に左右の足が地面についた状態を閉リンクと考えると、3 つの角度が決まれば残りすべての角度が決定される。このことを用いると a1, a2, b1 の角度が決定された時、b2 は式(1)により求められる。そこで等角速度運動により決定された a1, a2, b1 を順次式(1)に代入することで b2 を決定する。これにより足先の滑りが生じない歩行を行い、シミュレーションと実機との移動距離の誤差をできるだけ少なくする。

$$b_2 = \sin^{-1}\left(\frac{l_2}{l_3} \sin \theta_3\right) + \cos^{-1}\left(\frac{l_3^2 + l_2^2 - L^2}{2l_3 l_2}\right) \quad (1)$$

ここで、 l_3, l_2, θ_3 は以下の様な関数で表される。

$$l_3 = \sqrt{l_{r1}^2 + l_2^2 - 2l_{r1}l_2 \cos \theta_3}, \quad \theta_3 = b_1 - \sin^{-1}\left(\frac{l_1}{l_2} \sin \theta_2\right)$$

$$l_2 = \sqrt{l_1^2 + l^2 - 2l_1 l \cos \theta_2}, \quad \theta_2 = a_1 - \sin^{-1}\left(\frac{l_{12}}{l_1} \sin a_2\right)$$

$$l_1 = \sqrt{l_{11}^2 + l_{12}^2 - 2l_{11}l_{12} \cos a_2}$$

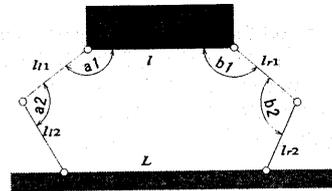


Fig.5 Closed links

4.1 適応度関数

適応度とは、GA で探索している各個体が環境にどの程度適応しているかを表すものであり、GA の計算過程における重要な要素のひとつである。本研究では、次の 5 つの評価関数を総合し、適応度とする。

- ① 移動距離 f_1
- ② 胴体の傾き f_2
- ③ 胴体のゆれ f_3
- ④ 遊脚の角度変化 f_4
- ⑤ 危険姿勢へのペナルティ f_5

まず、シミュレーション上でカニロボットが 1 周期の歩行で移動する距離を f_1 とし、遠くまで移動する個体ほど適応度が大きくなるように設定する。1 周期での移動距離 U の計算式を式(2)に示す。ここで、 $u(t)$ は微小時間での胴体の移動距離を表す。

$$f_1 = U = \sum_{t=0}^{T_LIMIT} u(t) \quad (2)$$

しかし f_1 のみでの探索では胴体の姿勢については考慮していない。そこで②と③の評価方法を導入する。②は胴体の傾きで、胴体の傾き $\theta(t)$ の絶対値の総和を f_2 とし、胴体の傾きが大きくなると適応度が低くなるように設定する。③は胴体の揺れで、胴体高度の平均と現在の高度との差を f_3 とし、揺れが増加するほど適応度が低下するように設定する。式(3)、式(4)に②、③の計算式を示す。ここで式(4)の $h(t)$ は胴体の地面からの高さであり、 h_0 はその初期高さである。

$$f_2 = \sum_{t=0}^{T_LIMIT} |\theta(t)| \quad (3)$$

$$f_3 = \sum_{t=1}^{T_LIMIT} |h(t) - h_0| \quad (4)$$

また、遊脚の動きは移動距離にそれほど大きく影響しない。そのため無駄に大きく足を振り上げる歩行パターンが淘汰されずに残ることが多々ある。不必要な脚の動きは実機に適用した場合に予期せぬ事故やエネルギーの浪費につながる。

そこで各関節の角度変化の合計を f_4 とし、 f_4 が大きくなると適応度が低くなるように設定する。 f_4 を表す式を式(5)に示し、 $\Delta a1, \Delta a2, \dots$ は微小時間での角度変化を表す。

$$f_4 = \sum_{i=0}^{T_LIMIT} (|\Delta a1| + |\Delta a2| + |\Delta b1| + |\Delta b2| + |\Delta A1| + |\Delta A2| + |\Delta B1| + |\Delta B2|) \quad (5)$$

また、歩行の際に転倒や段差からの転落が発生するような危険な歩行パターンを判断し抑止するため、危険姿勢に対するペナルティとして f_5 を用いる。危険姿勢とは段差側面及び段差近傍への接触、さらに転倒の危険性のある2本足(L2とR2)での支持状態のこととする。 f_5 は通常は1とし、危険姿勢になると0となる。

これらを適用した適応度の計算式を式(6)に示す。この適応度関数を用いることにより、移動速度だけではなく、胴体の揺れや危険足先位置を考慮した個体の探索が行われる。ここで w_1, w_2, w_3, w_4 は定数で $f_1 \sim f_4$ が適応度に与える影響の重みづけを行っている。

$$fitness = (w_1 \times f_1 / t - w_2 \times f_2 - w_3 \times f_3 - w_4 \times f_4) \times f_5 \quad (6)$$

4.2 水平路面での歩行パターン生成手法

水平路面では移動によって路面環境が変化することがないので、1つの周期パターンを繰り返すことによって歩容を形成する。つまり、Fig.6の模式図に示すように1周期のみをGAで探索し、それを Position1 → Position2 → Position3 → Position1 → ... というように3つの指定角度を順に適用することによって歩行を構成する。また、各足に2個、全体で8個ある関節の Position1 から Position3 までの目標角度を遺伝子に変換する。Fig.7に示すように各関節の目標角度を3bit からなるパラメータとし各関節 a1~B2 の8つのパラメータによって1 Position とする。1周期の歩行は3つの Position から成り、合計で72bit の遺伝子からGAの個体を形成している。

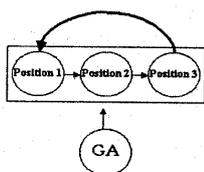


Fig.6 Even ground case

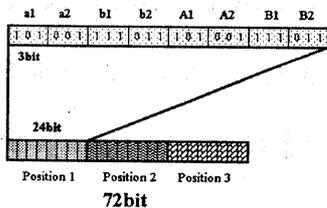


Fig.7 Composition of a gene

探索する可動範囲は Fig.8 に示すように Position ごとに変更する。Position1, Position2 の第一関節は可動範囲を -20[deg] ~ 20[deg] に設定し、第二関節は Position1 が 90[deg] ~ 130[deg]、

Position2 は 50[deg] ~ 90[deg] とする。1つの関節につき3bit つまり8パターンあり、それぞれの関節に設定された可動範囲を8等分した角度を指定角度の1単位とするので、それぞれ 5[deg] づつに分解している。Position3の第一関節は 10[deg] ~ 90[deg]、第二関節は 50[deg] ~ 140[deg] としそれぞれ 10[deg] づつに分解している。これにより歩行を成さない個体、逆方向に進む個体の発生を抑え、歩容に大きな影響を与える支持脚の動きに対して密度の高い探索が行える。

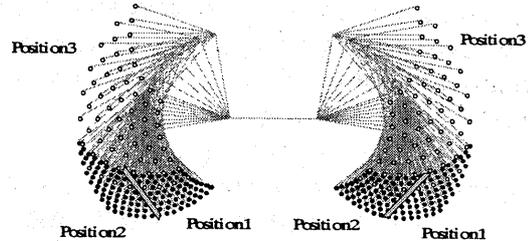


Fig.8 Change of the range for horizon

4.3 段差路面での歩行パターン生成手法

段差から胴体の中心までの距離が 250mm よりも小さくなった時点、つまり Position1 → Position2 → Position3 とあと一周り繰り返すことにより段に足が掛かる可能性のある範囲に入った時点で段差乗り越えの歩行パターン生成手法に移行する。段差路面では水平路面と異なり段差からの距離や高さにより歩行の形態を変化させる必要がある。そこで、Fig.9のように1周期(3 Position)ごとにGAによる探索を行うことで歩行パターンを形成する。しかし、この手法では周期間での相関性が弱いため、現周期での適応度さえよければ次周期での段差乗り越えに不利なものであっても最良の個体として出力されてしまう。そこで、全世代交代数 100 の半分の 50 世代を越えても適応度が 100 より小さい場合 2 周期探索に移行する。2 周期探索では Fig.10 に示すようにこれまでの 3 Position の探索から次周期を含めた 6 Position での探索に移行し、Fig.11 のように 144 ビットの遺伝子を探査に用いる。これによって周期どうしの関連性が強まり次の周期のことを考慮した探索が可能となる。

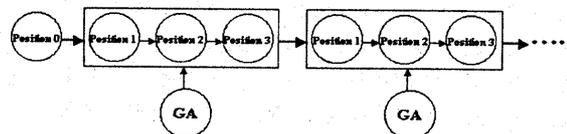


Fig.9 Search procedure

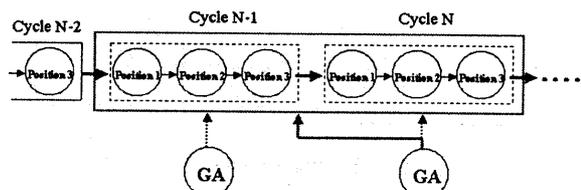


Fig.10 2 cycle search method

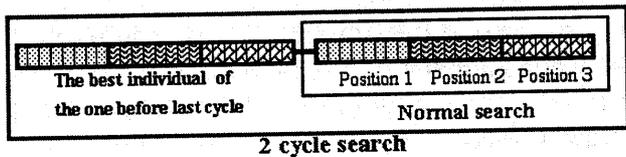


Fig.11 Extension of a gene

また、段差を乗り越える際には振り上げる足の高さが関係しており、遊脚が段よりも低いものを探索の候補からできるだけ取り除く必要がある。そこで、式(7)により段の高さに合わせて遊脚の高さを制限することで、より適応度の高いものを短時間で探索できると考えられる。

$$h_0 + l_{r1} \sin b_1 - l_{r2} \sin(b_1 + b_2) > H \quad (7)$$

ここで、 h_0 は胴体の初期高さ、 H は段の高さ、 l_{r1} 、 l_{r2} はそれぞれ第一リンク、第二リンクの長さ、 b_1 、 b_2 は第一関節、第二関節の角度を示す。ここで、 $b_1 + b_2 = 90^\circ$ の時(第二リンクが真下を向く時、つまり b_1 が固定された時の最も足先が低くなる状態)の b_1 を式(8)に表す。この b_1 を用いて第一関節は $b_1 \sim 90[\text{deg}]$ の値を可動範囲と設定する。また、第二関節は $50[\text{deg}] \sim 130[\text{deg}]$ の値を可動範囲とする。その範囲を Fig.12 に示す。Fig.12 より水平路面の時より Position3 での位置が上に移っていることが確認できる。

$$b_1 = \sin^{-1} \frac{(H + l_{r2} - h_0)}{l_{r1}} \quad (8)$$

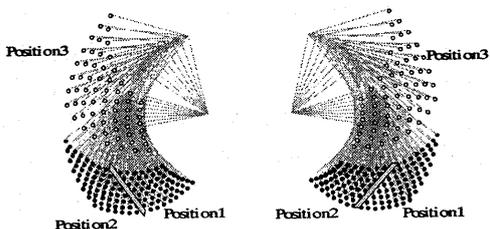


Fig.12 Change of the range for step

5. 探索実験

Fig.13, Fig.14, Fig.15 に高さ 30mm, 40mm, 50mm の段差に対する段差乗り越え歩行パターンの探索結果を示す。また、式(6)の評価関数の係数は $a=200$, $b=1.0$, $c=0.2$, $d=0.05$ とした。図中央に走る波線は胴体中心の移動の様子を表す。Fig.13, Fig.14, Fig.15 より GA を用いることでそれぞれの段の高さに合わせた段差乗り越えの歩行パターンが探索され段差を乗り越えることが確認できる。

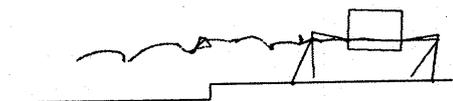


Fig.13 step of 30mm

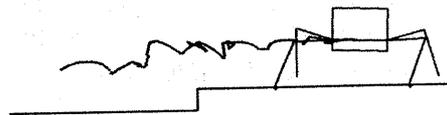


Fig.14 step of 40mm

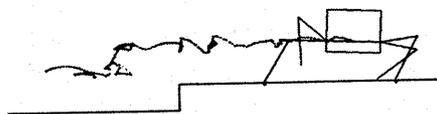


Fig.15 step of 50mm

6. 結言

本報告では様々な環境に柔軟に対応できる歩行ロボットとしてカニ型ロボットを考え、GA を用いて環境に合わせた歩行パターンを探索する手法を提案した。まず路面形状に段差がある場合を想定し、段差を乗り越える歩行パターンを探索した。シミュレーションにより段差の高さに合わせた歩行パターンが探索されることを示し、実験により本手法の有効性を確認した。本手法は従来のように環境に合わせたプログラムは必要なく GA の探索プログラムのみで歩行パターンが決定されるため、簡単なプログラムで様々な環境に適応できる可能性がある。今後は、段差だけではなく様々な環境に適応できる歩行パターンの探索についても考慮していく。

参考文献

- (1)小溝大介, 黄慶九, 内田洋彰, 下井信浩, 野波健蔵, “地雷探知用 6 足歩行ロボットの運動制御と CAE シミュレーション”, 第 42 回自動制御連合講演会前刷集, 計測自動制御学会, pp.95-96, 1999
- (2)倉爪亮, 葉石敦生, 米田完, 広瀬茂男, “4 足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.3, pp.380~386, 2001
- (3)山口仁一, 木下昇, 高西淳夫, 加藤一郎, “路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ 2 足歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.4, pp.76-89, 1996
- (4)日本ロボット学会(編), 木村浩, “ロボット工学ハンドブック”, コロナ社, 1990
- (5)西井淳, “昆虫の歩行パターンのエネルギー効率に基づく最適性の検討”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II, No.10, pp.2430-2437, 1998
- (6)安居院猛, 長尾智晴, “ジェネティックアルゴリズム”1993, 昭晃堂
- (7)北野宏明(編), “遺伝的アルゴリズム 4”, 2000, 産業図書