

# SAP によるプログラムの自動編成

- ロボットアームによる荷物運搬問題への適用 -

田辺 竜也

## 1 はじめに

近年のロボット技術の高度化により、様々な分野で活躍するロボットが増えてきている。例えば、人間の代わりに作業を行う産業用ロボットや、災害発生時に危険な場所での要救助者の探索を行うレスキューロボットなど、今後もより多くの場面でロボットが必要になると考えられる。それに伴い、ロボットに要求される制御プログラムもより高度で複雑になるが、そのようなプログラムを人の手で作ることは容易ではない。そのため、近年では計算機を用いてプログラムの自動設計を行う自動プログラミングの研究分野が注目されている。そこで、我々の研究室では自動プログラミング手法の一つとして、シミュレーテッドアニーリングプログラミング (Simulated Annealing Programming:SAP) <sup>1)</sup> の研究を行っている。SAP は先行研究によってベンチマーク問題における有効性は既に示されているが、実機での検討は十分に行われていない。そこで、本研究では SAP で得られた解を用いて、シミュレーションでの動作と実機での動作の検討を行う。本稿では、シミュレーションで得られた結果について検討をする。

## 2 シミュレーテッドアニーリングプログラミング (SAP)

### 2.1 SAP の概要

SAP とは金属の焼きなましを模倣したシミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing:SA) を木構造が扱えるよう拡張した手法である。SAP は SA と同様に生成処理、受理判定、状態遷移、冷却から成る。

### 2.2 SAP のアルゴリズム

SAP のアルゴリズムを以下に述べる。

#### STEP 1 初期解候補の生成

初期解をランダムに生成し、その評価を行う。

#### STEP 2 生成処理

現在の解である木構造からランダムにノードを選択し、選択されたノードを根とする部分木を削除する。削除した部分に、ランダムに生成した部分木を挿入することにより、次解候補を生成する。Fig. 1 に生成処理の操作を示す。

#### STEP 3 受理判定、状態遷移

現在の解の評価値  $E$  と次解候補の評価値  $E'$  との差分  $\Delta E (= E' - E)$ 、および温度パラメータ  $T$  を基に、次の解候補に遷移するか否かの判定を行う (受理判定)。受理判定には、式 (1) に示す Metropolis 基準を用いる。

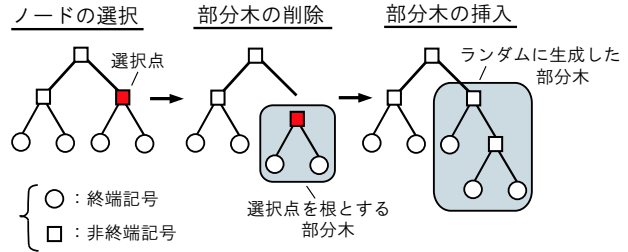


Fig.1 生成処理

$$P_{AC} = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta E \leq 0 \\ \exp(-\frac{\Delta E}{T}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $P_{AC}$  は受理確率であり、次解候補が解良方向へ生成された場合は無条件で受理され、改悪方向へ生成された場合でも確率的に受理される。改悪方向への受理確率は、差分  $\Delta E$  が小さいほど高く、また、温度パラメータ  $T$  が大きいほど高いという特徴を持つ。

なお、STEP2, 3 の処理をアニーリングと呼ぶ。

#### STEP 4 冷却 (クーリング)

一定期間アニーリングを行った後、温度パラメータ  $T_k$  を小さくする冷却 (クーリング) を行う。冷却後の温度  $T_{k+1}$  は式 (2) に示す指数型アニーリングを用いて決定する。なお  $\gamma$  は冷却率である。

$$T_{k+1} = \gamma T_k \quad (0.8 \leq \gamma < 1) \quad (2)$$

#### STEP 5 終了判定

STEP2~4 を定められた回数行えば、探索を終了する。

## 3 対象問題

本研究では、ロボットアームを用いた対象問題として、荷物運搬問題を提案した。荷物運搬問題は、ロボットアームが限られた体力の中でフィールド上に設置された荷物を目的地まで運ぶことを目的とする問題である。設定した環境は以下の通りである。

### 3.1 フィールド

Fig. 2 に示す XY 平面上の 4 つのフィールドを用いる。荷物と荷物を運搬する目的地は原点  $(0, 0)$  を中心とした半径  $r$  の円周上とする。また、半径  $r$  はロボットアームの腕の長さである。

なお荷物を運搬する目的地は全てのフィールドにおいて  $\theta=175^\circ$  とする。

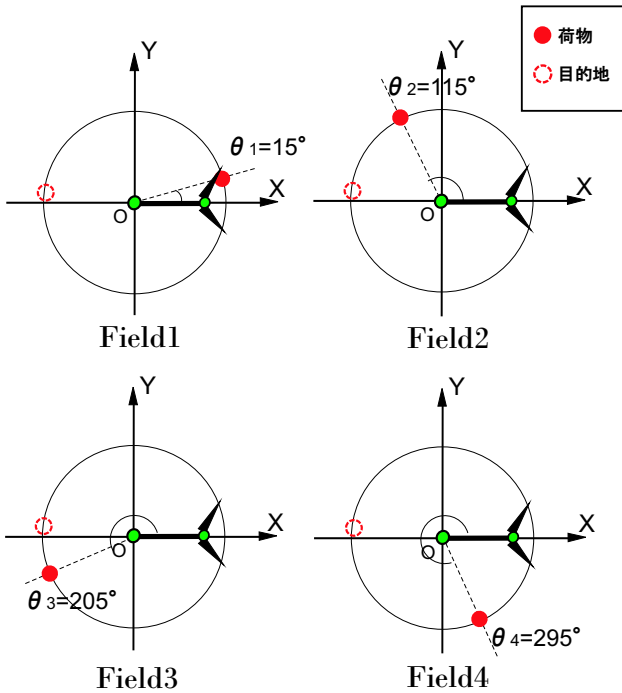


Fig.2 対象問題のフィールド

### 3.2 ロボット

使用するロボットは、2関節を持つロボットアームであり、現在地の荷物の有無を検知できるセンサを持つ。またロボットの移動範囲は  $0 \leq \theta < 360$  とし、ロボットの初期位置は  $\theta = 0^\circ$  とする。

### 3.3 行動規則

荷物運搬問題に用いた終端記号を Table 1 に、非終端記号を Table 2 に示す。

終端記号	機能
RIGHT	5° 時計回り.
LEFT	5° 反時計回り.
CATCH	アームの手を閉じる.
RELEASE	アームの手を開く.

終端記号	機能
if baggage here	子ノードを2つ持つ。 現在のアームの位置に荷物があれば第1子ノードを、無ければ第2子ノードを実行する。
progn2	子ノードを2つ持つ。 第1子ノード、第2子ノードの順に実行する。
progn3	子ノードを3つ持つ。 第1子ノード、第2子ノード、第3子ノードの順に実行する。

### 3.4 行動回数

ロボットアームの行動回数は100とする。なお、ロボットアームは終端記号を1つ実行する毎に行動回数を

1消費するものとする。

### 3.5 評価方法

評価には、式(3)に示す各フィールドにおける評価値の合計である  $E_{sum}$  を用いる。

$$E_{sum} = \sum E_i \quad (3)$$

各フィールドにおける評価値  $E_i$  は、式(4)に示す評価関数を用いて求める。各フィールドでの評価は、荷物を目的地まで運べた場合(タスク成功)と、荷物を運ぶことはできなかったが初期位置から移動させることはできた場合(タスク失敗1)、荷物を全く動かさなかった場合(タスク失敗2)の3つに場合分けして行う。

$$E_i = \begin{cases} 100 - \text{ロボットの残り体力} & (\text{タスク成功}) \\ 100 + P & (\text{タスク失敗1}) \\ 200 + P & (\text{タスク失敗2}) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)に用いられている  $P$  とは、タスク終了時点でのロボットアームと荷物の位置からタスクを成功させるのに最低限度必要なロボットアームの体力のことである。

## 4 実験

本研究では、荷物運搬問題における重要温度について検討を行う。重要温度とは、探索に有効な温度のことを指す。この重要温度のみを用いた探索を行うことで、ブローが生じることなく、良好な解が得られることが報告されている<sup>1)</sup>。

そこで、荷物運搬問題に重要温度が存在するか確認するために、温度を固定したSAP(一定温度SAP)を適用した。なお、用いる温度は  $2^{-7} \sim 2^6$  までの間を等比的に分割した温度とし、総探索回数を100,000回とした。

実験結果として、各温度における20試行分の評価値とノード数の平均値を Fig. 3 に示す。なお、Fig. 3 は縦軸に評価値とノード数を、横軸に温度をそれぞれ示す。

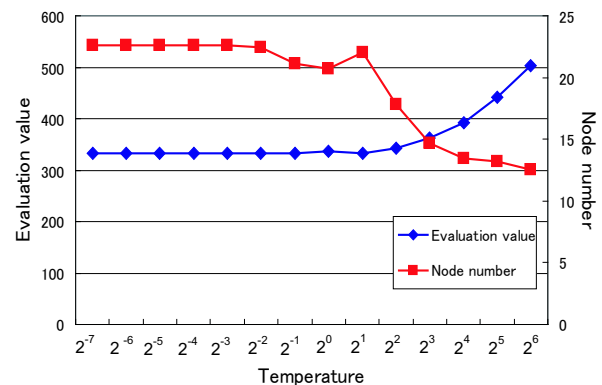


Fig.3 一定温度探索

### 4.1 実験結果

Fig. 3 より、高温のみで探索を行った場合はまったく解が収束せず、一方低温のみで探索を行った場合はノー

ド数が大きい値で収束している．それに対し，温度  $1(2^0)$  付近の場合は解が良好で，かつノード数が少なくなっている．したがって，荷物運搬問題において，探索に有効な一定温度は  $1$  付近であることが特定できた．

今回の実験を踏まえた上で，対象問題に対して SAP を適用した．用いたパラメータを Table 3 に示す．

Table3 荷物運搬問題におけるパラメータ

パラメータ	値
評価計算回数	$2.0 \times 10^5$
最高温度	1.0
最低温度	1.0

一定温度 SAP を適用した結果，今回生成された解の中には4つのフィールド全てにおいてタスクを成功させる解を作ることはできなかった．今回生成された解は，4つのフィールドのうち2つあるいは3つのフィールドにおいてタスクを成功させることができるものだった．生成された解のうち，Fig. 4 に示しているのは Field1, Field2 に対して，Fig. 5 に示しているのは Field3, Field4 に対して，Fig. 6 に示しているのは Field1, Field2, Field3 に対してそれぞれ有効な解による評価値の遷移をグラフにしたものである．なお，Fig. 4～Fig. 6 では，横軸に評価計算回数，縦軸に評価値を示している．

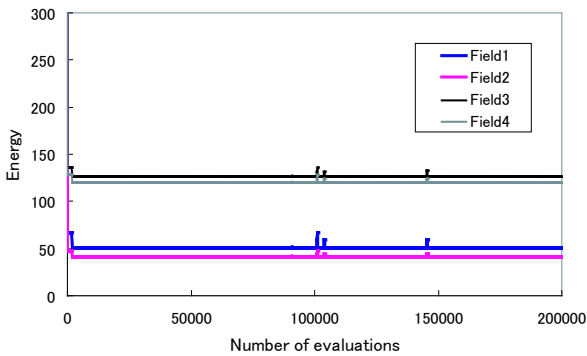


Fig.4 Field1, 2 において有効な解

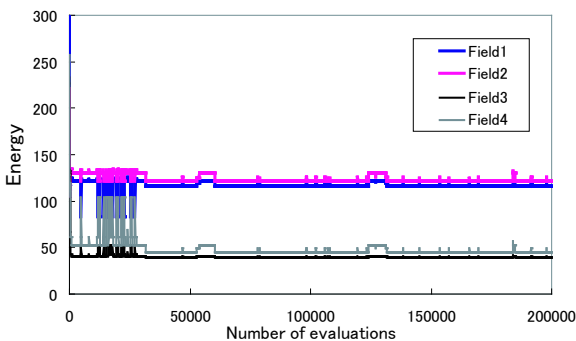


Fig.5 Field3, 4 において有効な解

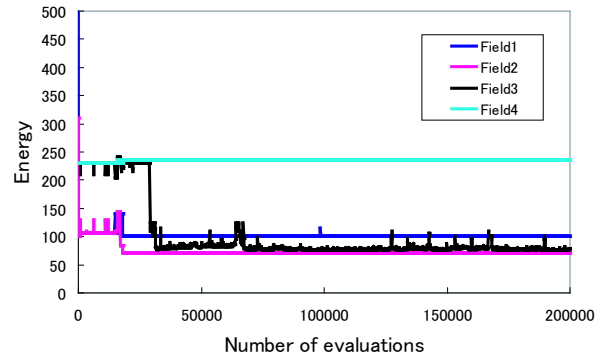


Fig.6 Field1, 2, 3 において有効な解

## 4.2 考察

Field1, Field2 に対して有効な解をロボットに適用したときの動作は次のようなものである．まずは反時計回りに進んで荷物の探索を行い，荷物を発見した後は時計回りに進んで目的地まで運ぶという動作を行う．そのため Field3, Field4 においては，荷物を発見してから目的地まで運ぶまでの距離が Field1, Field2 に比べて長くなり，荷物運搬途中でロボットアームの体力がなくなった．Field3, Field4 に対して有効な解の場合はまず時計回りに進みながら荷物を探して，荷物発見後は反時計回りで目的地まで運ぶものだったので前者とは逆の事が起きた．Field1～3 に有効な解では荷物の探索をしているときは反時計方向に進む割合が多いが，荷物を見つけた後は時計回りに進んでいく割合が多くなった．その動作では最も距離が長くなる Field4 でタスクが失敗したのは，やはりロボットの体力が足りなかったためである．

## 5 まとめ

今回は複数のフィールドを用いて，荷物配置が異なる場合でもロボットアームが荷物を運搬できるかどうか実験を行った．結果として，対象とした4つ全てのフィールドで問題を解くことのできる解を生成することはできなかった．その理由は，ロボットに与えられた体力が対象問題を解くのに十分足りるものではなかったからである．実際にロボットの体力を増やして SAP を適用させたところ，4つのフィールド全てにおいて，与えられたエネルギー内でタスクを完了させる解を生成することができた．今後の展望としては，最小限の体力で多くのフィールドに対応可能できるロボットアームの行動規則の生成ができるようにする．それを実機に適用することで，実環境における SAP の有効性について検討する．

## 参考文献

- 1) 藤田 佳久, 三木 光範, 橋本雅文, 廣安 知之. シミュレーテッドアニーリングを用いた自動プログラミング: 情報処理学会論文誌, Vo48, pp.88-102, 2007