

A_024

探索中の良好な解と交叉を行うシミュレーテッドアニーリング
Simulated Annealing with Archive-Based Crossover

平岩 健一郎[†]
Kenichiro HIRAIWA

三木 光範[‡]
Mitsunori MIKI

廣安 知之[‡]
Tomoyuki HIROYASU

1. はじめに

シミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing:SA) は、熱力学のアニーリングを計算機上でシミュレートすることにより、エネルギーと呼ばれる目的関数値が最小となる状態 (大域的な最小状態) を見つける汎用最適化手法である。[1]

近年、組合せ最適化問題における SA の解精度を上昇させるため、高性能化に関する研究が数多くなされてきた。SA において温度と近傍は重要であるが、組み合わせ最適化問題では近傍を決めると近傍幅も一意に決まるため、温度パラメータが重要となる。そのため温度に関する高性能化の研究が行われている。[2]

著者らは温度に関する高性能化が行われた手法の性能を更に高めるため、過去の探索履歴に注目し、過去の探索点の中から良好な解を保存したアーカイブの中の解と、現時点で最も目的関数値の良い解 (最良解) との情報交換を行うシミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing with Archive-Based Crossover:SA/AX) を提案している。[3] 情報交換の方法としては遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms:GA) における交叉を用いる。そして SA/AX を代表的な組合せ最適化問題である巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem:TSP) に適用した結果、良好な解精度を得ることができた。[3]

本研究では SA/AX をジョブショップスケジューリング問題 (Job-shop Scheduling Problems:JSP) に適用し、本手法の TSP 以外の組合せ最適化問題での有効性を検証する。

2. 交叉による過去の探索解との情報交換

最適化問題では、目的関数値だけでなく設計変数値も重要である。代表的な組合せ最適化問題である TSP を例に取ると、図 1 のように、同程度の目的関数値であっても、設計変数値の異なる局所解が存在する。

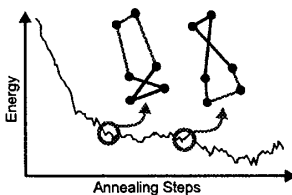


図 1: 探索履歴

実際に対象問題として eil51[4] に対し、通常の SA を適用した結果、探索履歴中に図 2 のような 2 つの目的関数値の類似している解が見つかった。

図 2 において、実線は最適解と等しい枝、点線は最適解と異なる枝を示している。これを見ると目的関数値が

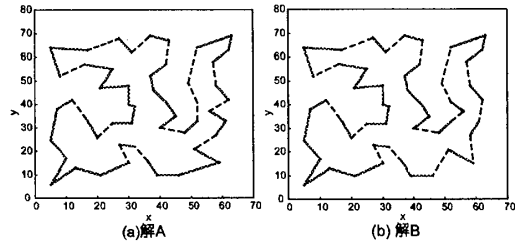


図 2: 探索履歴中の目的関数値の等しい 2 つの解 (TSP) 等しくても、異なる部分解を持つ解が存在することがわかる。

SA/AX はこのような異なる部分解を持つ解間での情報交換により設計変数の良好な部分を集めることで、より良好な解を作ることができると考え、過去の良好な探索点との交叉による情報交換を行う。情報交換の方法としては GA における交叉を用いる。そして SA/AX を TSP に適用した結果、良好な解精度が得られた。[3]

本研究では、SA/AX の TSP 以外の組合せ最適化問題での有効性を検証するため、JSP を対象とする。

TSP の場合と同様に SA で JSP を解いた際の探索履歴を調べた結果、JSP に関しても TSP と同様に図 3 のような 2 つの目的関数値の等しい解が見つかった。対象問題は ft10[5] である。

実行順序										実行順序											
M0	1	8	0	2	9	6	4	7	3	5	M0	8	1	0	4	6	7	9	2	3	5
M1	2	6	9	8	4	3	5	7	0	1	M1	3	6	8	9	5	0	2	4	7	1
M2	7	4	5	1	9	2	3	6	0	8	M2	5	4	7	1	9	6	0	8	3	2
M3	2	8	5	4	1	5	0	9	7	3	M3	8	6	5	0	1	2	4	9	7	3
M4	1	4	7	3	0	6	9	5	8	2	M4	1	0	7	4	3	6	5	9	2	8
M5	4	8	5	7	2	6	1	9	0	3	M5	5	8	6	4	0	7	8	1	2	3
M6	9	6	1	7	3	8	5	0	2	4	M6	9	6	0	1	7	5	3	8	2	4
M7	2	4	1	6	8	7	3	0	9	5	M7	6	0	1	2	4	7	3	5	8	9
M8	9	2	4	5	6	7	1	3	8	0	M8	9	5	6	2	7	4	0	3	1	8
M9	1	9	6	8	5	7	4	2	0	3	M9	1	6	9	5	8	7	0	4	2	3

図 3: 探索履歴中の目的関数値の等しい 2 つの解 (JSP)

図 3 において、縦はマシン番号、横はそのマシンにおけるジョブの実行順序、そしてセル中の数字はジョブ番号を示している。また、黒色のセルはクリティカルパス、白色のセルはそれ以外の作業を示している。図 3 より、各マシン上のジョブの実行順序の大部分が異なり、クリティカルパスも異なっていることから、解 A と解 B が異なる部分解を持つことがわかる。

以上より、JSP においても異なる部分解を持つ解間での情報交換を行うことにより、部分解が組み合わせられ、TSP と同様により良好な解を作ることができると考えられる。

3. SA/AX のアルゴリズム

提案手法 SA/AX のアルゴリズムは以下の通りである。

1. 次状態生成

[†]同志社大学大学院 工学研究科
[‡]同志社大学 工学部

2. 受理判定
3. 状態遷移
4. アーカイブへの追加

1~3の処理を一定期間繰り返した後、一定周期の中で最も目的関数値の良いものをアーカイブとして選出する。

5. 交叉
一定周期ごとに過去の探索の中でアーカイブからランダムに選んだ解と最も目的関数値のよい解(最良解)とを交叉させ、複数の解(子個体)を生成する。
6. 現在の解への反映
親個体と、子個体内、最も目的関数値の良いものを探索点とする。
7. クーリング

SA/AXはアーカイブに保存した過去の良好な解との情報交換を行いながら探索を進めることで、通常のSAよりも良好な探索が可能となると考える。

4. 数値実験

4.1 SAにおける重要温度領域の存在

本研究では、JSPに対応した交叉法として Inter-machine JOX[6]を用いる。これは各機械上における作業の投入順序をなるべく保存しながら子を生じさせる交叉法である。具体的には一方の親個体の各設計変数を0.5の確率で子個体に継承させ、継承されなかった設計変数をもう一方の親個体から取り入れるという操作を2つの子個体に対して行う。

組合せ最適化問題にSAを適用した研究において、特定範囲の温度でのアニーリングがSAの解探索性能に大きく影響することが分かっており[7][8]、JSPにおいても特定温度での一定温度探索が有効であることが分かっている。[2]本研究では、この特定範囲の温度を重要温度領域と呼び、一定温度探索を行うものとする。

4.2 SAとの比較

提案手法の有効性を検証するため、対象問題をft10およびft20[5]とし、通常のSA(Standard SA:SSA)との比較実験を行う。各対象問題のパラメータを表1に示す。結果は20試行の最大値(Max)、中央値(Median)、最小値(Min)をとった。

表1: SSAおよびSA/AXのパラメータ

クーリング周期	1000
総アニーリング数	32000
近傍	CB近傍[9]

結果を図4および図5に示す。縦軸は最適解との誤差率、横軸は一定温度探索における温度である。

図4においては温度15付近が、図5においては温度10付近が重要温度領域となっている。

この2つの図より重要温度領域よりも高温になると、SA/AXの結果がSSAよりも良好になっていることがわかる。SAでは次状態生成にメトロポリス基準を用いているため、高温部では次状態を受理する確率が高くなる。

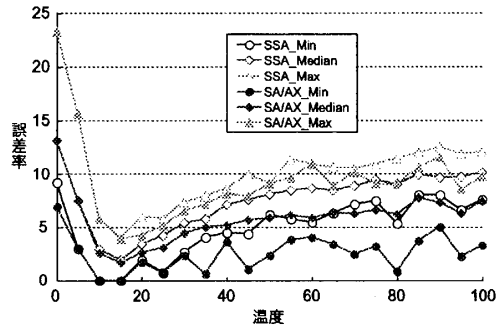


図4: ft10

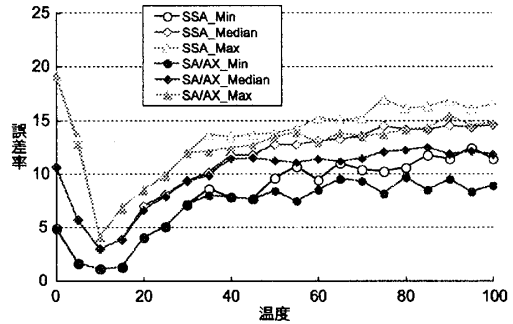


図5: ft20

そのため改悪を繰り返すことでアーカイブ中の解が低温部よりも多様になり、交叉によって良好な子個体が生成されやすくなったと考えられる。

また、2つの図から、SSAは重要温度領域よりも高温になると性能が著しく低下するのに対し、SA/AXでは重要温度領域以降の温度領域では性能が大きく変化してはいない。このことから、SA/AXは重要温度を求める予備実験を行わなくても、ある程度の解精度を得ることができることがわかった。

重要温度領域においては高温部に比べ交叉の影響を見ることができないが、それに関する検討は今後の課題である。

参考文献

- [1] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr.C.D., Vecchi, M.P.Optimization by Simulated Annealing. Science,1983.
- [2] 三木光範, 廣安知之, 吉田武史, 輪湖純也. 適応的溫度調節メカニズムを持つ並列 SA. 情報処理学会論文誌, Vol. 41, No. 6, 2000.
- [3] 三木光範, 廣安知之, 平岩健一郎. 探索中の良好な解と交叉を行うシミュレーテッドアニーリング. 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 68, No. 2, Page143-144, 2006.
- [4] Tsplib. Technical report. <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/>.
- [5] CS410/510SS Project Job Shop Scheduling. <http://web.cecs.pdx.edu/bart/cs510ss/project/jobshop/jobshop/>.
- [6] 小野功, 小林重信. Inter-machine JOXに基づくJSPの進化的解法. 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp. 780-790, 1998.
- [7] D.T.Connolly.An improved scheme for the qap. EJOR, Vol.46, pp.93-100, 1990.
- [8] Mark Fielding. Simulated annealing with an optimal fixed temperature. 2000.
- [9] 山田武士, Bruce E. Rosen, 中野良平. クリティカルブロックシミュレーテッドアニーリング法によるジョブショップスケジューリング問題の解法. 電気学会論文誌, 1994.