

遺伝的シミュレーテッドアニーリングを用いた QoS マルチキャスト経路選択法

A QoS Multicast Routing Algorithm Based on Genetic Simulated Annealing Algorithm

彭 博†
Bo Peng

李 磊‡
Lei Li

1. はじめに

近年、インターネット上、音声通話や動画配信といったリアルタイム・アプリケーション配信サービスが増加している。このような同時に多くの人にデータを配信するサービスにマルチキャスト通信は広く利用されるようになった。

マルチメディア情報をサポートするためにネットワークスループットや品質といったQoS (Quality of Service)を満たすルーティングが求められている。コスト最適なQoSマルチキャスト木を求める問題はNP困難である。近年、進化戦略を用いる手法がNP困難問題の解法として注目されている。遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) がその1つである[4][5]。

本研究では、局所最適解から脱出するアルゴリズムとして代表的なシミュレーテッドアニーリング (Simulated Annealing: SA) 法と遺伝的アルゴリズムの組み合わせ手法を用いて、最小コストQoSマルチキャスト経路探索問題を解決する。

シミュレーテッドアニーリング(SA)法は、Metropolisらが1953年に発表した焼きなましと呼ばれる加熱炉内の個体の冷却過程をシミュレートするアルゴリズムである[2]。SAは、まず、初期温度 T_0 を設定した後、与えられた初期状態から、次々と状態を遷移させることにより、最終的にはエネルギーが最小となる状態、つまり目的関数の大域的最適解を見つける汎用最適化手法である[6]。

一般的な最適化手法では大域的なネットワークにおいて最適解を求めることが難しいが、SAを導入することで、解品質が改良する方向だけでなく改悪する方向に対しても確率的に遷移を認める仕組みにより、大域的最適解を見つけることができる。

本研究では、QoSマルチキャスト最短経路探索問題の解決手法として、GAとSAの組み合わせた手法の有効性を検討する。

2. ネットワークモデル

本研究では、ネットワークを重みつき無向グラフ $G = (V, E)$ で表す。ここで、 V, E は、それぞれノードの集合とノード間に存在するリンクの集合を表す。また、 i から j までの各リンク (i, j) に対する、3つのリンクパラメータコスト、遅延、帯域幅($Cost_{ij}$; $Delay_{ij}$; $Bandwidth_{ij}$)が定義される。マルチキャスト配信は1対複数の通信方式である。1つの送信ノード $s \in V$ から受信ノード集合 $M \subseteq \{V - \{s\}\}$ まで送信すると仮定する。マルチキャストツリー $T = (V_T, E_T)$,

$V_T \subseteq V$, $E_T \subseteq E$, T はすべての送信ノードから受信ノード $d_i \in M$ までの経路 $P_T(s, d_i)$ を含んでいる。

各経路 $P_T(s, d_i)$ に対する遅延と帯域幅を以下のように定義する。

$$Delay(P(s, d_i)) = \sum_{e \in P_T(s, d_i)} Delay(e) \quad (1)$$

$$Bandwidth(P(s, d_i)) = \min_{e \in P_T(s, d_i)} \{Bandwidth(e)\} \quad (2)$$

各マルチキャストツリーに対するコストと遅延揺らぎは以下のように定義する。

$$cost(T(s, M)) = \sum_{e \in T(s, M)} Cost(e) \quad (3)$$

$$Delay_Jitter(T(s, M)) = \max |D(P_T(s, d_i)) - D(P_T(s, d_j))| \quad (4)$$

本研究は、以下のQoS制約条件を満たす最少コストのマルチキャストツリー $\min\{cost(T(s, M))\}$ を求めることである。

1. $Delay(P_T(s, d_i)) \leq D_{max}$
2. $Bandwidth(P_T(s, d_i)) \geq B_{min}$
3. $Delay_Jitter(T(s, M)) \leq DJ_{max}$

3. 提案手法

提案手法のフローを図1に示す。

- step 1. GAの初期集団を生成し、初期温度 t_0 を設定する。
- step 2. GAの選択と交叉を行う。
- step 3. 突然変異にSA法を導入する。
- step 4. 終了条件を満たさなければ、step 2に戻る。終了条件を満たす場合、最良解をoutputする。

3.1 Pre-processing Phase

帯域幅制限を満たさない経路を削除する。

3.2 初期経路集団生成

- step1 送信ノードと複数の受信ノードを設定する。
- step2 kth-Dijkstra法を用いて送信ノードから受信ノードまでのすべての経路を生成し、遅延制限を満たさない経路を削除する。
- step3 各受信ノード d_i に対して候補経路集合 Q_i を生成する。

† 法政大学大学院 工学研究科

‡ 法政大学大学院 工学部

$$Q_i = \{p_i^1, \dots, p_i^j, \dots, p_i^k\} \quad (5)$$

step4 各受信ノードの候補経路集合 Q_i から1つ経路を選び、マルチキャストツリーを構成し、マルチキャストツリーを初期集団の個体として表現される。

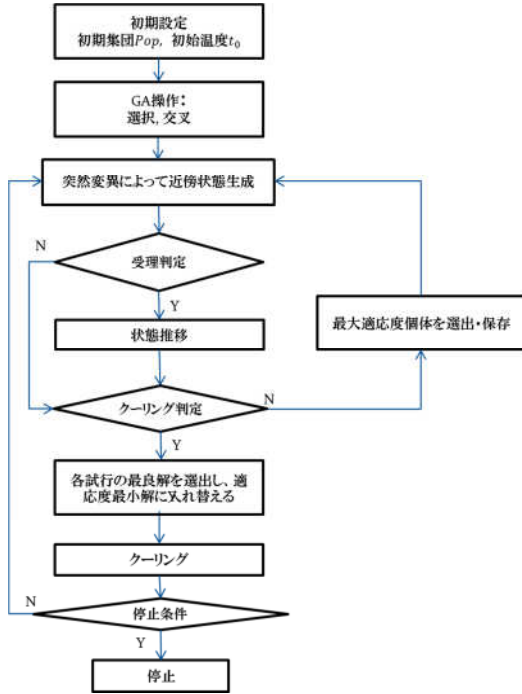


図 1 提案手法

3.3 適応度の評価

適応度関数はペナルティ関数を使って、以下のように定義される。

$$f(T(s, M)) = f_c + M f_{dj} \quad (6)$$

$$f_c = \frac{\alpha}{\text{cost}(T(s, M))} = \frac{\alpha}{\sum_{e \in T(s, M)} \text{Cost}(e)} \quad (7)$$

$$f_{dj} = \prod_{d_i \in M} \delta_{dj}(\text{Delay_jitter}(p(s, d_i)) - DJ_{\max}) \quad (8)$$

$$\delta_{dj} = \begin{cases} 0, & T \leq 0 \\ r_{dj}, & T > 0 \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 α は正の整数、 M は負の整数であり、 r_{dj} はペナルティのパラメータを表す。

3.4 選択

本研究はルーレット選択法を用いて、個体が選択される確率 P_i を以下の式で定義される。

$$P_i = \frac{f(i)}{\sum_{i=1}^{N_{pop}} f(i)} \quad (10)$$

3.5 交叉

Srinivas と Patnaik [1]の研究で使われた適応型スキームを交叉に組み合わせる。この適応型GAの特徴は、交叉効果をバランスさせることで制御する。最適解の探索が停滞する傾向にあるとき、交叉確率 p_c は増加する。また、探索が解空間にばらついているとき、 p_c は減少する。適応型交叉確率は次の式の通りである。

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ p_{c1} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (11)$$

交叉操作では、選択された二つの個体がランダムに交叉点を定め、1点交叉を行う。 f_{max} は現在の集団の最大適応度、 f_{avg} は平均適応度、 f' は交叉する二つの個体のうちより良い適応度を示す。

3.6 SA 法を取り入れた突然変異

すべての個体を突然変異させる。突然変異方法として、各染色体から1つの遺伝子をランダムに選び、候補経路集合 Q_i から1つの経路を入れ換える。

突然変異によって得られた新たな状態 x' が個体 x の近傍状態として考えられる。近傍状態の受理確率は式(12)で与えられるMetropolis規準[2]を用いる。

$$p(x_i \rightarrow x'_i) = \begin{cases} 1 & f(x'_i) \geq f(x_i) \\ \exp\left(-\frac{\Delta f_{x_i x'_i}}{t_k}\right) & f(x'_i) < f(x_i) \end{cases} \quad (12)$$

現在状態集団と近傍状態集団の個体の適応度を求め、 $f(x') \geq f(x)$ (改善方向への遷移) ならば確率1で x' に遷移する。 $f(x'_i) < f(x_i)$ (改悪方向への遷移)の場合、近傍状態 x' の適応度 $f(x')$ と現在の状態 x の適応度 $f(x)$ との差分 $\Delta f_{x_i x'_i} = (f(x) - f'(x))$ 、および温度パラメータ t_k によって、確率 $\exp(-\Delta f_{x_i x'_i}/t_k)$ で近傍状態へ遷移する。

各温度で n 回近傍探索を行い、すべての個体を保存し、その中で最も良好な解を、現在の集団の最小解に入れ替える。そしてある程度の近傍探索を行った後にクーリングを行う。クーリングは第 k 世代の温度 t_k を与えて、次の世代の温度 t_{k+1} を返す処理のことである。式(13)のように指数型のアニーリングがよく使われる。

$$t_{k+1} = \gamma \times t_k \quad (13)$$

SA法の初期段階では、初期温度 t_0 を十分高温状態に設定する。ここでは、 $t_0 = 1000$ 、冷却率 $\gamma = 0.95$ と設定する。

4. シミュレーション

シミュレーション実験における、ネットワークトポロジは、ノード数23のネットワーク[3]を使用し、提案手法と従来手法[7][8]の結果を比較、検討する。ノード数23のネットワークモデルを図2に示す。送信ノードは1、受信ノードは{5, 10, 15, 20, 23}である。各リンクにおいて3つのパラメータ(Delay, Bandwidth, Cost)が定義される。

提案手法の性能評価を行うために、収束性能及び最適解へ到達の成功率についてシミュレーションを行う。初期集団population size = 10、交叉確率 $p_{c1} = 0.9, p_{c2} = 0.6$ 、初

温度 $t_0 = 1000$, 冷却率 $\gamma = 0.95$.

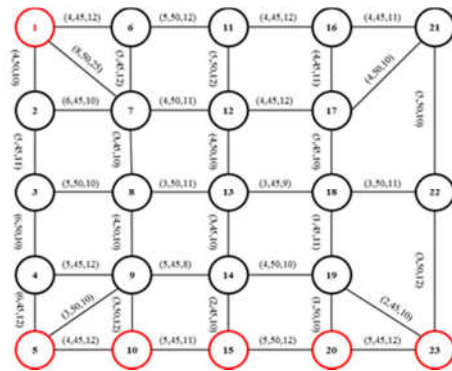


図 2 23 ノードのネットワーク

QoS制約条件: $\Delta B = 40$, $\Delta D = 25$, $\Delta DJ = 5$ に設定し実験を行った.

図2のネットワークにおいて各手法を適用したときの収束特性のグラフを図3 に示す.

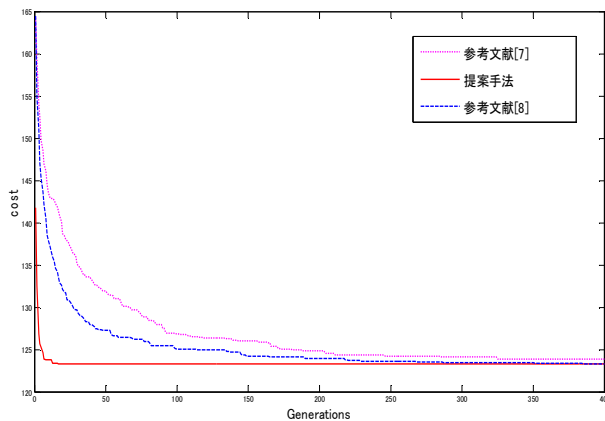


図 3 各世代までの最小コスト

図 3 によって, 提案手法が従来手法より最適解への収束速度が向上することが示された. 提案手法によって得られた最適なマルチキャストツリーが図 4 に示される.

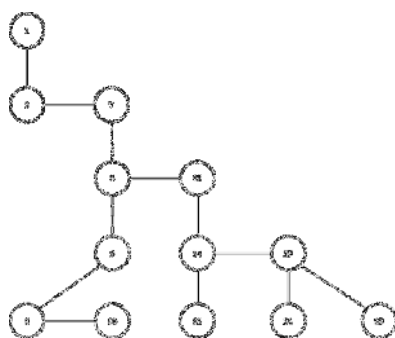


図 4 最小コストマルチキャストツリー

表 1 にそれぞれ手法の最適解へ到達成功率が示す. 結果から, 提案手法が従来手法より最適解への到達成功率が高いことがわかった.

表 1 最適解へ到達の成功率

	提案手法	参考文献[7]	参考文献[8]
$\Delta B = 40$, $\Delta D = 25$, $\Delta DJ = 5$	80%	72%	76%

5. 結論

今回はQoSマルチキャストルーティングにおいて, SA法を取り入れたGAを用いて, シミュレーションを行った. シミュレーション結果から, 提案手法が従来手法より収束性能向上を示している. SA法の導入することで, 局所解から抜け出す役割を果たしていると考えられる.

謝辞

この研究を遂行するにあたり, 終始適切な助言を賜り, また丁寧に指導して下さいました李磊教授に深く感謝いたします.

また, 李磊研究室の皆様にも, 多くのご協力と討論の機会をいただきました. この場をお借りして, 深く御礼を申し上げます.

参考文献

- [1] Srinivas M., Patnaik M., "Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 24, No. 4, pp. 656-667, (1994)
- [2] Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E., "Equation of calculations by fast computing machines", The Journal of Chemical Physics, Vol. 21, No. 6, pp. 1087-1092, (1953)
- [3] Sun, J., Fang, W., Wu, X.J., "QoS multicast routing using a quantum-behaved particle swarm optimization algorithm", Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol.24, pp.123-131, (2011)
- [4] 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, (1993)
- [5] Holland J.H., "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Ann Arbor, The University of Michigan Press, (1975)
- [6] Zhang K., Wang H., Feng Y.L., "Distributed multicast routing for delay and delay variation-bounded Steiner tree using simulated annealing", Computer Communications, Vol.28, No.11, pp. 1356-1370, (2005)
- [7] Liu J. M., Liu G.Y., "Algorithm of QoS Multicast Routing Based on Genetic Simulated Annealing Algorithm", International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM), (2010)
- [8] Peng, B., Li, L., "A Method for QoS Multicast Routing Based on Genetic Simulated Annealing Algorithm", International Journal of Future Generation Communication and Networking, Vol. 5, No. 1, pp. 43-60, (2012)