

シュタイナー配送木の採用によるネットワークコスト削減の予測

高野正次 片桐雅二 杉村利明
NTTヒューマンインタフェース研究所

本稿では、情報配送のためにシュタイナー木を利用したネットワークコストを可能な限り小さく抑制する経路制御方式を考える。現実のネットワークでは最短経路の制御方式が広く用いられているので、これら2つの経路制御方式が混在し、我々の方式は少数派であるようなモデルにおいてシミュレーション実験を行った。結果は、パラメータの変化に関わらずネットワークコストが減少し、本方式の有効性が示された。

An Estimation of Decrease in Network Cost by Steiner Delivery Tree

Shoji Kono Masaji Katagiri Toshiaki Sugimura
NTT Human Interface Laboratories

In this paper, a routing algorithm for information delivery is considered that holds network cost as small as possible by using Steiner tree. Since the shortest path routing (distance-vector routing) dominates the real networks, simulation experiments were performed in which these two routings were mixed together: ours is minor one. The result shows that the network cost decreases considerably regardless of varying the parameters.

1. はじめに

情報の配送をより効率的に行う技術としてマルチキャストが研究されてきた。この技術は、リンクにデータが重複して流れる無駄をなくすことを実現している。その最も有力な実装がIPマルチキャストであるが、その配送経路は情報発信源を根とする最短経路木として計算を行う。例えば、DVMRPあるいはMOSPFFなどである。

本稿では、ネットワークコストを最小にする配送経路の木構造であるシュタイナー木を構成するような経路制御方式を考えるが、既存の経路制御方式が最短経路木にもとづいているというネットワークの実態に合わせて、2つの経路制御方式の混在状況、とくにシュタイナーの経路制御方式が少数派であるような状況についてシミュレーション実験を行った。その結果、シュタイナーの経路制御方式にしたがうゲートウェイルータがネットワーク上に20%程度以上の密度で一様分布する場合には、最短経路の場合よりも小さいコストの配送経路を構成することができ、すべてのゲートウェイルータで行う場合には、最短経路木と比較してネットワークコストがおよそ3割減少した配送経路を構成することができた。実装についてはまだ未解決の問題もあるが、利用状況によっては本経路制御方式により情報配送のネットワークコストを減らす効果を期待できると考えている。

2. シュタイナー型配送方式

本節では、ネットワーク帯域をさらに効率よく利用するためにシュタイナー木を配送経路として採用する情報の配送方式を従来の最短経路の木と比較して検討する。前者の方式を、シュタイナー型配送方式と呼ぶことにする。

簡単な例を示す。図1のネットワークにおいて、情報発信源をノード0として、ノード1, 2, 5, 7, 9へデータを配送する場合を考える。リンクは2つのノードの間に定義され正のこ

ストをもち、配送のネットワークコストは配送に使用するリンクのコストの総和として定義される。

最短経路木による配送とは、各配送先ノードへの経路として情報発信源からその配送先へ到達する最短経路を利用する配送である(図2)。また、ネットワークコストが最小となる配送とは、情報発信源から全ての配送先ノードへ到達するという条件を満足する配送の中で、ネットワークコストが最小となる配送のことである(図3)。当然ながら、ネットワークコスト最小の配送の方が、最短経路の配送よりも一般にコストが小さい。この例では、最短経路木による配送経路とネットワークコスト最小木による配送経路のネットワークコストは、それぞれ24と18である。第1の興味はこの差がどの程度かということである。

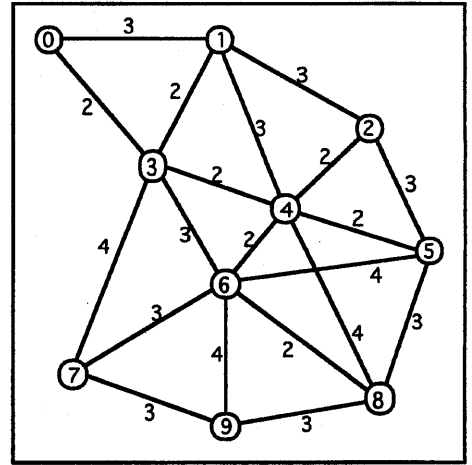


図1

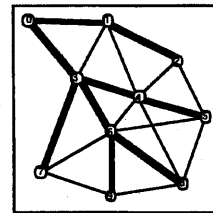


図2

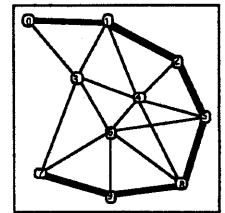


図3

一般に、ネットワークコスト最小木を計算することは容易ではない。この問題はグラフ理論においてシュタイナー問題と呼ばれているが、実際的な計算時間内に最小解が見つからないこと、つまり、NP困難であることがよく知られている。しかし、半導体の集積化などで発生する重要な問題であるために、非常によく研究され、たくさんの発見的アルゴリズムが報告されている。高速な発見的アルゴリズムにより見つけられるシュタイナー型の配送経路のコストが、どの程度最短経路木のコストよりも小さくなるか、これが第2の興味である。

さらに、次のような興味もある。通常、ネットワークで利用されている経路制御方式は最短経路にもとづいている。これは、通信の過半をしめる1対1のユニキャスト通信に最も適合している。したがって、情報配送のネットワークコストを最小とするようなシュタイナー型の経路を選択することは、現在のネットワーク上のゲートウェイやルータ上ではできないし、将来においてもおそらく一般的に期待できない。ネットワーク上のすべてではなく一部のゲートウェイやルータでしかシュタイナー型の配送経路を選択できない場合には、当然、すべてで選択できる場合よりネットワークコストを小さくすることはできない。これは、4節で説明するように、シュタイナー型の配送経路を選択できないゲートウェイやルータではユニキャストの仕組みを利用することになるが、経路の分岐ができないので経路上に配送する情報の重複が生じて、ネットワークコストが余計にかかるからである。そのような場合に、どの程度最短経路木のコストより小さいかが第3の興味である。

以上のような興味に対して解答を得るため、シミュレーション実験を行って比較することにした。ただし、1番目と2番目についてはたくさんの文献・報告があるが、3番目の点に関してはこれまでに報告がなかった。そこで、実験の目的は、ネットワーク上のゲートウェイやルータの一部においてだけでしかシュタイナー型の配送経路を利用できない状況のできるだけ詳細なシミュレーション評価を行うことにある。以下、本稿ではシュタイナー型の経路制御方式を利用できるゲートウェイやルータをシュタイナー型ノードと呼ぶことにする。

3. アルゴリズム

3節では、シュタイナー型の配送経路の木を求める発見的アルゴリズムについて説明する。シミュレーション実験では、複数の発見的アルゴリズムを試した。これは、各アルゴリズムのパフォーマンスを比較したり、ネットワークの条件に合わせてパフォーマンスの良いアルゴリズムを選択的に利用することができるようにするためである。

シュタイナー問題は、以下のように記述される。

(入力) $G=(V,E,d)$, S , R

(出力) シュタイナー木: T

ただし、無向グラフ: G , ノードの集合: V , リンクの集合: E , リンクのコスト関数: d

グループの集合: S [情報発信源: s と配送先の和集合]

シュタイナー型ノードの集合: R

まず、基本アルゴリズムを説明する。このアルゴリズムは、シュタイナー問題の許容解を見つけるためのよく知られた素朴なアルゴリズムのバリエーションである。

[基本アルゴリズム]

(STEP-1) S の完全グラフ K_S をつくる

(STEP-2) K_S 上に S のミニマル完全木 T_K をつくる

(STEP-3) T_K を G 上に戻し、部分グラフ \hat{G} をつくる

(STEP-4) \hat{G} 上に S のミニマル完全木 $K_{\hat{G}}$ をつくる

(STEP-5) $K_{\hat{G}}$ から余分な枝を切り T を得る

図1のネットワークにおいて

$S = \{0,1,5,7,9\}$, $s = 0$, $R = \{3,6,7,8\}$

である問題を A とすると、図4の太線である T が配送経路として得られる。ここで、四角いノードはシュタイナー型ノードであり、丸いノードはシュタイナー型でない。また、ノードの枠線が太いノードは、配送のグループ S に含まれるノードである。基本アルゴリズムは、シュタイナー型のノードの集合 R を認識して経路制御をするわけではない。

次に、迂回アルゴリズムを説明する。迂回アルゴリズムは、基本アルゴリズムと (STEP-1) が異なるだけであるが、これにより積極的にシュタイナー型のノードを経由する配送経路を見つける傾向をもつ。問題 A の場合、図5のような T を得る。

[迂回アルゴリズム]

(STEP-1) S と R の和集合 $S \cup R$ の完全グラフをつくる

(STEP-2以降) 基本アルゴリズムと同じ

ここで、基本アルゴリズムも迂回アルゴリズムもどちらも反復することなく終了する。通常、このような発見的なアルゴリズムで、できるだけ良い解を見つけようとする場合には、得た解を再びアルゴリズムに入力することを繰り返して、漸近的に最適解に近づけていくことが多い。しかし、反復するアルゴリズムでは最適な反復回数あるいは停止の判別条件が容易ではないことと、分散環境においての実装が格段に難しくなるという理由から、最短経路木によるコストとの差を比較するのは、反復のないアルゴリズムで見つけられる解が現実的でふさわしいと考えた。

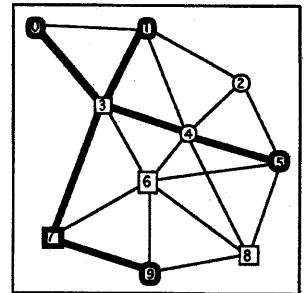


図4

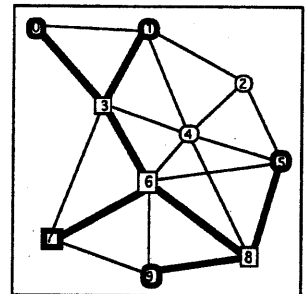


図5

[反復アルゴリズム]

基本アルゴリズムと迂回アルゴリズムで見つけた木のコストの小さい方をとり、その枝を確率的に振動させることにより、より小さいコストをもつ配送経路を見つけようとするアルゴリズムである。

実験では、反復アルゴリズムを利用してネットワークコストの小さい配送経路も計算した。これを実際に計算可能な配送の最小コストとみなし、基本・迂回の両アルゴリズムで見つけた配送経路のコストと比較するためである。当然、反復アルゴリズムは、基本・迂回の両アルゴリズムよりもコストの小さい配送木を見つけることができるが、反復回数と比べて配送コストの減少が小さければ、それだけ最初の配送経路の質が良いことになり、つまり、最初のアルゴリズムが優秀であることになる。逆に、反復回数に比べて配送コストの減少が大きければ、最初のアルゴリズムが悪いことが判断できる。

4. シミュレーションモデルと実験

シミュレーション実験の目的は、前節の各アルゴリズムが見つける配送木のコストと最短経路木のコストを比較することであるが、とくに前述した3番目の興味に関して注目する。

シュタイナー型の配送経路方式によって、情報配送のネットワークコストを従来よりも小さくすることが実現できるとしても、グローバルなネットワーク上のすべてのゲートウェイやルータでこの方式にしたがう経路制御を期待することは不可能で、むしろ特殊でマイナーな経路制御として利用できるゲートウェイも散在するような状況を想定するのが妥当であろう。なぜならば、通信はユニキャストの割合が最も多く、それには最短経路の方が適している上に、シュタイナー型の経路制御に限らず、ネットワーク上に新しい方式を一斉に不備なく導入することはもはや不可能だからである。したがって、そういう状況において、情報配送のネットワークコストを現状よりも減少させる効果が予想できることが望ましい。

そこで、本稿でシュタイナー型ノードと呼んでいるシュタイナー型の経路制御方式も利用できるノードがネットワーク上に存在する密度を変化させてシミュレーションを行い、アルゴリズムとネットワークコストの関係がどのように変化するか実験的に予測した。

すべてのノードがシュタイナー型とは限らないために、本方式の配送コストはシュタイナー木のネットワークコストと一致しなくなる。シュタイナー問題では配送経路の分岐はどのノードでも同じようにできる前提であるが、本方式ではシュタイナー型のノードのみ分岐ができるからである。分岐すべきノードがシュタイナー型でない場合には、最寄りのシュタイナー型ノードにおいて分岐を、すなわち配送される情報のコピーを行なう。これは、同一の情報が重複して転送されるリンクが生じることを意味する。また、重複して転送が生じるリンクのコストは転送量に応じて全体の配送コストに加算する。図6の例はノード7がシュタイナー型ノードでない点だけが図4と異なる。この場合、ノード3とノード7の間のリンクには、ノード3からノード7への配送データとノード3からノード9への配送データが重複して転送されるので、リンクのコストは2倍して配送コストへ加算される。

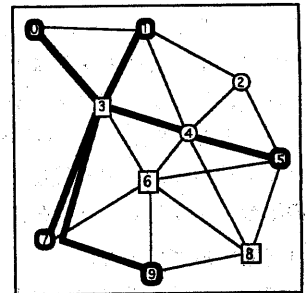


図6

[グラフのランダムな生成条件]

シミュレーション実験において使用するネットワークに対応するグラフは次のようにして生成した。ノードは、正方形の領域を下敷きにして一様分布にしたがいランダムに発生させる。この正方形の辺の長さは100で、生成するノード数は100とした。リンクのコスト関数 d は、リンクが繋ぐノード

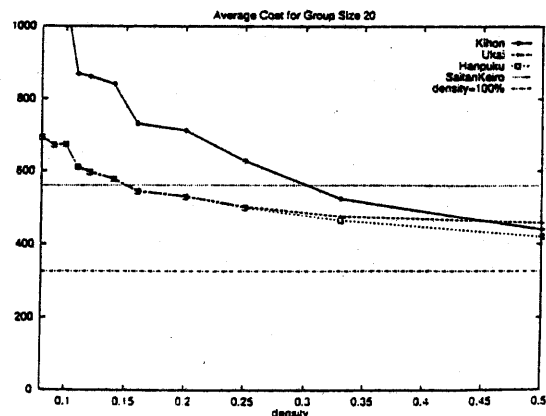
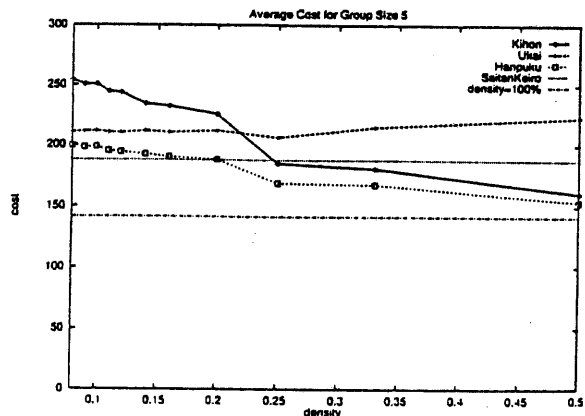
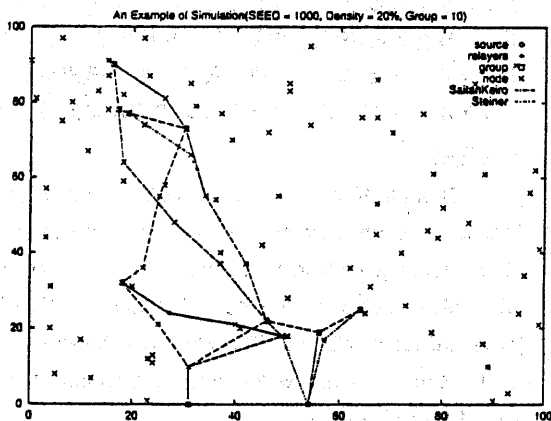
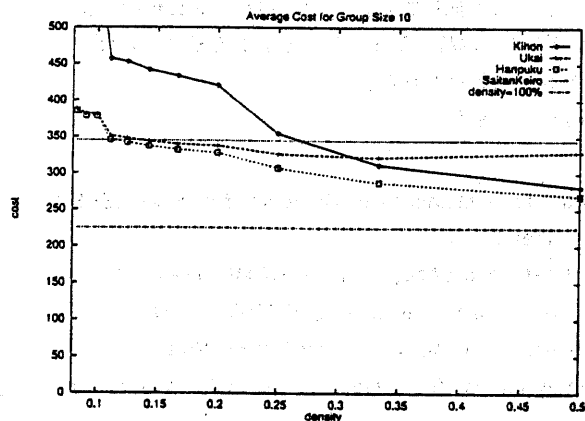
間のユークリッド距離とした。リンクは、下敷きとした正方形領域の一辺の $\frac{1}{5}$ より近いすべてのノードとの間に存在するものとした。ノードの次数については本稿では制約を置いていない。

[シミュレーション実験]

グループメンバーの数が5, 10, 20のときに、シュタイナー型ノードの密度を変化させた。各アルゴリズムの各パラメータに対して、それぞれ10000回ネットワークをランダムに生成し、配送コストの平均を得た。結果をグラフ(密度8%~50%)に示す。

シミュレーション実験の結果は、次のようにまとめることができる。

- (1) シュタイナー型ノードのネットワーク上に存在する密度が20%以上では、シュタイナー型の配送経路(基本・迂回・反復アルゴリズムによる最良のもの)が、最短経路よりもコストで小さい。すべてのノードがシュタイナー型ときには、約3割程度小さいコストを期待できる。
- (2) シュタイナー型ノードの密度によって発見的アルゴリズムの性能が異なる。密度が高いときは基本アルゴリズム、低いときは迂回アルゴリズムの方が優秀である。
- (3) 反復アルゴリズムで見つけることのできる配送経路のコストは、基本アルゴリズムあるいは迂回アルゴリズムで見つけられる配送木のコストよりも数%程度しかコストを改善しない。
- (4) 以上の傾向は、グループの大きさに関わらない。
- (5) グループメンバー数が5のとき、迂回アルゴリズムはパフォーマンスが悪く最短経路よりも悪い配送経路しか見つけられない。また、このとき反復アルゴリズムによるコストの改善効果が大きい。



実験結果(2)は次のような理由によるものと考えられる。基本アルゴリズムは経路制御においてシュタイナー型ノードを意識していない。このため途中で経由するノードがシュタイナー型ノードである確率によって、リンク上のデータ重複の多少が左右される。これに対して迂回アルゴリズムはシュタイナー型ノードを意識しており、積極的にこれを経由しようとする。したがって、特にシュタイナー型ノードの密度が少ない時には、その効果が顕著となる。しかしながら、シュタイナー型ノードの密度が大きい時には、不必要なシュタイナー型ノードまで経由してしまう傾向が現れる。

実験結果(5)については次のように考える。配送におけるグループ S のサイズが小さいと、迂回アルゴリズムの(STEP-1)でつくられる和集合 SUR の完全グラフにおいて、シュタイナー型ノードの集合 R の占める割合が大きくなり、不必要なシュタイナー型ノードまで経由する傾向がとくに顕著となり、配送コストの低減ができなくなる。

5. まとめ

本稿では、シュタイナー配送木を採用した情報配送方式を提案した。シミュレーション実験により、配送のネットワークコストを減少させることが予測できた。

マルチキャストは、情報を効果的に配送する技術としてリアルタイム映像配信などへの応用が期待されていて、とりわけIPマルチキャストが有力であるが、いくつかの問題が指摘されている。例えば、すべてのルータをマルチキャストルータにすることが現実的に不可能であることや、リライアブルな配信への適応性が低いこと、帯域制御やQoSコントロールといったメディア処理などの問題である。これに対して、サーバベースに情報の配信を行おうとする場合には、これらの問題への処置がずっと容易になるという利点がある。本稿のシュタイナー型の配送方式は、サーバベースに情報を配信する場合の経路制御方式として利用することが可能であり、本稿のシミュレーション実験によれば、IPマルチキャストより高い配送効率を達成可能であることが示された。

今後はインプリメンテーションの実現に向けて検討していきたい。

参考文献

- [1] K. Bharath-Kumar and J. M. Jaffe: Routing to Multiple Destinations in Computer Networks, IEEE Transactions on Communications, vol. com-31, No.3, March 1983.
- [2] S. Deering: Multicast Routing in Internetworks and Extended LANs, ACM SIGCOMM 1993.
- [3] J. Moy: Multicast Routing Extensions for OSPF, Comm. of the ACM, Aug 1994/Vol.37, No.8
- [4] H Eriksson: MBONE: The Multicast Backbone, Comm. of the ACM, Au 1994/Vol.37, No.8
- [5] L. Kou, G. Markowsky, and L. Berman: A Fast Algorithm for Steiner Trees, Acta Informatica 15, 141-145(1981)