

# アドホックネットワークにおける 最大流量算出時の流量増加経路探索手法

辰野 友祐紀<sup>†1</sup> 松垣 博章<sup>†1</sup>

本論文では、無線マルチホップネットワークにおいて、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの最大流量を求める手法について議論する。これまでに、有線ネットワークを対象としたフォード・ファルカーソンのアルゴリズムを無線信号が相互に干渉する無線マルチホップネットワークに適用可能となるように、容量を通信リンクではなくノードに対して定め、晒し端末と隠れ端末の関係に基づいて流量増加路を規定する方法を明らかにした。本論文では、単一の流量増加路にループを含むことを回避することで流量増加路の探索オーバーヘッドを削減し、相互に交差する流量増加路に含まれる無線リンクに与えた流量を局所的に修正することで総流量を増加させる手法を提案する。また、これらに基づく最大流量算出アルゴリズムを構成し、シミュレーション実験によって算出される最大流量とその計算時間を従来手法と比較することで提案手法の有効性を示す。

## Augmenting Path Detection for Achieving Maximum Flow in MANETs

YUKI TATSUNO<sup>†1</sup> and HIROAKI HIGAKI<sup>†1</sup>

This paper discusses a method to achieve the maximum flow from a source wireless node to a destination one in a wireless multihop network. The authors have been proposed modified requirements for an augmenting path in the Ford-Fulkerson's algorithm for a wired network to be adapted to a wireless multihop network. Due to interferences among wireless signals transmitted from neighbor wireless nodes, it is impossible for the original algorithm to be applied to a wireless multihop network. Hence, requirements for an augmenting path in a wireless multihop network have been determined based on effects on exposed and hidden nodes by assignment of capacities not to wireless links but to wireless nodes. This paper proposes methods to avoid loops in an augmenting path. They contribute to reduce computational complexity for detection of augmenting paths and to achieve more flow by localized re-assignment of flow in wireless links around an intersection wireless node of two augmenting paths. Based on

the modified requirements and loop avoidance and clearing methods, we design an extended Ford-Fulkerson's algorithm applicable to a wireless multihop network. Simulation experiments result that the proposed method achieves more flow with shorter calculation time than the conventional method.

### 1. はじめに

無線マルチホップネットワークにおいて、マルチメディア通信を実現するためには、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの複数の無線マルチホップ配送経路の各無線リンクに流量を予約することによって、要求する総流量を配送可能とすることが求められる。有線ネットワークを対象とした最大流量計算手法であるフォード・ファルカーソンアルゴリズム<sup>2)</sup>では、流量増加路を順次検出し、配送経路の各有線リンクに流量を与える。したがって、このアルゴリズムを無線マルチホップネットワークに適用可能となるように拡張することによって、要求する総流量が配送可能となるまで流量増加路を順次検出することが可能となる。無線マルチホップネットワークでは、晒し端末問題と隠れ端末問題により、各無線リンクに独立に流量を与えることができない。ひとつの無線リンクに流量を与えることにより、他の無線リンクに割当て可能な流量が変化する。これまでに著者らは、無線マルチホップネットワークにおける流量増加路を定めるために、容量を無線ノードに割当てる手法とこの割当てに基づいた流量増加路の満たすべき条件を明らかにした。フォード・ファルカーソンアルゴリズムでは、流量増加路にループを含まない。これは、無線マルチホップネットワークにおいても満たすべき条件であり、本論文ではこれを充足するための手法を考案する。また、複数の流量増加路によって結果的にループが形成される場合があり、フォード・ファルカーソンアルゴリズムでは、限定的な回避手法が導入されている。無線マルチホップネットワークでは、流量増加路が互いに交差することでループが形成されることを示し、局所的な流量修正によってこの問題を解消する手法を示す。また、この流量増加路条件とループ回避手法によって、無線マルチホップネットワークに適用可能な拡張フォード・ファルカーソンアルゴリズムを構成する。このアルゴリズムは、本論文で提案するループ回避手法によって流量が削減される問題を解消し、計算時間を短縮する。

<sup>†1</sup> 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス学専攻  
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

## 2. 従来手法

### 2.1 フォード・ファルカーソンのアルゴリズム

フォード・ファルカーソンアルゴリズムとは、有線ネットワーク  $\mathcal{NT}' := \langle \mathcal{N}', \mathcal{L}' \rangle$  がノード  $N_i$  の集合  $\mathcal{N}' := \{N_i\}$  とノード  $N_i$  から  $N_j$  へと接続する有線リンク  $|N_i N_j\rangle$  の集合  $\mathcal{L}' := \{|N_i N_j\rangle\}$  から構成され、各有線リンク  $|N_i N_j\rangle$  に容量  $c(|N_i N_j\rangle)$  が与えられているとき、送信元ノード  $N^s$  から送信先ノード  $N^d$  まで複数のマルチホップ経路によって配送可能な最大流量を算出する手法である。最大流量を算出する問題は、各有線リンク  $|N_i N_j\rangle$  の流量を  $f(|N_i N_j\rangle)$  とするとき、以下のように与えられる。

[最大流量問題]

すべての  $|N_i N_j\rangle \in \mathcal{L}'$  について  $f(|N_i N_j\rangle) \leq c(|N_i N_j\rangle)$  かつ、すべての  $N_i \in \mathcal{N}' - \{N^s, N^d\}$  について  $\sum_{|N_k N_i\rangle \in \mathcal{L}'} f(|N_k N_i\rangle) = \sum_{|N_i N_j\rangle \in \mathcal{L}'} f(|N_i N_j\rangle)$  のもとで、 $\sum_{|N^s N_j\rangle \in \mathcal{L}'} f(|N^s N_j\rangle) = \sum_{|N_k N^d\rangle \in \mathcal{L}'} f(|N_k N^d\rangle)$  の最大値を求める。□

フォード・ファルカーソンアルゴリズムでは、送信元ノード  $N^s$  から送信先ノード  $N^d$  への流量を増加させるマルチホップ配送経路を探索する。ここで、マルチホップ配送経路の最大流量は、検出経路に含まれる各有線リンクの最小容量で定められる。この最大流量が正であるマルチホップ配送経路は、 $N^s$  から  $N^d$  への流量を増加させる経路であり、流量増加路と呼ぶ。フォード・ファルカーソンアルゴリズムでは、以下の条件を満足する流量増加路を順次検出し、検出経路の最大流量を各有線リンクの容量から減ずることを流量増加路が検出不能となるまで繰返すことによって、 $N^s$  から  $N^d$  への複数のマルチホップ配送経路を用いた最大流量とそれを実現する各有線リンクへの割当て流量を算出する。

[有線ネットワークにおける流量増加路]

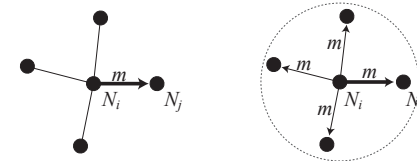
以下の条件を満足するマルチホップ配送経路  $R = \{N_0 \dots N_n\}$  は流量増加路である。

- すべての  $|N_i N_{i+1}\rangle \in R$  について  $c(|N_i N_{i+1}\rangle) > 0$  または  $f(|N_{i+1} N_i\rangle) > 0$  □

### 2.2 拡張アルゴリズム

フォード・ファルカーソンアルゴリズムでは、ノード  $N_i$  からノード  $N_j$  への各有線リンク  $|N_i N_j\rangle$  の流量が他の有線リンクの容量に影響を与えない、すなわち、各有線リンクの容量が他の有線リンクの流量に対して独立であることを前提としている。そのため、最大流量は各有線リンクの容量によって制約されている。これに対して、無線マルチホップネットワークでは、無線ノード  $N_i$  から隣接無線ノード  $N_j$  への通信が  $N_i$  の無線信号到達範囲に

含まれるすべての隣接無線ノード  $N \in \text{Nei}(N_i)$  へ到達するブロードキャストによって実現される。このため、 $N_i$  から  $N_j$  へ通信は、無線リンク  $|N_i N_j\rangle$  の流量のみではなく、すべての隣接無線ノード  $N$  との間の無線リンク  $|N_i N\rangle$  の流量を増加させることとなる(図1)。したがって容量は、各無線リンクに対して与えられるのではなく、各無線ノードに対して与えられ、最大流量は各無線ノードの容量によって制約される。



有線モデルネットワーク 無線モデルネットワーク  
図1 有線ネットワークモデルと無線ネットワークモデル

無線ノード  $N_i$  から隣接無線ノード  $N_j$  への通信は、 $N_i$  の容量を削減する。また、 $N_i$  は隣接無線ノード  $N_j$  との送受信を同時に行なうことができないことから、 $N_j$  から隣接無線ノードへの通信は、 $N_i$  の容量を削減する。さらに、無線ノード  $N$  からその隣接無線ノード  $N^t \in \text{Nei}(N)$  への通信に対して  $N_i$  が晒し端末となる場合には、この通信と同時に  $N$  以外の隣接無線ノードから  $N_i$  への通信を行なうことはできない。同様に、隣接無線ノード  $N^f \in \text{Nei}(N)$  から  $N$  への通信に対して  $N^f$  と  $N_i$  が互いに隠れ端末となる場合には、この通信と同時に  $N_i$  から隣接無線ノードへの通信を行なうことはできない。以上により、各無線ノードの容量を  $c(N_i)$ 、無線ノード  $N_i$  から隣接無線ノード  $N_j \in \text{Nei}(N_i)$  への無線リンクの流量を  $f(|N_i N_j\rangle)$  とすると、無線マルチホップネットワークにおける  $N^s$  から  $N^d$  への最大流量を求める問題は、以下のように与えられる。

[無線マルチホップネットワークでの最大流量問題]

$N \in \text{Nei}(N_i) \cup \{N_i\}$  または  $N' \in \text{Nei}(N_i) \cup \{N_i\}$  を満足するすべての  $|NN'\rangle$  について  $\sum_{|NN'\rangle} f(|NN'\rangle) \leq c(N_i)$  かつ、すべての  $N_i \in \mathcal{N}' - \{N^s, N^d\}$  について  $\sum_{|N_k N_i\rangle \in \mathcal{L}'} f(|N_k N_i\rangle) = \sum_{|N_i N_j\rangle \in \mathcal{L}'} f(|N_i N_j\rangle)$  のもとで、 $\sum_{|N^s N_j\rangle \in \mathcal{L}'} f(|N^s N_j\rangle) = \sum_{|N_k N^d\rangle \in \mathcal{L}'} f(|N_k N^d\rangle)$  の最大値を求める。□

ここで、フォード・ファルカーソンアルゴリズムに対して無線マルチホップネットワークに適用可能とする拡張を行なうために、上で述べた無線ネットワークモデルに基づいて、送信元無線ノード  $N^s$  から送信先無線ノード  $N^d$  への流量増加路となる無線マルチホップ配

送経路  $R$  の満たすべき条件を示す。

流量  $f$  の流量増加路  $R$  が定められた場合における、無線ノード  $N$  の容量  $c(N)$  の変化について検討する。上で述べたように、 $c(N)$  は、 $N$  を中継無線ノードとする無線マルチホップ配送経路および  $N$  の隣接無線ノードを中継無線ノードとする無線マルチホップ配送経路の容量を制約する。したがって、図 2 に示すように  $N = N_i \in R$  である場合には、晒し端末となる関係から  $N_i$  の容量  $c(N_i)$  は、無線リンク  $|N_{i-1}N_i\rangle$  の流量  $f$ 、無線リンク  $|N_iN_{i+1}\rangle$  の流量  $f$ 、無線リンク  $|N_{i+1}N_{i+2}\rangle$  の流量  $f$  だけ減少する。さらに、隠れ端末の関係から無線リンク  $|N_{i-2}N_{i-1}\rangle$  の流量  $f$  だけ減少することから、 $c(N) := c(N) - 4f$  である。

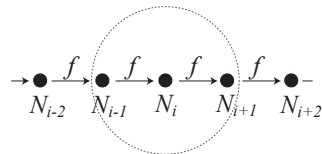


図 2 無線ノード容量の変化 ( $N \in R$  の場合)

一方、図 3 に示すように  $N \notin R$  かつ  $Nei(N) \cap R \neq \emptyset$  である場合には、晒し端末と隠れ端末の関係から  $Nei(N)$  および  $R$  に含まれる無線ノード  $N_i$  に接続する  $R$  に沿った無線リンクの流量だけ  $c(N)$  が減少する。すなわち、このような無線リンク数を  $l$  とするとき、 $c(N) := c(N) - lf$  である。

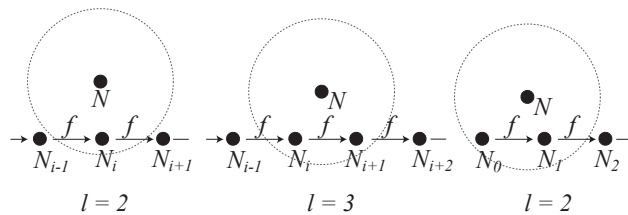


図 3 無線ノード容量の変化 ( $N \notin R$  の場合)

このような  $c(N)$  の変化から、無線マルチホップ配送経路  $R$  が流量増加路となる以下の自明な条件が導かれる。

[流量増加路条件 (1)]

無線マルチホップ配送経路  $R = \{N_0 \dots N_n\}$  において、すべての  $N_i$  について  $c(N_i) > 0$  であり、すべての  $N_i$  のすべての隣接無線ノード  $N \in Nei(N_i)$  について  $c(N) > 0$  であるならば、 $R$  は  $N^s (= N_0)$  から  $N^d (= N_n)$  への流量増加路である。□

次に、既に流量が与えられている無線リンク  $|N_{i+1}N_i\rangle$  の流量を削減することで流量増加路となる無線マルチホップ配送経路  $R := \{N_0 \dots N_n\}$  の条件について考える。図 4 は、流量  $f'$  の無線マルチホップ配送経路  $R'$  が存在するとき、流量  $f$  の無線マルチホップ配送経路  $R$  が流量増加路となる場合を示している。ここで、無線リンク  $|N_iN_{i+1}\rangle \in R$  かつ  $|N_{i+1}N_i\rangle \in R'$ 、 $f(|N_{i+1}N_i\rangle) = f' \geq f$  である。

$R$  に流量  $f$  を与えることによって、無線リンクの流量  $f(|N_jN_{j+1}\rangle)$  ( $j \neq i$ ) は  $f$  増加するが、 $f(|N_{i+1}N_i\rangle)$  は  $f$  減少する。したがって、 $N_j$  ( $j \leq i-2$  または  $j \geq i+3$ ) では  $N_j$  およびその隣接無線ノードに接続する無線通信リンクの流量の総和は  $4f$  増加する。すなわち、 $c(N_j) := c(N_j) - 4f$  となる。一方、 $N_{i-1}, N_i, N_{i+1}, N_{i+2}$  では、 $|N_{i+1}N_i\rangle$  の流量の減少により、自身およびその隣接無線ノードに接続する無線リンクの流量の総和は  $2f$  しか増加しない。すなわち、 $c(N) := c(N) - 2f$  ( $N = N_{i-1}, N_i, N_{i+1}, N_{i+2}$ ) である。したがって、 $R$  が流量増加路となるためには、 $R$  に含まれるすべての無線ノード  $N_i$  において  $c(N_i) > 0$  でなければならず、いずれかの  $N_i$  において  $c(N_i) = 0$  であるならば、 $R$  は流量増加路とはならない。

ただし、 $N_i$  を  $R$  に含まれる唯一の隣接無線ノードとする無線ノード  $N$  においては、無線リンク  $|N_{i-1}N_i\rangle$  の流量が  $f$  増加し、 $|N_{i+1}N_i\rangle$  の流量が  $f$  減少することから、自身およびその隣接無線ノードに接続する無線リンクの流量の総和は変化しない。すなわち、 $c(N) = 0$  であっても  $R$  を流量増加路とすることができる。同様に、 $N_{i+1}$  を  $R$  に含まれる唯一の隣接無線ノードとする無線ノード  $N'$  においても、無線リンク  $|N_{i+1}N_i\rangle$  の流量が  $f$  減少し、 $|N_{i+1}N_{i+2}\rangle$  の流量が  $f$  増加することから、自身およびその隣接無線ノードに接続する無線リンクの流量の総和は変化しない。すなわち、 $c(N') = 0$  であっても  $R$  を流量増加路とすることができる。

以上により、流量割当て済み無線リンクを逆方向に含む無線マルチホップ配送経路  $R$  が流量増加路となる条件は以下のように導かれる。

[流量増加路条件 (2)]

無線マルチホップ配送経路  $R = \{N_0 \dots N_n\}$  において、その流量を  $f > 0$  とするとき、 $f(|N_{i+1}N_i\rangle) = 0$  である無線リンク  $|N_iN_{i+1}\rangle$  の流量  $f(|N_iN_{i+1}\rangle)$  は  $f$  増加し、

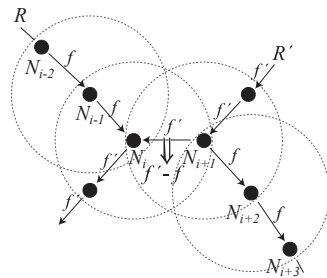
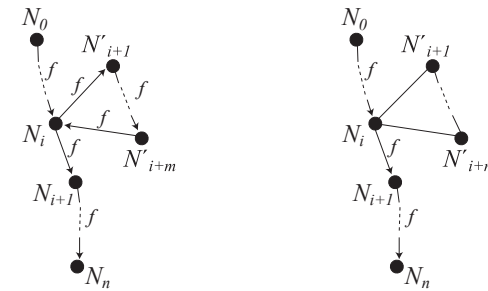


図 4 流量割当済の無線リンクを逆方向に含む流量増加路



(a) ループを含む配送経路 (b) ループを含まない配送経路

図 5 有線ネットワークにおける流量増加路とループ

$f(|N_{i+1}N_i|) > 0$  である無線リンク  $|N_iN_{i+1}|$  の流量  $f(|N_iN_{i+1}|)$  は  $f$  減少するとし,  $R$  に含まれる無線ノード  $N_i$  といずれかの  $N_i$  の隣接無線ノード  $N \in Nei(N_i)$  の容量減少量を評価する. 容量減少量が正であるすべての無線ノード  $N'$  の容量が正, すなわち,  $c(N') > 0$  ならば,  $R$  は流量増加路である. □

### 3. 提案手法

#### 3.1 経路内ループ回避

フォード・ファルカーソンのアルゴリズムにおける流量増加路は, 送信元ノードから送信先ノードまでのループを含まない経路である. 図 5(a) に示すように, 有線リンクで接続された中継ノード列からなる送信元ノード  $N_0$  から送信先ノード  $N_n$  までの配送経路  $\|N_0 \dots N_i N_{i+1} N_{i+m} N_i N_{i+1} \dots N_n\|$  がループ  $\|N_i N_{i+1} \dots N_{i+m} N_i\|$  を含んでおり, この経路に沿って流量  $f$  を与えることが可能である, すなわち, 経路のすべての有線リンクの容量が  $f$  以上であるとする. このとき, 図 5(b) に示すループを除いた経路  $\|N_0 \dots N_i N_{i+1} \dots N_n\|$  は,  $N_0$  から  $N_n$  までの配送経路であり, この経路に沿って  $f$  以上の流量を与えることが可能である. これは, この経路に含まれるすべての有線リンクの容量が  $f$  以上であるためである. また, 配送経路に沿って流量  $f$  を与えた結果, 経路に含まれるすべての有線リンクの容量が  $f$  だけ減少する. したがって, 両者の各有線リンクの容量を比較すると, 後者の方がループに含まれる有線リンクの容量が  $f$  だけ多くなり, これらの有線リンクを含む流量増加路を定め, より多くの流量を与えることができる場合がある.

無線マルチホップネットワークにおいては, 最大流量を得るための流量増加路における隣接無線ノード間の関係について論文<sup>3)</sup>で議論している. 図 6(a) に示すように, 流量増加路

となる無線マルチホップ経路  $\|N_0 \dots N_{i-1} N_i N_{i+1} \dots N_n\|$  に流量  $f$  を与えることが可能であり, 中継無線ノード  $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  が互いの無線信号到達範囲に含まれる場合を考える. このとき, 経路に含まれる各無線ノードおよびこれらの隣接無線ノードでは, 各ノードの無線信号到達範囲に含まれるあるいはこの境界を横切るこの経路に含まれる無線リンク数  $l$  をとすると, この経路に流量  $f$  を与えることによって容量が  $lf$  だけ減少することになる. すなわち, 各無線ノードの容量が  $lf$  以上であることが必要である. これに対して, 図 6(b) に示すように, 中継無線ノード  $N_i$  を除いた無線マルチホップ経路  $\|N_0 \dots N_{i-1} N_{i+1} \dots N_n\|$  は, 流量  $f$  を与えることが可能な流量増加路である. これは, もとの経路に含まれる無線ノードのうち  $N_i$  のみを隣接ノードに含む無線ノードは, この短縮経路に含まれる各無線ノードの隣接無線ノードとはならないため, 短縮経路に流量  $f$  を与えても容量が減少しない. また, 無線リンク  $|N_{i-1}N_i|$  および  $|N_iN_{i+1}|$  を無線信号到達範囲に含む無線ノード, すなわち,  $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  の両方に隣接する無線ノードでは, 容量の減少量が  $f$  だけ減少する. したがって, これらの無線ノードを中継ノードあるいは中継ノードの隣接ノードとして含む流量増加路を定め, より多くの流量を与えることができる場合がある. これは, 最大流量を得るための流量増加路においては, 中継無線ノード  $N_i$  の次ホップ無線ノード  $N_{i+1}$  は前ホップ無線ノード  $N_{i-1}$  の隣接無線ノードとはならないことを意味している. つまり, 流量増加路探索時には,  $N_{i+1}$  の探索対象は  $N_i$  の隣接無線ノードのうち,  $N_{i-1}$  の隣接無線ノードではないものとなる.

これを一般化したものが図 7 である. 図 7 では, 送信元無線ノード  $N_0$  から送信先無線

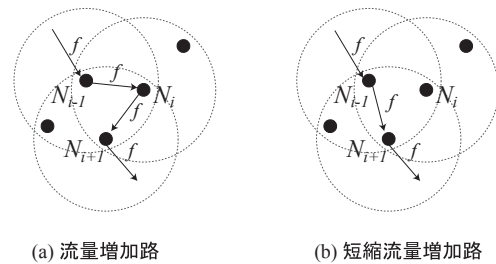


図 6 無線マルチホップネットワークにおける流量増加路 (1)

ノード  $N_n$  までの無線マルチホップ配送経路  $\|N_0 \dots N_i N'_{i+1} \dots N'_{i+m} N_{i+1} \dots N_n\|$  において、中継無線ノード  $N_{i+1}$  が  $N_i$  の隣接無線ノードとなっている。ここで、この経路が流量  $f$  を与えることが可能である流量増加路であるならば、経路上の無線ノードおよびこれらに隣接する無線ノードについて、各無線ノードの無線信号到達範囲に含まれるあるいはその境界を横切るこの経路に含まれる無線リンク数  $l$  に対して  $lf$  以上の容量が与えられている。ここで、 $N_i$  と  $N_{i+1}$  を無線リンク  $|N_i N_{i+1}|$  で短絡した短縮無線マルチホップ配送経路  $\|N_0 \dots N_i N_{i+1} \dots N_n\|$  は、 $N_0$  から  $N_n$  までの無線マルチホップ配送経路である。その経路に含まれる無線ノードおよびその隣接無線ノードは、もとの無線マルチホップ配送経路に含まれる無線ノードもしくはその隣接無線ノードである。また、無線信号到達範囲に含むもしくはそれを横切る短縮無線マルチホップ配送経路の無線リンク数  $l'$  は、各無線ノードにおいて、もとの無線マルチホップ配送経路の無線リンク数  $l$  よりも少なく、経路に沿って流量  $f$  を与えた場合の容量の減少量は  $(l - l')f$  だけ少ない。以上により、この短縮無線マルチホップ配送経路には、もとの無線マルチホップ配送経路よりも多くの流量を与えることが可能である場合がある。また、無線マルチホップ配送経路の短縮によって、より多くの流量増加路を定め、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの流量を拡大することが可能である。

無線マルチホップネットワークにおける最大流量算出過程においては、本節で述べた短縮可能とはならない流量増加路を順次検出することとする。短縮可能な無線マルチホップ配送経路  $\|N_0 \dots N_i N'_{i+1} \dots N'_{i+m} N_{i+1} \dots N_n\|$  では、前後ホップ無線ノード対ではない  $N_i$  と  $N_{i+1}$  が互いに隣接無線ノードとなっている。逆に、短縮可能とはならない流量増加路である無線マルチホップ配送経路  $\|N_0 \dots N_i N_{i+1} \dots N_n\|$  では、経路に含まれる中継無

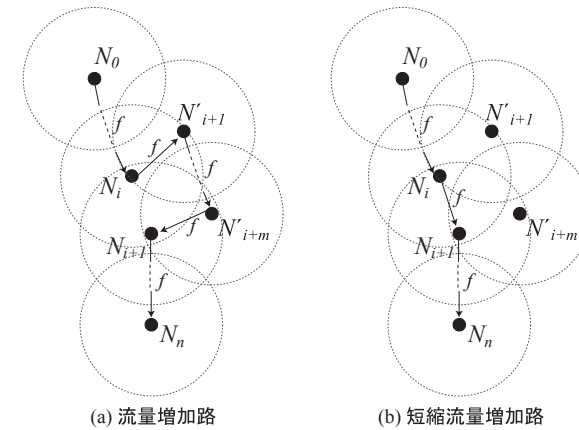


図 7 無線マルチホップネットワークにおける流量増加路 (2)

線ノード  $N_i$  は、前後ホップ中継無線ノードである  $N_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  以外に隣接する中継無線ノードを持たない。したがって、流量増加路の探索において中継無線ノード  $N_i$  の次ホップ無線ノード選択においては、 $N_i$  の隣接無線ノードのうち中継無線ノード  $N_j$  ( $0 \leq j < i$ ) に隣接しないもののみを探索対象とすればよい(図 8)。これによって、最大流量算出に要する時間を短縮することができる。また、フォード・ファルカーソンのアルゴリズムを無線マルチホップネットワークのために拡張したアルゴリズムを分散型で適用可能なラベリング法<sup>1)</sup>では、算出時間の短縮とともに通信オーバーヘッドの削減が実現される。

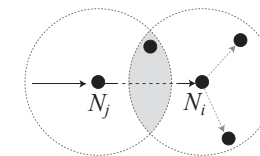


図 8 流量増加路探索における次ホップ無線ノードの選択

### 3.2 経路対ループ回避

前節では、単一経路に含まれるループを回避することで、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでのより大きな流量をより少ない計算量で算出する手法を提案した。フォード・ファルカーソンアルゴリズムでは、最大流量を順次検出される複数の流量増加路に与えら



れる流量の和として算出する．このとき，複数の経路によってループが形成されることで，得られる流量が削減されることを回避しなければならない．

図 9(a) では，有線ネットワークにおいて，複数の配送経路によってループが形成されている．送信元ノード  $N^s$  から送信先ノード  $N^d$  までの最大流量算出過程において，既に流量増加路である配送経路  $\|N_0(=N^s)\dots N_i\dots N_j\dots N_n(=N^d)\|$  が検出済みであり，その最大流量  $f$  が与えられているとする．このとき， $N^s$  から  $N^d$  までの別の流量増加路である配送経路  $\|N'_0(=N^s)\dots N'_i\dots N'_j\dots N'_n(=N^d)\|$  が検出され，その最大流量が  $f' < f$  であるとする．ここで， $N_i = N'_j$  かつ  $N_j = N'_i$  であるならば， $\|N_i\dots N_j = N'_i\dots N'_j\|$  はループ経路となる．そこで，図 9(b) に示すように，部分経路  $\|N_i\dots N_j\|$  の流量を  $f - f'$ ， $\|N'_i\dots N'_j\|$  の流量を 0 とすると， $N^s$  から  $N^d$  までの流量を  $f + f'$  のまま減少させることなく，ループに含まれる有線リンクの容量を増加させることができる．これによって， $N^s$  から  $N^d$  までのより多くの流量を算出することが可能となる．なお，フォード・ファルカーソンアルゴリズムでは，ループを形成する部分経路  $\|N_i\dots N_j\|$  と  $\|N'_i\dots N'_j\|$  が互いに反転経路である場合には， $\|N_i\dots N_j\|$  の各有線リンクの流量を削減することで流量増加路  $\|N'_0\dots N'_n(=N^d)\|$  を得ることにより，複数の流量増加路によるループ形成の問題の一部を解決している．

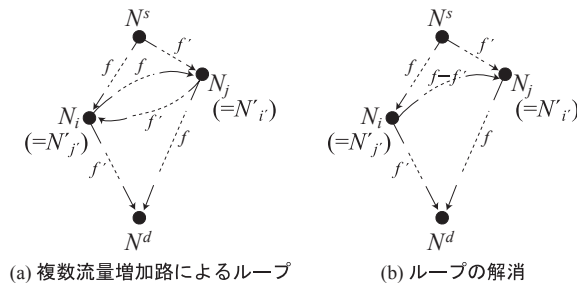


図 9 有線ネットワークにおける複数流量増加路によるループ

無線マルチホップネットワークにおいても，既検出流量増加路の部分経路の反転経路を含む流量増加路を検出する手法が論文<sup>4)</sup>で提案されており，その概要は 2.2 節に示した通りである．さらに，検出された流量増加路が既検出流量増加路と交わる場合においても，局所的なループが形成される．図 10(a) では，送信元無線ノード  $N^s$  から送信先無線ノード

$N^d$  までの流量増加路である無線マルチホップ配送経路  $\|N_0(=N^s)\dots N_i\dots N_n(=N^d)\|$  に流量  $f$  が与えられているとき，中継無線ノード  $N_i = N'_i$  で交差する別の流量増加路となる無線マルチホップ配送経路  $\|N'_0(=N^s)\dots N'_i\dots N'_n(=N^d)\|$  に流量  $f'$  を与える場合を示している．ここで， $f > f'$  であり，中継無線ノード  $N'_{i-1}$  と  $N_{i+1}$  が互いに無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードである場合には，無線リンク  $\|N'_{i-1}N_{i+1}\|$  の流量を  $f'$  とし，無線リンク  $\|N_iN_{i+1}\|$  の流量を  $f$  から  $f - f'$  へと削減することで，無線リンク  $\|N'_{i-1}N'_i\|$  の流量を 0 とすることができ，部分経路  $\|N'_{i-1}N'_iN_{i+1}\|$  におけるループを回避することができる (図 10(b))．さらに，中継無線ノード  $N_{i-1}$  と  $N'_{i+1}$  が互いに無線信号到達範囲に含まれる隣接無線ノードである場合には，無線リンク  $\|N_{i-1}N_i\|$  の流量を  $f$  から  $f - f'$  に削減し，無線リンク  $\|N_{i-1}N'_{i+1}\|$  の流量を  $f'$  とすることで，無線リンク  $\|N'_iN'_{i+1}\|$  の流量を 0 とすることができ，部分経路  $\|N_{i-1}N'_iN'_{i+1}\|$  におけるループを回避することができる (図 10(c))．このように，互いに交差する流量増加路が検出された場合には，局所的な流量修正によってループを回避し，各無線ノードの容量を増加することによって，より多くの流量増加路の検出を可能とし， $N^s$  から  $N^d$  までの流量を増加することが可能である場合がある．

### 3.3 最大流量算出アルゴリズム

2 章で述べた流量増加路の条件とその最大流量の算出手法および 3 章で提案したループ経路回避手法を組み合わせることによって，フォード・ファルカーソンのアルゴリズムを無線マルチホップネットワークへ適用可能な拡張手法が構成される．ここでは，送信元無線ノード  $N^s$  から送信先無線ノード  $N^d$  までの最大流量算出において，流量増加路を深さ優先探索するための再帰関数  $DFS()$  を図 11 に示すように定義している．現ホップ無線ノード  $N^c$  を送信元無線ノード  $N^s$  から隣接無線ノードへと順次変更し，送信先無線ノードに到達したならば，検出経路が流量増加路の条件を充足するかを検証する．流量増加路である場合には，その最大流量を算出し，経路上の無線リンクの流量を更新するとともに，経路上の無線ノードおよびその隣接無線ノードの容量を更新する．また，3.2 節で述べたように，検出経路が既検出経路と交差する場合には，経路を修正することによって流量を減らすことなく容量を増加させることができることがある．このための補正を行なう．なお，無線マルチホップネットワークでは，3.1 節で述べたように既に経路に含まれている無線ノードの隣接無線ノードを経路に含むことはできない．そのため， $N^c$  の次ホップ無線ノードがその次ホップ無線ノードとして選択することができないノードの集合には  $N^c$  の隣接無線ノード集合  $Nei(N^c)$  のすべてが含まれることになる．また， $N^c$  が  $N^d$  の隣接無線ノードであ

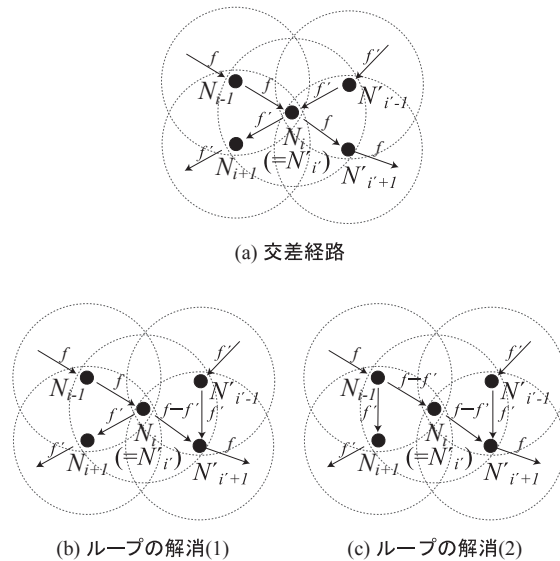


図 10 交差する流量増加路における局所的流量修正

る場合には、 $N^c$  の次ホップ無線ノードには  $N^d$  しか選択することができない。これによって、探索空間が大幅に縮小され、探索時間が短縮される。

#### 4. 性能評価

前章で提案したループ状の流量増加経路を回避する手法が、算出最大流量を低減せず、計算時間を短縮することをシミュレーション実験によって示す。ここでは、600m × 600m の正方形領域に無線信号到達距離 100m の無線ノード 40-70 台を一様乱数を用いてランダムに配置する。各無線ノードの残容量は 54Mbps で同一とし、送信元無線ノード、送信先無線ノードをランダムに選択する。各無線ノード数に対して 5,000 回の実験を行うが、送信元無線ノードから送信先無線ノードへの無線マルチホップ配送経路が存在する場合のみを測定対象とする。ここでは、以下の 3 手法を比較する。

- 有線ネットワークと同様のループ経路のみを回避する従来手法
- 単一流量増加路内の無線ネットワークでのループ経路を回避する提案手法

```

DFS ( 現ホップノード  $N^c$ ,  $N^c$  の次ホップとならないノード集合  $NS$  ) {
  if ( $N^d \in Nei(N^c)$ )
    if ( 検出経路が流量増加路 ) {
      検出経路の最大流量算出;
      無線リンク流量と無線ノード容量の更新;
      if ( 検出経路が既検出経路と交差 )
        ループ回避のための無線リンク流量と無線ノード容量の補正;
    }
  else
    foreach ( $N_n \in Nei(N^c) - NS$ )
      DFS ( $N_n$ ,  $NS \cup Nei(N^c)$ );
}
DFS ( $N^s$ ,  $\{N^s\}$ );
    
```

図 11 流量増加路探索アルゴリズム

表 1 計算時間の比較

無線ノード数	40	50	60	70
従来手法	492928.4	-	-	-
提案手法 1	0.2	1.2	10.7	169.8
提案手法 2	0.2	2.0	15.7	231.6

- 単一流量増加路内および交差流量増加路間のループ経路を回避する提案手法

まず、従来手法との比較による提案手法の性能評価を行なう。従来手法を適用する場合、無線ノード数 40 では最大流量を算出できたものの、50 以上においては最大流量を算出することができなかった。これは、無線ノード数の増加に対して組合せ的に増加する流量増加路候補の探索において適切な枝刈りができていないためである。一方、提案手法では無線ノード数 40-70 の全体で最大流量を算出することができ、従来手法と比較して単一流量増加路内でのループ経路を回避する手法 (提案手法 1) では 3,746 回 (74.9%)、単一流量増加路内および交差流量増加路間でのループ経路を回避する手法 (提案手法 2) では 3,747 回 (74.9%) の実験において大きな流量を得た。このときの計算時間を表 1 に示す。従来手法が提案手法に対して大幅な計算時間短縮を実現していることが分かる。これは、探索手順における有効な枝刈りを実現することによる効果であると考えられる。

表 1 から、提案手法 2 は提案手法 1 よりも 6.2%-83.0% 計算時間が延長している。これは、交差する流量増加路間で発生するループを検出した場合に、近隣無線ノードの残容量を増加させる修正を行なうことによるものである。この修正による流量増加の効果を表 2 お

表 2 交差流量増加路の修正による算出最大流量の改善実験数

無線ノード数	40	50	60	70
流量改善実験数	1	11	55	180

表 3 交差流量増加路の修正による算出最大流量の改善

無線ノード数	40	50	60	70
提案手法 1	11.3	15.3	15.4	15.0
提案手法 2	11.8	19.4	18.5	17.9

よび表 3 に示す。表 2 は、提案手法 2 の方が提案手法 1 よりも大きな流量を得ることができた実験回数である。無線ノード数、すなわち、無線ノード分布密度が高い環境ほど交差する流量増加路を検出する機会が増加していることが分かる。表 3 は、提案手法 1 よりも提案手法 2 の方が大きな流量を得ることができた場合、すなわち、交差流量増加路修正を施した場合におけるこれらの手法の平均流量である。提案手法 2 は提案手法 1 よりも平均 22.0%、最大 26.7% の最大流量増加を実現することが示された。

## 5. まとめと今後の課題

本論文では、無線マルチホップネットワークにおいて最大流量を算出するために拡張されたフォード・ファルカーソンアルゴリズムにおいて、単一流量増加路にループを含めないことと複数の流量増加路の組合せによってもループを発生させないことの必要性を示した。ここでは、単一の流量増加路にループを含めないことで無線ノードの容量を増加させるとともに、流量増加路の探索時間を短縮する。また、互いに交差する流量増加路においては、交差無線ノードの隣接無線ノードにおける流量割当てを局所的に修正することでループを回避し、より大きな総流量を実現する。最後に、流量増加路条件とループ回避、解消手法に基づく最大流量算出アルゴリズムを構成し、シミュレーション実験によって提案手法が算出流量を拡大し、計算時間を短縮することを示した。今後は、各無線ノードの残余量が異なる場合のシミュレーション実験により、提案手法が継続的に運用される無線マルチホップネットワークにおいても有効な手法であることを検証する。

## 参考文献

- 1) Doran, A. and Aldous, J., "Networks and Algorithms: An Introductory Approach," Wiley (1993).
- 2) Ford, L.R. and Fulkerson, D.R., "Maximum Flow through a Network," Canadian Journal of Mathematics, Vol.8, pp.399-404 (1956).
- 3) 辰野, 大下, 桧垣, "無線マルチホップ配送における通信容量予約手法," 情報処理学会第 72 回全国大会論文集, No.3, pp.151-152 (2010).
- 4) 辰野, 桧垣, "無線マルチホップネットワークにおける最大通信量を求めるための拡張ラベリング法," 第 19 回情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp1-8 (2011).