

移動経路を動的に決定するメッセージフェリーを用いた 効率的なメッセージ配送手法

Effective message delivery method using a Message Ferry deciding a movement route dynamically

畑中 健作¹
Kensaku Hatanaka

松浦 知史^{1,2}
Satoshi Matsuura

猪俣 敦夫¹
Atsuo Inomata

藤川 和利¹
Kazutoshi Fujikawa

1. はじめに

近年、大規模災害により既設の通信インフラが機能を停止する事態が発生している。通信インフラの復旧には数日以上を要することがあり、その間の災害救助活動や被災者の安否確認のための代替通信手段が求められている。被災地での応急的な通信インフラとして、多数のノードにより構成されるモバイルアドホックネットワークを用いた研究成果が発表されている。しかし、被災地においてモバイルアドホックネットワークにより通信インフラを構成する場合、広範囲に及ぶ被災地域をカバーするために多数の中継ノードを展開する必要があるため、大規模災害時の代替通信手段として利用することは難しい。

一方で、近年 Delay/Disruption Tolerant Network(DTN)[1]によるメッセージ配送が注目されている。DTN では、モバイルノード間の持続的な接続性を想定せず、メッセージは Store-Carry-Forward 方式で転送される。代表的な DTN によるメッセージ配送手法として端末間すれ違い通信[2-4]があるが、この手法は各ノードの確率的な遭遇によってメッセージが配送されるため、メッセージの到達を保証することができない。そのため、メッセージの中継・転送を行うことを役割とした特別なノードを用いてメッセージ配送を実現するメッセージフェリング[5]が研究されている。

メッセージフェリングとは、車両や UAV などの制御可能な移動体に特定の経路を巡回させることで、直接無線の届かないノード間でのメッセージ配送を可能とする方法である。

本研究では、被災地において捜索救助活動を行う救助隊員を想定したモバイルノード間でメッセージの配送を行う場合を対象とする。モバイルノードは、定められた領域の中で捜索救助活動を行い、一定時間ごとに情報共有を行うものとする。また、それぞれのモバイルノードの担当領域ごとにアクセスポイントを設置する。

モバイルノードを対象としたメッセージフェリングでは、モバイルノードがメッセージの送受信のために移動する必要があり、一定時間ごとにアクセスポイントとの間を往復することによる移動コストが大きい。また各モバイルノードが非同期にそれぞれのアクセスポイントに到来するため、宛先ノードがメッセージを受信するまでの遅延時間が大きくなるという問題点がある。

本研究では、アクセスポイントの移動計画によりメッセージフェリーの移動経路を動的に決定する手法を提案する。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology, Graduate
School of Information Science

² 独立行政法人 情報通信研究機構
National Institute of Information and Communication
Technology

これにより、モバイルノードのメッセージ送受信にかかる移動コストを削減し、メッセージの遅延時間を短縮させる。

2. 関連研究

本章では想定環境における要求事項を述べ、Delay Tolerant Network (DTN)の分類およびモバイルノードを対象としたメッセージフェリングの既存研究について述べる。

2.1 要求分析

本研究では、大規模災害の被災地において行われる救助隊による捜索救助活動における情報共有を想定する。被災地域が広範囲に及ぶ場合、救助隊は限られた人員を複数のグループに分割し、各グループにそれぞれの担当地域を割り当てて捜索救助活動にあたる。各グループは1名のリーダーと複数名の隊員により構成され、担当地域内で作業を実施する。各グループの作業に関する意志決定は、グループのリーダーが行う。その際、捜索作業の進捗状況や救助隊員の状態、機材の所持・使用状況といった事項についてグループ間で情報共有を行うものとする。救助隊は捜索救助活動に利用する情報を扱うため、確実にメッセージを宛先に届けることができる通信手段が求められる。

災害救助では一般的に発災後約72時間で要救助者の生存率が激減することから、救助隊が捜索救助活動にかけられる時間には限りがあると言える。グループ間での情報共有を行う上で、救助隊員が情報共有のために要する行動時間が多いことは捜索救助活動のための時間が減ることに直結する。よって、救助隊員の情報共有のために要する行動時間を短縮することが必要となる。また、救助隊は上で述べた情報を一定時間間隔で共有する。そのためメッセージの遅延は許容されるが、正確な情報共有にはメッセージの遅延時間が小さいことが望ましい。

2.2 Delay Tolerant Network (DTN)

大規模災害の被災地のように既存の通信インフラが機能しない環境下において、Delay/Disruption Tolerant Network (DTN)によりメッセージを配送することが考えられている。DTN では、メッセージはノードのモビリティを利用した Store-Carry-Forward 方式で転送される。DTN は、モビリティを制御可能な特別なノードを用いるか否かで端末間すれ違い通信とメッセージフェリングに分類できる。

2.2.2 端末間すれ違い通信

端末間すれ違い通信は、端末ノードのモビリティのみを利用してメッセージを配送する手法である。偶発的な端末間のすれ違い時にメッセージ交換を繰り返すことで、最終的にメッセージを目的ノードに到達させることができる。特別なデバイスが必要とせず端末ノードのみでメッセージを配送できるため低コストで利用できる反面、端末ノードのモビリティを用いるため地理的に孤立した位置にいるノードに対してはメッセージを配送することができないという欠点がある。また、ランダムに発生する端末ノード間

のすれ違いを用いたメッセージ配送であるため、メッセージの到達を保証することができない。よって、この方法は救助隊が搜索救助活動に用いる通信手段としては適さない。

2.2.2 メッセージフェリイング

メッセージフェリイングでは、メッセージフェリーと呼ばれるモビリティを制御可能な特別なノードにメッセージの中継・運搬を行わせることで、直接無線の届かないノード間のメッセージ配送を可能にする。メッセージフェリーは端末ノードから受信したメッセージを一時的にバッファに保管し、目的ノードの近くに移動した後にメッセージを送信する。メッセージフェリイングではメッセージフェリーを宛先ノードの近くまで物理的に移動させることで、確実にメッセージを配送することができる。この方法はメッセージの到達を保証できることから救助隊の搜索救助活動に用いる通信手段として適している。ただし被災地での使用を想定した場合、救助隊は搜索救助活動のために一定の範囲を移動するため、モバイルノードを対象としたメッセージ配送を想定する必要がある。

2.3 モバイルノードを対象としたメッセージフェリイング

2.3.1 Node-Initiated Message Ferrying (NIMF)

NIMF[6]では、モバイルノードがメッセージフェリーの移動経路近辺に移動した後にメッセージを送受信することで、メッセージフェリーによるモバイルノード間のメッセージ配送を行っている。NIMFではメッセージフェリーは予め決められた一定の移動経路を巡廻するため、モバイルノードは必要に応じてメッセージフェリーの移動経路に近づくことで確実にメッセージを送受信することができる。一方で、モバイルノードはメッセージの送受信の度にメッセージフェリーの移動経路近辺まで移動し、更にメッセージフェリーの到着を待つ必要があるため、モバイルノードに課せられる行動時間が長いという問題がある。またメッセージの遅延時間についても、モバイルノードの移動時間、メッセージフェリーの到着を待つ時間が加算されるため増大する。

2.3.2 Ferry Access Points (FAPs)

FAPs[7]ではメッセージフェリーの経路上に固定のアクセスポイントを設置する。モバイルノードはアクセスポイントを介してメッセージフェリーとメッセージを交換する。この手法ではアクセスポイントを利用することでモバイルノードがメッセージを送受信する際のメッセージフェリーの到着を待つ時間が省略される。しかし、モバイルノードはアクセスポイントの通信範囲まで移動する必要があり、搜索救助活動を行う地域が広がるにつれてアクセスポイントまでの移動時間が長くなる。またメッセージの遅延時間についても、アクセスポイントまでの移動時間が加算されるため増大する。

2.3.3 Optimized Way-Points Ferry Route (OPWP)

OPWP[8]では、モバイルノードの行動範囲およびモビリティモデルをもとにメッセージフェリーの移動経路を決定する。メッセージフェリーの移動経路は、モバイルノードとの遭遇確率の高い地点を選定し、選んだ地点を最短時間で全て通過する順序で結んだものとしている。メッセージフェリーが選定した各地点で一定時間以上待機することで、経路を一巡した際に一定確率でモバイルノードと遭遇する。OPWPではメッセージフェリーとの遭遇のためにモバイルノードが移動する必要はないという利点があるが、モバイルノードの行動範囲が変化した場合にそのモバイルノードへのメッセージ配送は行えなくなる。また、選定した地点でメッセージフェリーを待機させることから移動経路の巡廻にかかる所用時間が長くなり、さらにモバイルノードと

の遭遇は移動経路を複数回巡廻することで発生するためメッセージの遅延時間は非常に大きくなる。

2.4 関連研究のまとめ

メッセージフェリイングはメッセージの到達を保証できることから搜索救助活動における情報共有のための通信手段として適している。ただし、想定環境においてはモバイルノードを対象とする必要があり、その場合のモバイルノードに課せられる情報共有のための行動時間とメッセージの遅延時間は、被災地での搜索救助活動に重大な影響を及ぼす要因となる。

3. 提案手法

本章では、アクセスポイントの移動計画を用いたメッセージフェリーの移動経路の動的決定手法を提案する。

3.1 提案手法の概要

提案手法では、モバイルノードのアクセスポイントまでの移動時間を削減するためにアクセスポイントを適切な位置に移動させる。そのためにメッセージフェリーの移動経路をアクセスポイントの移動に対応させる必要がある。アクセスポイントは次の目的地となる地点を決定してから移動する。移動中のアクセスポイントは移動前の地点から次の目的地までの間に存在する可能性が高いと考えられる。そこで、アクセスポイントはメッセージフェリーに対し次の目的地を直近の移動計画として伝え、さらにメッセージフェリーは各アクセスポイントの移動計画をもとに移動経路を動的に決定することで、アクセスポイントの移動に対応したメッセージフェリイングを実現する。

3.2 想定環境

提案手法では、大規模災害の被災地において行われる救助隊の搜索救助活動における情報共有を想定する。救助隊は複数のグループを構成し、それぞれのグループに担当地域を割り当て搜索救助活動にあたるものとする。各グループは1名のリーダーと1名以上の隊員で構成される。リーダーは、各グループの担当地域の中で更に当面の間搜索救助を行う範囲を指定する。隊員は、リーダーによって指定された範囲内の搜索救助活動を実施する。リーダーおよび隊員は、情報共有のために無線インターフェースのあるデバイスを所持する。用いられるデバイスの通信範囲は限定的であり、地理的に離れたそれぞれの担当地域で活動するグループ間での直接通信を行うことはできない。以上のような想定をもとにグループ間での情報共有を行う上で、役割に応じて次のような3種類のノードを定義する。

・モバイルノード

モバイルノードは、救助グループの隊員を想定したノードとする。そのため挙動としては

- (1)搜索救助活動のために定められた地域内を移動する
- (2)情報共有のために一定時間ごとにアクセスポイントに向かう

という2種類の行動を繰り返す。モバイルノードは一定頻度で他のモバイルノード宛のメッセージを生成し、同一グループのアクセスポイントに送信する。また自ノード宛のメッセージをアクセスポイントから受信する。

・アクセスポイント

アクセスポイントは、救助グループのリーダー(指揮所)を想定したノードとする。そのためモバイルノードと比べて比較的長時間同じ場所に滞在する。また、グループの担当地域の中で次の搜索救助活動を行う範囲を決定し、同一グループのモバイルノードに指示する。新たに搜索救助活動を行う範囲を指定する場合、同一グループのモ

バイルノードに伝達した後自身もその地域へ向け移動を開始する。アクセスポイントは同一グループのモバイルノードから受信したメッセージを保管し、メッセージフェリーへ転送する。また、メッセージフェリーから受信した同一グループのモバイルノード宛のメッセージを保管し、モバイルノードの到来時に送信する。

・メッセージフェリー

メッセージフェリーは、小型無人航空機(UAV)を想定したノードとする。メッセージフェリーに小型 UAV を用いることで、被災地において倒壊した建物や瓦礫の影響を受けることなく決められた経路を一定の速度で巡廻できると考えられる。メッセージフェリーは、救助隊が探索救助活動を開始した時点での各グループのアクセスポイントの位置については既知であるとする。メッセージフェリーは、全てのアクセスポイントを一定の順序で訪れるように継続的に移動し、アクセスポイント間のメッセージ転送を行う。

3.3 メッセージフェリーの動的経路決定

提案手法において、メッセージフェリーがアクセスポイントの移動計画をもとに自身の移動経路を動的に決定していく様子について図1を用いて説明する。ここでは、アクセスポイントCが移動する場合を例に取り述べる。

(a) 運用の開始

アクセスポイントが所定の地点に設置される。メッセージフェリーは設置されたアクセスポイントの数および設置場所に関する位置情報をもとに移動経路を決定する。

(b) アクセスポイントの移動計画の決定

アクセスポイントは移動を開始する前に次の目的地を決定し、メッセージフェリーの到着を待つ。メッセージフェリーは(a)で決めた移動経路を巡回する。

(c,d) 移動計画の授受

メッセージフェリーがアクセスポイントに接近すると、アクセスポイントはメッセージフェリーに自身の移動計画を送信する。アクセスポイントは同一グループの全モバイルノードに対して移動計画を送信し終えた後に移動を開始する。メッセージフェリーはアクセスポイントから受け取った移動計画をもとに、アクセスポイントの移動開始前の位置と次の目的地を順に通過するように移動経路を更新する。

(e) メッセージフェリーとアクセスポイントの遭遇

アクセスポイントは次の目的地へ向けて移動する。メッセージフェリーは予定していた移動経路の途中で目的のアクセスポイントと遭遇した場合、その地点から目的地までの経路を省略し、次のアクセスポイントの移動開始前の位置へ向かう。

(f,g) アクセスポイントの移動完了

目的地に到着したアクセスポイントは停止する。メッセージフェリーはアクセスポイントが目的地に到着したことを確認後、アクセスポイントの現在地のみを通過するように移動経路を更新する。

以上の動作を繰り返すことで、メッセージフェリーはアクセスポイントの移動に対応して動的に移動経路を更新し続けることが可能となる。アクセスポイントはモバイルノードとともに新たに探索救助活動を行う範囲へ移動することで、モバイルノードのアクセスポイントまでの移動時間とメッセージの遅延時間を削減できると考えられる。

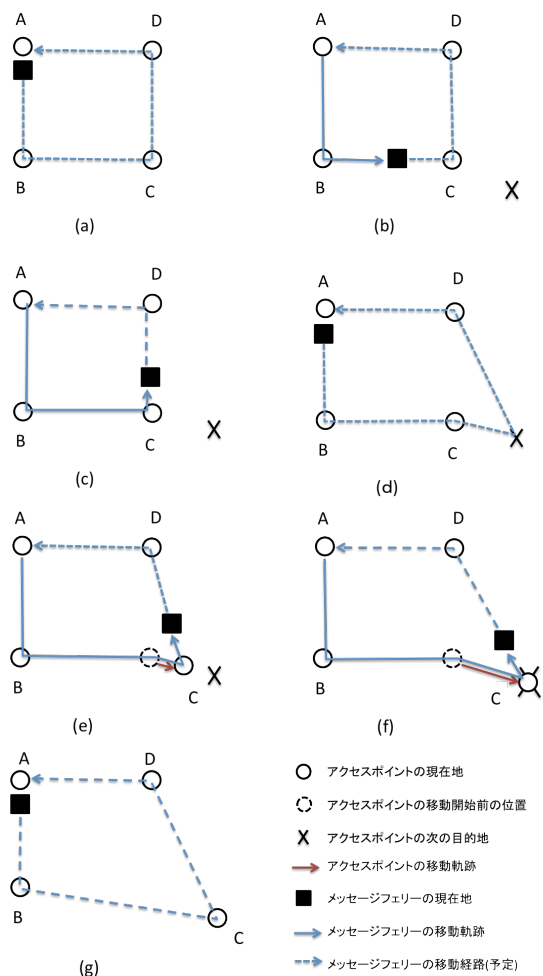


図1 メッセージフェリーの移動経路

4. 評価

提案手法の有効性を確認するためにシミュレーションによる性能評価を行った。比較手法にはアクセスポイントを固定する場合を用いて評価した。評価方法は、
 ・モバイルノードのアクセスポイントまでの往復にかかった累積移動時間
 ・宛先ノードがメッセージを受信するまでの平均遅延時間とする。シミュレータには The ONE[9]を用いて実験を行った。

4.1 シミュレーション環境

本シミュレーションでは正方形の領域の中で各グループの担当地域を重複のないように区切ったフィールドを用いた。シミュレーション環境におけるモバイルノードおよびアクセスポイントの挙動を図2に示す。モバイルノードはグループの担当地域の中でさらに探索範囲を定め、その範囲を掃討するように動く。ただし、一定時間ごとに同一グループのアクセスポイントとの間を往復する。比較手法ではアクセスポイントは(a)のようにグループの担当地域の中心に設置される。提案手法ではアクセスポイントは(b)のようにモバイルノードの探索範囲の中心に設置され、特定の時期に次の探索範囲の中心へ移動を開始する。モバイルノードの探索範囲はグループの担当地域の中で 500m 四方の

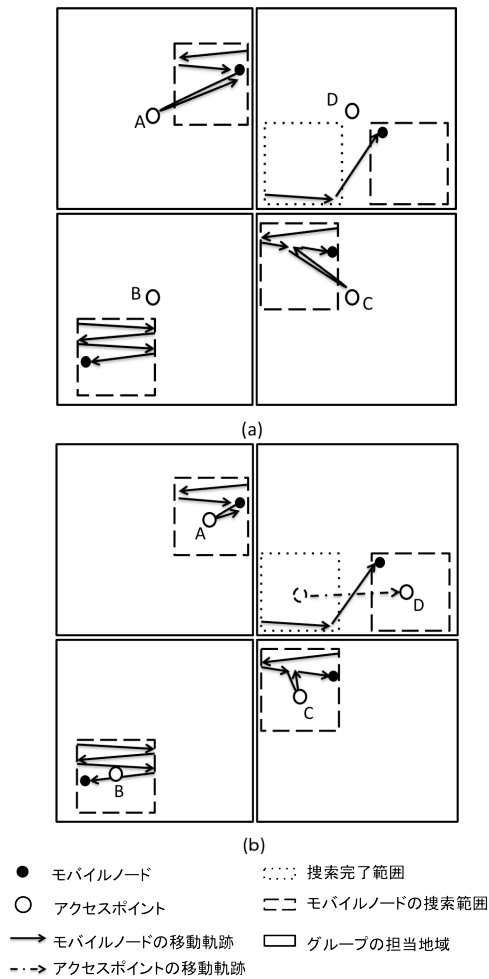


図2 モバイルノードおよびアクセスポイントの挙動

領域をランダムに選定する。モバイルノードおよびアクセスポイントの移動速度は0.8-1.1[m/s]とする。メッセージフェリは移動速度8.1[m/s]で全てのアクセスポイントを一定の順序で巡回する。本シミュレーションではグループ数は4つとし、それぞれのグループは1台のアクセスポイントと1台のモバイルノードからなる。またメッセージフェリは1台とする。

4.2 アクセスポイントへの到来周期による影響

4.2.1 シミュレーション結果

はじめに、モバイルノードのアクセスポイントへの到来周期を変化させた場合に、モバイルノードの累積移動時間(アクセスポイントへの往復にかかった時間)およびメッセージの平均遅延時間(送信元ノードがアクセスポイントに向かい始めてからメッセージが宛先ノードに到達するまでの時間)を確認した。アクセスポイントへの到来周期は1時間から3時間まで1時間ずつ変化させた。また、搜索救助活動を行う全地域は4km四方とし、各グループの担当地域は2km四方とした。図3にモバイルノードの累積移動時間を示し、図4にメッセージの平均遅延時間を示す。

図3が示すように、提案手法では比較手法に対してモバイルノードの累積移動時間を1時間ごとの場合で約21時間、2時間ごとの場合で約10時間、3時間ごとの場合で約8時間削減している。また図4から、メッセージの遅延時間については1時間ごとの場合で約17分、2時間ごとの場合で約25分、3時間ごとでは約27分短縮している。

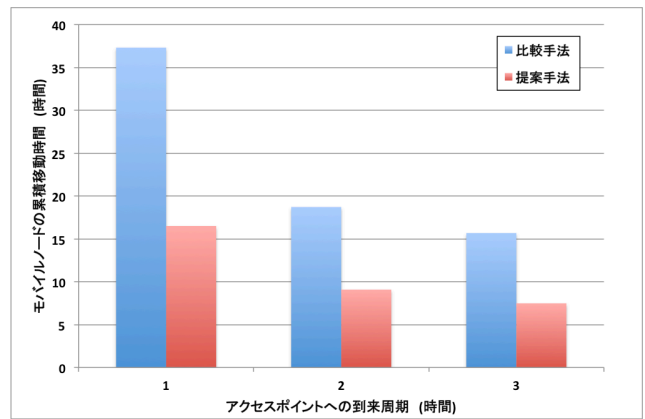


図3 モバイルノードの累積移動時間

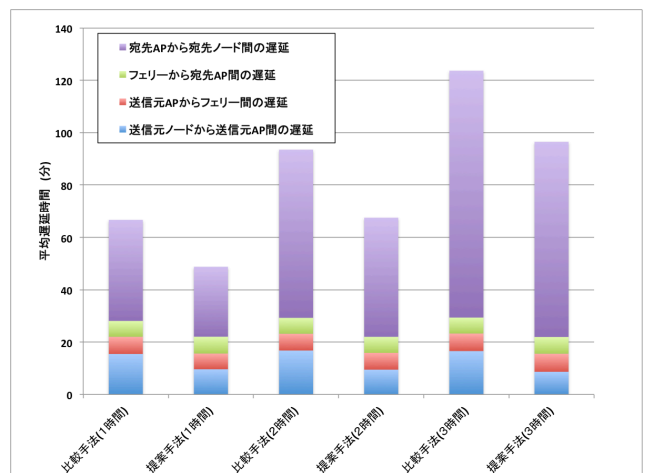


図4 メッセージの平均遅延時間

4.2.2 考察

モバイルノードの移動時間は現在搜索中の範囲からアクセスポイントまでの距離によって決まる。提案手法では現在搜索中の範囲にアクセスポイントを移動させることでモバイルノードの移動距離を短く保っている。結果として、図3が示すように提案手法はモバイルノードの移動時間を削減している。また、図4よりメッセージの遅延時間のうちモバイルノードとアクセスポイントの間で発生する遅延時間が大部分を占めている。提案手法ではモバイルノードの移動時間を削減することで遅延時間を短縮している。

4.3 グループの担当地域の広さによる影響

4.3.1 シミュレーション結果

次に、各グループの担当地域の広さにより提案手法と比較手法のパフォーマンスにどのような差が生じるかを確認した。全地域の広さを2km四方から8km四方の範囲まで2kmずつ変化させた。それに合わせて各グループの担当地域を1km四方の範囲から4km四方の範囲まで変化させた。また、モバイルノードのアクセスポイントへの到来周期は2時間ごととした。図5にモバイルノードの累積移動時間を示し、図6にメッセージの遅延時間を示す。

図5が示すように、提案手法では比較手法に対してモバイルノードの累積移動時間をグループの担当地域が1km四方の場合で約4時間、2km四方の場合で約10時間、3km四方の場合で約14時間、4km四方の場合では約25時間削減している。また図6からメッセージの遅延時間については、グループの担当地域が1km四方の場合で約3分、2km四方の場合で約17分、3km四方の場合で約22分、4km四方の場合で約28分短縮できている。

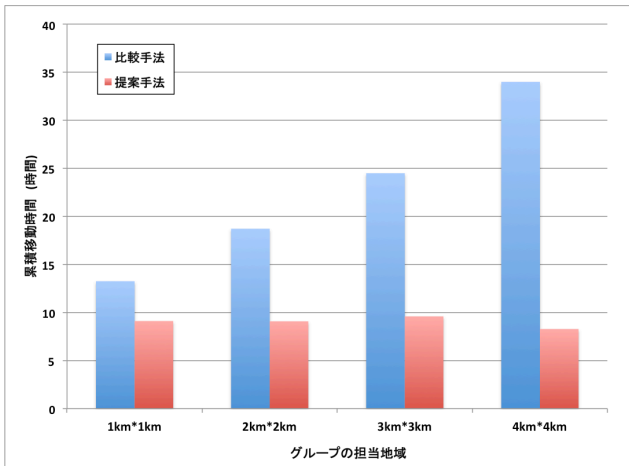


図5 モバイルノードの累積移動時間

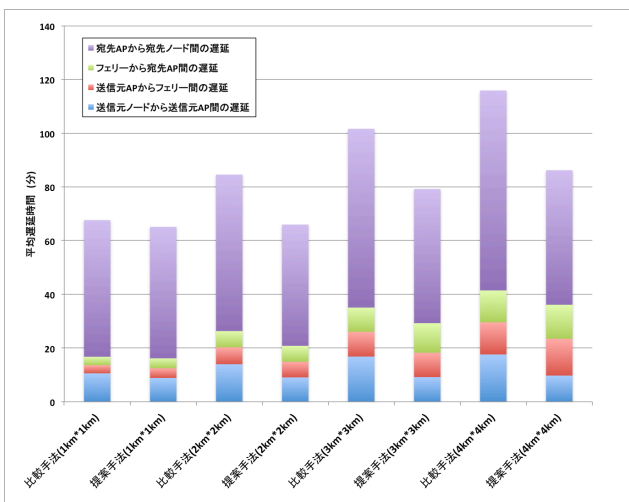


図6 メッセージの平均遅延時間

4.3.3 考察

図5から比較手法ではグループの担当地域が広がるにつれてモバイルノードの累積移動時間は増大する。これに対し、提案手法ではグループの担当地域の広さに関係せずモバイルノードの累積移動時間を一定の値に保っている。比較手法では担当地域が広がるにつれモバイルノードの探索範囲からアクセスポイントまでの距離が長くなるのに対し、提案手法ではアクセスポイントが常にモバイルノードの探索範囲内に位置するためと考えられる。また図6から、提案手法および比較手法の両方でグループの担当地域が広がるにつれメッセージの遅延時間が増大している。これは、グループの担当地域の広域化にともないメッセージフェリーの移動経路が長くなったためと考えられる。ただし、提案手法においてはモバイルノードとアクセスポイントとの間の遅延時間を一定に保つことで、全体として比較手法よりも短い遅延時間を達成している。

5. おわりに

本論文では、モバイルノードを対象としたメッセージフェリングにおいてメッセージフェリーの移動経路を動的に決定する手法を提案した。シミュレーションにより、提案手法はモバイルノードの情報共有にかかる移動時間を削減し、かつメッセージの遅延時間を短縮できることを示した。今後の課題としては、グループの担当地域が重複している場合を想定し、メッセージフェリーの巡廻順序を変更

して経路の最適化を行う予定である。また、さらにモバイルノードの移動時間とメッセージの遅延時間を短縮するために、各グループ内においてもメッセージフェリーを用いることが有効であると考えられる。そのため複数台のメッセージフェリーを用いる場合を考慮して提案手法の拡張を実施する。

参考文献

- [1]. K. Fall, "A delay-tolerant network architecture for challenged internets," pp. 27-34, 2003.
- [2]. L. Pelusi, A. Passarella, and M. Conti, "Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile ad hoc networks," Communications Magazine, IEEE, vol. 44, no. 11, pp. 134-141, 2006.
- [3]. A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially connected ad hoc networks," 2000.
- [4]. K. Psounis and C. S. Raghavendra, "Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks," 2005.
- [5]. W. Zhao and M. H. Ammar, "Message ferrying: Proactive routing in highly-partitioned wireless ad hoc networks," presented at the The Ninth IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems, 2003. FTDCS 2003., pp. 308-314.
- [6]. W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, "A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks," pp. 187-198, 2004.
- [7]. F. Yasmeen, M. Huda, M. Haque, M. Aoki, and S. Yamada, "Using Ferry Access Points to Improve the Performance of Message Ferrying in Delay-Tolerant Networks," Proc. ICCNMC, France, pp. 173-179, 2011.
- [8]. M. M. Bin Tariq, M. Ammar, and E. Zegura, "Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes," presented at the MobiHoc '06: Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, 2006.
- [9]. A. Keränen, J. Ott, and T. Kärkkäinen, "The ONE simulator for DTN protocol evaluation," presented at the 2nd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques