無線アドホックネットワークにおける位置依存データ配布の省電力化に関する検討

沖野智幸 † 峰野博史 ‡ 石原 進* 水野忠則 ‡

† 静岡大学大学院情報学研究科 ‡ 静岡大学情報学部 *静岡大学工学部

An investigation of power saving for distributing location dependent information on wireless ad-hoc networks

Tomoyuki Okino † Hiroshi Mineno ‡ Susumu Ishihara* Tadanori Mizuno ‡

†Graduate School of Information, Shizuoka University
‡Faculty of Information, Shizuoka University *Faculty of Engineering, Shizuoka University

1 はじめに

近年，無線移動端末などを用いて通信インフラの無い場所に一時的にネットワークを構築できる無線アドホックネットワークが注目されている．以下，本稿で対象とするアドホックネットワークは無線アドホックネットワークであるものとする．筆者らは移動端末を用いてアドホックネットワークを構築し，詳細な地域情報を収集するシステムを検討している．このシステムは災害復旧や救助活動など，通信インフラを使用できない場所で多くの作業員が協力して場所に依存した情報を交換しながら作業を進める際の情報流通基盤，あるいは道路交通情報や街角情報の流通を通信インフラに依存することなく行うなどの利用方法を想定している．

アドホックネットワークの性質上，通信を行う端末同士が直接通信可能でない場合でも，他の端末を中継することで通信可能となるが，端末の移動や無線リンクの状態の変化により端末間の接続性は保証されないため，通信性能が大きく変動してしまう．そこで，各端末に複製データを持たせることで各データの可用性を高める複製配布方式が提案されている [1][2]．筆者らはデータへのアクセス頻度が，データに関連づけられた位置と端末の位置関係によって決まる場合を前提に，データの複製をそのデータを取得した端末の位置周辺に存在する端末に対してまばらに配置する複製管理手法として Skip Copy(SC) 方式を提案している [3].

SC 方式はデータの冗長度を低く抑えつつデータへのアクセス成功率を高めている．しかしこれまでの評価では 2 層における影響を考慮していない．SC 方式は位置依存情報の複製の配布，ならびに位置依存情報の探索のためにフラッディングを多用する．そのため，端末が密集する状況において，多くの端末が同一データを重複して送受信することとなり，電力の浪費，無線チャネルの競合による通信性能の低下といった問題点がある．災害時などの環境では，ライフラインが切断されている可能性が高く，移動端末の充電を十分に行うことはできない．そのため，情報収集などを充電無しで遂行できることが望まれ，複製配布に関わる電力消費は最低限に抑える必要がある．

本稿では，SC 方式における 2 層での衝突や冗長なトラヒックをシミュレーションにより確認し，SC 方式における省電力化手法の必要性について述べる．

2 位置依存情報複製配布方式

2.1 位置依存情報

アドホックネットワークの応用の一例として，緊急・災害時における情報収集交換ネットワークが考えられる．例えば，災害発生時の地域情報収集において，消防隊や救急隊員が携帯端末を持ち，救助活動を行いつつ事故現場の画像や救助者リストなどの情報を取得し，アドホックネットワーク通信によりほかの隊員と交換することで，より早く災害地域の被害状況を知ることができるシステムが考えられる．

ここで想定しているような状況では，ある位置に依存した情報はその位置から比較的近い場所に位置するユーザから利用される頻度が高いと推測される．例えば，救助を行うときにはその現場の状況を正確に把握している必要があり，救急隊員は救助に向かう前にその現場の情報を調べる可能性が高い．また，隊員が救助活動を安全に行うためには，隊員のいる場所周辺の状況を把握しておくことが望ましい．従って，隊員は近隣の情報にアクセス，利用することが多いと考えられる．本稿では，特定の位置に関連付けられ，かつそれがその位置により近い位置にいる利用者から頻繁に利用される情報のことを位置依存情報と呼ぶこととする．

2.2 Skip Copy(SC) 方式

アドホックネットワークでの接続性が失われた場合でもデータへのアクセスを可能にするための方法として，複数端末への複製配布がある [1][2]．複製配布によるデータ可用性の向上効果を高めるには，データの利用頻度に応じてデータ転送時のコストが少なくなるように複製を適当な端末に配置することが望ましい．

データの利用頻度がデータと端末の位置情報に依存して決まる場合，各端末における各データへのアクセス頻度は端末の移

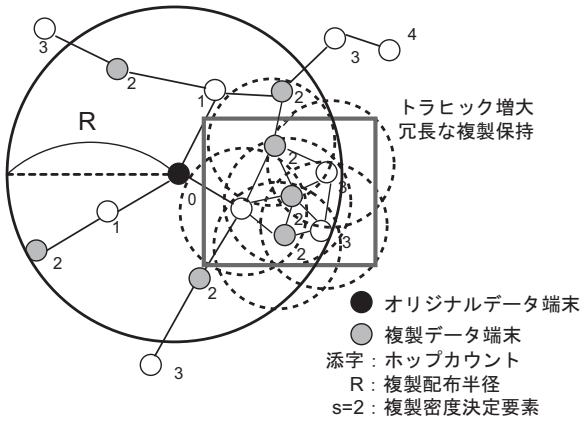

図 1: SC 方式による複製配布

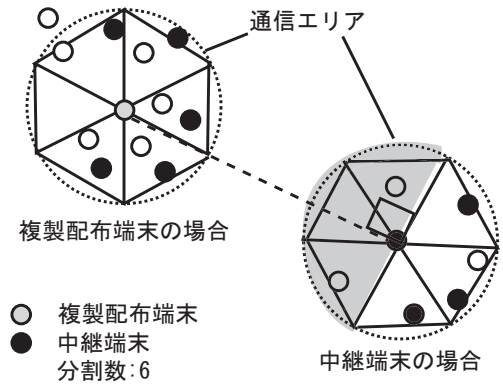

図 2: 中継ホスト選択手法

動に応じて変化する．一方，特定の位置からのデータへのアクセス頻度は変わらない．そこで，SC 方式では，データの発生と同時に複製をデータ発生端末の周辺に配布し，その後は，データへのアクセスがあった場合にその複製を転送する段階で，それを中継する端末の位置とデータの関連する位置関係に基づいて，複製の再配置を行う．この再配置により端末が元の位置から移動しても，データに関連する位置周辺には常にそのデータの複製が配置され続けることとなる．この結果，データへのアクセス頻度の高い端末の周辺にデータの複製が配置されることになるため，データへのアクセス時にその転送にかかるコストを小さくしつつ，データへのアクセス成功率を高めることができる．SC 方式では複製の配置される端末を端末とデータの関連する位置関係に加え，データ転送時におけるホップ数を考慮して，複製の地理的な密度を調整する．そのようにすることで，過度に複製を配布することを防ぎ，結果として多くの種類のデータの複製を扱うことができるようになり，システム全体のデータへのアクセス成功率を高めている．

2.3 SC 方式の課題

SC 方式は複製の配布およびデータ要求，応答をフラッディングベースで行っている．フラッディングは単純な動作で通信可能な端末すべてにデータを送信できる利点があり，端末の密度がそれほど高くない状況では効率的にデータ送信ができる．そのため，端末の密度がそれほど高くなければ SC 方式を用いることで効率良く複製を配布することができる．しかし，端末が密集している場合にフラッディングを行うと，通信可能範囲内の多くの端末がブロードキャストをするため，ブロードキャストストームが発生してしまう．このときに発生するトラヒックの多くは重複したものであり，それらの重複したデータの送受信に電力が浪費されてしまう．さらに 2 層における無線通信の衝突が多く発生し，通信性能が低下してしまう．SC 方式を実際に災害現場等で使用することを考えると，通信性能が不安定になることは，重要な情報を活用できないことにも繋がり情報収集に大きな影響を与える．端末の密度に関わらず安定な通信が可能であることが望ましく，さらに，端末のバッテリをなるべく長く使用するために無駄な通信を極力抑えることが重要である．

SC 方式による複製配布の目的は個々の端末からのリクエストに対して，応答が高い確率で成功する程度に複製が配布されることである．また，扱う情報が位置に依存していることや，端末は自身の位置情報を取得できることから，これを利用して余計な複製が配置されないようにしている．しかし，端末が密な状態では上述したようにトラヒック量が増加し，複製配布のコストが大きくなってしまう．そこで，端末の持つ位置情報を活用することで，各端末が数ホップ先までの端末を把握することが可能となり，その時点で最適な複製を持つべき端末の集合を求めることができると考える．つまり，低コストで高いアクセス成功率を維持できるような複製の配布が可能になると考えられる．筆者らは [4] において端末の情報を利用することで，効率良く複製を配布し，その利用効率が高くなるような手法を提案している．

SC 方式にはフラッディングベースによる端末密集時の重複したデータの送受信によって発生するトラヒックの削減と同時に低コストに複製を配置する方法が必要であり，これが SC 方式における最も重要な課題である．

3 省電力化の検討

無線アドホックネットワークにおけるフラッディングの効率化を図る研究として適応的フラッディングがある [6]．適応的フラッディングでは，受信電力に基づいてパケットの中継優先度を決定することで，同時に転送を行う端末数を少なくし干渉を低減させている．この中継優先制御によって端末数の多い状況でのフラッディングを効率化している．また，SPAN [7] は無線アドホックネットワークにおいてネットワークの規模や接続性を縮小しなくても，電力消費を抑えることができる技術である．これは端末が密な場合においても coordinator と呼ばれる端末がデータ中継を行う，また，その役割を端末間でローテーションさせることで負荷を分散させ，電力消費を抑えている．これらはいずれも通信を効率化させるための方法であるが，そのまま SC 方式に適用しても通信を行う端末が限定されることで，複製配布が一部で行われなかったり，干渉は低減できるが冗長な複製データを受け取る回数が増えてしまう可能性がある．

SC 方式の特徴を考慮した [4] は図 2 に示すように，データ中継時の端末を減らすことで干渉と冗長なトラヒックを減少させることを目的としている．また，なるべく低コストで複製配布を行うため，接続性の高い端末にデータ中継させるようにしている．この手法では端末は自身の位置情報を交換することで，周辺端末を把握し，図 2 に示すように通信エリアを分割することで中継端末を限定する．さらに中継端末は，すでに同一のデータを受信している可能性が高い端末 (図 2 の網掛け部分に位置する端末) を中継端末の候補からはずすことで，余分なトラヒックを抑えることが期待できる．詳細については [4] を参照．

4　2 層を考慮した SC 方式の再評価

[3] における SC 方式のシミュレーション評価は 2 層での通信エラーの影響まで十分に考慮していなかった．しかし，データ通信に無線を使用することや，端末数が多くなることを考えると，2 層における影響を考慮しなければならない．提案する省電力化手法の評価を行うために，これまで実施されていなかった 2 層における影響を考慮した SC 方式の再評価をシミュレーションにより行った．シミュレータはプロトコルスタックを階層的にモデル化している GloMoSim [5] を用い，SC 方式による位置依存情報複製配布機構をアプリケーションとして実装した．無線通信は現在の普及率を考え，IEEE802.11b を想定した．

L × L[m] の 2 次元平面上に 30 個の移動ノードがランダムウェイポイントモデルで移動する場合を想定する．ノードの通信可能半径を 100[m] とする．すなわち，距離 100[m] 以内のノードは相互に通信可能とする．各ノードは十分なメモリ容量を持つこととし，複製データ，オリジナルデータにかかわらず合計 100 個までデータを保持することができる．複製配布範囲 $R = 200$[m]，複製密度決定要素 $s = 2$ とし，初期状態ではすべてのノードは複製データを保持していない．802.11b の環境は，MAC 層に標準 802.11，無線周波数 2.4[GHz]，ビットレートを 11[Mbps] に設定することで再現した．ネットワーク層には IP，トランスポート層には UDP を使用し，また，RTS/CTS や後述するアプリケーション層で行う制限付きフラッディング以外のアドホックネットワーク用の IP ルーティングプロトコルは使用していない．このような環境において，各ノードは次の移動モデルとデータ取得・アクセスモデルに従って行動する．

4.1　移動モデルとトラヒックモデル

各ノードの初期位置はランダムに決定され，2 次元ランダムウェイポイントモデルに従い移動する．人の歩行を想定し，速度は $v = 0$〜2[m/s]，ポーズタイムは 3[sec] とした．各ノードは，指数分布で与えられる間隔でノードの現在位置をキーとした特定の位置に関連したデータを取得する．データを取得する間隔の平均は 50[sec] とした．取得されるデータはノードの存在する位置をパラメータとして持つ 5000[Bytes] のデータオブジェクトとする．ノードはデータを取得した時点で複製の配布を開始するものとする．

各ノードは指数分布で与えられる間隔でデータアクセスのための動作を行い，動作間隔の平均は 50[sec] とした．このうち 1/2 の確率である位置に関連したデータ要求を行う．要求するデータが関連する位置は，要求範囲 200[m] を平均とした指数分布に従って決定される．

要求，応答の送信ともに位置を利用した制限付きフラッディングを用いる．制限付きフラッディングとはデータを中継する際，直前のノードの位置と目的位置を利用して，ノードが中継を行うことでデータがより目的位置に近づくときのみデータを中継し，目的位置との距離が直前のノードとの距離よりも遠くなってしまう場合は中継を行わないというフラッディング方法と定義する．

4.2　評価指標

SC 方式によるアクセス成功率の向上と，これに伴うトラヒック量，通信エラーの発生の度合いを調べるため，以下の評価指標を用意した．

アクセス成功率A_S (Access Success ratio)

A_S を式 (1) に示す．A_T(Answer success Time) はアクセス要求元が対象となるデータの応答メッセージを受け取った回数の総和であり，R_T(Request Time) は各ノードがアクセス要求を送信した回数の総和である．A_S の算出はシミュレーション時間全体での A_T，R_T を利用した．

$$A_S = \frac{A_T}{R_T} \tag{1}$$

冗長度Re(Redundancy)

冗長度を式 (2) に示す．n は取得されたオリジナルデータの総数であり，D_i はデータ i の複製の数である．Re の算出はシミュレーション終了時点に行った．

$$Re = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i}{n} \tag{2}$$

データ破損率DL(Data Loss ratio)

データ破損率を式 (3) に示す．各ノードが複製配布時にアプリケーション層で受信したデータがパケットロスによって破損している割合である．

$$DL = \frac{\text{破損データ受信回数}}{\text{正常データ受信回数＋破損データ受信回数}} \tag{3}$$

冗長トラヒック

冗長トラヒックとは，ノードが一度処理したことのあるメッセージを重複して受信した回数の全ノードにおける和であり．複製配布時とデータ応答時を対象とした．

- 複製配布時の冗長トラヒック
- 応答時の冗長トラヒック

4.3　評価結果

1000 秒間のシミュレーションをシミュレーションエリアの 1 辺を 500〜1000[m]，50[m] 間隔で変化させ，以下に示す 3 つの複製配布方式について各評価指標を求め，比較を行った．

1. 通信できるノード全てに複製:RA(Replica All)
2. 複製配布範囲内のノード全てに複製:RAR(Replica All in R)
3. SC 方式:SC(Skip Copy)

冗長度とアクセス成功率

図 3 に異なるシミュレーション条件における冗長度とアクセス成功率の相関図を示す．アクセス成功率が高いときは冗長度も高くなる特徴を表しているとともに，SC 方式では低い冗長度で高いアクセス成功率を達成できていることが分かる．

通信エラーの発生頻度

通信エラーの発生頻度を調べるために，アプリケーション層で受信したデータの破損率を求めた．図 4 にデータ破損率を示す．すべての複製配布方法において，アクセス成功率が高いときほど，データ破損率が非常に高いことを示している．複製配布は正常に行われているが，通信の品質がかなり低くなり，複製配布にかかるコストが非常に高くなると言える．

冗長トラヒックの割合

図 5 に複製配布時の冗長トラヒックを示す．複製配布の方法，アクセス成功率の違いに関わらず，冗長トラヒックが発生している．また，図 6 にデータ応答時の冗長トラヒックを示す．アクセス成功率が高い時ほど多くの冗長トラヒックが発生している．

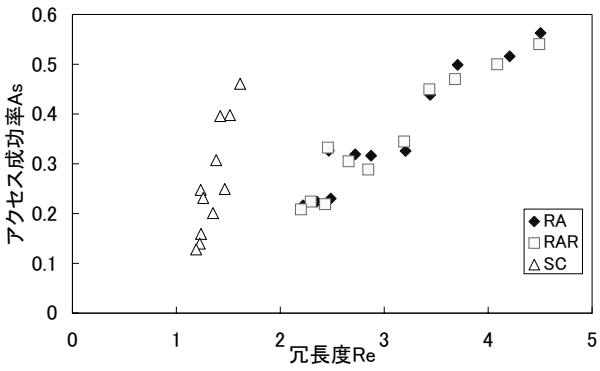

図 3: 冗長度とアクセス成功率

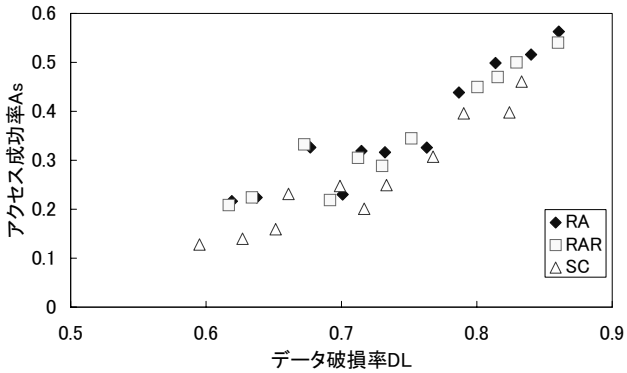

図 4: データ破損率とアクセス成功率

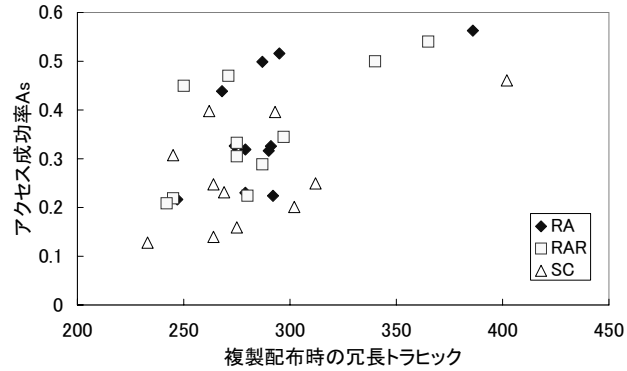

図 5: 複製配布時の冗長トラヒックとアクセス成功率

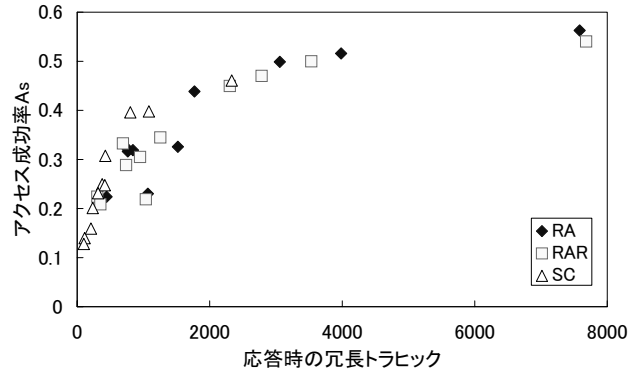

図 6: 応答時の冗長トラヒックとアクセス成功率

5　考察

今回のシミュレーションでは 2 層の影響により，多くの通信エラーの発生とそれによる無駄なトラヒックが多く発生することが確認でき，かなりの電力を浪費するものと考えられる．また，SC 方式において高いアクセス成功率を達成できるが，複製配布のコストが非常に高く，実環境での利用を想定すると，バッテリの消耗が著しく，運用に耐えないと予測できる．[4] で提案した中継ホスト選択手法はデータ中継を行う端末を減らすことで，冗長なトラヒックを削減する方法のため，SC 方式への適用効果が期待できる．また，評価結果からデータ応答時の冗長トラヒックが複製配布時よりも多いことが示された．複製が多く配置されてしまうと，データ要求時に多くの端末が応答を返してしまうため，トラヒックが増加したと考えられる．提案手法は主に複製配布における効率化を目的としており，データ応答について考慮していなかった．今後はデータ応答時の効率化を考慮し，提案手法の改善策についても検討する必要があると言える．

6　まとめ

アドホックネットワークにおける位置依存情報の複製配布方式である SC 方式の 2 層における影響について，プロトコルスタックが階層的にモデル化され，2 層の影響も評価可能なネットワークシミュレータを用いて SC 方式の課題を再確認した．SC 方式では高いアクセス成功率を維持しているが，複製配布時，データ応答時に冗長なトラヒックが多く発生していることが確認できた．このことから，中継ノードを減らすことでトラヒックを削減する中継ホスト選択手法 [4] が SC 方式の省電力化に適していると考えられる．今後，今回の評価で明らかになったデータ応答時のトラヒックに関して提案手法を改善させるとともに，電力消費モデルを実装し，その改善効果の評価を行う．

参考文献

[1] 原隆浩：アドホックネットワークにおけるデータ利用性向上のための複製配置，信学論，Vol.J84-B，No.3，pp. 632-642，2001.

[2] K. Chen and K. Nahrstedt: An integrated data lookup and replication scheme in mobile ad hoc networks, in Proc. of SPIE International Symposium on the Convergence of Information Technologies and Communications , 2001.

[3] 田森正紘，石原進，水野忠則：アドホックネットワークにおける端末の位置を考慮した複製配布方式の評価，情処研報，2001-MBL-18，Vol.2001，No.83，pp. 135-142，2001.

[4] 沖野智幸, 峰野博史, 石原進, 水野 忠則: アドホックネットワークにおける位置依存情報配布のための中継ホスト選択手法, マルチメディア，分散，協調とモバイル（DICOMO2003）シンポジウム論文集, Vol.2003, No.9, pp.609-612，2003.

[5] GloMoSim, http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/.

[6] 門洋一，大野雄一郎，行田弘一，大平孝：受信電力とキャリア検出により自律的に中継優先度と送信電力を決定するルーチング方式，信学技報，RCS2000-6，pp.35-42，2000.

[7] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris. Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks. In Proceedings of MobiCom’2001, Rome, Italy, 2001.