

# 省電力モバイルセンシングのための近隣デバイス間連携機構

A Neighbor Collaboration Mechanism for Energy-Efficient Mobile Sensing

樋口 雄大<sup>†1†2</sup>

山口 弘純<sup>†1</sup>

東野 輝夫<sup>†1</sup>

高井 峰生<sup>†1†3†4</sup>

Takamasa Higuchi

Hirozumi Yamaguchi

Teruo Higashino

Mineo Takai

## 1. はじめに

携帯電話端末から取得される位置情報やセンサの計測値を 3G/WiFi ネットワークを介してサーバ上へ集約することで、イベント会場等における混雑度や公共交通機関の運行状況といった環境情報をリアルタイムに認識するモバイルセンシング技術が近年高い注目を集めている [1, 2]。これに伴い、多数のモバイル端末（ノード）群から、環境認識に必要なセンサ情報を効率的に収集するための仕組みが求められている。既存のモバイルセンシングシステムの多くは、サービスに参加するすべての端末が 3G/WiFi ネットワーク等を介してセンサ情報を定期的にサーバへアップロードすることを想定しているが、こうした集中型のアーキテクチャでは、サーバへ同時に接続可能なノード数の上限など、スケーラビリティの制約が問題となる。また、通信インフラに障害が発生した場合にはシステムの利用そのものが困難になることから、避難支援等の災害時アプリケーションへの応用が難しいといった課題もある。

ノード数に対するスケーラビリティやシステムのロバスト性を高めるためには、Bluetooth 等の近距離無線通信を用いて近隣ノードとの間でローカルにセンサ情報を共有・集約する分散型のアーキテクチャ（図 1）が適していると考えられる。ノードの移動によってネットワーク内の接続関係が頻繁に変化する環境において効率的なデータ配送を行うためには、データを一時的に端末内のローカルなストレージに蓄積し、ノードが移動によって他のノードの通信範囲内に入った時点で転送を行う遅延耐性ネットワーク（DTN）のアプローチが有効であることが知られている [3-9]。各ノードは、DTN を介して近隣ノードとの間でセンサデータを共有するとともに、環境内に遍在するデジタルサイネージ等の公共デバイス（ローカルサーバ）の通信範囲内を通過した際に、集約したセンサ情報をローカルサーバへアップロードする。ローカルサーバ上でこれらのセンサ情報を分析し、環境認識結果を近距離無線通信やサイネージ等を通じて近隣の群衆へ発信すれば、災害時など通信インフラの利用が困難な環境においても、持続的なサービスの提供が可能となる。また、インターネットを介してローカルサーバ間を接続することで、より広域の環境情報を提供することもできる。

しかし、DTN の仕組みを前述のモバイルセンシングシステムにおけるセンサ情報の共有に適用するためには、次のような課題を解決する必要がある。1 つは、パケットが宛先ノードへ到達するまでの遅延時間と、端末の消費電力とのトレードオフ

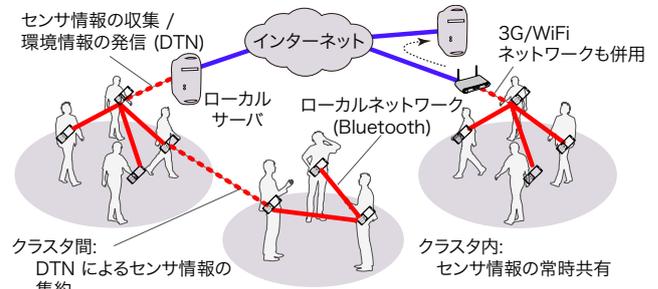


図 1 分散型モバイルセンシング

である。ノード同士が互いの通信範囲内にいる間に確実にデータの転送を行い、情報共有の遅延を軽減するためには、各ノードが高い頻度で近隣デバイスの探索を繰り返す必要がある。一方、デバイス探索の実行には一般に多くの電力が消費されるため、端末の消費電力を軽減するためには、探索の実行頻度を可能な限り抑えることが望ましい。また、スマートフォン等の市販デバイス上でシステムを動作させるためには、デバイスに実装された無線通信方式の制約を考慮してプロトコルを設計する必要がある。例えば、Bluetooth の場合、ピコネット内のデバイス数が 8 つに制限されているほか、デバイス探索の実行中は他のノードからの探索に対して応答できないといった性質がある。文献 [3-9] で提案されているような既存の DTN プロトコルでは、こうした無線通信の下位層に起因する問題はあまり考慮されていないが、特にノード密度が高い環境においては、通信リンクの次数制約や、デバイス探索の同時実行によるノード間のコンタクト検出率の低下によって通信機会の損失が頻繁に発生し、情報共有の効率が低下する可能性が高い。

本稿では、イベント会場や商業施設など多くの歩行者が往来する環境において、モバイル端末上で定期的に発生するセンサ情報を、DTN を介してモバイル端末間で効率的に共有するためのプロトコルを提案する。上記のような環境では、一般に、知人同士の集団や、同じ目的地へ向かう人の流れ等、互いに類似した移動の振り舞いをとるグループが存在する。提案手法では、ノード間の接続関係の履歴をもとに、こうした群衆内のグループを検出し、同一のグループに属すると推定されるノード間で連結なネットワーク（クラスター）を構成する。その上で、近隣ノードの探索をクラスターメンバー間で協調的に実行することで、コンタクト検出率を保ちつつ、1 ノードあたりのデバイス探索の実行頻度の軽減を図る。また、異なるクラスターに属するノードとの接続状況を常時メンバー間で共有し、クラスター間におけるメッセージの送受信を少数の通信リンクへ集約することで、ノードの次数制約に起因するメッセージ到達遅延の増加を抑制する。

ネットワークシミュレータ The ONE [10] によるシミュレーション実験の結果、すべてのノードがランダムな時間間隔で独

<sup>†1</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>†2</sup> 日本学術振興会 特別研究員 DC

JSPS Research Fellow

<sup>†3</sup> Space-Time Engineering, LLC

<sup>†4</sup> University of California, Los Angeles

立に近隣ノードの探索を繰り返し、検出されたすべての隣接ノードへ接続要求を行った場合と比較して、メッセージの到達率を維持しつつ、各ノードの平均的なデバイス探索の実行頻度を 46 % 軽減できることを確認している。

## 2. 関連研究

モビリティによってノード間の接続関係が頻繁に変化する非連結なネットワーク上においてメッセージを宛先ノードへと効率的に配送することを目指して、DTN 向けのルーティングプロトコルが活発に研究されている。Epidemic Routing [3] は、ノード同士が遭遇した際に、互いのノードが保持するメッセージの複製を送受信することにより、ノード間でメッセージの拡散を行う。この方式は、遅延が小さく、またルーティングのための事前知識が不要であるという利点があるが、ノード間のメッセージ転送が高頻度で発生するため、端末の消費電力が大きくなるといった課題がある。Epidemic Routing を拡張したプロトコルとして、ノード同士の過去の遭遇履歴情報から宛先ノードへのメッセージ配送確率を算出し、それに基づきメッセージの転送先や送信順序を制御することで、メッセージの複製回数を抑制する手法も提案されている [4-6]。RAPID [7] は、パケットの複製を行った場合の効用を定義し、単位メッセージサイズあたりの効用が最も大きいメッセージから順に送信を行う。効用関数の定義によって、平均/最大遅延の最小化やメッセージ到達率の最大化など、様々な指標に基づくルーティングの最適化を可能にしている。また、端末のバッテリー残量やユーザ間のソーシャルな関係性を考慮して、メッセージの送信回数をより効率的に軽減する手法も提案されている [8, 9]。提案手法は DTN のルーティングプロトコルと近距離無線通信の MAC/PHY 層の中間でミドルウェアとして動作し、クラスタの構成やトポロジ管理等を行う。このため、提案手法はルーティングプロトコルとは独立であり、上記のような任意の DTN 向けルーティング手法を適用することができる。

DTN を支える要素技術として、ノード間のコンタクトを効率的に検出する手法も活発に検討されている。文献 [11] では、デバイス探索の実行頻度とコンタクトの検出漏れ率とのトレードオフを理論解析によって明らかにしている。eDiscovery [12] は、検出された隣接ノードの数に応じてデバイス探索の実行頻度を動的に調整することで、コンタクトの検出率を維持しつつ、省電力化を実現している。これらの文献では、いずれも各ノードがデバイス探索の実行頻度を独立に決定することを想定している。これに対し、提案手法では、近隣ノード間で協調的に探索のタイミングを決定することで、1 ノードあたりのデバイス探索実行頻度のさらなる軽減と、コンタクト検出率の向上を図っている。なお、本稿では、それぞれのクラスタが一定の時間間隔で近隣クラスタとのコンタクトの探索を行うことを想定しているが、検出された近隣ノードの数等に応じて探索の実行間隔をクラスタ単位で動的に調整すれば、コンタクトの検出効率のさらなる向上が期待できる。

また、大規模な MANET におけるルーティングのオーバーヘッドを軽減するため、MANET 向けのクラスタリング手法が数多く提案されている。支配集合に基づくクラスタリング [13, 14]

では、ノード群の中から連結な支配集合を発見し、支配ノードのみをルート探索の対象とすることで、ルーティングの探索空間を限定する。ただし、ノードの移動による局所的なトポロジの変化を契機として、ネットワーク全体で大規模なクラスタの再構成が生じる場合があることから、ノードのモビリティが高い環境では、一般に十分な性能が得られない。これに対し、クラスタの維持や再構成のオーバーヘッドを抑えた低コストなクラスタリング手法も提案されている。LCC プロトコル [15] では、隣接ノードの中で最小の ID を持つノードがクラスタヘッドとなることで、1 ホップのクラスタを構成する。ノードの移動によって 2 つのクラスタヘッドが互いの通信範囲内に入った場合には、一方のノードがクラスタヘッドの役割を終了することで、クラスタの統合を行う。3hBAC [16] は、クラスタヘッド間の最短距離が 3 ホップとなるような重複のないクラスタを構成する。クラスタメンバを介してクラスタヘッドと 2 ホップで通信する“cluster guest”と呼ばれるノードを許容することで、クラスタヘッドと直接通信できなくなったノードのために新たなクラスタを構成する必要をなくし、クラスタ維持のオーバーヘッドを軽減している。また、クラスタの構成時にノードの移動特性を考慮することで、クラスタの安定性を高めるアプローチも提案されている。MOBIC [17] は、隣接するノード群に対する相対速度のばらつきが小さいノードをクラスタヘッドとして選択することで、クラスタの再構成の発生頻度を抑える。MobDHop [18] は、MOBIC のプロトコルを  $d$  ホップに拡張することで、ネットワーク内のクラスタ数のさらなる軽減を図っている。MobHiD [19] は、ノードの過去の移動履歴をもとに将来のモビリティを予測し、将来的に隣接ノード集合の変化が少ないと推定されるノードをクラスタヘッドに選択する。これらの手法では、クラスタの構成と維持のため、各ノードが定期的に隣接ノードの探索を行うことを想定している。特に、ノードのモビリティが高い環境においては、隣接ノード情報を最新の状態に保つため、各ノードが高い頻度で近隣デバイスの探索を繰り返すことが求められる。一方、1 章で述べた通り、Bluetooth など、市販の携帯電話端末で利用可能な無線通信方式では、デバイス探索の実行時に多くの電力が消費されるほか、探索が完了するまでに長い時間を要するため、隣接ノード情報の更新頻度に厳しい制約がある。これに対し、提案手法では、隣接ノードの探索をクラスタメンバ間で協調的に行うことで、クラスタの構成や維持に要するオーバーヘッドの軽減を図っている。なお、本稿では、議論の簡単化のため、過去一定期間のコネクティビティ情報のみを利用してクラスタの構成を行うことを想定しているが、MOBIC や MobHiD のように、ノード間の相対速度や過去の遭遇履歴情報を活用すれば、情報共有の効率をさらに高めることができると考えられる。

MANET 上に存在するすべてのノードに対してメッセージを効率的にフラッディングするためのプロトコルについても、様々な検討が行われている。Multipoint Relaying [20] や Dominant Pruning [21] では、送信元ノード  $u$  の隣接ノードの中から、2 ホップ以内のすべてのノードを被覆する最小の部分集合 (relay point 集合) をヒューリスティックに選択する。ここで、ノードが被覆されるとは、 $u$  が送信したメッセージを、直接ま

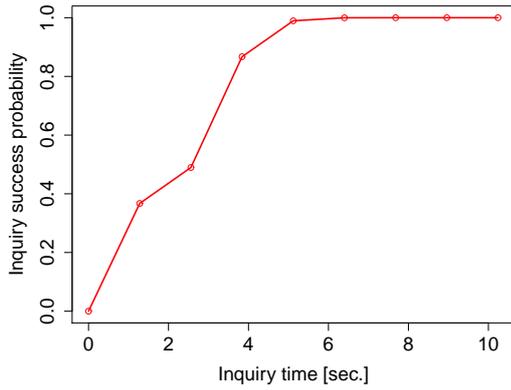


図 2 Inquiry の実行時間と成功率の関係 [23]

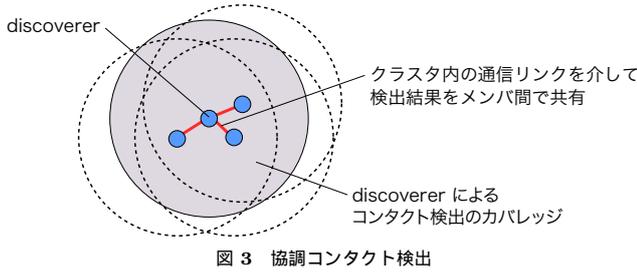


図 3 協調コンタクト検出

たは他ノードによる再送信によって間接的に受信できる状態を表す。送信ノードによって relay point に選択されたノードのみがメッセージの再送信を行うことで、ネットワーク全体における再送信の回数を軽減している。上記の手法では、送信ノードが relay point 集合の情報をメッセージ内に格納することを想定しているが、あらかじめノード間で分散的に連結な支配集合を求め、送信元ノードによらず、固定の relay point 集合を用いることで、メッセージのオーバーヘッドを軽減する手法も提案されている [22]。これらのフラッディングプロトコルでは、relay point 集合を構成するため、前述のクラスタリング手法と同様、各ノードが隣接ノード集合を定期的に収集する必要がある。本稿では、3 章および 4 章で述べる協調コンタクト検出の仕組みによってデバイス探索のオーバーヘッドの軽減を図るとともに、理論解析およびシミュレーション実験を通じて、その有効性を示している。

### 3. 協調コンタクト検出

Bluetooth のデバイス探索では、通信範囲内にいるすべてのノードを高い確率で検出するため、周波数チャネルを高速に切り替えながら繰り返し INQUIRY メッセージを送信する。このため、探索中は、他ノードからの INQUIRY に対する応答率が著しく低下するほか、消費電力が高い状態が持続する。あるノード  $u_i$  がデバイス探索を実行した時、 $u_i$  の通信範囲内のノード  $u_j$  が  $u_i$  の INQUIRY に対して応答できる確率（探索成功率）は、 $u_i$  の探索時間  $T_d$  のうち、 $u_j$  が探索を実行していない時間の長さ  $T_c$  ( $\leq T_d$ ) に依存して決まる。

ここで、 $T_c$  とデバイス探索の成功率の関係を図 2 に示す。探索の成功率は  $T_c$  が大きくなるほど増加し、 $T_c = 5.12$  秒で 99% に達する。短時間のコンタクトを確実に検出するために

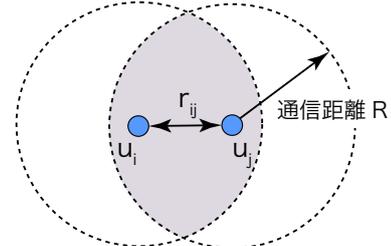


図 4 discoverer によるカバレッジのモデル

は、各ノードが高い頻度でデバイス探索を繰り返すことが求められるが、一方で、近隣ノードとの間でデバイス探索の同時実行が発生する可能性も高まるため、各ノードが非同期に探索を実行した場合には、一定の割合で検出漏れが発生する。提案手法では、クラスタメンバー間の地理的な近接性を活用して、図 3 のように、クラスタ内の一部のノードのみがデバイス探索を実行し、その結果をクラスタ内で共有することで、近隣ノードによる探索への応答性を高め、コンタクト検出率の向上を図る。

時刻  $t$  におけるクラスタメンバーの集合を  $\mathcal{M}(t)$ 、メンバー  $u_i \in \mathcal{M}(t)$  の隣接ノード集合を  $\mathcal{N}_i(t)$  とする。一般に、 $u_i$  の隣接ノード  $u \in \mathcal{N}_i(t)$  が他のメンバー  $u_j \in \mathcal{M}(t)$  にも隣接している確率  $P(u \in \mathcal{N}_j(t) | u \in \mathcal{N}_i(t))$  は、図 4 のように、 $u_i$  と  $u_j$  の通信範囲が重なる領域の面積に比例すると考えられる。各ノードの無線到達距離を  $R$ 、 $u_i$  と  $u_j$  の間の距離を  $r_{ij} = r$  とすると、 $P(u \in \mathcal{N}_j(t) | u \in \mathcal{N}_i(t), r_{ij} = r)$  は式 (1) により与えられる。

$$P(u \in \mathcal{N}_j(t) | u \in \mathcal{N}_i(t), r_{ij} = r) = \frac{1}{\pi R^2} \left\{ 2R^2 \arccos\left(\frac{r}{2R}\right) - \frac{r}{2} \sqrt{4R^2 - r^2} \right\} \quad (1)$$

ここで、時刻  $t$  において、クラスタ内で  $n$  個のメンバー  $\mathcal{D}(t) \subseteq \mathcal{M}(t)$  だけがデバイス探索を実行するような場合を考える。なお、本稿では、デバイス探索を行うメンバーを discoverer、それ以外のメンバーを non-discoverer と呼ぶ。non-discoverer  $u_i$  とクラスタ内の各メンバーとの地理的な距離  $r$  が確率分布  $f(r)$  に従うとすると、 $u_i$  の隣接ノード  $u$  がクラスタ内の discoverer  $u_j$  によって検出される確率  $P(X_{ij})$  は式 (2) により与えられる。なお、 $X_{ij}$  は  $u_i$  の隣接ノードが  $u_j$  によって検出される事象を表すものとする。

$$P(X_{ij}) = \int_0^\infty f(r_{ij} = r) \cdot P(X_{ij} | r_{ij} = r) dr = \int_0^\infty f(r_{ij} = r) \cdot P(u \in \mathcal{N}_j(t) | u \in \mathcal{N}_i(t), r_{ij} = r) dr \quad (2)$$

ここで、non-discoverer  $u_i$  の隣接ノードが、クラスタ内の少なくとも 1 つの discoverer によって検出される確率を考える。 $n$  個の discoverer を  $u_1, u_2, \dots, u_n$  とし、 $u_i$  とそれぞれの discoverer との距離を  $r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}$  とする。また、一般性を失わず、 $r_{i1} \leq r_{i2} \leq \dots \leq r_{in}$  とする。このとき、 $u_i$  がいずれかの discoverer によって検出される確率  $P(X_{i1} \vee X_{i2} \vee \dots \vee X_{in})$  について、明らかに次の関係が成り立つ。

$$P(X_{i1} \vee X_{i2} \vee \dots \vee X_{in}) \geq P(X_{i1}) \quad (3)$$

$u_{i1}$  は、 $n$  個の discoverer のうち  $u_i$  との距離が最も近いノードである。クラスタメンバーとの距離の累積分布関数を

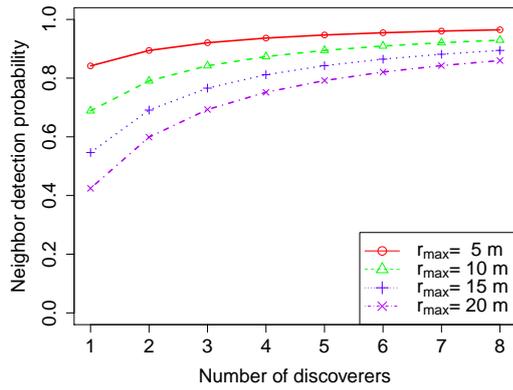


図5 discoverer による隣接ノードの検出率 (理論値)

$F(r) = \int_0^r f(r)dr$  とすると, 最も近くにいる discoverer との距離  $r_{i1}$  の累積分布関数  $F_1(r)$  は式 (4) で与えられる.

$$\begin{aligned} F_1(r) &= 1 - P(r_{i1} > r \wedge r_{i2} > r \wedge \dots \wedge r_{in} > r) \\ &= 1 - P(r_{i1} > r)P(r_{i2} > r) \dots P(r_{in} > r) \\ &= 1 - \{1 - F(r)\}^n \end{aligned} \quad (4)$$

$F_1(r)$  を距離  $r$  について微分することで,  $r_{i1}$  の確率密度関数  $f_1(r)$  が得られる.

$$f_1(r) = \frac{dF_1(r)}{dr} = n \{1 - F(r)\}^{n-1} f(r) \quad (5)$$

式 (2) および式 (5) を式 (3) へ代入すると,

$$\begin{aligned} &P(X_{i1} \vee X_{i2} \vee \dots \vee X_{in}) \\ &\geq \frac{n}{\pi R^2} \int_0^\infty \{1 - F(r)\}^{n-1} f(r) \cdot \\ &\quad \left\{ 2R^2 \arccos\left(\frac{r}{2R}\right) - \frac{r}{2} \sqrt{4R^2 - r^2} \right\} dr. \end{aligned} \quad (6)$$

discoverer によるコンタクト検出率の特性を調べるため, クラスタメンバとの距離が  $(0, r_{max})$  の一様分布に従うと仮定した場合の  $P(X_{i1} \vee X_{i2} \vee \dots \vee X_{in})$  の下限を, 式 (6) により算出した. 無線通信距離  $R$  は Bluetooth を想定して 10m とし,  $r_{max}$  を 5 ~ 20m, discoverer の数  $n$  を 1~8 の間でそれぞれ変化させた. このとき, non-discoverer の隣接ノードがクラスタ内のいずれかの discoverer によって検出される確率の下限を図 5 に示す.  $r_{max} = 5\text{ m}$  の時には, クラスタメンバのうち 1 つのノードがデバイス探索を行うことで, 他のメンバの隣接ノードも 84% 以上の確率で検出可能であることが分かる. このように, クラスタメンバの中で一部のノードのみがデバイス探索を実行することで, コンタクト検出率を保ちつつ, 各メンバの平均的なデバイス探索の実行頻度を軽減することが可能である. メンバ間の距離が離れるにつれて検出漏れの発生頻度が増加しているが, この場合には, discoverer の数  $n$  を増やすことで, 検出率を高めることができる. なお, 本稿では経験的に  $n = 2$  とする.

## 4. プロトコル設計

### 4.1 想定環境

各ノードは, 加速度センサ等の内蔵センサから一定時間ごとに計測値を取得し, 特徴量の抽出などアプリケーションに応じた前処理によってデータサイズの圧縮を行う. 圧縮後のセンサ

情報 (数十 bytes ~ 数 Kbytes) は, ノード間の DTN を介して環境内のすべてのノードへ拡散される. サーバは生成から一定時間内に受信されたセンサ情報のみを用いて環境認識を行うものとし, あらかじめ定められた許容遅延時間を超過したメッセージは直ちに破棄されるとする.

### 4.2 プロトコルの概要

提案手法では, 同じグループに属すると推定されるノード間で連結なネットワーク (クラスタ) を構成し, コンタクトの探索や通信リンクの管理をクラスタ単位で協調的に行うことにより, デバイス探索の実行頻度とリンク確立のオーバーヘッドの軽減を図る. 初期状態においてはすべてのノードが自身をクラスタヘッド (CH) とするサイズ 1 のクラスタを構成するものとし, その後は, 各クラスタが以下の 3 つのフェーズを繰り返すことで, クラスタの維持とデータの送受信を行う.

- (1) クラスタ維持フェーズ: CH はデバイス探索を実行し, 隣接ノード集合を取得する (図 6 (a)). 他のメンバは, CH からのデバイス探索に回答するため, 検出可能状態で待機する. デバイス探索が完了すると, CH は, 検出された隣接ノード集合をもとにクラスタメンバを更新する. クラスタの構成と維持については 4.3 節で述べる.
- (2) コンタクト検出フェーズ: CH は, クラスタメンバの中から自身を含む  $n$  個の discoverer をランダムに選択し, discoverer 集合  $\mathcal{D}(t)$  をクラスタ内へフラッディングする. CH 以外の discoverer はデバイス探索を実行し, 近隣クラスタとのコンタクトを検出する (図 6 (b)).
- (3) 通信フェーズ: discoverer は, クラスタ外の隣接ノードに対して接続要求を行い, 互いのクラスタが保持するデータを送受信する (図 6 (c)). 他クラスタからの接続要求への応答性を維持するため, クラスタ間の通信リンクは, データの送受信が完了した時点で切断される. また, 他クラスタから受信したデータおよびクラスタメンバによって新たに取得されたセンサ情報は, クラスタ内のネットワークを介して即時にメンバ間で共有される.

### 4.3 クラスタの構成と維持

クラスタ維持フェーズでは, CH  $u_0$  がデバイス探索を実行し, 近隣ノードに対して *INQUIRY* メッセージをブロードキャストする. *INQUIRY* を受信した近隣ノード  $u_i$  は, 自身と同一のクラスタに属するすべてのメンバの ID を格納した *INQUIRY\_RESPONSE* メッセージを  $u_0$  に対して返答する. これにより, CH  $u_0$  は, 現時刻  $t$  における隣接ノード集合  $\mathcal{N}_0(t)$  と, 各隣接ノード  $u_i \in \mathcal{N}_0(t)$  が属するクラスタのメンバ集合  $\mathcal{M}_i$  を取得することができる. なお, 2 つの隣接ノード  $u_i, u_j \in \mathcal{N}_0(t)$  が同一のクラスタに属している場合には,  $\mathcal{M}_i = \mathcal{M}_j$  となる. Bluetooth では, デバイス探索に対する応答メッセージの中に, 最大 2,048 バイトのデバイス名 (任意の文字列) を格納することができる. このエントリにクラスタメンバの ID 情報を含めることで, 新たなコネクションを確立することなく, デバイス探索と同時に近隣のクラスタ情報を収集することが可能となる.

このフェーズでは CH のみがデバイス探索を実行するため,

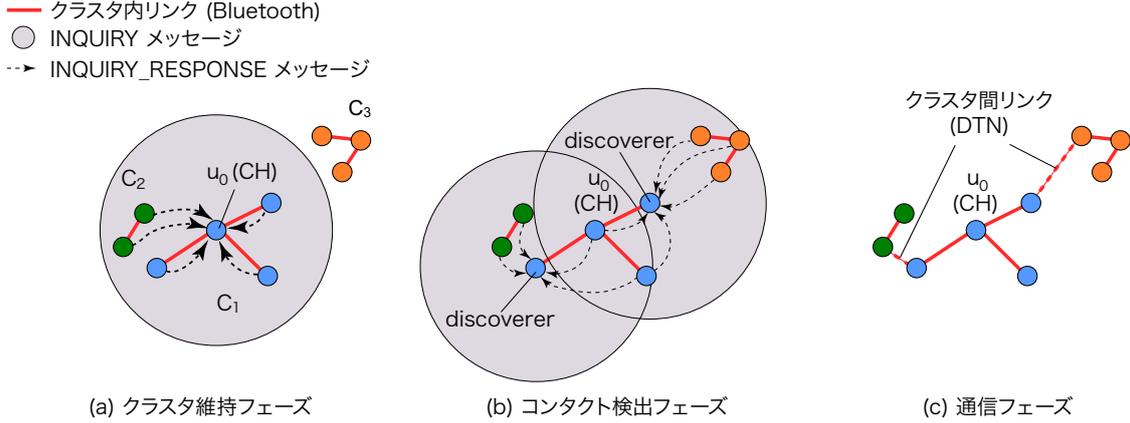


図 6 プロトコルの動作例

クラスタ内のメンバは高い確率で *INQUIRY* メッセージに回答することが可能である．一方，ノードがデバイス探索や通信を行うタイミングはクラスタごとに独立に決定されるため，異なるクラスタに属するノードは， $u_0$  と同時にデバイス探索を実行している可能性がある．前述の通り，隣接するノードが同時にデバイス探索を実行した場合には互いの検出が困難となるため，こうしたクラスタ外の隣接ノードに対しては確率的に検出漏れが生じる．CH がクラスタの維持を行う際には，隣接ノードの検出漏れによってクラスタの安定性が低下することを防ぐため，過去  $W$  ラウンドの隣接ノード集合の履歴  $\langle \mathcal{N}_0(t), \mathcal{N}_0(t-t_1), \dots, \mathcal{N}_0(t-t_{W-1}) \rangle$  を用いて，式 (7) により，現在の隣接ノード集合  $\mathcal{N}_0(t)$  を補完する．

$$\mathcal{N}'_0(t) = \mathcal{N}_0(t) \cup \mathcal{N}_0^c(t) \quad (7)$$

ここで， $\mathcal{N}_0^c(t)$  は，過去  $W$  ラウンドのうち  $\lceil W/2 \rceil$  以上のラウンドで検出された隣接ノードの集合とする．なお，本稿ではウィンドウサイズを  $W = 3$  とする．

デバイス探索が完了すると，CH は，隣接ノード集合の履歴に基づき，クラスタのメンバを更新する．提案手法では，すべてのクラスタメンバ  $u_i \in \mathcal{M}_0$  が式 (8) の条件を満たすようにメンバの追加と削除を行う．

$$\forall t' \in (t-T, t]; u_i \in \mathcal{N}'_0(t') \quad (8)$$

ここで， $T$  はノードのモビリティの特性に応じて決まるパラメータである．式 (8) より， $u_0$  を CH とするクラスタに属することができるのは，過去  $T$  秒以上にわたって  $u_0$  との隣接関係が持続しているノードのみである．以上の定義に基づき，CH は下記の手順でクラスタのメンバ集合を更新する．

- (1) クラスタメンバ集合  $\mathcal{M}_0$  の中で，最新の隣接ノード集合に含まれないノード  $u_i \notin \mathcal{N}'_0(t)$  は，式 (8) の条件を満たさないため，メンバ集合から除外する．
- (2) クラスタメンバ以外の隣接ノード  $u_i \notin \mathcal{M}_0$  の中で， $u_i$  が属するクラスタ  $\mathcal{M}_i$  のすべてのメンバが式 (8) の条件を満たす場合には， $\mathcal{M}_0$  に  $\mathcal{M}_i$  のすべてのメンバを追加することで，2 つのクラスタをマージする．

以上により，現在のラウンドにおける新たなメンバ集合  $\mathcal{M}'_0$  が得られる．最後に，CH は変更後のメンバ集合  $\mathcal{M}'_0$  を *MEM-*

*BERSET\_UPDATED* メッセージとしてクラスタ内へフラッディングすることで，クラスタメンバに対してクラスタ内のネットワークポロジの更新を促す．

#### 4.4 クラスタ間の通信リンクの管理

デバイス探索完了後，discoverer  $u_i \in \mathcal{D}(t)$  は，クラスタ外の隣接ノード  $u_j \notin \mathcal{M}_i$  に対して接続要求を行う．これらの通信リンクを通じて  $u_j$  から受信したメッセージ，およびクラスタメンバによって新たに取得されたセンサ情報は，クラスタ内のネットワークを介して，直ちに他のメンバと共有される．このため，クラスタ内のいずれかのメンバが，近隣クラスタとの間で 1 本の通信リンクを確立すれば，互いのクラスタ内で保持するすべての情報を送受信することが可能である．

discoverer  $u_i \in \mathcal{D}(t)$  は，コンタクト検出フェーズにおいて収集した隣接ノード集合  $\mathcal{N}_i(t)$  および隣接ノード  $u_j \in \mathcal{N}_i(t)$  が属するクラスタのメンバ集合をもとに，接続すべき隣接クラスタの集合  $\mathcal{Q}_i = \{\mathcal{M}_j \mid \exists u_j \in \mathcal{N}_i(t) \cap \mathcal{M}_j\}$  を求める．その上で，それぞれの隣接クラスタ  $\mathcal{M}_j \in \mathcal{Q}_i$  から， $u_i$  自身と隣接しているメンバ  $u_k \in \mathcal{N}_i(t) \cap \mathcal{M}_j$  を 1 つずつ選択し，それらのノードに対して接続要求を行う．このとき，同一のクラスタに対して複数のメンバが接続要求を行うことを防ぐため，次のような排他制御を行う． $u_i$  が隣接ノード  $u_k$  への接続要求を行う際には，クラスタ内へ *LOCK*( $u_k$ ) メッセージをフラッディングする．これにより，他の discoverer は， $u_k$  と同一のクラスタに属する隣接ノードへの接続要求を一定期間抑制される． $u_k$  との間で通信リンクの確立に成功すると， $u_i$  は *CONNECTED*( $u_k$ ) メッセージをクラスタ内へフラッディングする．*CONNECTED*( $u_k$ ) を受信すると，discoverer は，接続すべき隣接クラスタの集合  $\mathcal{Q}$  から  $u_k$  が属するクラスタを削除する． $u_k$  への接続が失敗した場合には， $u_i$  は  $\mathcal{N}_i(t) \cap \mathcal{M}_k$  に含まれる他のノードへの接続を試みる．以上により，隣接するクラスタとの間で 1 組ずつ通信リンクが確立される．

#### 4.5 クラスタ内ネットワークの維持

Bluetooth では，1 つのピコネットに接続できるノード数に上限があるため，クラスタ内ネットワークを構成する際には，最小限のリンク数で連結なトポロジを実現できることが望ましい．そこで，提案手法では，クラスタ内において，CH を根ノードとするツリー状のネットワークを維持する．初期状態

においては、すべてのクラスタは根ノードのみからなるサイズ1のネットワークを構成する。クラスタのマージを行う際には、CH  $u_0$  が、マージ先のクラスタのCHに対して接続要求を行い、 $u_0$  自身がマージ後のクラスタのCHとなる。また、ツリー上の親ノードとの通信リンクが切断された場合には、自身と非連結な他のメンバに対して接続要求を行うことで、クラスタ内のネットワークを修復する。一方、CHから受信したクラスタメンバ集合に自ノードが含まれない場合には、すべてのメンバとの通信リンクを切断した上で、自身をCHとする新たなクラスタを構成する。

また、あるノードからクラスタ内のメンバへの通信リンクが一定数を超えた場合には、ネットワークトポロジの再構成を行い、ノードのリンク次数を軽減する。ノード  $u$  が6つ以上の隣接ノードを持つとき、それらの隣接ノードの中には、互いに隣接関係にあるノードが少なくとも1組存在する（これらを  $v, w$  とする）[24]。  $u$  は、 $v - w$  間のリンク確立を促した後、 $v$  または  $w$  とのリンクを切断することで、自身のリンク次数を軽減する。このように、クラスタメンバとの通信リンクの数を高々5つに制限することで、他のクラスタのノードからの接続要求への応答性を維持する。

## 5. 性能評価

### 5.1 シミュレーション環境

提案手法の有効性を評価するため、ネットワークシミュレータ The ONE [10] によるシミュレーション実験を行った。シミュレーション領域のサイズは  $50\text{m} \times 50\text{m}$  とし、ノード数は100とする。各ノードは、10ノードからなるグループを構成し、以下のようなモビリティモデルに従って、フィールド内をランダムに移動するものとする。まず、Reference Point Group Mobility モデル [25] と同様、各グループの平均的な振る舞いを表す10個の参照点を作成する。それぞれの参照点は、Random Waypoint モデルに従ってフィールド内を独立に移動する。移動先の waypoint はフィールド内からランダムに選択され、参照点は目的地に向かって一定の速度で移動する。このとき、移動速度は  $(v_{min}, v_{max})$  の一様分布からサンプリングする。 $v_{min}, v_{max}$  はそれぞれノードの最小・最大速度であり、本稿では  $v_{min} = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $v_{max} = 1.5 \text{ m/s}$  とする。目的地の waypoint に到着すると、参照点は最大120秒間静止した後、次の目的地への移動を開始する。グループの参照点が次の目的地を選択すると、そのグループに属するノードは、参照点を選択した waypoint を中心とする半径3mの領域内から自身の行き先 waypoint をランダムに選択する。以上により、各ノードは、グループの参照点を中心として、集団的に振る舞う。

各ノードは、10秒間隔で、すべてのノードを宛先とする2KBのメッセージ（センサ情報）を生成し、Epidemic Routing プロトコルによって、ノード間でメッセージを拡散する。メッセージの生存期間（TTL）は60秒とし、生成から60秒以内に宛先ノードへ到達したメッセージを配送成功と定義する。ノード間の通信は Bluetooth v2.1+EDR を想定し、通信距離は10m、通信速度は2Mbpsとする。また、それぞれのクラスタは10~20秒のランダムな間隔でコンタクト検出を行うものとし、デ

表1 シミュレーション結果 (Proposed/ $n=2$ )

デバイス探索実行間隔	65.1 sec
平均メッセージ到達率	57%
1ノードあたりの平均リンク確立頻度	0.026 /sec.

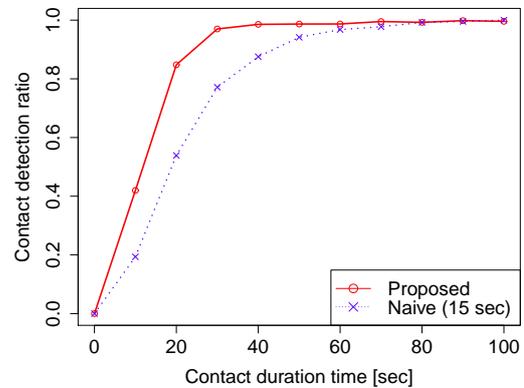


図7 コンタクト検出率

バイス探索の持続時間は5.12秒とする。

なお、The ONE の MAC/PHY 層は、ノードの通信距離と通信速度のみを考慮した抽象モデルで実装されているが、本実験では、デバイス探索による近隣ノードの検出率を文献 [23] のモデルに基づき確率的に決定することで、Bluetooth の特性を再現している。また、各ノードの最大リンク次数は7とし、接続要求を行ってからノード間で通信が開始するまでの間には、2秒間の遅延が生じるものとした。

以上の環境のもとで、3,600秒間のシミュレーションを行い、提案手法の性能を、すべてのノードが  $T_{inq} \pm 5$  秒のランダムな時間間隔でデバイス探索を実行し、検出されたすべての隣接ノードに対して通信リンクの確立を試みるシンプルな通信プロトコル (Naive) と比較した。なお、 $T_{inq}$  は各ノードによるデバイス探索の実行間隔の平均値を表すパラメータとする。

### 5.2 シミュレーション結果

#### 5.2.1 コンタクト検出率

ノード間のコンタクトの持続時間とコンタクト検出率の関係を図7に示す。複数のノードが同時にデバイス探索を実行した場合に互いの検出率が著しく低下するという Bluetooth の特性により、Naive において、すべてのノードが平均15秒間隔でデバイス探索を繰り返した場合にも、一定の割合でコンタクトの検出漏れが発生している。提案手法では、少数の discoverer のみがデバイス探索を実行するため、探索の空間的なカバレッジは Naive に比べて低下するものの、近隣ノードとの間で探索の同時実行が発生する頻度が軽減されるため、discoverer の通信範囲内に存在するノードは高い確率で検出することができる。その結果、Naive と比較して、短時間のコンタクトをより高確率で検出することが可能となっている。

#### 5.2.2 メッセージ到達率

提案手法によりノード間でセンサ情報の拡散を行った場合の、1ノードあたりのデバイス探索実行間隔、各ノードが DTN を介して許容遅延時間以内に収集することができたメッセージの割合（メッセージ到達率）、および1ノードあたりの接続要求の実行頻度の平均値を表1に示す。また、Naive において、各

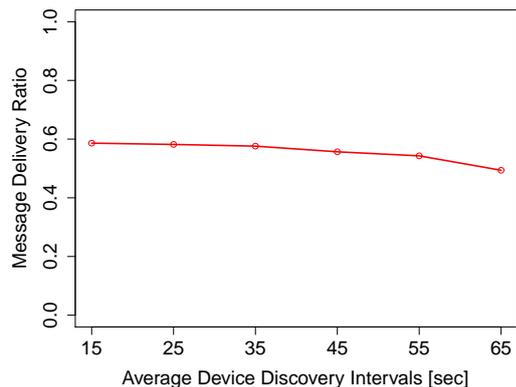


図 8 メッセージ到達率 (*Naive*)

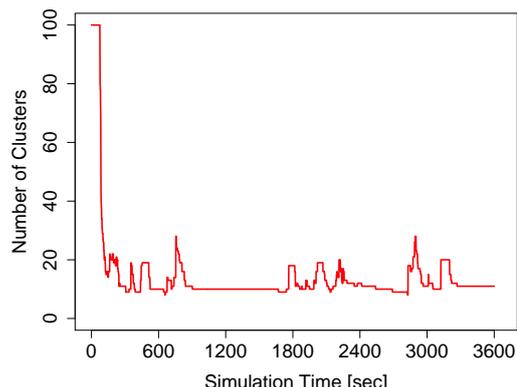


図 10 クラスタ数の時間変化

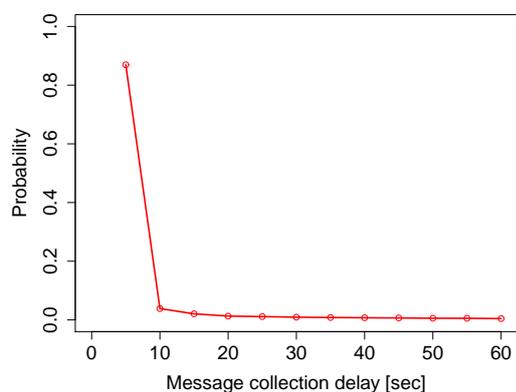


図 9 メッセージ収集遅延時間

ノードによるデバイス探索実行間隔の平均値  $T_{inq}$  を 15 ~ 65 秒の間で変化させた場合のメッセージ到達率を図 8 に示す。提案手法では、60 秒以内に宛先ノードへ到達したメッセージの割合が 57% となり、*Naive* においてすべてのノードが平均 35 秒間隔でデバイス探索を繰り返した場合と同等のメッセージ配送性能が得られることが分かった。一方、*Naive* では、 $T_{inq}$  が長くなるにつれて許容遅延時間内に宛先へ到達するメッセージの割合が徐々に低下しており、各ノードのデバイス探索の実行間隔を提案手法と同等の 65 秒とした場合には、メッセージ到達率が 49% まで低下している。このように、提案手法では、通信リンクの管理やコンタクト検出をクラスタメンバー間で協調的に行うことにより、同等のデバイス探索実行頻度で、メッセージ到達率を 16% 改善することができている。なお、ノード間のコンタクトが即時に検出され、通信リンクの次数制約が存在しないと仮定した理想的な通信環境におけるメッセージ到達率は 73% となった。

### 5.2.3 データ収集率

最後に、各クラスタの CH が 3G/WiFi ネットワークを介して自身が保持するメッセージをサーバへアップロードすると仮定し、メッセージが CH を介してサーバに到達するまでの遅延時間の分布を評価した結果を図 9 に示す。また、ノード群によって構成されたクラスタの総数の時間変化を図 10 に示す。初期状態においてはすべてのノードが自身を CH とするサイズ 1 のクラスタを構成するため、合計 100 個のクラスタが構成される。その後、時間の経過とともにクラスタの統合が

繰り返され、クラスタ数は 10 ~ 20 の範囲に収束する。クラスタ内ではメンバー間の通信リンクを介してセンサ情報が即時に共有されるため、87% のメッセージが 5 秒以内の遅延時間でサーバへ到達している。一方、全シミュレーション時間を通じたクラスタ数の平均値は 14.3 となり、サーバとの接続の総数は、すべてのノードがサーバと直接通信を行う集中型のアーキテクチャと比較して、平均 86% 軽減されている。また、60 秒以内にサーバへ到達するメッセージの割合は 94% となっており、高いデータ収集率が実現されていることが分かる。以上のように、ノード間におけるローカルな情報共有が、ノード数に対するスケーラビリティの向上にも寄与することを確認している。

## 6. ま と め

本稿では、通信リンクの管理やコンタクト検出を近隣ノード間で協調的に行うことにより、モバイル端末上で定期的が発生するセンサ情報を、DTN を介して群衆間で効率的に共有するための手法を提案した。シミュレーション実験の結果、すべてのノードがランダムな時間間隔で独立にデバイス探索を実行し、検出されたすべての隣接ノードへ接続要求を行う場合と比較して、メッセージ到達率を維持しつつ、各ノードの平均的なデバイス探索の実行頻度を 46% 軽減できることを示した。また、各クラスタの CH が保持するメッセージを 3G/WiFi ネットワークを介してサーバへ集約した場合、すべてのノードが直接サーバとの通信を行う集中型のアーキテクチャと比較して平均的な通信リンクの数を 86% 軽減しつつ、87% のメッセージを 5 秒以内の遅延時間で収集できることが分かった。

ノード群から位置情報や音声等のセンサ情報を収集する際、互いに地理的に近くにいるノードから取得される情報は、一般に、高い類似性を有すると想定される。このため、クラスタメンバー間でセンシングの実行タイミングをスケジューリングすれば、センサ情報のカバレッジを維持しつつ、各ノードによるセンシングの実行頻度を軽減し、さらなる省電力化を実現することが可能になると考えられる。今後は、センサの計測値の特性や端末の残余電力等を考慮してメンバー間で効率的なセンシングのスケジューリングを行うための手法の検討や、センサ情報の集約・圧縮による通信トラフィックの軽減等に取り組んでいく予定である。

## 参 考 文 献

- 1) Weppner, J. and Lukowicz, P.: Bluetooth based collaborative crowd density estimation with mobile phones, *Proceedings of the 11th International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '13)*, pp.193–200 (2013).
- 2) Zhou, P., Zheng, Y. and Li, M.: How long to wait?: predicting bus arrival time with mobile phone based participatory sensing, *Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys '12)*, pp.379–392 (2012).
- 3) Vahdat, A. and Becker, D.: Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks, Technical report (2000).
- 4) Lindgren, A., Doria, A. and Schelén, O.: Probabilistic routing in intermittently connected networks, *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, Vol.7, No.3, pp. 19–20 (2003).
- 5) Burgess, J., Gallagher, B., Jensen, D. and Levine, B.: MaxProp: Routing for Vehicle-Based Disruption-Tolerant Networks, *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM '06)*, pp.1–11 (2006).
- 6) Burns, B., Brock, O. and Levine, B.: MV routing and capacity building in disruption tolerant networks, *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '05)*, Vol.1, pp.398–408 (2005).
- 7) Balasubramanian, A., Levine, B. and Venkataramani, A.: DTN routing as a resource allocation problem, *Proceedings of the 2007 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications (SIGCOMM '07)*, pp.373–384 (2007).
- 8) Leguay, J., Friedman, T. and Conan, V.: Evaluating Mobility Pattern Space Routing for DTNs, *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM '06)*, pp.1–10 (2006).
- 9) Musolesi, M., Hailes, S. and Mascolo, C.: Adaptive Routing for Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks, *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WOWMOM '05)*, pp.183–189 (2005).
- 10) Keränen, A., Ott, J. and Kärkkäinen, T.: The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation, *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools '09)* (2009).
- 11) Wang, W., Srinivasan, V. and Motani, M.: Adaptive contact probing mechanisms for delay tolerant applications, *Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '07)*, pp.230–241 (2007).
- 12) Han, B. and Srinivasan, A.: eDiscovery: Energy efficient device discovery for mobile opportunistic communications, *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP '12)*, pp.1–10 (2012).
- 13) Wu, J. and Li, H.: On calculating connected dominating set for efficient routing in ad hoc wireless networks, *Proceedings of the 3rd international workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications (DIALM '99)*, pp.7–14 (1999).
- 14) Chen, Y.P. and Liestman, A.L.: Approximating minimum size weakly-connected dominating sets for clustering mobile ad hoc networks, *Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc '02)*, pp. 165–172 (2002).
- 15) Chiang, C.-C., Wu, H.-K., Liu, W. and Gerla, M.: Routing in Clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel, *Proceedings of the IEEE Singapore International Conference on Networks (SICON '97)*, pp.197–211.
- 16) Yu, J. and Chong, P. H.J.: 3hBAC (3-hop between adjacent clusterheads): a novel non-overlapping clustering algorithm for mobile ad hoc networks, *2003 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and signal Processing (PACRIM '03)*, Vol.1, pp.318–321 (2003).
- 17) Basu, P., Khan, N. and Little, T.: A mobility based metric for clustering in mobile ad hoc networks, *Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems Workshop*, pp.413–418 (2001).
- 18) Er, I. and Seah, W.: Mobility-based d-hop clustering algorithm for mobile ad hoc networks, *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2004 (WCNC '04)*, Vol.4, pp.2359–2364 (2004).
- 19) Konstantopoulos, C., Gavalas, D. and Pantziou, G.: Clustering in mobile ad hoc networks through neighborhood stability-based mobility prediction, *Comput. Netw.*, Vol.52, No.9, pp.1797–1824 (2008).
- 20) Qayyum, A., Viennot, L. and Laouiti, A.: Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks, *Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '02)*, pp.3866–3875 (2002).
- 21) Lim, H. and Kim, C.: Flooding in wireless ad hoc networks, *Computer Communications*, Vol.24, No.34, pp. 353 – 363 (2001).
- 22) Wu, J. and Li, H.: A Dominating-Set-Based Routing Scheme in Ad Hoc Wireless Networks, *Telecommunication Systems Journal*, Vol.3, pp.63–84 (1999).
- 23) Peterson, B., Baldwin, R. and Kharoufeh, J.: Bluetooth Inquiry Time Characterization and Selection, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.5, No.9, pp.1173–1187 (2006).
- 24) Zaruba, G., Basagni, S. and Chlamtac, I.: Bluetrees – scatternet formation to enable Bluetooth-based ad hoc networks, *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '01)*, Vol.1, pp. 273–277 (2001).
- 25) Hong, X., Gerla, M., Pei, G. and Chiang, C.-C.: A group mobility model for ad hoc wireless networks, *Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM '99)*, pp.53–60 (1999).