

機関番号：31303

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20680002

研究課題名（和文） モバイルシンクを用いた大規模センシング情報処理システムの構築

研究課題名（英文） Development of a large-scale information processing system making use of mobile sink

研究代表者

中山英久（NAKAYAMA HIDEHISA）

東北工業大学・工学部・講師

研究者番号：40400303

研究成果の概要（和文）：ユビキタスシステムを実現するネットワークインフラであるアドホックネットワークとセンサネットワークの大規模化が必要であり、これらを協調させた新しいアプローチであるモバイルシンクに関して、広域エリアにおける情報収集を実現するための情報収集システムを構築するための要素技術を研究した。

研究成果の概要（英文）：It is necessary to research for achieving a large-scale ubiquitous system which is based on a network infrastructure of ad-hoc networks and sensor networks. I researched some technology components for developing an information-gathering system to the mobile sink which is the new cooperative approach on widespread area.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2009年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	9,300,000	2,790,000	12,090,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：ユビキタスコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

本研究では、センサネットワークとアドホックネットワークを協調させた新しいアプローチである、モバイルシンクを用いた広域エリアにおける情報収集において、信頼性を確保しつつも効率的な情報収集を実現するための情報収集システムの構築に関する研究を目的としていた。具体的には、モバイルシンクを中心としたセンサクラスタリング技術、およびモバイルシンクのセキュリティ技術についての研究を行い、研究開始当初は、実用可能な段階までモバイルシンク技術を成熟させることが目標であった。

2. 研究の目的

(1) クラスタリング技術について

本研究では特に、ノード-クラスタ中心間の距離和を最適化するクラスタリングアルゴリズムとして EM アルゴリズムに着目する。距離和の最適化に優れた EM アルゴリズムは、ネットワーク全体での通信距離の削減、すなわち消費電力の抑制に優れると考えられる。ただし、実際の無線センサネットワークにおける通信距離は、EM アルゴリズムで用いられる直線距離とは異なっている。種々のクラスタリング技術について調査した結果、通信に特化した EM アルゴリズムの改良手法について検討を行った。

(2) セキュリティ技術について

本研究では特に、データ収集におけるセキュリティ確保のため、特別な情報が MANET と管理された有線ネットワークとの接続点である GW を通過するような GW 選択手法について着目する。データタイプに応じた経路制御を行うと、トラヒックの偏りが発生する可能性がある。そこでデータタイプを考慮した GW 選択に加え、特別なデータを優先させる輻輳制御を行うような 経路制御方式について検討を行った。

3. 研究の方法

(1) クラスタリング技術について

EM アルゴリズムは、ノードが二次元混合正規分布に従って分布しているというモデルの下で、ノード-クラスタ中心間の距離和最小化を行う有効なアルゴリズムである。このアルゴリズムは、与えられたパラメータからノードの負担率を算出する E ステップと、ノードの負担率に従って尤度関数の期待値を最大化するパラメータを決定する M ステップにより構成される。このとき、尤度関数の期待値は単調増加かつ一定値に収束することが保証されている。2次元混合正規分布における EM アルゴリズムは以下のように表される。なお、式中の変数及びパラメータの定義を下表に示す。

変数	定義
N	ノード数
\mathbf{x}_n	ノード x_n の二次元位置ベクトル
\mathbf{x}	\mathbf{x}_n のベクトル集合
K	クラスタ数
π_k	クラスタ c_k の混合比
$\boldsymbol{\mu}_k$	クラスタ c_k のクラスタ中心の二次元位置ベクトル
$\boldsymbol{\mu}$	$\boldsymbol{\mu}_k$ のベクトル集合
$\boldsymbol{\Sigma}_k$	クラスタ c_k の 2×2 の分散共分散行列
$\boldsymbol{\Sigma}$	$\boldsymbol{\Sigma}_k$ の行列集合

[E-step] 各ノードの負担率を求める。

$$\gamma(z_{nk}) = \frac{\pi_k \mathcal{N}(\mathbf{x}_n | \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k)}{\sum_{j=1}^K \pi_j \mathcal{N}(\mathbf{x}_n | \boldsymbol{\mu}_j, \boldsymbol{\Sigma}_j)}$$

ここで

$$\mathcal{N}(\mathbf{x}_n | \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k) = \frac{1}{(2\pi)^{|\boldsymbol{\Sigma}_k|/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_k)^T \boldsymbol{\Sigma}_k^{-1} (\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_k) \right\}$$

[M-step] 尤度関数を最大化するパラメータを求める。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu}_k^{\text{new}} &= \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N \gamma(z_{nk}) \mathbf{x}_n \\ \boldsymbol{\Sigma}_k^{\text{new}} &= \frac{1}{N_k} \sum_{n=1}^N \gamma(z_{nk}) (\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_k^{\text{new}}) (\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_k^{\text{new}})^T \\ \pi_k^{\text{new}} &= \frac{N_k}{N} \end{aligned}$$

ここで

$$N_k = \sum_{n=1}^N \gamma(z_{nk})$$

である。EM アルゴリズムでは、E ステップと M ステップを交互に繰り返す。クラスタリングとしての各ステップは、E ステップでノードが各クラスタに所属する度合いを算出し、M ステップでその度合いに従って、以下の尤度関数の期待値を最大化するようにクラスタ中心の座標などのパラメータを変化させる。

$$\mathcal{P} = \sum_{n=1}^N \ln \left\{ \sum_{k=1}^K \pi_k \mathcal{N}(\mathbf{x}_n | \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k) \right\}$$

M ステップではクラスタ中心の座標が更新されていくが、このとき、尤度関数の期待値は単調増加かつ収束する。よって、EM アルゴリズムの終了条件を尤度関数の期待値が十分に収束した時とすることで、アルゴリズムの収束が保証される。

EM アルゴリズムは、ノード-クラスタ中心間の距離和を最小化するアルゴリズムとして収束性の良いアルゴリズムであるが、この距離和はノード-クラスタ中心間の直線距離に基づく。ノードの密度に対する通信可能距離が十分に大きければ、実際の通信距離と直線距離はほぼ等しくなる。しかしながら、無線センサネットワークにおいてノード密度がある程度疎である、つまり孤立ノードが大量に発生するほど低くはなく、ノード-クラスタ中心間の直線距離と通信距離が一致するほど高くはないような状態が、一般的に想定される状況である。したがって、EM アルゴリズムによるクラスタリングでは、前提となる仮定が実際の無線センサネットワークの状態と異なり、最適なクラスタリングが行えていない場合が存在する。

そこで本研究では、EM アルゴリズムによるクラスタリングの収束性の良さと全体最適性を保ちつつ、実際のノードの接続状況に即したクラスタリングを提案した。提案手法では、EM アルゴリズムに与える距離を直線距離ではなく実際の通信距離に置き換えることにより、その最適化を目標とする。提案手法では、EM アルゴリズムにおける E ステップに用いられる式及び M ステップに用いられる式を、以下の式で置き換える。

$$\mathcal{N}(\mathbf{x}_n | \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k) = \frac{1}{(2\pi)^{|\boldsymbol{\Sigma}_k|/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\boldsymbol{\alpha}_{nk}^T \boldsymbol{\Sigma}_k^{-1} \boldsymbol{\alpha}_{nk}\right\}$$

および

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu}_k^{\text{new}} &= \frac{1}{N_k} \sum_{\mathbf{x}_n \in \mathbf{X}_{\text{Tree}}(c_k)} \gamma(z_{nk}) \mathbf{x}_n \\ \boldsymbol{\Sigma}_k^{\text{new}} &= \frac{1}{N_k} \sum_{\mathbf{x}_n \in \mathbf{X}_{\text{Tree}}(c_k)} \gamma(z_{nk}) \boldsymbol{\alpha}_{nk}^{\text{new}} (\boldsymbol{\alpha}_{nk}^{\text{new}})^T \\ N_k &= \sum_{\mathbf{x}_n \in \mathbf{X}_{\text{Tree}}(c_k)} \gamma(z_{nk}) \end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\alpha}_{nk} = \frac{\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_k}{\|\mathbf{x}_n - \boldsymbol{\mu}_k\|} D(\mathbf{x}_n, c_k)$$

ここで

である。ただし、 $\mathbf{X}_{\text{Tree}}(c_k)$ は、クラスタ中心 c_k を根とする通信経路木に含まれるノードの集合である。また $D(\mathbf{x}_n, c_k)$ は、クラスタ中心 c_k を根とする通信経路上でのクラスタ中心 c_k からノード \mathbf{x}_n までの距離であり、 $\boldsymbol{\alpha}_{nk}^{\text{new}}$ は $\boldsymbol{\alpha}_{nk}$ において $\boldsymbol{\mu}_k$ を $\boldsymbol{\mu}_k^{\text{new}}$ に置き換えたものである。

(2) セキュリティ技術について

データ収集にセキュリティを考慮し、データタイプを考慮した GW 選択手法を考える。ここでは、通常のデータを Normal Data (n-Data)、特別なデータを Sensitive Data (s-Data) と呼び、それぞれのデータタイプに合わせた GW を選択する。具体的には、s-Data を転送できる管理された GW (あるいは管理された優先ネットワークへの接続点) を s-GW、他の GW を n-GW とし、s-Data の転送先は s-GW に限定されるように、データタイプごとに独立な経路構築を行う。ここで、ルーティングプロトコルには Dynamic MANET On-demand (DYMO) を用いる。DYMO は、MANET の標準化の中で議論されている比較的新しいプロトコルで、常に全てのノードへの経路を保持するのではなく、通信要求に応じてオンデマンドに経路を作成する。もっとも注目すべき特徴は、外部ネットワークとの接続を定義されているという点で、Hybrid MANET に適したルーティングプロトコルであるという事が出来る。

DYMO でデータタイプ毎に異なる経路を構築するため、ルーティングメッセージもデータタイプに合わせて分類する。n-Data の送信者は経路作成のために n-RREQ を、s-Data の送信者は s-RREQ をブロードキャストする。n-RREQ に対する応答は n-RREP となり、s-RREQ には s-RREP を返すことになる。ルーティングメッセージもデータタイプと同様の分類

をすることで、送信するデータの種別を明示した経路構築を行う。また、ルーティングメッセージを転送する過程で、各中継ノードがそのタイプを反転することはなく、受信したルーティングメッセージのタイプのまま転送する。この RREQ や RREP のタイプの違いは、メッセージヘッダの空きビットをフラグとして利用することで反映する事が出来る。RREQ のターゲットが MANET 外部に存在する場合、RREP を返すのは GW となるが、n-GW と s-GW では s-RREQ に対する反応が異なる。s-Data を扱える s-GW は宛先ノードの代わりに s-RREP を送信する。一方、n-GW は s-RREQ を受信しても何もしない。これにより、特別なデータの転送は管理された GW (s-GW) のみが行うことになる。また、各ノードのルーティングテーブルの管理方法も DYMO とは異なってくる。DYMO では、1つの宛先に対して各ノードが持ちうるルーティングエントリは1つまでである。ところが、それではデータタイプを区別して転送先を決めることが出来ない。そこで、エントリにもフラグを用意し、n-Data のための転送先、s-Data のための転送先を区別する。以上によって、データタイプと経路のタイプの間の対応を取った経路構築が行われる。

MANET 内のノードが外部ネットワークへの経路を構築するとき、DYMO では基本的に最短ホップの GW を選択する。上記 GW 選択手法では、n-Data 送信時は最短ホップの GW を選択する一方、s-Data 送信時は「最短ホップの s-GW」を選択する。これによりデータタイプによる GW 選択を可能にするが、その一方で s-GW にトラヒックが集中しやすくなる。その結果、s-GW やその周辺のノードで輻輳が発生しやすく、場合によっては s-Data の方が n-Data よりもドロップしやすくなってしまふ。そこで、高優先のデータを優先的に転送する仕組みとそのための輻輳制御が必要となる。

以上より本研究では、s-Data と n-Data という2つのデータタイプのうち s-Data を高優先とし、s-Data のドロップを抑えて通信品質を維持・向上する輻輳制御手法を提案した。提案手法のアプローチは、s-Data の優先的転送を行い、さらに s-Data の経路安定化の為、輻輳時には n-Data の送信元に経路変更を要求する。具体的にはキューのスケジューリングと管理技術を利用し、DYMO の動作の改良によりこれらを実現した。

4. 研究成果

(1) クラスタリング技術について

ネットワークシミュレータ QualNet を用いて、クラスタリングの性能を比較する。提案手法に対する比較手法は、ノードの接続性を意識し、自律分散的にクラスタリングを行う

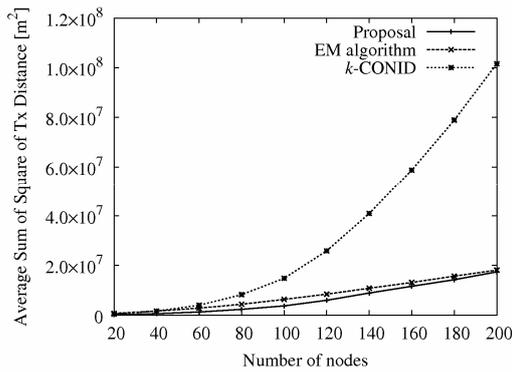


図 4-1-1 通信エネルギー

k-CONID アルゴリズムと、ノードの接続性を考慮しない場合での距離最適化に優れた EM アルゴリズムを用いた。評価指標として、通信エネルギー、収集経路長及び効率性を用いた。

図 4-1-1 に通信エネルギーのグラフを示す。通信エネルギーはすべての手法でノード数に従って増加している。k-CONID においてノード数が増えた場合、通信エネルギーは孤立ノードによる影響が大きくなる。k-CONID アルゴリズムは自律分散的なアルゴリズムであるため、孤立ノードはサイズ 1 のクラスタを形成する。このため、クラスタ数が一定になるようクラスタリングすると、孤立ノード以外のクラスタのサイズが増大する。結果として通信距離が増長し、通信エネルギーが増加する。EM アルゴリズムはノード数が増加し、ノード-クラスタ中心間の通信距離と直線距離の誤差が少なくなるにつれ、全体最適に近いクラスタリングが行える。このため、ノード数の増加に従って最小の通信エネルギーを達成できるようになる。これに対して提案手法はノードの接続性を考慮しているために、ノード数に関わらず最適なクラスタリ

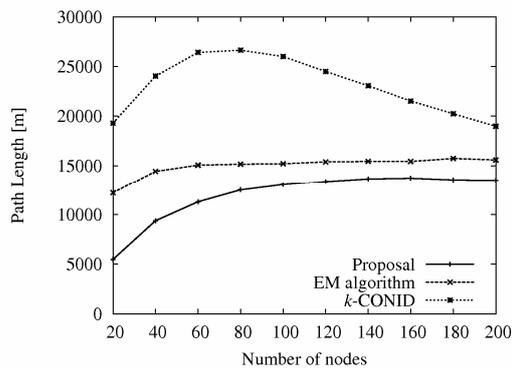


図 4-1-2 収集経路長

ングが行えていることが分かる。

図 4-1-2 に収集経路長のグラフを示す。収集経路長はノード密度が高くなるにつれて

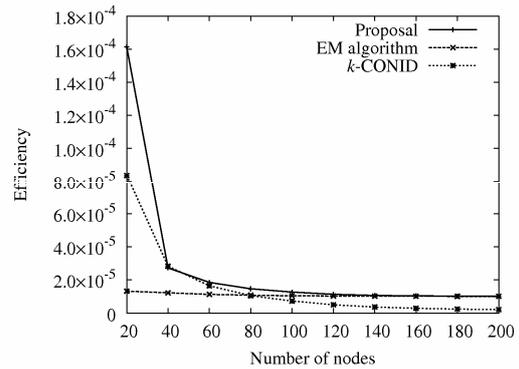


図 4-1-3 効率性

一定値に収束するような挙動を示すことが分かる。k-CONID アルゴリズムでは、ノード密度が疎の場合はクラスタ数が増大し、従って収集経路長も増加していることが分かる。またノード密度が密な場合でも、ランダム性に基づくクラスタリング手法であるため、ノードの位置に関わらずクラスタヘッドが選ばれる。このため、領域の中心のノードと端に近いノードが巡回経路に選ばれる確率に差が無く、平均的な収集経路長は増加する傾向にある。これに対して EM アルゴリズム及び提案手法では、全体最適を目標としたアルゴリズムであるため、クラスタ中心が領域の端に寄る可能性は低い。このため平均的な収集経路長は抑制される傾向にある。

図 4-1-3 から、効率性はノード数が多くなるにつれて減少することが分かる。ノード数が少ない場合、図 4-1-1 に示した通信エネルギーでは、全ての手法でほとんど差がない。しかしながら、提案手法ではノードの接続性を考慮したクラスタリングが行われているために、データが収集できないクラスタが存在しない。このため、提案手法は比較手法に比べて高い効率性を達成できる。また、k-CONID アルゴリズムも提案手法と同様にデータが収集できないクラスタは存在しないが、データの収集地点がノード上になるため、複数のノードが通信ブロックを形成している場合に提案手法よりも通信距離が増大する。このため、効率性が低下していると考えられる。

(2) セキュリティ技術について

ネットワークシミュレータ QualNet を用いて、セキュリティを確保したデータ転送性能を比較する。提案手法に対する比較手法は、DYMO およびデータタイプを考慮した GW 選択手法（改良前）を用いた。評価指標として、データタイプごとの送受信率、平均ホップ数、平均 End-to-End 遅延を用いた。

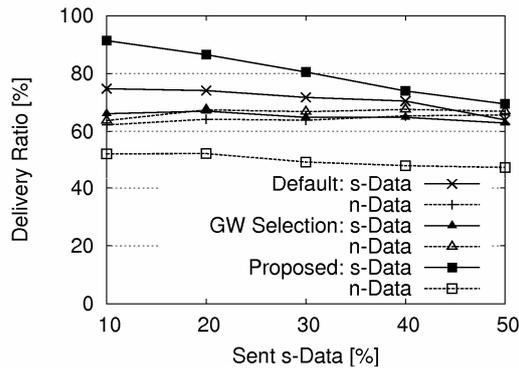


図 4-2-1 データタイプごとの送受信率

図 4-2-1 にデータタイプごとの送受信率を示す。ソースノード数の増加に伴い、いずれのデータタイプもドロップが増加する傾向が分かる。DYMO に比べ、GW 選択を行うことで各データの送受信率の低下が発生している事が分かる。GW 選択を行うと s-Data が「最短ホップの GW」ではなく「最短ホップの s-GW」に集中し、輻輳が発生するためである。そのため、GW 選択のみを行うと特に s-Data の送受信率が低下してしまう。一方で、輻輳制御を導入した提案手法では、GW 選択による s-Data のレート低下を克服し、高いレートを実現している。s-Data を優先した輻輳制御を行うことで、s-Data の通信品質の向上を達成している事が分かる。

図 4-2-2 は各手法の平均ホップ数の結果である。DYMO はデータタイプに影響を受けないので、ほぼ一定に保たれる。GW 選択を行うと、s-Data が「最短ホップの GW」ではなく「最短ホップの s-GW」に向かうため、s-Data 増加に伴い平均ホップ数は増加傾向となる。

各手法の平均 End-to-End 遅延を図 4-2-3 に示す。DYMO はデータタイプに影響を受けないので、ホップ数と同じくほぼ一定に保たれる。GW 選択を行うと、ホップ数の増加、s-GW 周辺での輻輳により遅延が大きくなる。しかし、輻輳制御も行うことにより、キューイング遅延が改善され、遅延を大きく改善するこ

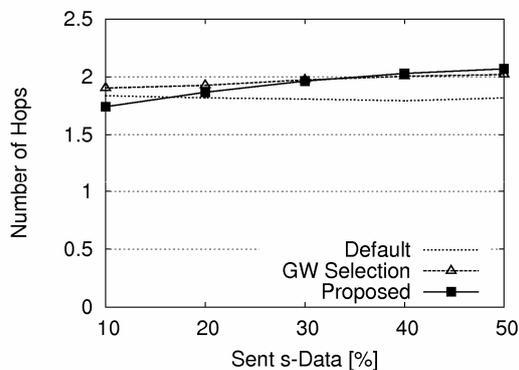


図 4-2-2 平均ホップ数

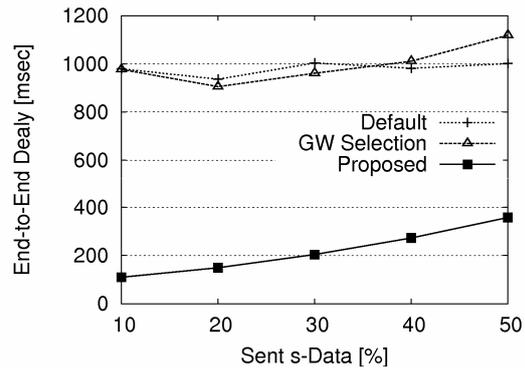


図 4-2-3 平均 End-to-End 遅延

とが分かる。提案手法の輻輳制御の遅延改善により、s-Data をはじめ全通信の品質を向上しているといえる。

(3) まとめ

(1)より、提案手法は通信エネルギーの低減、データ収集における遅延の抑制及び効率性の向上に関して有効なアルゴリズムであることを確認した。また(2)より、GW 選択を行いつつも輻輳制御を行うことで、s-Data の送受信率低下が克服できることを確認し、さらに輻輳の緩和により、通信遅延を大幅に削減することを確認した。両技術について研究成果が得られたため、概ね当初の目的は達成されたと考えている。今後の課題は、これらの技術と、精査中である関連技術の導入を元にして、大規模ユビキタスシステムとして実装することである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

①Kenji Miyao, Hidehisa Nakayama, Nirwan Ansari, and Nei Kato, LTRT: An Efficient and Reliable Topology Control Algorithm for Ad-Hoc Network, IEEE Trans. on Wireless Communications, 査読有, vol. 8-12, 2009, pp. 6050-6058.

②Hidehisa Nakayama, Satoshi Kurosawa, Abbas Jamalipour, Yoshiaki Nemoto, and Nei Kato, A Dynamic Anomaly Detection Scheme for AODV-based Mobile Ad Hoc Network, IEEE Trans. on Vehicular Technology, 査読有, vol. 58-5, 2009, pp. 2471-2481.

③ Takeshi Matsuda, Hidehisa Nakayama, Xuemin(Sherman) Shen, Yoshiaki Nemoto and Nei Kato, Gateway Selection Protocol in Hybrid MANET Using DYMO Routing, Mobile Networks and Applications, 査読有, vol. 15, 2010, pp. 205-215.

④Hidehisa Nakayama, Zubair Md. Fadlullah, Nirwan Ansari, and Nei Kato, A Novel Scheme for WSN Sink Mobility based on Clustering and Set Packing Techniques, IEEE Trans. on Automatic Control, 査読有, 2011, 印刷中.

〔学会発表〕(計8件)

- ① Bounpadith Kannhavong, Hidehisa Nakayama, Abbas Jamalipour, Yoshiaki Nemoto, and Nei Kato, SA-OLSR: Security Aware Optimized Link State Routing for Mobile Ad Hoc Networks, Proc. of the 2008 IEEE ICC 2008, IS01-6, May. 2008, Beijing, China.
- ② Takeshi Matsuda, Hidehisa Nakayama, Sherman Shen, Yoshiaki Nemoto, and Nei Kato, On Gateway Selection Protocol for DYMO-based MANET, Proc. of the IEEE WiMob2008,), Oct. 2008, Avinon, France
- ③Kenji Miyao, Hidehisa Nakayama, Nirwan Ansari, Yoshiaki Nemoto, and Nei Kato, A Reliable Topology for Efficient Key Distribution in Ad-Hoc Networks, Proc. of the IEEE Workshop on SPAWN2008, Jun. 2008, California, USA.
- ④ Yutaro Sasaki, Hidehisa Nakayama, Nirwan Ansari, Yoshiaki Nemoto, and Nei Kato, A New Data Gathering Scheme Based on Set Cover Algorithm for Mobile Sinks in WSNs, Proceedings of the IEEE Globecom2008, AH24W3-2, Dec. 2008. New Orleans, USA.
- ⑤深堀哲史, 中山英久, 西山大樹, 加藤寧, 無線センサネットワークにおけるノードの接続状況を加味したクラスタリングに関する検討, 信学技報, CS2009-82, March 2010, 沖縄.
- ⑥中山英久, 松田丈司, 加藤寧, ハイブリッド MANETにおける優先度を考慮した経路制御に関する考察, 信学技報, CS2009-80, March 2010, 沖縄.
- ⑦Tetsushi Fukabori, Hidehisa Nakayama, Hiroki Nishiyama, Nirwan Ansari, and Nei Kato, Energy Efficient and Fault-Tolerant Broadcast Protocol in Wireless Ad-hoc Networks, Proc. of the IEEE ICC 2010, AH15-2, May. 2010, Cape Town, South Africa.
- ⑧ Hans Livingstone, Hidehisa Nakayama, Takeshi Matsuda, Sherman Shen, Yoshiaki Nemoto, and Nei Kato, Gateway Selection in Multi-Hop Wireless Networks Using Route and Link Optimization, Proc. of the IEEE Globecom 2010, Dec. 2010, Miami, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山英久 (NAKAYAMA HIDEHISA)
東北工業大学・工学部・講師
研究者番号: 40400303