

# センサネットワークにおけるデータマネジメント

○石原 進

静岡大学創造科学技術大学院

## Data Management on Sensor Networks

○Susumu Ishihara

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

### Abstract:

For efficient data transmission on wireless sensor networks which consist of thousands of sensor nodes which have limited battery power, not only data-link layer, network layer, transport protocols, and battery management, but operations which is appropriate for the characteristics of the data is important. In this paper, we introduce some data-centric approaches and in-network processing technologies presented at INSS2006. Adding to this, we introduce some studies for replica management of location dependent data on sensor and ad hoc networks.

## 1 はじめに

数百、数千台のノードの利用が想定される無線センサネットワークでは、バッテリーの補充等、個々のノードの電力の管理を行うことは現実的ではない。また、センサノードは水、森、砂漠、体内等人が物理的に接触して管理できない場所に配置されることも多い。さらに、小型のセンサノードでは物理的に搭載できるバッテリーの大きさが制限されるため、バッテリー容量を小さくせざるを得ない。従って、センサネットワークの開発においては省電力化が重要な課題である。また、電力の枯渇やノードの故障、物理的障害などによる無線リンクの断絶や誤りの発生により、データ通信の維持が困難となりうる。従って、これらの障害を想定した上で、データ通信の信頼性を高めるための技術が必要不可欠である。

センサネットワークの消費電力の削減ならびにデータ通信の信頼性の確保のためには、物理層、データリンク層、ネットワーク層での技術、およびこれらの制御にノードのバッテリー残量や発電量による情報を用いた制御のみならず、送信するデータの特性に応じた処理が必要である。データセントリックの考え方に基づくルーティング、送信データ量削減のためのデータ伝播処理過程におけるデータ集約等の in-network processing, データ利用性維持のための複製配置などがこれに当たる。

本稿では、INSS2006 で発表された主なデータセントリックアプローチの技術、in-network processing の研究について紹介するとともに、筆者の行っている位置依存データの複製管理に関する研究について紹介する。

## 2 INSS2006におけるデータマネジメント関連の研究発表

### 2.1 予測に基づくデータ送信回数の削減

[1]と[2]はいずれも測定値の予測を行い、測定値が予測値と大きく異なる場合にのみ測定ノードからシンクへデータを送信することで、データ送信回数を削減し、省電力化を図る手法を提案している。

[1]では、予測メカニズムに単純化されたカルマンフィルタから得られる多項式の評価を用いている。データ測定ノードおよび集約ノードは、それぞれ測定値および他のノードから取得したデータを元に測定値の予測を行う。測定値が予測値と大きく異なった場合、データの送信を行う。提案手法の有効性を Norwegian University of Tromsøにおける1分毎の気象データ(気温、気圧)を元にデータ送信回数の削減効果および MICA2 Mote 上に同システムを適用した場合の省電力効果を検証している。

一方、[2]では、予測メカニズムに最小自乗法に基づく適応フィルタを用いている。この方式を用いることで測定対象に対する事前のモデル化が不要であるとしている。また、測定値の予測を測定ノードだけでなくシンクノードでも行う。こうすることで、測定値を受信しない状態でもシンク側ローカルでの予測値に基づくデータ取得が可能となる。測定ノードは初期化モード、通常モード、スタンドアロンモードの3つの状態を持つ。初期化モードは予測のためのデータ系列を取得するモードであり、データ系列が確保できるとノードは通常モードに移る。通常モードでは、ノー

ドは測定データを定期的にシンクに送信する。その後、予測値が許容範囲以内か否かによってスタンドアロンモードと通常モードを切り替える。スタンドアロンモードではフィルタの係数更新は行われず、シンクと測定ノードのフィルタの状態は同じ状態が維持される。本発表でも、[1]と同様に実観測データに基づく予測精度とトラフィックの削減効果の検証が行われている。

これらの手法を用いる場合、測定データがシンクに届かなかった場合に、それがリンク障害あるいはノードの停止によるものか、誤差が少ないためによるものかの判断が行えない。[2]は、誤差が許容範囲よりも小さい場合でも定期的に測定ノードからシンクへパケットを送ることで、測定ノードの起動状態を確認する方法を示している。また、シンクノードでの予測も行う場合、測定データのネットワーク上の欠落によって、予測のためのデータ系列がシンクと測定ノードで同期がとれなくなる問題があり、この問題の効率的な解決方法が課題となっている。さらに予測メカニズムの適用可能範囲が気温や、気圧など緩やかに変化するに限られるという問題がある。

## 2.2 モデルベースのデータ集約

センサネットワーク中でのデータ集約は、トラフィックの削減に効果的な手段であるが、実用的な測定データを得るには、用途に応じて適切な集約方法を用いることが必要である。[3]では、密に配置されたセンサノードによる構造物状態監視のためのデータ集約手法を提案している。本手法では、構造物の物理特性を考慮したモデルベースの構造物解析アルゴリズムを用い、センサノード間の分散処理による相関関数の見積もり計算を行うことで、データ集約を用いない場合に比べて送信データ量を20~40分の1に削減している。提案アルゴリズムはMICA2s Mote上に実装され、3階建てのスケールモデルにセンサノードを配置した実験システムにより有効性の検証が行われている。

## 2.3 センサ-アクチュエータネットワークにおけるネットワーク分断時のコンテキスト推論

[4]では、センサネットワークにおけるコンテキスト推定に基づいて、アクチュエータで何らかのアクションを起こすセンサ-アクチュエータネットワークにおいて、推論を行うサーバとセンサネットワークが分断した場合にも継続してコンテキスト推定とそれに基づくアクションを続行するための仕組みHIHORBを提案している。HIHORBでは、障害が発生していない場合は、センサネットワークはシン

クノードを介して、バックボーンサーバに接続され、バックボーンサーバが測定データに基づいてページアンネットワークによるコンテキスト推定を行う。バックボーンサーバはセンサノードに定期的に最新のコンテキスト推定とアクションの実行に必要なデータを送信する。ただし、コンテキスト推定に必要なテーブルのうち、アクションの実行に至る可能性のある部分のみを送信することで、トラフィックを削減している。バックボーンとの接続性が失われたことをセンサノードが知ると、センサノードはこれまでに受信していた推定用のデータに基づき、推定処理並びにアクション起動の代理実行を行う。HIHORBはMICAz Moteによるセンサネットワークに実装されている。

## 2.4 ノードの協調によるイベント処理、データ保存

[5]では、シンクノードに接続する基地局との接続が間欠的である環境を想定し、センサネットワーク内のノードの協調によるイベントの関連づけ処理、データ保存を行うためのフレームワークRESTOREを提案している。このフレームワークにより、シンクノードとの通信のための電力消費を削減できるほか、シンクノード以外のデータ利用者への直接データ送信が可能となるとしている。

本手法の骨子は、センサノードを重ならない複数のゾーンに分け、ゾーン内部の複数のノードで協調してデータの関連づけ処理、保管ならびに集約処理を行うことにある。各ゾーンで処理・保管されたデータは、センサネットワークとシンクノードへの接続する基地局との接続性が得られた場合にシンクに送信される。

センサノードは隣接ノード間との通信により自律的にゾーン分けの処理を行う。この処理は、ゾーン内のノードの制御とデータの収集を行うゾーンマネージャの選出と、ゾーンマネージャ以外のノードによる自身が属するゾーンマネージャの選択によって行われる。ゾーンマネージャの選出は、ノード間距離、バッテリー残量、記憶容量によって得られる評価値がすべての隣接ノードよりも大きなノードが、自身をゾーンマネージャと宣言することで行う。ゾーンマネージャは次のゾーン分け処理が行われるまで起動し続ける。また、ゾーンマネージャはゾーンのメンバのバッテリー残量に従って、メンバの順位付けを行い、バッテリー残量の多い(=順位の低い)順に長いスリープ時間の起動スケジュールを与える。

センサネットワーク内で発生したイベントは以下のように扱われる。ノードがイベントを検出すると、ノードは自身のゾーンマネージャにそのイベントを送信する。ゾーンマ

ネージャはイベントの種別に従って、GHT[12]等のハッシュ関数によりそのイベントを格納するゾーン (primary storage zone: PSZ) を得る。イベントの種別は、例えば、駐車違反監視アプリケーションであれば、車両につけられた RFID の ID、温度監視アプリケーションであればノードの位置などである。ゾーンマネージャはイベントを PSZ のノードマネージャに転送する。

PSZ のノードマネージャは、イベントの種別や発生時刻等に従い、ゾーン内のノードを選択してデータを格納させる。ノードの選択手法にはいくつかの手法が提案されているが、データの発生頻度とノードのバッテリー残量 (スリープ時間の長さに対応) を関連づけ、頻繁に発生するデータはバッテリー残量の多いノードに割り当てる手法が特徴的である。また、ゾーン内での複数のノードで同一イベントデータの複製を保持させる手法が提案されている。この際、データに要求される信頼性の度合と、ゾーンメンバの順位を対応させることで信頼性に応じた複製配置を行ったり、順位が同じメンバノードが同一のスケジュールを持つことを利用し、一度のブロードキャストでデータを複数のメンバに配信することを提案している。また、複数のゾーン間で協調し、複製を持ち合うことも提案されている。

### 3 位置依存データの複製管理

ノード密度が低いあるいは密度に偏りのあるセンサネットワークにおいては、ノード間の接続性が失われることによって、センサノード上のデータ利用性が低下する問題がある。以下、ノード間接続性とデータ管理を扱った研究の一例として、筆者らが行っている、センサ、アドホックネットワークにおける位置依存データの複製管理に関する研究について紹介する。

本研究では、車両や、災害救助隊員、兵士などの装備するセンサによる測定データやカメラ画像、携帯電話や携帯情報端末を保持する歩行者が入力する現在位置に関連する文字・画像情報や周辺のユビキタスデバイスから取得したデータなどをサーバレスなアドホックネットワークで共有する仕組みを扱っている。このようにノードが生成するその現在位置に関連したデータを我々は位置依存データと呼んでいる。

特定の ID を持つノードとの通信が保証されず、かつ固定のサーバが存在しないアドホックネットワークで位置依存データにアクセスするには、何らかの手段で現在データを保持しているノードを特定する必要がある。筆者らは、データ保持ノードにアクセスするための手段として Geocast<sup>1</sup>を

用いるシステムを考えている。このようなシステムを SOLA (System for Sharing Object with Location Information on Ad hoc networks) と呼び、SOLA の環境下でのデータの可用性の向上ならびにトラフィックの削減を目指した手法を開発している。本研究はもともとアドホックネットワークというキーワードの元に開始されたものであるが、実質的にはノードが移動するセンサネットワークを扱っているといつてよい。

#### 3.1 複製の必要性

ノード密度が十分に密ではない、あるいは密度に偏りがあるアドホックネットワークにおいては、ノード間の接続性が保証されない。また、データ保持ノードが故障したり、移動する可能性もある。従って、あるノードから他のノードが保持しているデータを利用しようとした場合、常にそのデータが利用できるわけではない。この問題を解決するための手法として、アドホックネットワーク上のノード上にデータの複製を配置する手法が提案されている。

複製の配置に当たっては、以下の要件を考慮する必要がある。

- データの利用性 (アクセス成功率) を向上する。
- 複製へのアクセス、および複製の配置に伴うトラフィックを削減する。
- 複製保持に必要な記憶容量を少なくする。

以上の観点から、以下のアプローチによるアドホックネットワークにおける複製配置方法が原らによって提案されている [6]。

- 利用者の使用頻度の高いデータの複製をローカルに配置する。
- 隣接ノード間での複製の重複を避けて、利用者の使用頻度の高いデータの複製をローカルに配置する。
- 接続性の高いノードのグループ内で複製を共有するように配置する。

以上の研究は各ノードから各データへのアクセス頻度が既知であること、利用者ノードが複製保持ノードのアドレスで特定できることを仮定している。しかしながら、センサネットワークのようにネットワーク内に存在するノードのメンバが未知あるいはメンバ数が膨大であり、各ノードから各データに対するアクセス頻度のネットワーク内共有

<sup>1</sup>特定の地理的位置にいる複数のノードに向けてパケットを送信すること

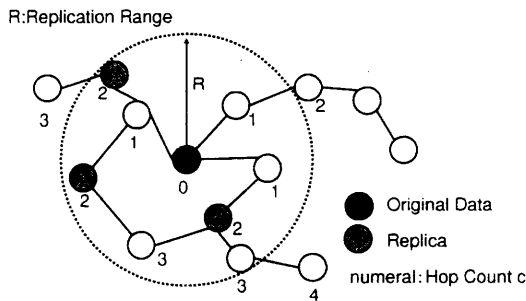


図 1: SC 方式における投機的複製配置

が難しい場合には上記の手法をそのまま適用することは困難である。また、センサネットワークにおいては、測定データがどのノードによって得られたかは重要ではなく、アドレスセントリックの通信が行われることが少ないため、複製保持ノードのアドレスに依存したデータアクセスは考えにくい。

そこで、筆者らは、位置依存データの複製を、それが発生した位置周辺の複数のノードに適切な密度で配置することにより、関心領域への Geocast による問い合わせ送信により、データを取得することを想定している。このための複製配布方式として、筆者らは Skip Copy (SC) 方式という複製配布方式を提案している。

### 3.2 Skip Copy (SC) 方式

SC 方式は、位置依存データの複製を、このデータ発生位置周辺の複数のノードに配置し、ノードの移動時にもこれらをデータ発生位置周辺に存在するノードに保持させるように複製を再配置することで、位置ベースのルーティングによる問い合わせられる位置依存データの利用率を向上させる方式である。

SC 方式では、ノードがデータを生成すると、直ちにフラッディングを行い、データ生成ノードからの距離が与えられた複製配布範囲  $R$  以内であるノードの内、データ生成ノードからの最短ホップ数がスキップパラメータ  $S$  の倍数であるノードにのみ複製をする (図 1)。複製の数はデータが利用される頻度が高いほど多いことが望ましいが、ノードがデータを生成した時点ではデータの利用はわからないので、 $S$  のみに従って複製を配置する。この処理を投機的複製配置と呼ぶ。 $S$  と  $R$  の値の決定は、データの利用率とノードの記憶容量、複製配布に要するトラフィックとのトレードオフとなる。

各ノードは移動するため、データ発生から時間が経過すると投機的複製配布時に複製を保持したノードがデータ発

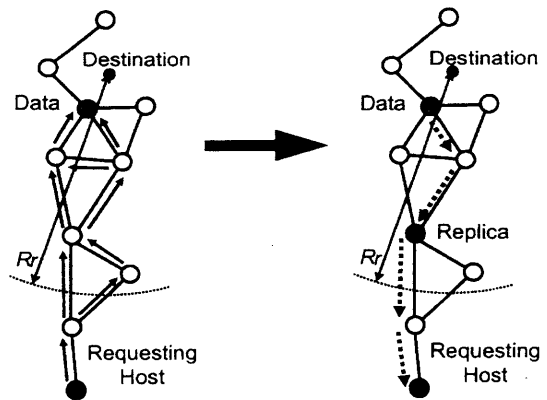


図 2: SC 方式における複製再配置

生位置から離れる可能性がある。こうなると位置ベースのルーティングによる問い合わせが成功しなくなってしまう。これを防ぐため、問い合わせに応じて複製が要求元のノードにユニキャストで返送される過程で、投機的複製配布時と同様のルールに従い複製を再配置する。具体的には、複製の返送元となったノードからのホップ数が  $S$  の倍数であり、データ発生位置からの距離が  $R$  以下のノードに複製を配置し直す (図 2)。こうすることで、問い合わせ頻度の高いデータの複製がデータ発生位置周辺のノードに保持され続ける。

シミュレーションの結果、SC 方式はノードの記憶容量が少ない場合から多い場合いずれにおいても良好なデータ利用率が得られることが確かめられている。

最短ホップ数のみによる複製の密度制御では、ノード密度の違いにより複製配布範囲内に置かれる複製の数が大きく異なってしまう。また、 $R$  が大きい場合、投機的複製配布のトラフィックが無視できない。そこで、投機的複製配布時のフラッディングにおいてノード間距離に基づいてブロードキャストの送信タイミングを制御し、受信ノードが重複するブロードキャストをキャンセルすることでブロードキャストに伴うトラフィックを削減すると同時に、複製保持ノードの候補をブロードキャストを行ったノードのみに限定することでノード密度に複製の密度が左右されにくくする改良手法を提案している [8]。さらに、投機的複製配布時に、十分な数の隣接ノードが確認できる場合にのみブロードキャストを行うことで、ノード密度が低い場合のトラフィックの削減と十分な複製数の確保を実現する改良手法 [9]、複製配布先を複製配布範囲内だけでなく、問い合わせ発生が多い地域の近辺のノードに複製を配置する改良手法 [10]、車々間通信への適用のための拡張手法 [11] を提案している。

### 3.3 関連研究

SOLA と同様に、位置依存のデータを特定の位置にいるノードに保持させ続ける手法が複数提案されている。以下、代表的なものを紹介する。

#### 3.3.1 GHT を用いた手法

データセントリックストレージを扱った代表的研究として、GHT (Geographic Hash Table) を利用した手法がある [12]。GHT とは、キーの値を地理的座標に対応づけるハッシュ関数である。この方式では、発生したデータのキーを元に、データを格納する地理的座標を決める。キーをデータ発生源の位置座標、ハッシュの計算結果をキーそのものとするれば、SOLA と同様、この手法は位置依存データをデータ発生位置に配置するためにも利用できる。

GHT で得られた座標その位置には必ずしもノードが存在するとは限らないので、この手法では、位置ベースのルーティングプロトコルである GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) を用いて、その地理的座標に近いノードにデータを送信し、格納させる。GPSR は基本的には目的位置に最も近い隣接ノードにデータを送信するが、宛先に近づくノードが存在しない場合、目的位置を囲うリンクを左周りで周回させる。この周回を終えたパケットが再び同じノードに戻ってきたとき、そのノードがそのキーのホームノードとなり、データを格納する (図 3)。

ノードの故障や移動に対応するため、ホームノードは目的位置を囲っているホームノードを含むリンクの周回路 (home perimeter) 上のノードにキーとデータの組の複製を配置する。また、この複製の配置の過程でホームノードの置き換えを行う。具体的な仕組みは以下の通りである。ホームノードは定期的に GPSR を用いてキーに対応する目的位置に向けて、キーとデータの組からなる refresh パケットを送信する。refresh パケットを受信したノードは、キーのデータの組を

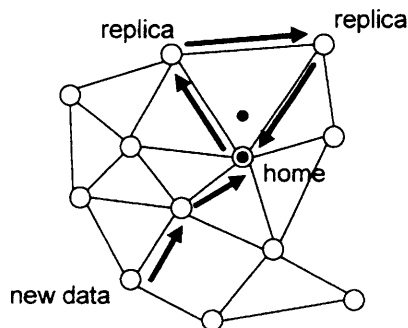


図 3: GHT と GPSR によるデータの配置

ローカルにコピーする。refresh パケットは新規データの格納時と同じく目的位置を囲うリンクを周回するので、周回を終えたパケットを再度受け取ったノードが新たなホームノードとなる。なお、定められた期間内にホームノードから refresh パケットを受け取れなかった複製保持ノードは、自身が新たに refresh パケットを送出する。これにより、ホームノードが孤立したり、故障した場合に新たにホームノードを置くことを可能としている。

#### 3.3.2 Nomadic Agent

屋代は位置依存データを配信するモバイルエージェント—Nomadic Agent (NA)— がアドホックネットワークを用いてノード間を移動することにより、特定の地理的領域内にエージェントがとどまり続けるための手法を提案している [13]。NA には、自身が情報提供を行う有効範囲と、それに含まれる保持エリアが設定されている。NA を保持しているノードが保持エリアを離れると、NA は、保持エリア内にいる適切なノードのうち保持エリア内に存在し続ける時間が長いと推定されるノードをノードの移動速度・方向に従って選出し、このノードに移動する。また、NA の送信する通信距離をノード密度に従って調節することで、ノードの消費電力を抑制する。なお、この方式の拡張として、有効範囲内に複数のエージェントを配置することで信頼性を向上する手法も提案されている [14]。

#### 3.3.3 Abiding geocast

Maiöfer らは Abiding geocast という概念を提案している [15]。Abiding geocast とは、ノードの移動にかかわらず、同じ地理的領域に同じメッセージを配信し続けることを指す。その実現手法として以下の 3 つのアプローチが提案されている。

- 固定サーバからの通常の Geocast による配信
- Geocast Region 中の代表ノードからの配信  
データの初回の配信は通常の Geocast で行われ、Geocast Region 中のノード全てがデータを受信する。この後、Geocast Region 内のノード間で代表ノードの選出処理が行われる。移動速度が遅く、Geocast Region の中心近くにいるノードが代表ノードとして選ばれる。代表ノードは以降の配信を受け持つ。代表ノードが Geocast Region から離れる場合は、サイド代表ノードの選出処理が行われ、代表ノードが交代する。
- 隣接ノード間での配信データ交換による配信

初回のデータ配信は Geocast で行われるが、データ受信ノードはそのデータを保持し続ける。その後、各ノードが新たに隣接ノードを発見すると、相手が受信していない現在位置に対応する Geocast データを交換する。

## 4 おわりに

INSS2006 で発表された主なデータセントリックアプローチの技術、in-network processing の研究ならびに位置依存データの複製管理に関する研究について紹介した。センサネットワークの多方面への応用により、データセントリックアプローチの技術、in-network processing の研究は今後ますます重要性を増すと考える。また、移動体にセンサが搭載される場合や、センサ配置の粗密があるような場合、主にアドホックネットワークの分野で検討されていた複製管理に関する議論が重要性を増すと考える。国外ではアドホック、センサネットワークにおける複製管理に関する議論は盛んになっている。今後の国内での同分野の研究の盛り上がり期待したい。

## 参考文献

- [1] E-O. Blaß, L. Tiede, and M. Zitterbart, "An energy-efficient and reliable mechanism for data transport in wireless sensor networks," in proc. of INSS2006, pp. 211–216, 2006.
- [2] Silvia Santini and Kay Romer, "An adaptive strategy for quality-based data reduction in wireless sensor networks," in proc. of INSS2006, pp. 29–36, 2006.
- [3] T. Nagayama, B. F. Spencer Jr., G. A. Agha, and K. A. Mechitov, "Model-based data aggregation for structural monitoring employing smart sensors," in proc. of INSS2006, pp. 203–210, 2006.
- [4] H. Aida, M. Kadota, J. Nakazawa, and H. Tokuda, "A disconnected bayesian analysis for wireless sensor-actuator," in proc. of INSS2006, pp. 37–44, 2006.
- [5] S. Krishnamurthy, T. He, G. Zhou, J.A. Stankovic, and S.H. Son, "RESTORE: A real-time event correlation and storage service for sensor networks," in proc. of INSS2006, pp. 225–233, 2006.
- [6] T. Hara, "Effective replica allocation in ad hoc networks for improving data accessibility," in proc. of IEEE Infocom 2001, Vol. 3, pp. 1568–1576, 2001.
- [7] 土田元, 沖野智幸, 田森正紘, 渡辺尚, 水野忠則, 石原進, "無線アドホックネットワークにおける位置依存情報複製配布手法," 電子情報通信学会和文論文誌 B, Vol. J88-B, No. 11, pp. 2214–2227, 2005.
- [8] 石原進, 佐仲貴幸, 土田元, 水野忠則, "無線アドホックネットワークにおける位置依存情報複製配布方式のトラフィック削減手法," 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 12, pp. 2834–2847, 2005.
- [9] 土田元, 石原進, "無線アドホックネットワークにおける近隣端末情報を利用した位置依存情報複製配布のスケジューリング手法の評価," 電子情報通信学会研究報告, Vol. 105, No. 628, pp. 347–352, 2006.
- [10] G. Tsuchida, N. Suzuki, M. Yamanaka, and S. Ishihara, "Adaptive replication of location-dependent data in ad hoc networks," in proc. of INSS2006, p. 126, 2006.
- [11] M. Yamanaka, G. Tsuchida and S. Ishihara, "A replica distribution scheme for location dependent information on vehicular ad hoc networks," in proc. of the 3rd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks (VANET2006), 2006.
- [12] S. Ratnasamy, B. Karp, L. Yin, F. Yu, D. Estrin, R. Govindan and S. Shenker, "GHT: A Geographic Hash-table for Data-centric Storage in Sensor networks," in proc. of the 1st ACM international workshop on wireless sensor networks and applications (WSNA2002), 2002.
- [13] 屋代智之, T.F. LaPorta, "Nomadic Agent System: インフラに依存しない位置情報サービス提供システム," 情報処理学会論文誌, Vol. 46 No. 12, pp. 2952–2962, 2005.
- [14] 仁平和博, 井上真吾, 沖原光晴, 屋代智之, "位置情報サービスが可能な Nomadic Agent の対障害性に関する提案," 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 12, pp. 2963–2972, 2005.
- [15] C. Maihöfer, T. Leinmüller, and E. Schoch, "Abiding geocast: Time-stable geocast for ad hoc networks," in proc. of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks (VANET2005), pp. 20–29, 2005.