

環境知能センサ網グループ - 環境知能センサ網の研究 - 成果報告

研究組織:

インターネット工学研究室	山口英教授	(平成 21 年度～平成 25 年度)
インターネット・アーキテクチャ研究室	砂原秀樹教授	(平成 21 年度～平成 22 年度)
情報基盤システム学研究室	藤川和利教授	(平成 23 年度～平成 25 年度)
ネットワークシステム学研究室	岡田実教授	(平成 21 年度～平成 25 年度)

研究成果の概要 (和文):

アンビエント環境では、ユーザが存在する環境をもとに構成されるコンテキストに応じた有用な情報やサービスを提供する仕組みが求められている。環境知能センサ網グループでは、特にネットワークをベースとして以下の3つの研究課題を進めてきた。インターネット工学研究室の研究グループでは、各端末から定期的に送られてくる位置情報を管理し、各端末や各基地局に情報を送信することでサービスを実現し、端末位置を管理する仕組みを確立するために、位置に依存した情報配信をネットワーク層で配信する方式として位置依存マルチキャスト(LBM)の実現を目指し、ネットワーク層で端末の位置を一意に表す IPv6 マルチキャストアドレスとして GALMA を提案した。情報基盤システム学研究室・インターネット・アーキテクチャ研究室の研究グループでは、センサネットワークにおけるリアルタイムなストリームデータ処理基盤として分散 Publish/Subscribe システム、被災地の通信インフラ停止などにおいて既存の通信インフラに依らない通信手段として特定の経路を巡回するデバイスにメッセージを中継させるメッセージフェリイング機構の提案、Intelligent Transport Systems (ITS) 分野における運転者の負担軽減を目的とした自動運転、走行所要時間や燃費を考慮した走行経路の推薦、道路網のボトルネック把握のためのセンシングなど、これらの技術を実現するための必須要素である渋滞情報の共有手段を確立した。ネットワークシステム学研究室の研究グループでは、漏洩同軸ケーブル(LCX)を用いて形成されたセル内において、マルチアンテナを用いる端末検出方式を確立するために電波暗室内で取得した伝播路応答をもとに解析し、位置検出手法の検討を進め、また内視鏡検査により発見された病変部位の近傍に小型の RFID タグを留置し、センサアンテナを用いて RFID タグ位置を特定し、正確に病変を切除することを可能にするシステムの開発を行った。

研究成果の概要 (英文):

For ambient world, the users often require a new mechanism that provides useful information or services according to a context structured based on their living environment. Our ambient intelligence sensor network groups progressed the following themes based on network technology. In Internet Engineering Laboratory, they focused on IPv6 multicast address assignment scheme for Location-based Multicast (LBM). A packet is forwarded to a location or an area of the destination multicast address on the multicast called the address GALMA (Geographically Aggregatable Location-based Multicast Address). In Laboratory for Internet Architecture and Systems, they focused on following three themes on networking systems. Such as alert system is required to be reliable delivered the data. However, there is still a significant issue that Publish/Subscribe system is not guaranteed the reachability and integrity of the messages. They have developed novel Pub/Sub system. Also they proposed a dynamic route decision method of Ferry that adapt to the movement of the rescue team and reduce the movement time of the node and the delay of the message. Furthermore, to share traffic information among vehicles in the same congested traffic flow, their key issue is "how to determine the congested traffic flow?" and "how to determine the head of the congested traffic flow?" To solve this, they introduced a method for clustering vehicles that are in the same congested traffic flow. In Laboratory for Communications, they focused on a scheme of wireless position location for radio terminal using MIMO-OFDM signal on LCX (Leaky coaxial cable). Especially they modified a conventional subspace method and it enabled to detect time delay in impulse response using IFFT (inverse fast Fourier transform) processing.

キーワード: LBM, GALMA, IPv6, Pub/Sub, DTN, メッセージフェリー, ITS, LCX, MIMO, RFID, 位置情報

1. 研究目的

アンビエント環境では、ユーザが存在する環境をもとに構成されるコンテキストに応じた有用な情報やサービスを提供する仕組みが求められている。本研究グループでは、(i) センサネットワークに社会や人間生活が依存しても十分に安心して利用できるディペンダブル性の確保（マルチルートネットワークコーディング等）、(ii) 膨大なデータを円滑に扱うためのスケーラビリティの確保（センサ数に対するスケーラビリティを意識したネットワーク構成、チューニングアルゴリズム等）を行うことを目的とする。また、機能実証を通して、本格的なセンサネットワーク構築の基礎を確立する。

2. 研究方法

上記の研究目的を達成するため、以下の3つの研究項目に取り組んだ。

- (1) 位置依存情報配信を目的とした IPv6 マルチキャストアドレスの設計と評価
- (2) DTN 環境下における効率の良い情報流通手法に関する研究
- (3) ワイヤレス技術を用いた位置検出およびワイヤレスセンサネットワークの信頼性改善に関する研究

3. 研究内容・成果

3.1. 位置依存情報配信を目的とした IPv6 マルチキャストアドレスの設計と評価

アンビエント環境では、スマートフォンの普及に伴い、輸送障害・災害情報の配信、周辺施設の広告配信といった利用者の位置に依存した情報配信に対する期待が高まっている。サービス提供者は、各端末から定期的に送られてくる位置情報を管理し、各端末や各基地局に情報を送信することでサービスを実現しており、端末位置を管理する仕組みが必須である。位置に依存した情報配信をネットワーク層で配信する方式として位置依存マルチキャスト (LBM:Location-Based Multicast) の実現を目指し、ネットワーク層で端末の位置を一意に表す IPv6 マルチキャストアドレスとして GALMA (Geographically Aggregatable Location-based Multicast Address) を提案する。提案方式の有効性を示すために、実際の人の移動データを用いて各階層における総アドレス数、アドレス更新頻度を端末数毎に解析を行う。

LBM は、端末が自律的に位置情報から GALMA を決定することで、現在位置・領域に対するパケットを受信可能にする。このアドレスは、階層的なアドレス構造により、アドレス表記のみで柔軟な領域指定と階層的な経路集約を同時に実現する。

GALMA では、実世界の領域を格子状に分割し、交番二進符号で一意的識別子を各格子に割り当てることでマルチキャストアドレスを決定する。図 1 は、緯度、経度方向に 16 分割（4 ビット）と 64 分割（6 ビット）した例である。GALMA は、分割時のビット数が大きくなるほど格子の粒度は細くなる。この割り当て方式では、隣接する格子との符号間のハミング距離が常に 1 となる。

GALMA のアドレス構造は、図 2 に示す四分木の階層構造を有している。階層数は、緯度経度に割り当てられたビット長が階層数となる。例えば、図 1 は、左の 2 ビット側が第 2 階層、右の 3 ビット側が第 3 階層となる。第 $n+1$ 階層の上位 n ビットが共通している 4 グリッドは、

n 階層で1つのグリッドに一意に必ず対応する。この際、 $n+1$ 階層の4つのグリッド識別子は、共通している上位 n ビットが上位階層のグリッドの識別子となる。グリッドの大きさは、同階層のグリッドであっても地球の形状により一定ではない。赤道付近で単位グリッドあたりの大きさが最大となり、極に近づくにつれて単位グリッドあたりの大きさは最小となる。例えば東京都千代田区付近の緯度では、第 22 階層で約 $5\text{m}\times 5\text{m}$ になる。一方で赤道近くの新加ポールでは、第 22 階層で約 $8\text{m}\times 8\text{m}$ となる。つまり、端末が GALMA を決定する際とサービス提供者が情報を配信する際には、緯度を考慮して階層数を決める。

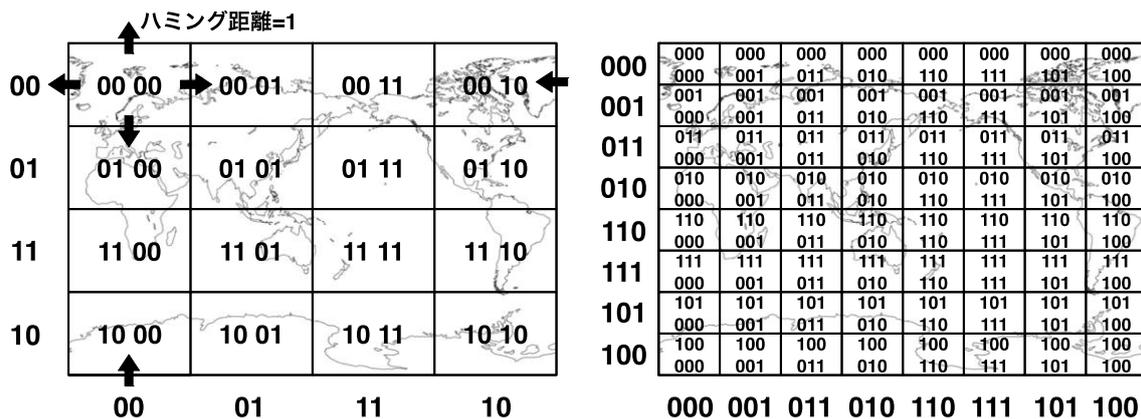


図 1 アドレスの割り当て例 (2 ビット, 3 ビット)

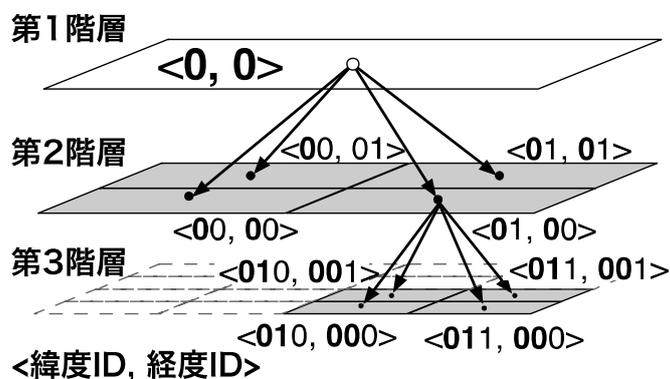


図 2 GALMA の四分木構造

LBM では、携帯端末の位置が利用者の移動に伴い変化する。端末の位置に応じた情報配信には、端末の位置に応じて GALMA が更新されなければならない。アドレスの更新は、端末から収容ネットワークに対して更新を通知することで行われる。この際、アドレス更新が頻繁に発生すると、ネットワーク全体に負荷を掛けてしまう。そこで、PF データを用いて GALMA の更新頻度を解析した。まず、PF データからランダムに利用者 ID を 100, 1000, 10000, 100000 人分それぞれの人数につき 10 個の異なるデータセットを作成する。各データから 00:00 から 23:59 までの位置情報を 1 分毎に読み、各端末の GALMA を第 22 階層で決定する。時刻 t で決定されたアドレスが $t-1$ のアドレスと異なる場合には、GALMA が更新されたとみなす。

図 3 は、端末数 100, 1000, 10000, 100000 での更新数の時間変化を示している。午前 02:00 から午前 08:00 にかけて徐々に更新数が増加していく。これは、通勤・通学の時間帯であり人々が最も移動する時間帯であるため、GALMA も逐次更新されている。最もアドレス更新が発生する時間は、午前 08:00 前後であることもわかる。図 4 は、各端末数に対する最大更新数の割合を箱ひげ図で示している。同時に更新される最大数は、端末数が増加すると更新する端末数が約 11% に収束する。そのため、LBM の経路制御では、同時更新数を全端末数の 11% と前提としたプロトコルの設計と評価が求められる。

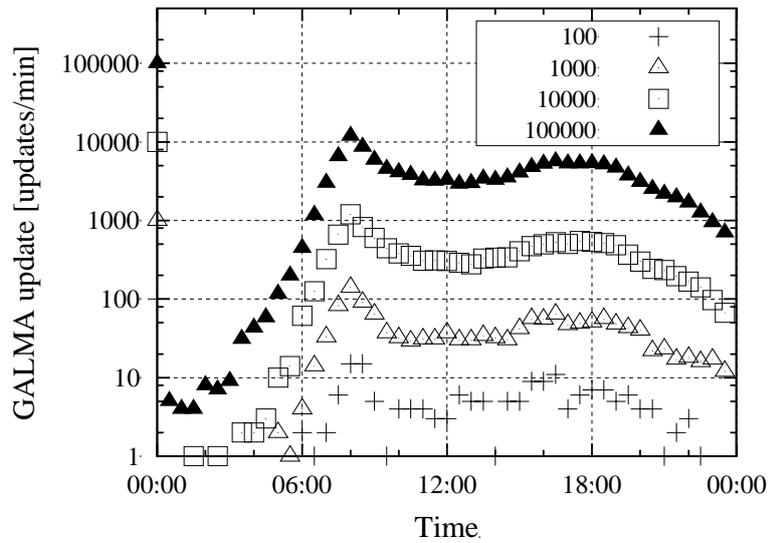


図 3 GALMA 更新数の時間変化

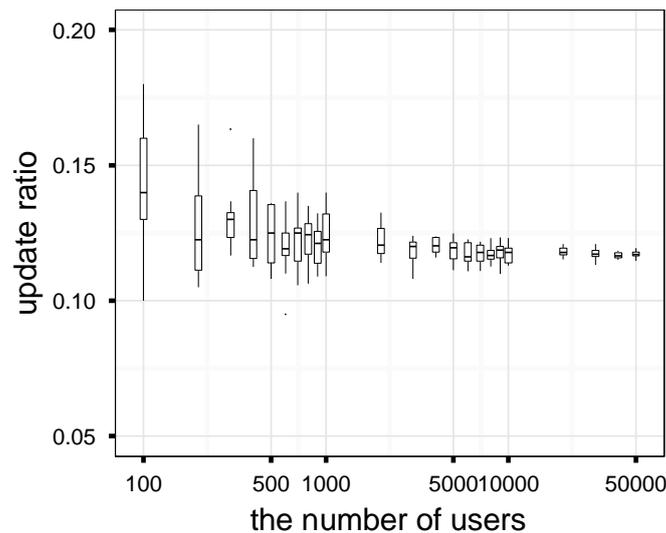


図 4 端末数に対する GALMA の最大更新数の割合

3.2. DTN 環境下における効率の良い情報流通手法に関する研究

(メッセージ保証機構を備えた分散 Publish/Subscribe システムの提案と評価)

センサネットワークにおけるリアルタイムなストリームデータ処理基盤として分散 Publish / Subscribe システム(Pub/Sub)が利用されている(図 5)。Pub/Sub はデータの生成者である Publisher とデータの消費者である Subscriber が疎結合な関係にある非同期メッセージングモデルであり、push 型のリアルタイムなストリームデータ配信・処理に適している。しかし、Pub/Sub システムでは Publisher と Subscriber が疎結合な関係にあるため、Subscriber は自身が要求しているデータを全て受信できているかどうか、受信したデータが正しく処理されたものかどうかを確認できないため、従来の Pub/Sub システムでは、データ配送過程におけるメッセージの到達性と処理ノードにおける計算処理の信頼性が不保証である。そこで、分散 Pub/Sub システムのメッセージ配送過程における 到達性・処理ノードにおける計算処理の信頼性を保証するために、地理情報に基づいた処理ノードのグループ構築手法と構築したグループ内のメッセージを監視・保証するための特殊な処理ノードの選出手法、及びメッセージの監視・保証手法について研究を実施した。

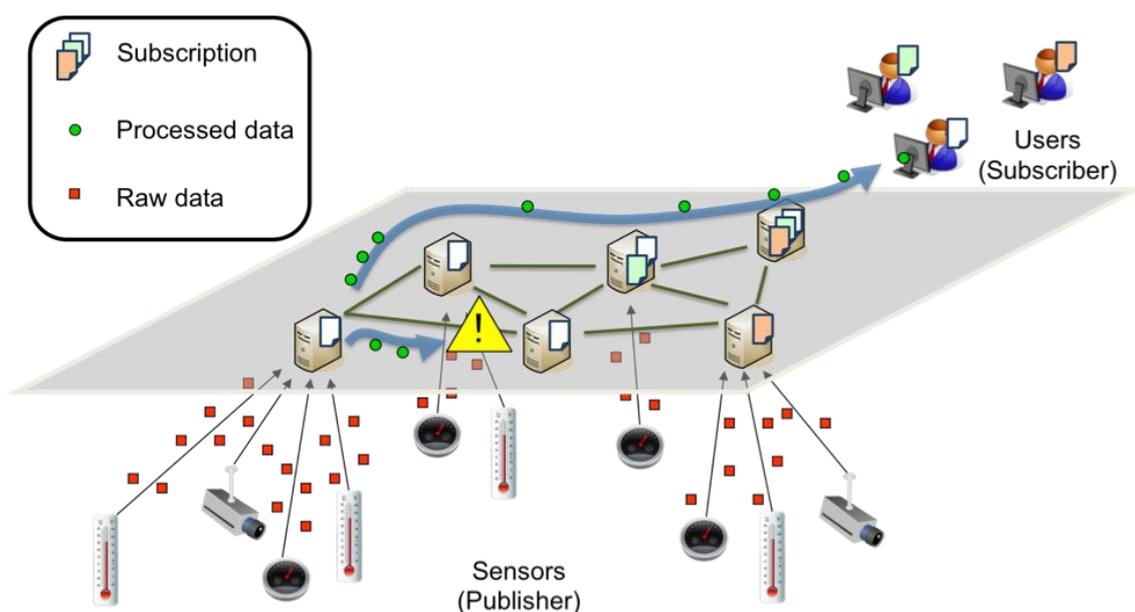


図 5 分散 Publish / Subscribe システム(Pub/Sub)

地理情報に基づいた分散 Pub/Sub システムのメッセージ配送過程における到達性・Processing node における計算処理の信頼性保証手法について検討した。具体的には、メッセージ配送・処理の基盤として Z-ordering を利用した地理オーバレイネットワークを利用し、その上で計算用 Subscription の分割・移譲を行うことで高いスケーラビリティを実現している分散 Pub/Sub システムを採用し、メッセージの到達性と Processing node における計算処理の信頼性保証のために、地理的局所性を持った保証機構を提案した。まず、地理的局所性を持った保証を行うために、Z-ordering によって付与された地理 ID のプレフィックス一致長に基づき

Processing node のグループを構築する手法について検討し、単一のグループが肥大化することを防ぐためにグループ内におけるホップ数の制限を導入し、制限値に違反する場合には一致長を長くすることで再度グループ化を行う手法を確立した。これは、特定のグループにおいてメッセージの監視・保証に関するコストが大きくなることを防ぐためである。次に、構築した Processing node のグループ内における通信の監視とメッセージ保証を行う Supervisor を選出する手法について検討し、Supervisor は他の Processing node に比べ負荷が高くなることが予想されるため、グループ内において CPU 負荷が低いノードを順次選択する手法を確立した。次に、メッセージの Subscription の移譲処理に基づく負荷平滑化機能に対応させ、スケーラビリティを向上させた。さらに、メッセージの保証を行うために、Supervisor にはグループ内で通信されるメッセージ Subscription の複製を持たせ、メッセージの不到達/計算処理の誤りが発生した際には、それらの複製を用いて保証を行う手法を実現した。

提案した Pub/Sub システムを実装し、ケーススタディとして東京都内の高層建造物を対象としたビルディング・オートメーションにおけるアラートシステムを一元的に管理するメッセージ配送・処理システムを想定したエミュレーションによる評価実験を行った。実験結果より、余剰メッセージ数の増加傾向と CPU 負荷の最大値は、システムが継続的にメッセージを処理できる程度のものであり、したがって、提案手法は高確率でメッセージの不到達・計算処理の誤りが発生する環境においても動作可能であることを示した。また、十分なスケーラビリティを持つことから、建造物の台数が増加するような場合にも対応でき、現実環境にも適用可能であることを示した。

(災害救助活動における情報共有に適したメッセージフェリーの動的経路決定手法の提案)

大規模災害の発災後、被災地では迅速な救助活動のために救助者間の情報共有が求められている。その際、被災地では既設の通信インフラが機能を停止することが予想されるためインフラに依らない通信手段が必要となる。そのような通信手段として特定の経路を巡回するデバイスにメッセージを中継させるメッセージフェリーイングが注目されている(図 6)。メッセージフェリーイングでは、ノードはメッセージの送受信時にフェリーの経路に接近する必要があるが、災害救助活動においてはメッセージの遅延時間の増加に加えて本来の救助にあたる時間を削ることにつながる。そこで、メッセージの遅延時間と救助者の情報共有に要する時間を削減するために、ノードの移動に合わせてフェリーの経路を動的に決定する手法の確立を目指した。特に、フェリーの運用時間に制限がある場合に巡回経路から除外するノードを選択することで単一のフェリーによる経路の分割を行い、地理的なスケーラビリティを確保した。さらに、提案手法の有効性を示すために救助者のモビリティを再現したシミュレーションにより評価した。

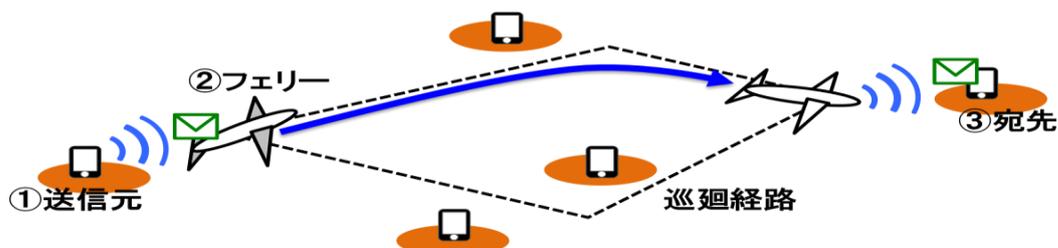


図 6 特定の経路を巡回するデバイスにメッセージを中継させるメッセージフェリーイング

被災地において救助活動を実施する複数の救助隊間でメッセージフェリングによって情報共有を行う方法について検討した。具体的には、災害救助活動における情報共有に適した方法としてメッセージの遅延時間と情報共有に要する時間を削減するために、各グループのリーダーの位置情報をもとに経由地点を更新し、フェリーの経路を動的に決定する手法を提案した。また、フェリーに用いるデバイスの電源による制約から連続運用時間に制限がある場合を考慮し、モバイルノードとの通信時刻および移動量をメトリックとして経路から除外するノードを決め、一台のフェリーで経路を分割し、地理的なスケーラビリティを確保する方法を提案した。実験では、UAV を用いてフェリーを構成しスマートフォンとの遭遇時の Wi-Fi の通信特性を調査し、インフラストラクチャモードでは一部通信が開始されない場合があったが、アドホックモードでは遭遇時のメッセージ交換が可能であることを検証できた。また、フェリーの速度を変化させて遭遇時の通信時間とデータ転送量を計測し、想定するアプリケーションに対して遭遇時に転送できるデータ量が充分であることを示した。

シミュレーション上で被災地での救助隊のモビリティを再現し、フェリーの移動速度、道路被害の程度、フェリーの運用時間を変化させて実験を行った。提案手法は、グループの移動に合わせてフェリーの経路を最適化することでメッセージ配送に関わるモバイルノードの移動を削減し、それによってメッセージの遅延時間と情報共有に要する時間を短縮することを目指しており、フェリーの移動速度が速くなるほど提案手法による効果が大きくなった。また、各グループの現在地から目的地までの間に地図情報を用いた経路をとることで移動中のモバイルノードとの遭遇を発生させることを意図した。フィールドの道路の被害状況を変えてモバイルノードに迂回する経路をとらせた場合、道路の多い市街地を移動するモバイルノードについては、フェリーとの遭遇回数が減少しなかったが、道路の少ない地域に目的地のあるモバイルノードについてはフェリーとの移動中の遭遇が減り、遅延時間の増加につながった。さらに、運用時間に制限がある場合には、ノードとの通信時間と移動量をメトリックとして巡廻経路から除外するノードを決定することで経路の分割を行い、地理的なスケーラビリティを確保することを狙った。運用時間の制限が短くなると、メッセージの遅延時間、情報共有に要する時間が増大したが、メッセージ配送自体は可能であることを示した。

(車車間での渋滞情報共有のためのクラスタリング手法の提案)

ITS 分野に関する研究が盛んに行われているが、運転者の負担軽減を目的とした自動運転、走行所要時間や燃費を考慮した走行経路の推薦、道路網のボトルネック把握のためのセンシング等多岐に渡る。これらの技術を実現するための必須要素の 1 つが渋滞情報の共有手段であり、自動運転や走行経路推薦といったいずれの応用技術においても何らかの渋滞情報共有手段が必要であり、これを用いて渋滞情報共有を行うことで渋滞の緩和や環境負荷低減といった効果が期待できる。渋滞情報共有を目的とした研究やサービスは存在し、それらは既に実環境で利用されているが、市街地において突発的に発生しうる渋滞に関する高精度かつリアルタイムな情報共有を実現するものはない。このような環境における渋滞情報共有手段として車車間で渋滞情報を直接共有することが効果的であるが、渋滞車列の識別および最も精度の高い渋滞情報を持つ渋滞車列の先頭車両を識別することが必要となる。この問題を解決するため、同一渋滞列

中の車両をクラスタリングするアルゴリズムを提案した。具体的には、軌跡を用いた車列の識別および地理位置を用いた先頭車列の識別を行い、同一車列の車両をクラスタ化し、クラスタ内での渋滞情報共有が実現される。有効性を確認するためにシミュレーションプログラムの実装・評価を行い、渋滞情報共有手段として有効であることを示した。

数 km 四方程度の市街地において突発的に発生した渋滞では、渋滞中の車両に対して何らかの渋滞情報を提供することで代替経路の選択による渋滞回避を行うことができる。これを実現するアプリケーションに共通して利用可能なクラスタリングアルゴリズムを提案した。渋滞列において高精度かつリアルタイムな渋滞情報を得るためには、渋滞先頭車両の発見および他車から受信した情報の自車に対する関連性の判断を行う必要がある。これをクラスタリングで実現する場合、車列の識別および車列先頭車両の識別の 2 つの要件を満たす必要がある。VANET 環境での利用を想定した場合、地図情報への非依存および通信量への考慮の要件を満たすことが望ましい。そこで、各車両の軌跡の共通点を利用してクラスタリングすることで車列の識別を実現した。軌跡の共通点の利用にあたっては軌跡を抽象化してからマッチングを行うことにより、GPS の誤差があったとしても車列を識別でき、またクラスタ ID の付与にあたって地理情報を利用することで、車列先頭車両の識別および地図情報への非依存を実現した。加えて、クラスタリングに必要なメッセージの送受信にあたってメッセージの重み付けを利用したメッセージ数の削減を行うことで、通信量に考慮したクラスタリングを実現した。これらより提案手法は渋滞情報共有のためのクラスタリング要件を満たし、渋滞情報の共有に適用できることを示した。

市街地を想定した環境下において、要件を満たしたクラスタリングを行うことができることを示すために、シミュレータ上で評価実験を行った。既存手法において 30%前後であった **reachability** は 60-70%程度、同じく 10%前後であった **correctness** は 80%前後に向上した。また、車両流入量の増加と共に **reachability** が低下する傾向があったが、メッセージの重み付けによりこれを防止し、車両流入量によらない高い **reachability** を実現した。これより要件のうち車列の識別および車列先頭車両の識別が満たされた。次に、各車両が保持する軌跡のサンプル数の適切な値を導くため、保持するサンプル数に対する **reachability** と **correctness** への影響を調べた結果、全ての車両に提案手法が導入されている環境において、保持するサンプル数 n は $n=8$ 程度でよいことを導出した。これはメッセージの重み付けによって、実際に利用される軌跡のサンプルは軌跡中の先頭数サンプル程度であるからである。さらに、クラスタの定期メンテナンスによる **reachability** と **correctness** への影響を調べ、**reachability** と **correctness** 共に 10%程度の向上が実現されたことを確認した。またメッセージの重み付けによる通信量への影響を調べ、重み付けを行わなかった場合に比べ 20%程度の削減効果を確認した。最後に、実際に想定される渋滞情報共有アプリケーションの一部として組み込んだ場合における効果について簡易的に調査した結果、わずかであるが旅行時間の改善がみられた。結果として、市街地における車車間での渋滞情報共有段を提供するためのクラスタリング手法として要件を満たし、かつ実際のアプリケーションにも適用可能であることを示した。

3.3. ワイヤレス技術を用いた位置検出およびワイヤレスセンサネットワークの信頼性改善に関する研究

(RFID による手術支援システムの実現)

CT (Computed Tomography), MRI (Magnetic Resonance Interferometry)などの画像診断技術や内視鏡検査により、数 mm 程度の腫瘍が見つけれられるようになってきている。しかし、手術時は、臓器の外部からアプローチするため、臓器内部の病変を手術時に同定することは困難である。従来は、検査時に色素によるマーキングを行う方法や金属クリップを留置する方法が取られているが、正確性や合併症の問題がある。

本研究では、図 7(a)に示すように内視鏡検査により発見された病変部位の近傍に小型の RFID タグを留置し、手術時には、(b)に示すようにセンサアンテナを用いて RFID タグ位置を特定し、正確に病変を切除することを可能にするシステムの開発を行った。

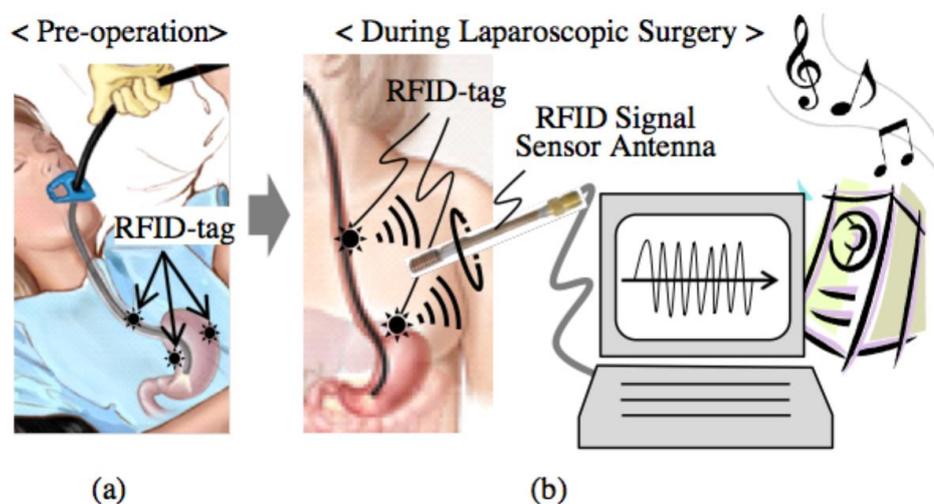


図 7 RFID タグを用いた手術支援システム

図 8 に開発した RFID タグ付きクリップを示す。図では、内視鏡のチャンネルを通じて病変部に留置が可能にするため 1.8mm の RFID タグをクリップに装着している。システムの構成を図 9 に示す。Sensor アンテナにより RFID タグからの信号を受信する。信号処理を行うことで、RFID タグ位置の検出を行う。構成となっている。

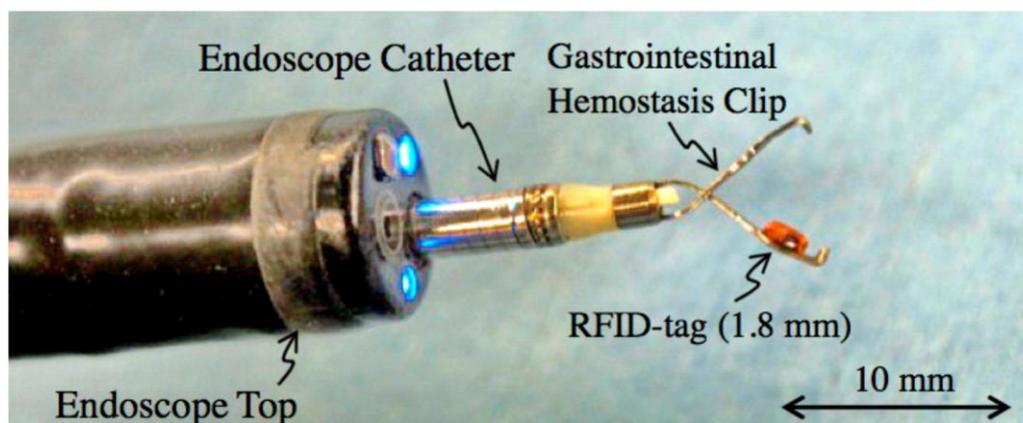


図 8 内視鏡を通じて体内留置可能な RFID タグ付きクリップ

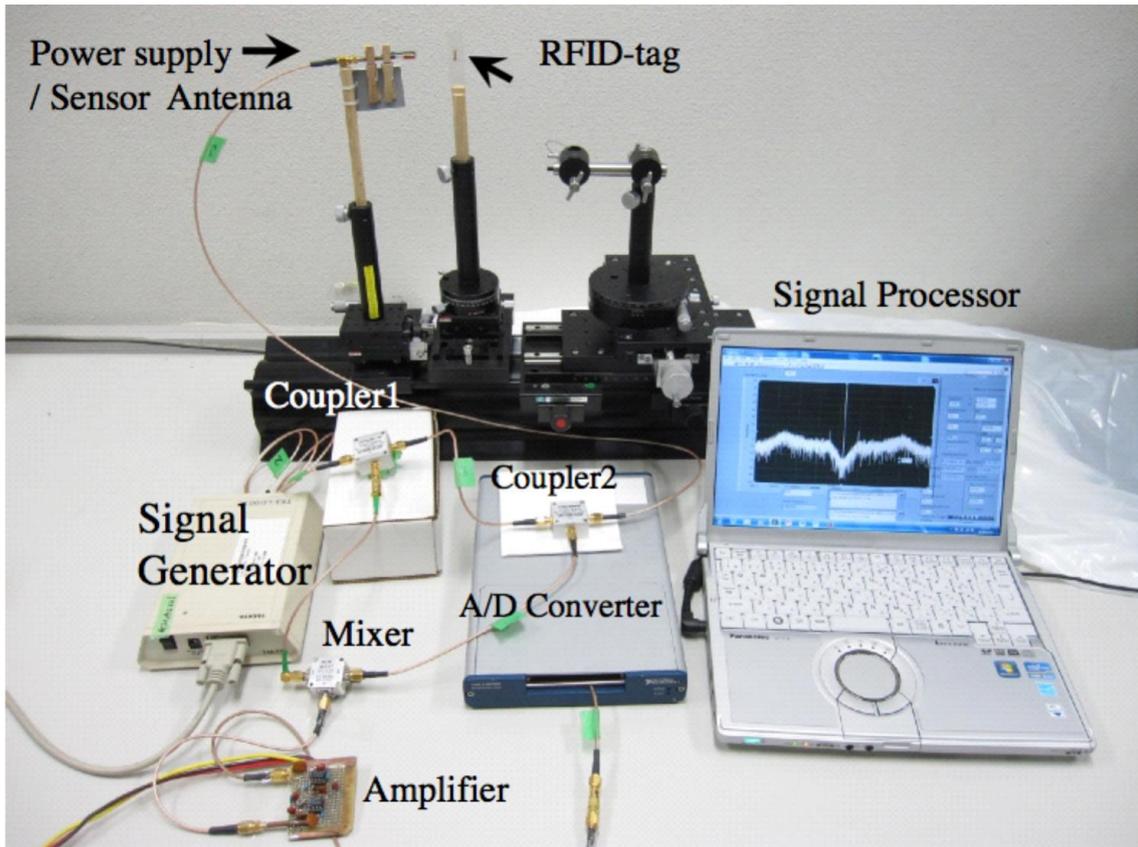


図9 RFIDによる手術支援システムの構成

(LCX リニアセル MIMO システムの研究開発)

従来は MIMO のような複数の信号を送送するために使用されていなかった漏洩同軸ケーブル (LCX) を図 10 に示すように MIMO システムの無線信号の伝送を可能にしつつ、その伝送速度 (周波数利用効率) を改善可能とするセル構成法の研究開発を行った。

図中には研究課題を挙げているが、特に(c)の位置検出技術は、セル間ハンドオーバーやセンサーインフラとしての応用が可能であり、その空間分解能の目標値を 1m と設定している。

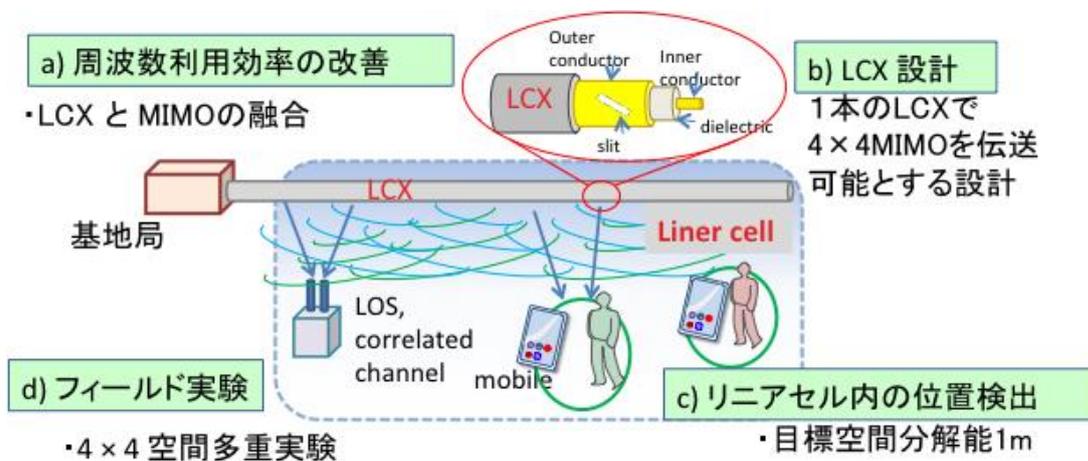


図10 LCX リニアセル MIMO システムの構成と研究課題

RFID を用いた手術支援システムの性能評価を行った。センサアンテナにより RFID タグからの受信信号強度の変化を測定し、測定値を信号処理することにより位置推定を行った。その結果を図 11 に示す。図において、 x, y は、センサアンテナから横方向へのずれ、 z はセンサアンテナからの距離に対応している。図(b)では赤点が RFID タグの実際の位置、白から青の領域は、推定した RFID タグ位置である。色は尤度を表している。図(b)に示すようにタグ位置推定ができていることがわかる。誤差特性を図(a)に示す。この図からセンサアンテナから 15mm 以内の範囲であれば、距離推定誤差は 10mm 以下に抑えられていることがわかる。

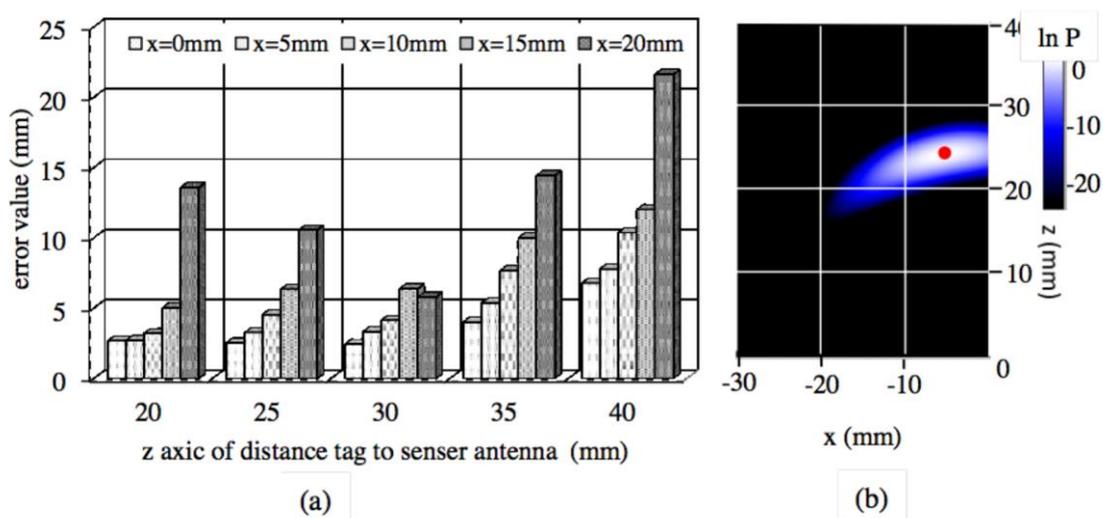


図 11 RFID タグ位置推定結果

実際にこのシステムを用いて動物実験を行っており、手術支援システムとして有効に動作することを確認している。

LCX リニアセル MIMO システムの研究開発では、移動端末の位置検出方式を検討した。図 12 にシステムの構成ならびに受信機の信号処理を示す。システムの構成で示したように、移動端末(MT)から空間を経て、LCX アンテナに入射し、LCX の給電線を通る電波の伝搬路の減衰および位相応答特性をモデル化する必要があったため、電波暗室内にて計測を行った。計測の様子とその座標系を図 13 に示す。LCX の全長は約 10m とし、周波数を 3GHz から 3.5GHz までの 500MHz とした。伝搬路応答は端末位置に対する依存性を有するため、同図に示す座標系で LCX の長手軸に平行な方向と垂直な方向について端末位置を変化させて測定を行った。その結果、端末位置が受信機に対して遠ざかれば増え、近づけば減るということが分かったため、電波の経路を幾何光学で近似可能であると考えられる。一方、長手軸に対して垂直方向に端末を遠ざければ、信号電力は大きく減衰する傾向とともに、無視できないゆらぎの成分の存在も同時に観測された。

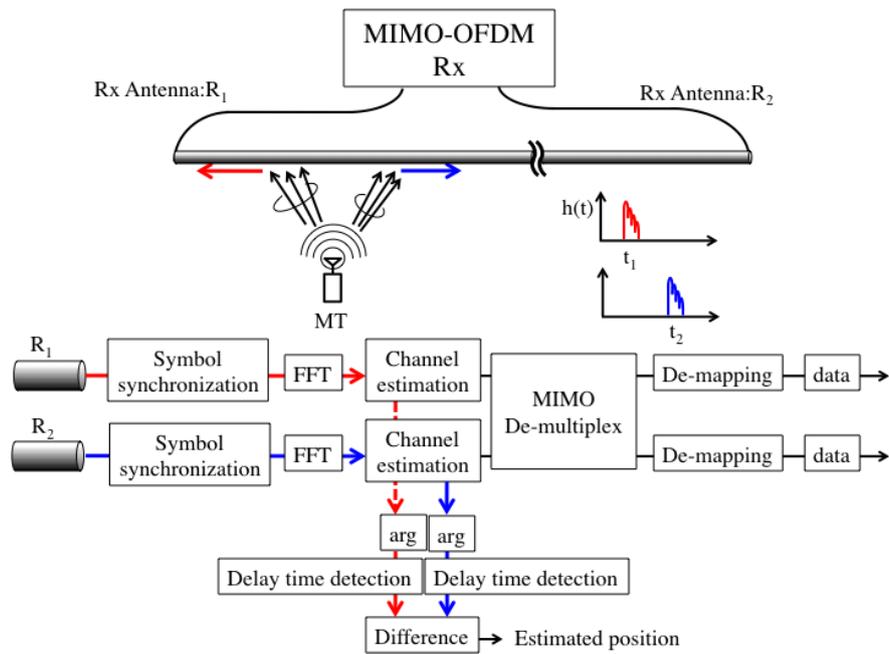
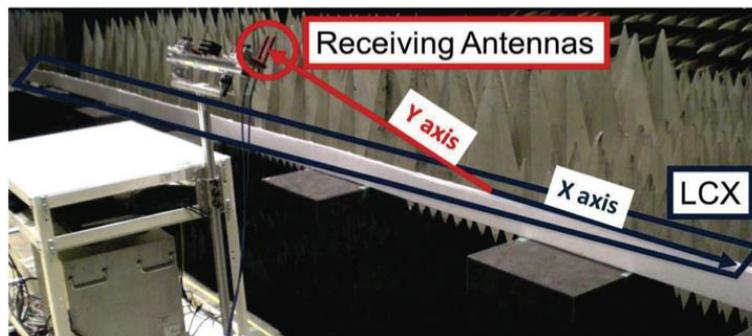
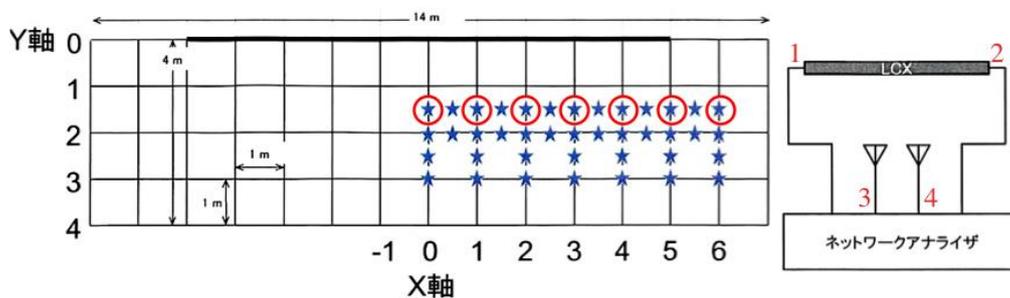


図 12 LCX リニアセル MIMO システムの位置検出の構成



(a) 暗室内測定の様子



(b) 測定の座標系

図 13 暗室内での計測の様子と測定座標系

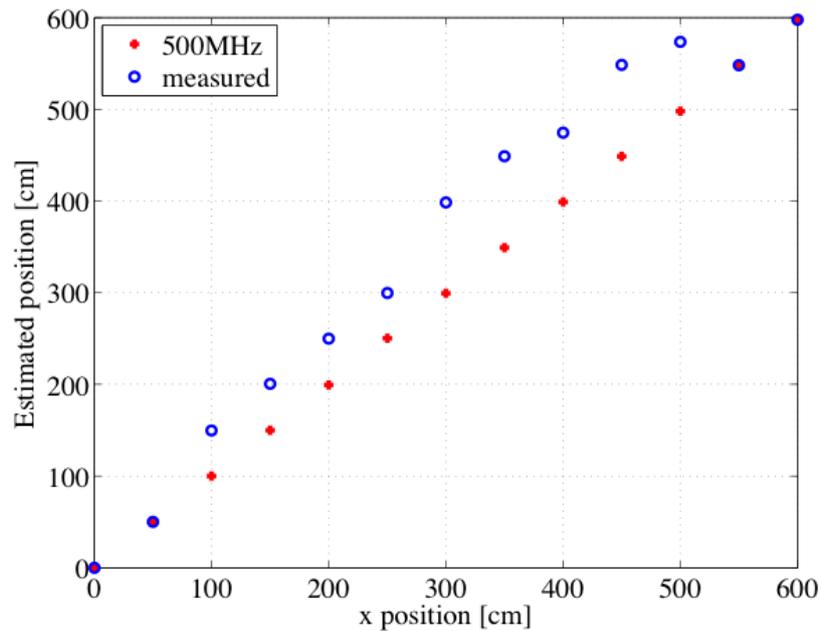


図 14 計算機シミュレーションによる誤差評価

図 12 に示した受信機は WiFi 等によく使用される OFDM 信号を用いることを仮定しており、OFDM 信号を構成する副搬送波の既知信号を用いて送受信機間の伝搬路応答の推定を行っている。図中の R1 および R2 からシンボルのタイミング同期を行い、フーリエ変換(FFT)を行う。得られた周波数領域の信号から副搬送波ごとに伝搬路推定を行う。伝搬路推定から右へ伸びるブロックは変調された情報信号の復調処理を表すが、ここではその詳細は割愛する。一方、下へ伸びるブロックでは各副搬送波の伝搬路応答の要素をつなげて、周波数に対する位相応答関数を得ている。そして MMSE アルゴリズムにより多項式近似し、1 次の係数(位相応答関数の傾きに相当)を得た後、 -2π で割って遅延時間を得ている。電波暗室内で取得した伝搬路応答を計算機シミュレータに組み込み、上記のアルゴリズムで位置推定を行った結果を図 14 に示す。用いた無線信号は副搬送波間隔が約 300kHz、帯域幅が約 17MHz の OFDM 信号である。図より正規の位置との誤差は高々 1m であり、目標とする分解能を達成可能であることが示された。

(環境知能センサ網グループ成果取り纏め: 猪俣 敦夫)