

3 情報共有空間のための センサコンピューティング

水野忠則 静岡大学創造科学技術大学院

峰野博史 静岡大学情報学部

コミュニケーション形態が、サイバースペースと実空間を密接に連携させた情報共有空間を介したものと急速に変化している。情報共有空間では、現実世界の情報を利用した情報処理、つまりコンテキスト・アウェアネスが重要となり、その状況を認識するための入力インタフェースとして基本となるのはセンサである。本稿では、これらのセンシング機能だけでなく、情報処理機能と通信機能を備えたセンサノードを互いに有線、無線の通信網によって接続し、協調動作を行うことで情報共有空間を実現する情報処理環境であるセンサコンピューティングに関して紹介する。また、自律分散協調制御を実現する制御ソフトウェアに注目し、情報の発生源となるセンサが現実世界のどこで発生した情報なのかを明らかにするセンサローカライゼーション技術と、現実世界に遍在することになるセンサコンピューティング制御ソフトウェアの自律協調更新技術に関して、近年のトレンドを紹介する。

情報共有空間とセンサコンピューティング

コミュニケーション形態が、サイバースペースと実空間を密接に連携させた情報共有空間を介したものと急速に変化している。情報共有空間では、現実世界の情報を利用した情報処理、つまりコンテキスト・アウェアネスが重要となり、その状況を認識するための入力インタフェースとして基本となるのはセンサである。センサを利用した情報処理環境、つまりセンサコンピューティングに関する技術は、行動の意図や文脈の把握、行動支援を目指す情報処理を中核としたアプリケーション支援の研究（コンテキスト・モデリング）、自律分散協調制御を実現する制御ソフトウェア（ミドルウェア）の研究、人や動物の感覚器官の機能を代行するだけでなく機能を専門化するセンシング技術の研究、小型かつ低消費電力により通信機能を提供する無線通信技術の研究、各技術に応じたセキュリティ技術の研究という5つにカテゴリズできる。

これら各分野においてさまざまな側面から活発な研究が行われ、現実世界の情報をサイバースペースと密接に連携させた情報共有空間の実現が目指されている。しかし、得られた情報をどのようにサービス向上やネットワーク環境の改善につなげ、情報共有空間としてシステム全体を常に変化する周囲状況や環境に応じて効率的・

効果的に順応させていくかという検討はまだ始まったばかりである。

本稿では、情報共有空間を実現する技術に関して、センサコンピューティングの側面から検討し、変化する周囲状況や環境に自律的に順応し、提供サービスやシステムへ知的フィードバックループを実現する手法について述べる。また、情報共有空間上で自律分散協調制御を実現する制御ソフトウェアに注目し、特に情報の発生源となるセンサが現実世界のどこで発生した情報なのかを明らかにするセンサローカライゼーション技術と、現実世界に遍在することになるセンサコンピューティング制御ソフトウェアの自律協調更新技術に関して、近年のトレンドと今後の動向を整理する。

センサコンピューティングとは

●概要

センサとは、温度、音、圧力、光などの物理量を計測し、電氣的データに変換するデバイスをいう。センサコンピューティングとは、これらのセンシング機能だけでなく、情報処理機能と通信機能を備えたセンサノードを互いに有線、無線の通信網によって接続し、協調動作を行うことで情報共有空間を実現する情報処理環境である（図-1）。

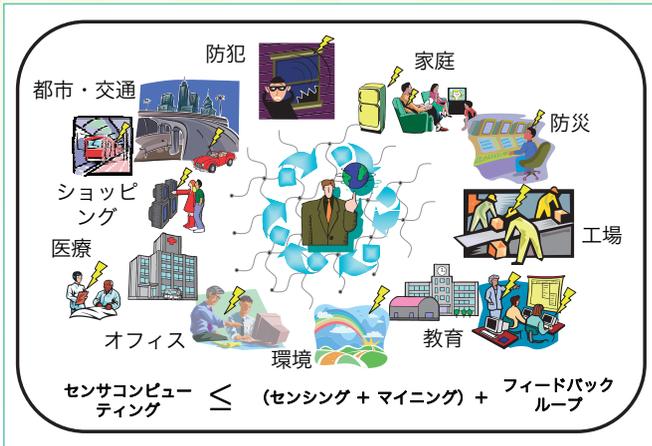


図-1 センサコンピューティングの概念

これまで、センサネットワークの構築技術やユーザモデリングなど、前述した各分野においてさまざまな側面から研究が行われてきたが、センサコンピューティングでは、技術革新の急速な変化に追従可能で、システムへどのような改良が必要かを明らかにし、継続的にサービス向上やシステムの変更に柔軟に対応することのできるフィードバックループを実現する技術が必要となる。このフィードバックループは、短期的側面でも効果を発揮でき、さまざまな機器やセンサ、ユーザなどから得られる情報を利用してマイニング（クラスタリング、分類）を行って、そこから頻出するパターンを発見することで、さまざまなセンサなどから得られる情報の意味自体が分からなくても、次に発生し得る状況を推測したサービスを提供することができる。つまり、行動の意図や文脈の把握といったコンテキスト・モデリングが完全でなくても、頻出パターンの発見とクラスタリングを繰り返すことで、ある程度の状況を推測したサービス提供は実現可能だと考える。

また、サービス提供用アプリケーションや、センサネットワークを実現する通信プロトコル、センサノードが位置情報を自動取得するためのローカライゼーションプロトコルなどのソフトウェアをリアルタイムに更新可能な制御ミドルウェアによって、提供サービスの再構築を柔軟に繰り返すことで、変革の激しい情報通信技術（ICT: Information and Communication Technology）の更新可能なライフタイムの長いシステムを構築可能とする技術も必要である。

センサコンピューティングでは、センシング、マイニング、フィードバックループという3つのキーワードが重要である。センシングとは、センサで入力した情報を処理し、自律的に動作する概念である。構築されたシステムは、センシングネットワーク上のさまざまなセンサなどから得られる情報の意味自体を理解することなく

マイニングによって頻出パターンを分析し、その結果を入力として次に発生し得る状況や行動パターン（利用者モデル）を推測することができる。その結果、システムが提供するサービスの最適化を行うことができるだけでなく、サービス提供用アプリケーションやセンサネットワークを実現する通信プロトコル、位置情報を自動取得するためのローカライゼーションプロトコルといったセンシングネットワーク環境そのものもリアルタイムに柔軟に再構築可能なフィードバックループを実現できる。

●関連技術

昨今のモバイルヘテロジニアスネットワーク時代の到来を前に、国外では、Oxygen, Endeavour, NewArch など新たなネットワークアーキテクチャの構築を目指した取り組みが行われてきた。昨今、全米科学財団（NSF）が支援するプロジェクト GENI（Global Environment for Network Innovations）では、センサネットワークの統合も視野に入れた次世代ネットワークアーキテクチャを想定している。このような背景のもと、センサネットワークにおける効率的な情報収集のためのプロトコル、ネットワーク上のサービス発見技術や、ヘテロジニアスな通信環境でのプロトコルの違いを隠蔽するプロトコルなどが主に検討されてきた。センサコンピューティングでは、センサネットワークのための基本的プロトコル技術と抽象度の高い記述に基づくサービス発見技術、動的ネットワーク技術の間を埋める技術を提供し、上記研究とは相補的な技術となることを目指している。

また、センサコンピューティングの特徴の1つである頻出パターン（軌道）のマイニングには、大量の頻出パターンの蓄積と類似性に基づくクラスタリングと分類が必要になる。静止情報についてはいくつかの研究が行われているが¹⁾、軌道のような動的情報では、密度の大小に応じて最適な格納を行い、入力データとの一致を効率的に行う研究は少ない。また、大規模データのマイニングをサービスとネットワークを最適化するためのフィードバックループへ取り入れる例はこれまでにないが、ディスクリットな頻出パターン（たとえば Web ログなどのアクセスパターン）の発見とマイニングの適用に関して、すでに顕著な成果を挙げている²⁾。そのため、この成果を発展させることで、軌道のような大規模データのマイニングでも2次元空間での最適化が可能であると考えられる。

もう1つの特徴であるフィードバックループは、サービス提供用アプリケーションやセンサネットワークを実現する通信プロトコル、位置情報を自動取得するためのローカライゼーションプロトコルなどをリアルタイムに更新し、システム構築後のフィードバックを適用可能

	アンカーベースの手法 (Anchor-based)			アンカーフリーの手法 (Anchor-free)	
レンジベースの手法 (Range-based)	Bat	Cricket		Iterative-Trilateration	
	SpotON	RADAR		Iterative-Multilateration	
	Ecolocation	AHLoS		Cluster-Localization Sweeps	
レンジフリーの手法 (Range-free)	Centroid	DV-hop	APIT	MDS-MAP	Spotlight
	Hop-TERRAIN	SeRLoc		MDS-MAP(P)	
	VelCoL	PDM	Amorphous	AFL	ROULA
	Provability-Grid	Gradient			
	ELA	CAB	GHOST		

図-2 センサローライゼーション手法の分類

な制御ミドルウェアとして実装する。無線センサネットワークでは、構成するデバイス上のソフトウェアを効率的かつ容易に更新する技術が検討され始めており、メッセージ衝突を避けることで消費電力の削減を実現し、セグメント分割することで効率よい配送や部分更新を実現する手法が提案されている^{3), 4)}。しかし、特定の条件もしくは特定エリアのデバイスのみ更新するといった柔軟な更新は実現されておらず、さらにマイニングパターンを利用することでネットワークの最適化が可能であると考えられる。また、ローライゼーション技術に関しても、さまざまな高精度手法が研究されているが⁵⁾、現時点では測位方式に焦点を置いたものであり、通信プロトコルとの親和性、融合性の観点から検討されていない。ローライゼーション技術と通信プロトコルを融合させることで、軌道パターンのマイニングを利用した効率的な通信プロトコルの実現も期待できる。

センサローライゼーション技術

●概要

センサネットワークにおいて、センサによって取得されたさまざまな環境データを利用する上では、データの取得された位置情報が必要となる場合が多い。また、マッピング管理等のアプリケーションでは、位置情報そのものが重要な意味を持つ。しかし、センサノードを大量にばらまいたり、さまざまな場所へ埋め込んだり、センサノードが移動する場合を考えると、あらかじめ各ノードの位置を確認することは困難であるため、何らかの方法で各ノードの位置を推定するセンサローライゼーション技術が重要となる。特に、サイズや消費電力に関する制約の大きい無線センサノードの場合、全ノードにGPS (Global Positioning System) を搭載させることは現実的でなく、また、CricketやBat、RADARのように基地局をサービスエリア内にくまなく設置する必要

のあるLPS (Local Positioning Systems) を利用することも、サービスエリアの限定やシステム構築の負荷、高コストといった理由により敬遠されがちである。そのため、無線センサネットワークでは、ノードが自立的に情報を交換することで各ノードの位置関係を推定していく手法が注目されており、数多くの研究が提案されている。

センサローライゼーションの手法は、何らかの手法で距離を測定し距離に基づいて各ノードの位置を推定していくレンジベース (Range-based) の手法と、各ノードの持つ無線通信を利用してホップ数や近隣ノードとの位置関係から各ノードの位置を推定していくレンジフリー (Range-free) の手法の2つに大別できる。特に、距離を測定するための特別なデバイスを必要としないRange-freeの手法は、省電力かつ低コストで各ノードの位置を推定できるため、数百~数千個といった膨大な数のノードを想定するセンサネットワークでも有効である。また、Range-freeの手法によって大まかなネットワークトポロジが得られてから、利用可能な部分のみでもRange-basedの手法を適用すれば、より高精度に位置を推定することができる。

一方、GPSや手動設定によって位置情報の設定された数台のノードを基準点 (Anchor) として利用するアンカーベースの手法 (Anchor-based) と、基準点を一切利用しないで全ノードの相対位置を推定するアンカーフリーの手法 (Anchor-free) で分類することもできる。ただし、Anchor-freeの手法は、相対的なセンサネットワークのトポロジを得てから、基準点を利用して相対座標を実空間上の絶対座標へ変換することができる。

一概にすべての手法を適切にマッピングできるとは限らないが、以上をまとめると、センサローライゼーションの手法は、図-2に示す4つの手法に大別することができる。以降では、この4つの手法について、代表的な研究を例に挙げ紹介する。もちろん、ここで挙げた研究以外でも、多くの研究が行われている。

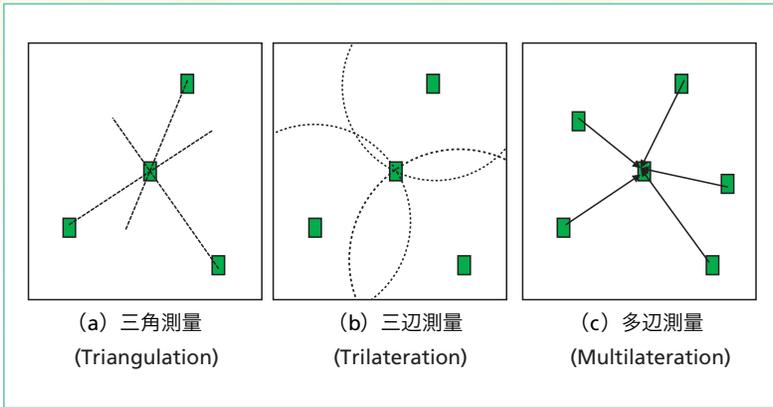


図-3 代表的な位置推定手法

● Range-based 手法

Range-basedの手法では、何らかの手法で距離を測定し距離に基づいて各ノードの位置を推定していく。そのため、Range-freeの手法に比べ高い精度を得ることができる。距離を測定するのに利用される手法として、電波や音波といった信号の滞空時間から距離を算出するToA (Time of Arrival)、信号の受信時刻差を利用するTDoA (Time Difference of Arrival)、信号到来方位を利用するAoA (Angle of Arrival)、受信信号の信号強度を利用するRSSI (Received Signal Strength Indicator)が挙げられる。どの手法を利用するかは要求精度とデバイスの複雑さやコストとのトレードオフである。たとえば、信号強度を用いた手法は、特別なハードウェアは必要なく単純であるが、周辺の環境に大きく影響を受けやすい。一方、TDoAやToAといった時間を用いた手法は、高い精度で距離を測定できるが、特別なハードウェアが必要であったり、複雑さ、新たな電力消費が生じるといった特徴を持つ。また、角度を利用する手法では、一般に指向性アンテナやアレイアンテナが利用される。ただし、センサノード側で、指向性アンテナを回転させたり、アレイアンテナの受信信号の時刻ずれから到来方位を予測する方法は、小型で省電力の望まれるセンサノードでは実現が難しい。そのため、基準点側に指向性アンテナを想定する研究もあるが、まだ課題は多い。

次に、測定された距離からノードの位置を推定する基本原理を紹介する。2次元平面状の座標は、基本的には、3つの基準点との角度、2基準点間の距離とそれら基準点との角度、3基準点からの距離といった三角形の特性を利用したいずれかの方法で推定できる。図-3によく利用される位置推定手法の概観を示す。図-3(a)は基準点との角度を利用する三角測量 (Triangulation)、図-3(b)は3基準点との距離を利用する三辺測量 (Trilateration)、図-3(c)はGPSのように多数の基準点との距離を利用して推定精度を向上させる多辺測量 (Multilateration)

である。

要求精度やコストによって距離の測定手法と位置の推定手法の組合せはさまざまなものが考えられるが、Range-basedのAnchor-freeな手法の代表的なものとして、Bat, Cricket, SpotON, RADAR, Ecolocationなどが挙げられる。また、AHLoSでは、少数の基準点(最低3つ以上)からノードまでの距離を測定し、三辺測量や多辺測量で位置を決定し、その位置の決定したノードを基準点として再帰的に周辺の未決定のノードの位置を決定していく Iterative-Multilateration という手法を提案している。

この Iterative-Multilateration という手法自身は、基準点があっても適用することができるため、Anchor-freeでノード間の距離を測定することで相対的な位置を決定し、周辺のノードの位置を伝播的に決定していくこともできる。その際、測定距離の誤差伝播や測位ノードのフリップ(反転した逆の位置になること)をグラフ理論を利用して抑えようとする手法も提案されており、代表的なものとして、Iterative-Multilateration, Cluster-Localization, Sweepsなどが挙げられる。

● Range-free 手法

次に、距離を測定するための特別なデバイスを必要としない Range-freeの手法は、省電力かつ低コストで各ノードの位置を推定できるため、数多くの手法が提案されている。特に、GPSや手動設定によって位置情報の設定された基準点を利用する Anchor-basedの手法は、距離を測定するための特別なデバイスをノード自身に要求しないため、さまざまな手法が提案されている。たとえば、位置情報が未知であるノードが、複数の基準点から基準点の位置の含まれたビーコンを受信できる状況を想定し、受信した複数の基準点の位置から物理的重心を求めることで、対象ノードの位置を推定する Centroidや、広範囲に自身の位置情報を含んだビーコンをブロードキャスト可能な高出力の基準点を想定し、3つの基準点によって形成される三角形の中に自身や隣接ノードがいるかないかという PIT判定 (Point-In-Triangulation Test)を、基準点の組合せを変えて繰り返すことで、自身の存在する推定範囲の大きさを縮小させ位置を推定する APIT、基準点からのビーコン情報をネットワーク内にマルチホップさせ、ホップ数を距離へ換算し位置を推定する DV-Hopや Amorphousなどが提案されている。その他の代表的なものとして、SeRLoc, CAB, PDM, VeLCoL, Hop-TERRAIN, Gradient, ELA, Probability-Grid, GHoSTなどが挙げられ、それ

ぞれ多種多様な特徴を持つ。

一方、Range-freeの手法でも、位置情報の設定された基準点を特に必要とせずともノード間の相対的な位置関係を決定するAnchor-freeの手法が注目されている。特に、自律的に基準となるノードを決定していき、その基準ノードを利用して全ノードの相対位置を決定するAFLや、多変量解析の一手法である多次元尺度構成法(MDS: Multi-dimensional Scaling)をセンサローカライゼーションに適用したものなどがある。多次元尺度構成法とは、対象間の非類似度(広い意味での距離)の関係をできるだけ保つように、対象を多次元空間の点で表し視覚化する手法で、最も単純な古典的MDSを採用しているものが多い。古典的MDSの基本的な原理は、対象間の距離が既知ならば、対象間の内積を求めることができるため、この内積から対象の座標値を復元しようというものである。MDSの重要なポイントは、この2点間の距離をどのように表し距離行列とするかであり、この距離行列の精度が結果に大きな影響を与える。また、MDSの演算コストは、ノード数を n とすると $O(n^3)$ であるといった特徴も持つ。

昨今では、不規則(Non-Convex)な形状のネットワークポロジにも対応できるよう、より範囲を狭めたローカルマップ内に存在するノードのローカライゼーションを行い、その後、すべてのローカルマップをグローバルマップへマージするという手法が提案されている。こうすることで、ローカルマップの構築にかかる演算を分散して実行することができ、より大規模なセンサネットワークへ適用させることもできる。

Range-freeの手法は、ノード間の位置関係を決定することができるが、一般にホップ数をベースにノード間の距離を決定するため、推定された座標の精度は高くない。そのため、Range-freeでのローカライゼーションをした後に、Range-basedの手法を適用し、測定された隣接ノードとの距離を利用して最小二乗誤差によって位置を微調整することもできる。また、必要であれば基準点を利用して、相対座標を絶対座標に変換することができる。以上のようなRange-basedのAnchor-free手法の代表的なものとして、AFL, MDS-MAP, MDS-MAP(P), Spotlight, ROULAなどが挙げられる。

●センサローカライゼーション手法のまとめ

以上のように、さまざまなセンサローカライゼーション手法が提案されているが、実環境の複雑性をすべて考慮するのは難しい。そのため、シミュレーションではさまざまな仮定をおいているのが実情である。たとえば、各ノードの無線通信の範囲は円とする、接続性は双方向通信可能な対称的なものである、障害物は存在しない見

通しのある状況、マルチパスや平坦な地形を想定している、などである。ただし、これらの実環境との隔たりを考慮しようという動きも積極的に検討され始めており、ローカライゼーション時のセキュリティ、通信範囲の揺れや不均一な密度、不規則なネットワークポロジへの対応や、実環境でその有効性や課題を評価しようとする研究も行われている。

我々の研究グループでも、Range-freeのAnchor-freeで不規則なネットワークポロジに対応可能なROULAを提案している。ROULAは、MANET(Mobile Ad-hoc Network)ルーティングプロトコルのOLSR(Optimized Link State Routing)で利用されるMPR(Multipoint Relay)ノードを利用した正三角形でローカルマップを構成し、ネットワークプロトコルとの親和性も実現した新規的な手法である。

センサローカライゼーション技術は、まだ研究の域を脱していないが、計測デバイスの分解能、消費電力やサイズ、コストといったさまざまな制約の解決、統計解析やグラフ理論応用の集大成によって、情報共有空間を支えるセンサコンピューティングの基礎技術として近い将来の実用化が期待できる。

制御ソフトウェア更新技術

●概要

センサネットワークは、次世代のインフラストラクチャとして、あらゆる場所のセンシングデータを提供し、多様なサービスで利用されることが想定される。信頼性の高いインフラとしてセンサネットワークを稼働させるには、アプリケーションの要求に応じたセンシングデータを低コストで長期間、安定して提供できるような制御ソフトウェアが必要である。しかし、センサネットワークを長期間運用すれば、アプリケーションの要求や周辺環境は変化し、センサネットワークへ要求される仕様にも変更が発生し得る。そのような場合、センサネットワークを構成するノード上で動作する制御ソフトウェアを更新し、用途に応じた機能を提供できるものに置き換えるという制御ソフトウェア更新が必要となる。センサネットワークで最も重要な機能は、センシングデータを提供することであり、ノード上の限られた資源を、このソフトウェア更新のために大きく割り当てることは望ましくない。しかも、信頼性の高いセンサネットワークを構築するためには、提供されているサービスに影響を与えることなく、容易にソフトウェア更新を行うことが要求される。以降では、このような要求に応えるため、センサノード上の制御ソフトウェアを高信頼に更新する手法について紹介する。

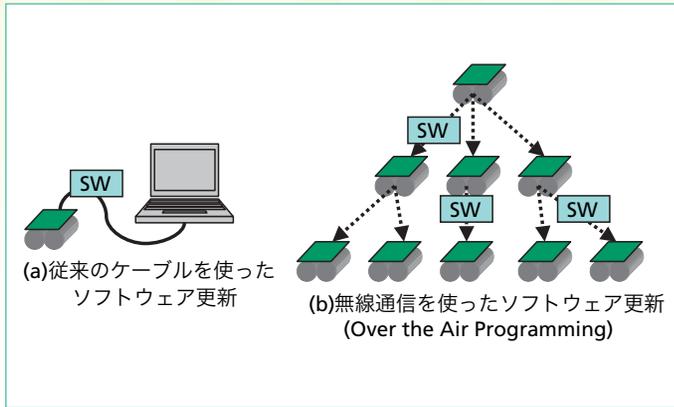


図-4 センサノードの制御ソフトウェア更新手法

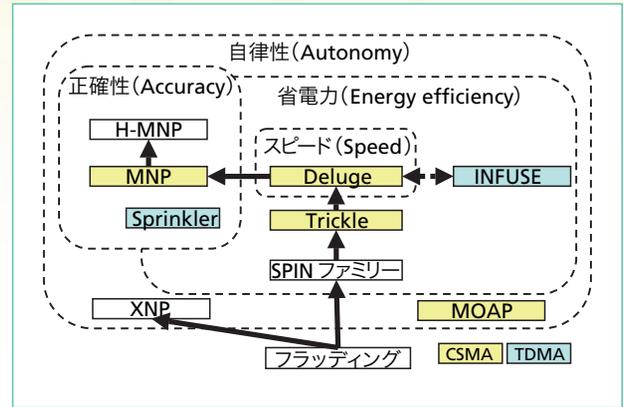


図-5 ソフトウェア更新手法の分類

● センサノードの制御ソフトウェア更新手法

センサネットワークの分野において、最も古典的な制御ソフトウェアの更新手法は、制御ソフトウェア開発用のコンピュータとセンサノードを直接ケーブルで接続し、ケーブルを介して制御ソフトウェアをノードに書き込む手法である(図-4)。しかし、ノードを1台ずつケーブルで接続して更新するのは、無数のノードで構成されるような大規模センサネットワークでは非効率である。そのため、大規模なセンサネットワークでも簡単に各ノードの制御ソフトウェアを更新可能なように、無線通信を介してマルチホップ配送とノードへの自動書き込みによって制御ソフトウェアの更新を行う OTAP (Over the Air Programming) が注目されている。

この OTAP に関して、さまざまな手法が提案されているが、各提案手法の提案の流れをその主な特徴で分類したものを示す(図-5)。最も単純な方法は、フラッディングによって制御ソフトウェアをノードへ配送する手法である。ただし、フラッディングは単純な仕組みであるが、メッセージ送受信が多くなってブロードキャストストームが発生し、無駄な再送、電力消費が問題となる。そこで、ADV (通知)、REQ (要求)、DATA (データ) と呼ばれる3種類のメッセージを用いた3ハンドシェイクを行うことでフラッディングのような冗長メッセージの送受信を削減しようとする SPIN ファミリープロトコルが提案された。つまり、自身の保持しているデータに関する情報を ADV メッセージによって隣接ノードへ通知し、隣接ノードはそのデータが必要であれば、REQ メッセージを ADV 送信ノードへ送る。これにより、そのデータを必要とするノードに対してのみ DATA メッセージを用いてデータを送信することが可能となり、冗長メッセージの送受信を削減することが可能となる。

また、Trickle では、SPIN の3ハンドシェイクを改良し、冗長な ADV メッセージをさらに削減している。ただし、Trickle では、1回に転送できるデータサイズ (MTU)

が制限されており、サイズの大きな制御ソフトウェアの更新は対象としていなかった。そのため、Deluge は、ページ分割によって、この MTU サイズを超えるような大容量のソフトウェア配送も可能にしている。ページ分割では、配送するソフトウェアイメージをページと呼ばれるデータ単位に分割し多重化して配送することを可能とし、ページごとに要求を行うことで部分データのインクリメンタルなソフトウェア更新も可能としている。

ここまでの制御ソフトウェア更新手法では、ノードが高密度に存在するようなセンサネットワークでは、隠れ端末問題などとともにメッセージ衝突が頻繁に起こるという共通的な課題を抱えていた。そこで、MNP や Sprinkler では、メッセージ送信を行う代表者を選出するアルゴリズムを採用することで、高密度なセンサネットワークでも隠れ端末問題とメッセージ衝突の回避を実現している。これまでの手法では、新しいデータを保持しているノードはすべてが送信者としてメッセージを送信していたが、これらの手法では、データを送信する代表者を選出することで、衝突を回避しようとしている。また、MNP では、代表者以外のノードをスリープ状態に移行させることで、センサネットワーク全体の消費電力をさらに削減しようとしている。

Deluge や Trickle が MAC プロトコルに CSMA 方式を採用していることに対して、INFUSE では、TDMA 方式を採用している。TDMA 方式では、時間ごとに通信するユーザをあらかじめ決めていたため、メッセージ衝突は発生しにくく、隠れ端末問題やメッセージ衝突を回避することができる。メッセージ衝突自体を避ける以外にも、損傷したデータを受信側で復元しようと試みる方式も存在する。MNP を発展させた Hybrid-MNP では、FEC (Forward Error Correction) を用いて損傷データの復元を可能としている。

●制御ソフトウェア更新手法のまとめ

以上のように、センサネットワークにおける制御ソフトウェアの更新手法は、さまざまなものが提案されており、我々の研究グループでも、ページ分割による多重化配送の効率を改善する手法について検討を進めている。また、通信プロトコルの複数レイヤ間で、必要な情報を交換して適切な処理を行おうとするクロスレイヤ通信プロトコルも重要となる。

センサノードの制御ソフトウェア更新技術も、まだ研究の域を脱していないが、アプリケーションを意識したクロスレイヤ MAC プロトコル、時刻同期によるスケジューリングといったさまざまな研究成果の応用によって実用化が促進されるものと考えられる。

今後の展望

本稿では、情報共有空間のためのセンサコンピューティングに関して、センサローライゼーション技術と制御ソフトウェア更新技術に関する動向を踏まえまとめた。

得られた情報をどのようにサービス向上やネットワーク環境の改善につなげ、情報共有空間としてシステム全体を常に変化する周囲状況や環境に応じて効率的・効果的に順応させていくかという検討はまだ始まったばかりである。今後ともさまざまな側面からセンサコンピューティングに関する活発な研究を行い、現実世界の情報をサイバースペースと密接に連携させた情報共有空間の実現が期待される。

謝辞 静岡大学情報学部 石川博教授には、本稿をまとめるにあたり、多大なご協力いただきました。感謝いたします。

参考文献

- 1) Rasetic, S., Snader, J., Elding, J. and Nascimento, M. A. : A Trajectory Splitting Model for Efficient Spatio-Temporal Indexing, in Proc. of 31st Int'l Conf. VLDB, pp.934-945 (2005).
- 2) Ishikawa, H., Ohta, M., Yokoyama, S., Nakayama, J. and Katayama K. : On the Effectiveness of Web Usage Mining for Page Recommendation and Restructuring Source, in Springer Lecture Notes in Computer Science, Vol.2593, pp.253-267 (2002).
- 3) Wang, Q., Zhu, Y. and Cheng, L. : Reprogramming Wireless Sensor Networks : Challenges and Approaches, in IEEE Network May/June, pp.48-55 (2006).
- 4) Han, C., Kumar, R., Shea, R., Kohler, E. and Srivastava, M. : A Dynamic Operating System for Sensor Nodes, in Proc. of 3rd Int'l Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services, pp.163-176 (2005).
- 5) Patwari, N., Ash, J. N., Kyperountas, S., Hero, A. O., III Moses, R. L. and Correal, N. S. : Locating the Nodes : Cooperative Localization in Wireless Sensor Networks, in IEEE Signal Processing Magazine, Vol.22, No.4, pp.54-69 (2005).

(平成 19 年 1 月 4 日受付)

水野忠則 (正会員)
mizuno@mizulab.net

1968 年名古屋工業大学経営工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。1993 年静岡大学工学部情報知識工学科教授。1996 年同大情報学部情報科学科教授。2006 年より同大創造科学技術大学院長、教授、工学博士。情報ネットワーク、モバイルコンピューティング、放送コンピューティングに関する研究に従事。著書『コンピュータネットワーク概論』(日経 BP)、『モダンオペレーティングシステム』(ピアソン・エディケーション)等。電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。本会フェロー、監事。

峰野博史 (正会員)
mineno@inf.shizuoka.ac.jp

1997 年静岡大学工学部情報知識工学科卒業。1999 年同大学院理工学研究科計算機工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。NTT サービスインテグレーション基盤研究所配属。2002 年より静岡大学情報学部情報科学科助手。2006 年九州大学大学院システム情報科学府博士(乙)学位取得。1999 年電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞、2001 年 NTT サービスインテグレーション基盤研究所所長表彰。2005 年、2006 年本会 DICO MO シンポジウムベストカンパニオン賞。各受賞。ヘテロジニアスネットワークコンバージェンスに関する研究に従事。電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。