

論文の内容の要旨

論文題目 センサネットワークにおける高効率分散型制御に関する研究

氏 名 関根 理敏

近年、ユビキタスコンピューティング環境において、ネットワークに接続された多数のセンサが実空間情報を収集することで、さまざまなサービスを実現するセンサネットワークが注目されている。電子デバイスの微細化技術(MEMS)の発展に伴い、温度、光、音などのセンシング機能を持った小型デバイスが、無線リンクで自律分散的にネットワークを構成し、生活空間にコンピュータが遍在することで、木目細やかな実空間情報取得が可能となる。またローカルに存在する無線センサネットワークはインターネットに接続され、家庭やオフィスといった限定された場所だけではなく、都市や自然環境から得られる実空間情報が広域に流通し、ユーザやアプリケーションが必要とする情報をリアルタイムに得ることが想定される。

本論文では、多種多様な実空間情報を、センサネットワークを介して収集し、それを活用する環境において、ネットワークを適応的かつ自律分散的に制御することで、ネットワークリソースを有効に活用し、効率的に実空間情報を流通させ、さまざまなサービスに活用させるということを目的とする。その技術的課題の解決について、具体的には無線センサネットワークを想定し、長期間のネットワーク稼働や運用コスト削減に必要な低消費電力化に向けたメディアアクセス制御(MAC: Medium Access Control)や、ノード間のアクティブ・スリープのスケジュールにおける同期制御について論じている。またインターネット上でのセンサデータを収集や管理において、特に高頻度なデータの更新を考慮して、適応的にコンテンツを配置する手法に論じている。

第2章では、実空間情報を収集し、活用するためのセンサネットワークの概要を述べるとともにセンサネットワーク特有の技術的課題や要求事項を明らかにしている。無線センサネットワークでは、技術的課題として、低消費電力化が挙げられる。無線センサネットワークではバッテリーやメモリの容量、CPU (Central Processing Unit)の能力などに大きな制約があり、無線リンクで接続されたノードから構成されるセンサネットワークでは、電力の消費を極力抑え、ネットワークをなるべく長期間稼働させることが必要である。特に無線通信における電力消費が大部分を占めるため、メディアアクセス制御によって、通信を行わない間はスリープ状態となる間欠通信を行うことが有効である。また間欠通信におけるオーバーヘッドが小さい同期制御も重要となる。さらにインターネット上で多種多様な大量のセンサデータをスケーラブルに収集、管理、また配信を扱うメカニズムも必要とな

る。特にセンサデータは一般の WWW (World Wide Web) 上のコンテンツと比較して、更新頻度が高く、その更新頻度が地理的・時間的に異なるため、特定のノードに負荷が集中してボトルネックが発生する可能性がある。そのために適応的かつスケーラブルにコンテンツを配置することが重要となる。

第 3 章では、トラフィックの高低が時間的・空間的に偏りがあるセンサネットワークのアプリケーションを想定し、トラフィックの発生に応じて自律分散的かつ動的にスロットを割り当てることで、スループットの低下を抑制しつつ、高い消費電力効率を実現する無線メディアアクセス制御について論じている。無線通信では実際にパケットの送受信を行わなくとも、無線インタフェースがアクティブ状態であれば電力を消費するため、一般に通信を行う期間が比較的短いセンサネットワークにおいては、送受信を行わない期間は、極力無線インタフェースはスリープ状態になることが望ましい。センサネットワークでは、通常はトラフィックがほとんどなく、イベント検知、クエリの配信などの際に、一時的にノードがデータの送受信を行う場合がある。また、異なる位置に配置されたノードによってもトラフィックが異なる場合もある。そのため、MAC プロトコルの設計の上で、時間的・空間的なトラフィックの相違に対して、柔軟に対応できることが重要であると考えられる。センサネットワークにおける従来の CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 方式では、キャリアセンスやバックオフが必要となるので、自分に無関係なパケットの送受信を行う場合があり、消費電力を浪費する可能性がある。一方、TDMA (Time Division Multiple Access) 方式では、データパケットの送受信は予め割り当てられたスロットに行われるため、CSMA 方式と比較して、データパケットの送受信に伴う冗長なアクティブ期間が少なく、消費電力は抑制される。厳密なスロット割り当てによるオーバーヘッドの増加やノードによるトラフィックの違いに応じた割り当てが困難という課題がある。提案手法では、データパケットの送受信を行うノードのみがスロット予約を行うことで、制御パケットのオーバーヘッドが削減される。さらに各ノードが、スロット予約期間においてアクティブ状態になる期間を、トラフィックの変動に応じて動的に制御する。提案手法をセンサ実機で動作確認を行った上、計算機シミュレーションによる評価の結果、提案手法では、従来手法と比較して、消費電力を抑制しつつ、トラフィックが増加しても、スループットを維持することができることを示している。

第 4 章では、間欠通信に適したアクティブ・スリープのスケジュール同期制御について論じている。間欠通信を行うためには送受信ノードがアクティブ状態でなければならないため、間欠通信を行う際にはこのアクティブ・スリープ状態の同期制御が必要となる。この間欠通信における同期制御において、ネットワーク全体で 1 つの同期を維持する手法は同期制御のオーバーヘッドが大きいという問題がある。通常時は同期制御を行わず、通信を行う場合には、送信側が 1 周期の間受信ノードを起こすための信号を送信し続けることで周囲のノードをアクティブ状態にし、通信を行う方式もある。この方式ではアクティブ・スリープ状態のスケジュール同期が不要であるが、通信に無関係なノードもアクティブ

状態になり、通信を行うたびに同期制御が必要となるため、消費電力を浪費する可能性もある。そこで本研究では、間欠通信における同期制御のオーバーヘッドの削減による省電力化を目的とし、送信要求の発生に応じて同期制御を行い、さらにクロックスキューを考慮に入れることで、長期間、同期を維持し、同期制御のオーバーヘッドを抑制したオンデマンド型同期制御手法の提案を行う。提案手法では、同期パケットを受信したノードは、その後送信ノードが次にアクティブとなる時間までスリープ状態となることで、無駄な同期パケットを受信することなく消費電力を削減できる。提案手法では、データパケット送信要求が発生した場合のみ同期を取り、その後は定期的な同期パケットの送信は行わない。同期の維持は従来手法の高精度同期方式を基本に行っている。送信側の時刻と受信側の時刻の差を履歴情報として、送信側のクロックスキューを算出することで、送信側と受信側の時刻を同期させる時刻同期プロトコルである。まず、同期の基準となるノードが同期パケットを送信する。このときの同期パケットには基準ノードのパケットの送信時間が記述される。この同期パケットを受信したノードはパケットの受信時間を記憶する。そして送信ノードとの時刻のずれを記憶する。この動作を繰り返すことにより、送信ノードとのタイマのずれの履歴を取得することができる。この履歴情報を直線近似し、その直線の傾きであるクロックスキューを算出することで送信ノードとのタイマのずれを補正することが可能となる。計算機シミュレーション評価により、提案手法では、制御パケットの削減と消費電力の削減できることを示している。

第5章では、リアルタイムに変動するセンサデータのインターネット上の流通を想定し、構造型ピアツーピア (P2P) ネットワークにおいてデータ登録やクエリ配信における履歴情報の利用やポインタの配置、また適応的なコンテンツ配置により、データの更新や検索における負荷分散を行う手法について論じている。P2P ネットワークでは、効率化、ロバスト性の向上、また負荷分散などの観点から、適切にコンテンツを配置する必要がある。

センサデータを P2P ネットワーク上でグローバルに共有する場合、センサデータはリアルタイムに変動するため、データ更新におけるオーバーヘッドが大きくなることが想定される。しかしながら、従来手法では、主に検索における負荷分散や、オーバーヘッドの削減に着目し、データの更新における負荷分散や、オーバーヘッドの削減に十分対応しているとはいえない。そこで本章では、連続的な検索範囲を含むレンジクエリに対応した構造型 P2P ネットワーク上で、高頻度に更新されるデータを適応的に配置する手法について提案を行っている。提案手法では、ノードが自分の保持するデータを分割して複数のノードに保持させることで、データの更新における負荷分散を行っている。また、データの複製を配置することにより、データ検索における負荷分散を行っている。さらに、データの登録や検索における履歴情報を利用したり、データを提供するノードが、適応的にデータやメタデータの登録や更新を行ったりすることで、データの更新および検索におけるオーバーヘッドを削減している。計算機シミュレーションによる評価により、提案手法に有効性を示している。