

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：32670

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25330120

研究課題名(和文) オープンソースハードウェアを用いた動的再構成可能なセンサネットワークシステム

研究課題名(英文) A Dynamically Reconfigurable Sensor Network System based on Open Source Hardware Devices

研究代表者

横田 裕介 (Yokota, Yusuke)

日本女子大学・理学部・准教授

研究者番号：70303881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：センサネットワークシステムでは、稼働中にノードの持つ機能や役割を動的に変更することが求められる。従来はソフトウェアレベルでのノードの動的な機能変更について主に研究が進められてきたが、本研究ではPSoC等の動的再構成可能デバイスをノードのモジュールとして導入し、ハードウェアレベルでの動的な機能変更を実現するシステムを開発した。これにより、従来は実現が困難であったアナログ回路レベルでの機能変更も可能になり、センシングの精度やサンプリング周波数の大幅な変更や、コプロセッサ機能の動的な追加などの動作をシステム稼働中に実行できるようになった。

研究成果の概要(英文)：A capability to change functions or roles of nodes dynamically in operation is required for sensor network systems. Existing researches have mainly focused on techniques for changing functions of sensor nodes dynamically in software level. In contrast to this, we developed a system that has a capability to change functions of nodes dynamically in hardware level utilizing dynamically reconfigurable devices including PSoC. It realizes drastic changes of accuracy of sensing or sampling rates with changing behavior of analog circuits, and an addition of a co-processor function to running node online.

研究分野：情報工学

キーワード：センサネットワーク 動的再構成可能デバイス

1. 研究開始当初の背景

センサネットワークアプリケーションが必要とする機能のうち、特に重要なものと考えられているものの一つが、システム稼働中のセンサノードの動作を動的に変更する機能である。これまでに、センサノード上におけるソフトウェアレベルでの動的な機能変更を実現するための様々な手法が研究されてきている。これに対し、ハードウェアレベルでの動的な機能変更の実現については、まだそれほど活発に行われるようになっていない。

初期のセンサネットワークシステムは、各ノードの性能・能力・役割が単一であり、定期的にセンシングしたデータをホストPC側へ送信するというシンプルな動作を前提としていた。しかし、様々なセンサネットワークアプリケーションシステムを開発し運用する中で、下記のような要求の重要性が明らかになってきた。

- (1) 単一ネットワーク内に様々な異なる役割を持ったセンサノードが混在
- (2) システム稼働中における動的なノードの役割の変更
- (3) システム稼働中のセンシング動作内容の動的な変更

このような要求に対応するためには、センサノードのソフトウェアレベルでの動的な機能変更に加え、ハードウェアレベルでの動的な機能変更を提供することが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、PSoC、FPGA といった動的再構成可能デバイスをノードのモジュールとして導入し、OS レベルでのサポートを提供することによって、より柔軟性の高いセンサネットワークシステムを実現することを目標とする。これによって、例えば次のような機能を実現することが可能になる。

- (1) 演算・通信能力の動的な変更：クラスタヘッドとなるノードは他のノードと比べ、多くのデータを受信し、集約処理を行い、また送信する必要がある。これをサポートするため、動的再構成デバイスをコプロセッサとして用いることで、演算・通信能力を向上させる。
- (2) センシング能力の動的な変更：動的再構成可能デバイスに接続されたセンサの制御内容を動的に変更する。例えば、センシング精度の動的な変更、許容サンプリングレートの動的な変更(1秒に1回程度のモードから1秒に数千回程度のモードへの変更のような、ソフトウェアレベルでは対応しきれないもの)といった機能を提供する。

3. 研究の方法

まず、動的再構成機能を持つセンサノード実現のためのハードウェアおよびシステムソフトウェアの開発を行い、基本機能の動作

検証を行う。センサノード本体部分にはオープンソースハードウェアである Arduino を用いる。動的再構成可能デバイスとしては PSoC を用いる。

次に、開発したノードを用いたアプリケーション開発を容易にするための、フレームワークの設計と実装を進める。このフレームワークを用いることによって、動的再構成可能デバイス制御のための複雑な操作を隠蔽し、従来のセンサネットワーク用ソフトウェアを大きく変更することなく、動的再構成機能を活用したアプリケーションを開発することを支援する。また、役割が異なるノード間での協調動作を記述することを容易にし、柔軟性の高い協調型センサネットワークシステムの効率的な開発を可能にする。このフレームワークを用いて実際にシステムを構築し試験運用を行い、その有効性の確認を行う。

4. 研究成果

本研究課題の目標は、(1) 動的再構成可能デバイスを持つセンサノードの開発 (2) 動的再構成機能を活用するためのフレームワークの開発 の2点にまとめられる。

- (1) 動的再構成可能デバイスを持つセンサノードの開発：

まず、ハードウェアの基本構成の検討を行った。ノード本体部分にはオープンソースハードウェアである Arduino (Arduino UNO R3)、動的再構成機能を提供するデバイスとしては PSoC 1(CY8C29466-24PXI)、無線通信デバイスには XBee (XBee S2) を用いることとした。これにより、ZigBee 無線通信を使用したセンサネットワークシステムを構築することができる。

次に、実現目標となる動的再構成を用いた具体的な機能を検討した。一つ目はセンシング精度およびサンプリングレートの変更機能である。これは、これまでに参加してきたセンサネットワーク応用に関する研究において、重要な要件として挙げられていたことが主な理由である。二つ目は、コプロセッサ機能の動的な追加である。これは、ノードの役割の多様性および動的な役割の変更のサポートが重要であることが明らかになってきていることによる。ノードの役割の違いは必要とされるデータ処理能力の違いとなる。システム稼働中に動的にノードの役割が変更され、求められるデータ処理能力が大幅に高くなった場合、本提案システムを用いて動的にコプロセッサ機能を追加することによって、柔軟な対応を実現することができる。以下、それぞれの機能の開発についてまとめる。

センシング精度およびサンプリングレートの変更機能：初めにおおまかに現在のセンシング値を測定した後に、より狭い範囲で高精度なセンシングを行うといった利用方法を想定し、開発を進めた。例えば、温度セン

サを用いてまず 0~100 の範囲で室温を計測し、現在の室温が 25 前後であることが明らかになると、次は 20~30 の範囲でより詳細に室温を計測するような動作を実現することができる。この機能を実現するため、PSoC1 上で主に ADCINC (A/D Converter Incremental)、PGA (Programmable Gain Amplifier)、I2CHW (I2C Hardware)の3種類のモジュールを使用して機能を構成した。センサは PSoC1 に接続されており、PSoC1 と Arduino は I2C シリアル通信によって通信を行う。この I2C 通信においては、Arduino がマスタ、PSoC1 がスレーブとして動作する。Arduino がノード全体の制御を担当するため、PSoC1 デバイスの動作制御も Arduino が行う。PSoC1 は Arduino からの指示に従って動作を変更し、得られたセンシング値を Arduino 側へ送信する。

コプロセッサ機能の動的な追加：これは Arduino と PSoC1 による並列処理機構を動的に追加する機能である。この機能を利用する場面として想定されるものの一つに、大規模な無線センサネットワークを構成する際に用いられるクラスタリング技術が挙げられる。クラスタと呼ばれる単位でセンサノードのグループを構築し、クラスタヘッドと呼ばれるセンサノードが、クラスタ内の他のセンサノードから送信されたデータを集約することで、ホスト PC へのトータルの通信量を削減する。クラスタヘッドは、クラスタ内のセンサノード、外部のクラスタヘッド、およびホスト PC と通信し、またクラスタ内のセンサノードから受信したデータの集約演算を行う。クラスタヘッドで行われる処理は、負荷が高くなる傾向があり、これを軽減することが求められる。PSoC1 デバイスをノードのコプロセッサとして用いることで、負荷が大きいデータ集約演算を並列処理することが可能となる。このような機能は、負荷の大きい処理が必要とされるマルチメディアセンサネットワークや、高いサンプリングレートが求められる構造物ヘルスマonitoringで有用であると考えられる。プロトタイプシステムでは、メインとなる Arduino 側のプロセッサでは通信に特化した処理を行い、コプロセッサとして用いる PSoC1 デバイスでは集約演算に特化した処理を行うことで処理の効率化を図った。プロトタイプシステムにおけるクラスタヘッドの役割を担うノードでは、クラスタ内のノードとの通信タスク、PSoC1 デバイスとの通信タスク、外部のクラスタヘッドやホスト PC との通信タスクを実行する。Arduino は、他ノードから送られてきたデータを一時的に保存し、クラスタ内のすべてのノードからのデータが集まったことを確認すると、PSoC1 にデータを送信する。PSoC1 は、受信したデータを指示された方法で集約演算し、Arduino に演算結果を送信する。Arduino は、PSoC1 から受信した集約演算結果を、外部のクラスタヘッドに送信する。

(2) 動的再構成機能を活用するためのフレームワークの開発：

原始的なセンサネットワークシステムは、全ノードが同じ機能を持ち、同じ動作に基づいてセンシングを行うという前提で設計されている。一方、ノードの多様化・高機能化が進むにつれ、現在のセンサネットワークシステムでは、ノードごとに機能が異なり、またノード同士で情報を交換しながら協調動作することが求められるようになってきた。したがって、動的再構成機能を持つような高機能なセンサノードを制御するためには、適切なソフトウェアフレームワークによる支援が不可欠であり、このようなサポートが無い場合、アプリケーションの開発が非常に煩雑なものとなる恐れがある。ここでは、ノードの動作をルールとして定め、センサデータから判別される状況に応じて、イベント情報を送信することでノードの動作を動的に切り替えるイベント通信に基づく協調型センサネットワークシステムのためのフレームワークを開発した。ノードがデータの処理を行い、状況判別の結果をイベントとして他のノードに伝搬することで、ノード間の協調動作を可能にしている。

システムの概要：センサデータはローカルストレージに保存され、それを元に判断を行い、必要があればイベントを生成する(図1)。また、必要に応じてホストへセンサデータを送信することもできる。生成されたイベントは、ホストを経由せずマルチホップ通信によって対象ノードへ直接送信される。イベントを受け取ったノードは、ルール記述内容に基づいて自律的に自身の動作を変更する。これにより、アプリケーションが必要とするセンサデータのみをホストへ送信し、ノードの動作変更用に用いられるセンサデータはイベント通信として置き換えられ、ノード間の直接通信によって処理することを可能にしている。

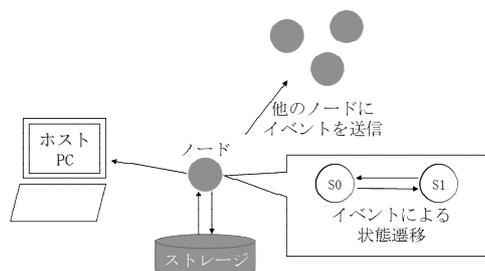


図 1 システムの概要

ルール処理部：ルール処理部では、センシングを行う度にノードのローカルストレージにデータを蓄積し、その処理結果からイベントを発生させる。イベントが、ユーザが設定した条件に適合していた場合、ノードは自身の動作の切り替えを行う。この手法では、ノードごとにセンサの種類が異なる場合における異種ノード間の協調動作を自然に記

述することができる。具体例として、ノードに湿度計と照度計を用いた場合について述べる(図2)。照度計は曇りの時には一分に一回計測を行い、晴れの時には一時間に一回計測するように設定されている。湿度計の値が x を超過した場合に、照度計を搭載しているノード2にイベント1を送信する。イベント1を受信したノード2は、曇りから晴れの状態になったと判断し、一時間に一度計測するよう動作を変更する。また、湿度計の値が y 以下になると、今度はイベント2をノード2に送信する。イベント2を受信したノード2は、晴れから曇りの状態になったと判断して一分に一度計測するように動作を変更する。

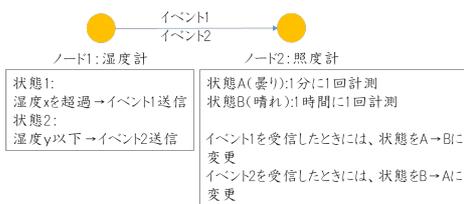


図2 ルール処理動作例

システムの構成：システムのモジュール構成を図3に示す。ノードはホストからの制御命令および他のノードからのイベントを受信し、ホストへセンサデータ、および他のノードへイベントを送信する。一方ホストはノードにルールを送信し、ノードからセンサデータを受信する。

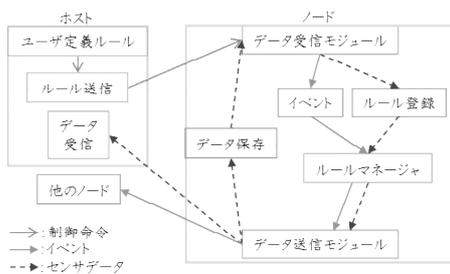


図3 モジュール構成

以上、(1)のハードウェア面の開発および(2)のソフトウェア面での開発を行った。今後は、この成果を活用したアプリケーションの開発を進めることを検討している。本研究課題において開発したノードハードウェアは、アナログ回路レベルでの動作変更が可能な点が大きな特徴となっている。今後のアプリケーション開発については、この特徴を役立てることが可能な分野を対象としたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. T. Torii, Y. Yokota, and E. Okubo, A

Web-Based Sensor Data Management System for Distributed Environmental Observation, Journal of Advances in Computer Networks (JACN), 査読あり, Vol.1, No.2, pp.105-109, Jun. 2013.

〔学会発表〕(計15件)

1. 横田裕介, 動的再構成デバイスを用いたセンサネットワークシステムの開発, 信学技報, vol. 117, no. 57, ASN2017-4, pp. 19-22, 2017年5月25日, 東京大学 駒場リサーチキャンパス 生産技術研究所 (東京都目黒区)
2. 吉田麻衣子, 横田裕介, イベント通信に基づく協調型センサネットワークシステムの実装, 情報処理学会第78回全国大会, 1T-04, 2016年3月10日, 慶應義塾大学 矢上キャンパス (神奈川県横浜市港北区)
3. 山田早礼, 横田裕介, 小型デバイス向け遠隔連携センシングシステムの開発, 情報処理学会第78回全国大会, 2V-01, 2016年3月10日, 慶應義塾大学 矢上キャンパス (神奈川県横浜市港北区)
4. 貝塚千穂, 横田裕介, UAVを用いたモバイルセンシングシステムにおけるスケジューリング機構, 情報処理学会第78回全国大会, 2T-03, 2016年3月10日, 慶應義塾大学 矢上キャンパス (神奈川県横浜市港北区)
5. 瀬戸諒, 横田裕介, 大久保英嗣, 移動型マイクロストレージシステムとセンサネットワークによるセンサデータ回収機構の実現, 信学技報, vol. 114, no. 480, ASN2014-172, pp. 241-246, 2015年3月3日, 芝浦工業大学 豊洲キャンパス (東京都江東区)
6. 木下智雅, 横田裕介, 大久保英嗣, 動的再構成デバイスを用いたセンサノードの高機能化, 情報処理学会第77回全国大会, 第3分冊, 6T-05, 2015年3月19日, 京都大学 吉田キャンパス (京都府京都市左京区)
7. 橘高俊, 横田裕介, 大久保英嗣, 移動型センサネットワークにおける重要度に基づくノードの動的配置手法, 情報処理学会第77回全国大会, 第3分冊, 6T-04, 2015年3月19日, 京都大学 吉田キャンパス (京都府京都市左京区)
8. 森香樹, 横田裕介, 大久保英嗣, 協調処理を実現する広域センサネットワークシステムの設計と実装, 情報処理学会第77回全国大会, 第3分冊, 2U-2, 2015年3月17日, 京都大学 吉田キャンパス (京都府京都市左京区)
9. 石川久嗣, 横田裕介, 大久保英嗣, 自律飛行体ノードによる無線センサネットワークのための移動スケジューリング手法, 信学技報, Vol. 114, No. 418,

- ASN2014-116, pp. 55-60, 2015年1月26日, 南紀白浜温泉 むさし (和歌山県西牟婁郡)
10. 三木佑真, 横田裕介, 大久保英嗣. AR技術を用いた無線センサネットワークシステムの運用支援システムの開発, 信学技報, Vol. 114, No. 418, ASN2014-147, pp. 203-208, 2015年1月27日, 南紀白浜温泉 むさし (和歌山県西牟婁郡)
 11. 杉井祐太, 横田裕介, 大久保英嗣. 無線センサネットワークシステムにおける自律移動型ノードのためのフレームワーク開発, 信学技報, Vol. 114, No. 418, ASN2014-146, pp. 197-202, 2015年1月27日, 南紀白浜温泉 むさし (和歌山県西牟婁郡)
 12. Alberto Gallegos Ramonet, Yusuke Yokota and Eiji Okubo, A Micro Weather Analysis Method for Sensor Data in Precision Agriculture, Innovations in Information and Communication Science and Technology (IICST 2014), 4th Postgraduate Consortium International Workshop, 2014/9/3, Warsaw, Poland.
 13. 周力陽, 横田裕介, 大久保英嗣. 無線センサネットワークにおける遠隔反応可能なモバイルエージェントモデル, 情報処理学会研究報告, 2014-DPS-158/2014-CSEC-64, Vol. 2014, No. 38, 2014/3/7, 明治大学中野キャンパス (東京都中野区)
 14. 杉井祐太, 横田裕介, 大久保英嗣. 無人観測のための自律移動型ノードを利用したセンサネットワークシステム, 情報処理学会題76回全国大会, 第3分冊, 6W-7, 2014年3月13日, 東京電機大学東京千住キャンパス (東京都足立区)
 15. 劉坐松, 瀬戸諒, 横田裕介, 大久保英嗣: 移動型マイクロストレージシステムによるセンサデータ回収機構, 信学技報, vol. 113, no. 132, ASN2013-73, pp. 141-145, 2013年7月18日, アクトシティ浜松 (静岡県浜松市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横田 裕介 (YOKOTA, Yusuke)
日本女子大学・理学部・准教授
研究者番号: 70303881