

令和元年6月19日現在

機関番号：21201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K15984

研究課題名（和文）柔軟なノード間連携により大量のデータの処理を実現するセンサシステム基盤技術の開発

研究課題名（英文）Development of sensor system core technology to realize processing of a large amount of data by flexible node cooperation

研究代表者

今井 信太郎 (Imai, Shintaro)

岩手県立大学・ソフトウェア情報学部・准教授

研究者番号：50510260

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本申請研究では、環境に適応した動作を可能とする、マルチエージェント技術に基づくセンサシステム基盤技術の開発を実施した。この技術により、エージェントシステムに参加できないセンサノードが存在した場合でも、近傍のノードが処理を補完することが可能となった。この結果、システムは特定のノードに負荷が発生した場合などの環境変化を検知し、自律的にデータ処理場所の変更やノードの動作の調整を行うことによりノードの負荷や消費電力を低減させることなどが可能となり、環境への適応が実現された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本申請研究で開発したセンサシステム基盤技術により、システムは柔軟なデータ処理場所の変更などを自律的に行うことにより、デバイス構成などの環境に適応した動作が可能となる。今後、大量のセンサデータを利用した様々なサービスの展開が予想され、センサシステムは社会にとって欠かせないインフラの一部となると考えられる。本申請研究の成果は、このようなセンサシステムの発展に貢献することが予想される。

研究成果の概要（英文）：In this research, I developed sensor system core technology based on multi-agent technology that enables operation adapted to the environment. It is possible to complement the processing by nearby nodes even if there is a sensor node that cannot participate in the agent system by using this technology. This technology made the system can detect an environmental change such as load on a specific node, reduce the load and power consumption of the node by autonomously changing the data processing location and adjusting the operation of the node. Therefore, adaptation to the environment was realized by the proposed technology.

研究分野：センサシステム

キーワード：センサシステム センサネットワーク マルチエージェントシステム

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、多数のセンサノードを用いて、実空間に存在する人間や物体から様々な大量のデータを取得し、そのデータを様々なサービスに応用することが行われている。しかし、大量のデータの特定サーバへの送信は、通信路やストレージに大きな負荷を与えることになり、必要な場合にセンサノードやその近傍のノードでデータ処理を行いデータサイズを縮小することは、今後のセンサを用いたサービスには必須である。

このような背景から、データの多くがセンサやその近傍（ネットワークのエッジ）で管理されるという思想に基づく、Edge-Heavy Data や、ネットワークの終端近くに処理サーバを設置することにより通信コストの低減を図る Cisco Systems 社の Fog Computing などが提唱されている。しかし、サイズの小さいデータを扱う場合や、通信路やストレージに余裕のある場合など、特定のノードに取得したセンサデータを集めた上で処理することが有効である場合も多く、図1のようにサービスやデータ、デバイス環境に応じて柔軟にデータ処理内容・処理場所を選択できることが理想である。

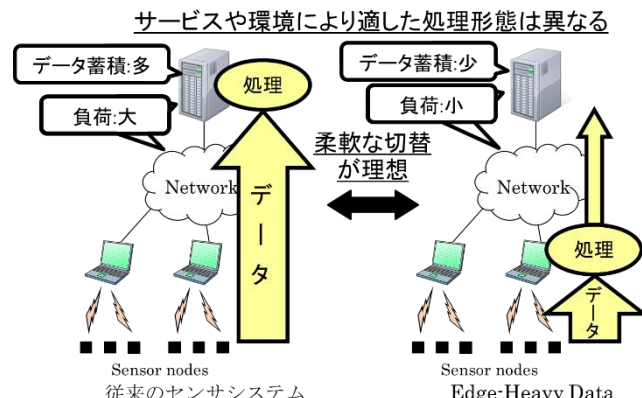


図1 データ処理場所による差異

これに対しては、センサノードやその近傍ノードにおいて自律的・協調的に状況判断を行い動作することが可能な分散エージェントシステムに基づく手法が有効である。しかし、以下の理由により、通常のコピュータで運用されているエージェントシステムをそのまま利用することは困難である。

- (1) センサデバイスは特定のサービスとの結び付きが強い場合が多く、ソフトウェアのアップデートも困難であり、全てのノードのエージェントシステムへの適応が困難である
- (2) センサデバイスの性能面の制約から、必要な計算処理のできないノードを考慮する必要がある

2. 研究の目的

以上の背景から、本申請研究では、サービスやデータ、デバイスなどの環境に適応した動作を可能とする、マルチエージェント技術に基づくセンサシステム基盤技術を研究開発する。本研究では、エージェントシステムに参加できないセンサノードの近傍に存在するノードが、他のノードと協調してセンサノードのエージェント処理を補完する機能を構築する。

3. 研究の方法

本申請研究では、センサノードの近傍に存在するノードが、センサノードのエージェント処理を補完する機能を構築する。具体的には、既存のエージェントシステムと連携して処理を補完するエージェント処理補完機能を開発する。この機能に関しては、2点の開発項目がある。また、この機能の評価のためのプロトタイプシステム・シミュレーション環境も合わせて開発する。本申請研究の評価軸は、センサノードやネットワークにかかる負荷の軽減の度合い、ネットワークなどの環境変化への耐性、サービスからの多様なデータ要求に対する対応可能性などである。

- (1) センサノードとエージェントシステムのブリッジング機能の開発：システム全体でエージェントシステムに基づき環境に適応したサービスを提供するためには、別のサービスと強く結びついているセンサノードや、性能面の制約からエージェントシステムと連携できないセンサノードからのデータを解析し、エージェントシステムに必要な情報を推測する必要がある。例えば、データの受信間隔に基づくネットワーク環境の推測などがこれに該当する。
- (2) ノード間協調機能の開発：システム全体で環境に適応した処理を行うためには、複数のノード間での協調動作が必要となる。ここでは、複数のセンサノードが協調動作する際の交渉プロトコル、環境変化を検知した場合の再交渉プロトコル、データ処理場所を移動する場合の処理プロトコルなどを作成し、それに基づく交渉により協調を実現する。
- (3) プロトタイプシステム・シミュレーション環境の構築：(1)(2)の評価用プロトタイプシステムを構築し、提案手法を評価する。また、センサノード数やそこから取得されるデータ量が膨大になった場合の提案手法の効果を評価するために、シミュレーション環境を構築し、評価を行う。

4. 研究成果

(1) 提案手法

本申請研究では、センサシステムを構成するサーバや配置可能なノードにモバイルエージェントを配置し、マルチエージェントシステムとして動作させることにより、サービスや取得するデータ、必要なデータ処理の内容、端末やネットワークの環境に応じてデータ処理内容・処理場所を自律的に選択する手法を提案した。提案手法では、データ処理やサービス提供を司るそれぞ

れのエージェントが協調動作することにより、環境変化に対応する。例えば、サービス提供中にデータ処理を行っているノードの負荷が上昇した場合にデータ処理場所を変更する、ネットワークに負荷がかかった場合に処理場所を変更することによってその部分のデータ量を減少させる、あるノードの電力残量が低下した場合にデータ処理内容やデータ処理場所を変更することによって負荷を減少させるというような動作を実現する。また、エージェントシステムと連携できないセンサノードからのデータについては、データの形式、データの受信間隔、データを要求したサービスの種類からデータの属性を推測しエージェントシステムに組み込む。提案手法では以下の3種類のエージェントを用いる。

①**Manager agent**: 各サーバや配置可能なセンサノードに1エージェントずつ存在し、その端末のリソース情報や端末上で活動している他のエージェントの情報を保持する。リソース情報としては、端末において取得可能なデータの種類、端末において使用可能なリソース量の情報を保持する。また、各端末の特性に関する情報があればその情報も保持する。エージェントシステムと連携できないセンサノードとの連携に必要な情報の推論および保持も担当する。

②**SP agent**: 利用者にサービスを提供するためのエージェントであり、外部サーバに存在する。**SP agent**はサービスごとに存在し、各サービスを提供するために必要な情報やその情報を得るために必要なデータ、データ処理のために必要なリソースをエージェント知識として保持している。例えば、見守りサービスを提供する**SP agent**は、対象者の動作や対象者の位置などの情報を必要とし、その情報を得るために必要なデータは加速度データなどであることや、データ処理に必要なリソース量をエージェント知識として保持している。そして、**SP agent**はそれらの情報を他のエージェントから受け取り、それらを使用して利用者にサービスを提供する。また、**SP agent**はセンサシステムにおけるデータ処理場所を決定する役割を持つ。このため、即応性などのサービス提供時に考慮すべき特性がある場合は、その情報も保持する。

③**DP agent**: データを処理して必要な情報を抽出するエージェントであり、外部サーバ、ローカルサーバ、センサノードに存在し、端末間を移動する。**DP agent**は処理対象のデータの種類や処理手法ごとに異なるエージェントが存在する。例えば、3軸加速度データから **Support Vector Machine** を用いて対象者の動作を推定する **DP agent** などが存在する。提案手法のエージェント組織構成を図2に示す。

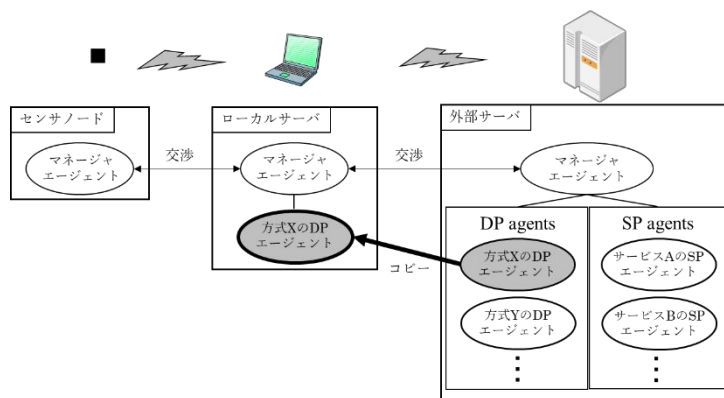


図2 サービス提供前のエージェント構成

各ノードやネットワークの環境に変化が生じた場合、提案手法ではエージェント組織を再構成することにより環境の変化に対応する。エージェント組織構成フェーズでは図3に示す①～③の動作が行われる。

①**SP agent**はサービス要求を受け取ると、**Manager agent**を通じてローカルサーバ群の**Manager agent**に対して**Contract net protocol (CNP)**[1]を用いて情報提供を依頼する。例えば観測対象者の動作の情報が必要な場合には、動作の情報そのものやその情報を得るために必要な加速度データを依頼する。**CNP**は、エージェントシステムにおけるタスク分割のプロトコルであり、依頼側エージェントのタスク提示に対し、そのタスクを実行可能なエージェントが入札を行い、その入札を比較することによりタスクを依頼するエージェントが決定される。依頼を受信した各ローカルサーバの**Manager agent**は、通信可能なセンサノードの**Manager agent**に依頼を転送する。

②依頼を受信したセンサノードの**Manager agent**は、必要な情報やデータに対応可能であれば入札を返信する。このとき、自身のスペック情報をあわせて送信する。ローカルサーバの**Manager agent**も同様に、通信可能なセンサノードを用いて情報を提供可能であれば、自身のスペック情報を付加した上で外部サーバに対して入札を送信する。

③入札を受信した外部サーバの**Manager agent**は、**CNP**を依頼した**SP agent**にすべての入札

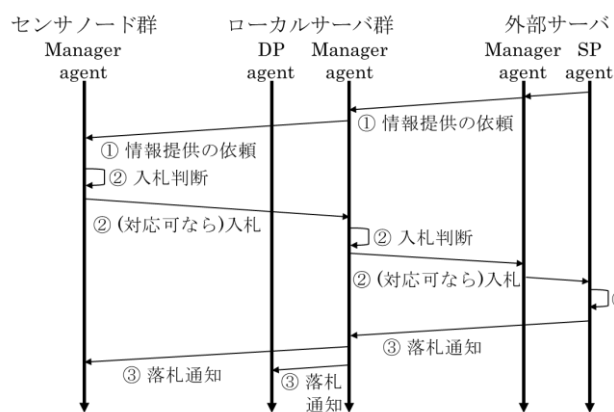


図3 エージェント組織構成フェーズの処理の流れ

を送信する。SP agent は入札から得られる情報に基づきサービスを構成するローカルサーバやセンサノードの組織を決定する。そして、そのローカルサーバに対して落札を通知する。このとき、データ処理をローカルサーバやセンサノードに行わせる場合にはその指示も合わせて通知する。また後述するサービス再構成のための再構成のトリガとなる環境変化の基準を同時に通知する。例えば、ノードの電力残量が一定値以下となった場合などが基準となる。ローカルサーバは、受信した落札通知をセンサノードに転送する。

以上の手順でサービス提供のためのエージェント組織が構成され、サービスの提供が開始される。サービス提供中、センサノードはデータを取得し、ローカルサーバにそのデータを送信する。ローカルサーバは、受信したデータを外部サーバに送信する。このとき、データ処理を指示されているローカルサーバやセンサノードは、受信したデータを処理した上で、その結果を送信する。

各ノードやネットワークの環境に変化が生じ、エージェント組織を再構成する場合は以下の動作が行われる。

①サービス提供中に環境が変化し、エージェント組織構成フェーズで通知された基準が満たされた場合、ローカルサーバやセンサノードは、外部サーバに向けて環境変化を通知する。

②環境変化の通知を受けた外部サーバの SP agent は、エージェント組織構成フェーズと同様の処理で新たなエージェント組織を構成し、この組織によりサービスを提供する。

エージェント組織構成、再構成において、サービスを構成するローカルサーバやセンサノード、およびセンサデータの処理場所を決定するための評価方式については、(E1)センサデータ処理に必要なリソース量、(E2)各端末の電力残量、(E3)各端末の使用可能なリソース量、(E4)ローカルサーバと外部サーバ間のネットワーク環境、(E5)ローカルサーバとセンサノード間のネットワーク構成の 5 要素を考慮する。SP agent は自身のサービスの(E1)を把握している。また、エージェント組織構成フェーズにおける入札から、SP agent は各ローカルサーバやセンサノードの(E2),(E3),(E5)を取得することができる。また、(E4)は CNP の通信から把握する。これらの要素から、SP agent は、まずサービスを構成するローカルサーバとセンサノードを決定する。複数の入札があった場合、SP agent はそれぞれの入札について、(E1)の各要素の値 r_i 、(E2),(E3),(E4)の各要素の値 e_i を用いて、以下の式で各要素の評価値 v_i を算出する。

$$v_i = e_i / r_i \quad \dots(i)$$

続いて、SP agent はサービスを構成するローカルサーバとセンサノードから、データ処理を行うノードを以下の手順で決定する。

①(E5)ローカルサーバとセンサノード間のネットワーク構成から、必要なデータが集約されるノードを判断し、そのノードより末端のノードを候補から除外する。

②候補として残ったノードに対して式(i)を適用し、 v_i の最小値が最大のノードをデータ処理ノードとする。

(2) 評価

本提案手法の評価のため、プロトタイプシステムを作成し実験を行った。実験環境を図 4 に示す。センサノードは自作のノードとスマートフォンの 2 種類を使用した。自作ノードでは、Kionix 社の 3 軸加速度センサ KXR94-2050 が搭載されたセンサモジュール、Zigbee 通信モジュールとして Digi International 社の XBee を用いた。スマートフォンはローカルサーバの機能を兼ねている。それ以外のローカルサーバ、外部サーバは一般的な PC を用いた。自作センサノードとローカルサーバ間の通信は Zigbee を用い、スマートフォンとそれ以外の PC はそれぞれ無線 LAN と有線 LAN で接続されている。スマートフォンのプログラムは Android SDK 16 で作成し、それ以外のローカルサーバ、外部サーバのプログラムは Java 1.7.0 を用いて作成した。エージェントプラットフォームとして、PIAX[2]を用いた。本プロトタイプシステムでは、(1)で述べたエージェントについて、動作推定結果を用いて見守りサービスを提供する SP agent を 1 種類、3 軸加速度データを処理して動作推定を行う DP agent を PC 用とスマートフォン用の 2 種類作成した。また、それぞれの端末に Manager agent を配置した。本プロトタイプシステムでは、Manager agent に他の端末の Manager agent のアドレスおよび自端末のリソース量をあらかじめ与える。本プロトタイプシステムにおいて考慮するリソースは、CPU 使用率、記憶容量、電力残量とした。SP agent は(1)で述べたエージェント組織構成フェーズにおいて、文字列で記述される必要な情報・データの種類と上記 3 種類のリソースの要求値を通知する。ローカルサーバの Manager agent は、入札を行う場合、文字列で記述される提供可能な情報・データの種類と上記 3 種類の

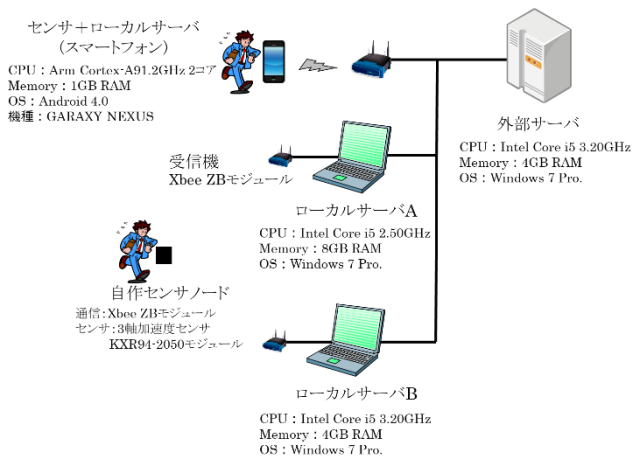


図 4 実験環境

リソースの値を外部サーバの **Manager agent** に送信する。また、環境変化の基準も同様に各リソースの数値を落札したローカルサーバの **Manager agent** に通知する。この実験では、データ処理を行っているローカルサーバにおいてサービス以外の処理が発生し、CPU 使用率が上昇する環境変化が発生した場合の提案手法の効果を検証した。実験に使用した機器は、図 4 の外部サーバとローカルサーバ B である。この実験では、外部サーバのリソース値を低く設定し、初期のデータ処理場所がローカルサーバ B となるようにした。加速度データの取得間隔および送信間隔は 100msec とし、動作推定は 3000msec ごとに行う。プロトタイプシステムは以下のよう動作する。

- ①外部サーバの **SP agent** は観測対象者の動作情報または 3 軸加速度データを要求する。必要なリソース量はローカルサーバ B が提供できる値とする。
- ②データを提供可能なローカルサーバ B のみが入札を行う。
- ③**SP agent** はデータ処理場所を決定するため、ローカルサーバ B と自身を提案手法の式(i)を用いて比較する。この実験ではいずれの要素の評価値もローカルサーバ B が高いため、データ処理場所はローカルサーバ B となる。この結果に基づき **SP agent** はデータ処理をローカルサーバ B に割り当てる。
- ④サービス中に CPU 負荷の上昇を検知したローカルサーバ B は環境変化を **SP agent** に通知する。
- ⑤**SP agent** はエージェント組織再構成で再び動作情報または 3 軸加速度データを要求する。
- ⑥ローカルサーバ B が入札を行い、CPU 負荷の値によって式(i)の値が変化し、外部サーバにデータ処理が割り当てられる。

実験結果からは、CPU 使用率の上昇により環境の変化が検知され、エージェント組織再構成により CPU 使用率の高いローカルサーバ B から外部サーバにデータ処理場所が移された。すなわち、システムは使用可能なリソース量の変化という環境の変化に対し自律的に対応し、高負荷となった端末の負荷を下げるできている。同様に、サービス提供中に端末の電力残量が低下した場合やセンサノードが移動した場合の実験を実施し、エージェント組織再構成によりシステムが環境の変化に自律的に対応することを確認した。これらの実験結果から、提案手法によりシステムがセンサノードの構成の変化、端末において使用可能なリソース量の変化、電力残量の変化といった環境の変化を検知し、エージェント組織再構成が行われていることが読み取れる。この再構成の結果、データ処理場所が変更され、サービスの継続や負荷の軽減、電力消費の軽減が実現されている。

また、一般的な単身者用の住居に複数種のセンサノードを設置し、携帯型端末、PC やネットワークを用い、機械学習により様々なサービスに応用可能である利用者の生活行動を推定するプロトタイプシステムを構築した。このシステムを用いた実験において、エージェント間の連携により、既存のセンサノード群を用いた手法を同程度の推定精度を維持しつつ、環境に応じてデータの取得頻度や送信の頻度、行動推定の頻度を変更することによる省電力化が可能であるという結果が得られた。また、特定のノードに突発的に大きな負荷が発生した場合には、データ処理場所を変更することによってノードの負荷や消費電力を低減させ、変化に対応することができおり、本基盤技術のセンサノードとエージェントシステムのブリッジング機能および複数センサノードの連携機能により、センサノードやネットワークにかかる負荷の軽減やその変化への耐性の向上、観測対象の状況に基づくシステムの動作の調整など、環境に適応した動作が可能となることが示された。

(3) まとめ

研究期間全体を通して、サービスやデータ、デバイスなどの環境に適応した動作を可能とする、マルチエージェント技術に基づくセンサシステム基盤技術の研究開発を実施した。本研究では、エージェントシステムに参加できないセンサノードが存在した場合でも、近傍に存在するノードがエージェント処理を補完することが可能となった。この技術により、システムは特定のノードに突発的に大きな負荷が発生した場合や特定のノードの電力残量が低下した場合などの環境の変化を検知し、自律的にデータ処理場所の変更やノードの動作の調整を行うことによりノードの負荷や消費電力を低減させることなどが可能となり、環境への適応が実現された。

現在、大量のセンサデータを扱うサービスでは、特定のサーバにデータを全て集めた上で処理を行うものが多い。また、センサノードの近傍で処理を行う手法が提唱されているが、利点と欠点がある。この問題に対して、本申請研究で開発したセンサシステム基盤技術により、サービスやデータ、デバイスなどの環境に適応した動作が可能となる。今後、さらに大量のセンサデータが獲得可能となり、そのデータを利用した様々なサービスの展開が予想され、センサシステムは社会にとって欠かせないインフラの一部となると考えられる。本申請研究の成果は、このようなセンサシステムの発展に貢献することが予想される。

今後の研究課題としては、特に提供するサービス、扱うデータの内容、必要とされるセキュリティのレベル、他組織とのデータ連携などの定量的に表現することの困難な要素を考慮する必要のある環境へのシステムの適応などが挙げられる。

参考文献

- [1] R. Smith, "The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a

Distributed Problem Solver”, IEEE Transaction of Computers, vol. C-29, no. 12, pp. 1104–1113, 1980.

- [2] Y. Teranishi, “PIAX: Toward a Framework for Sensor Overlay Network”, Proceedings of the Sixth IEEE Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, pp. 1-5, 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 5 件）

- ① Shintaro Imai, Yusuke Kishikawa, Yoshikazu Arai, Toshimitsu Inomata, Prototype of Indoor Activity Estimation System with Low Load, Proc. of 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 査読有, Vol. 1, pp. 204-207, 2018
DOI: 10.1109/GCCE.2018.8574774
- ② Shintaro Imai, Haruka Shimizu, Bingxi Zhao, Yoshikazu Arai, Toshimitsu Inomata, Development of a Node Cooperation Method for Location Change of Sensor Data Processing, Int. J. of Energy, Information and Communications, 査読有, Vol. 8, pp. 15-28, 2017
DOI: 10.14257/ijeic.2017.8.1.02

〔学会発表〕（計 4 件）

- ① Shintaro Imai, Prototype of Indoor Activity Estimation System with Low Load, 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2018.

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。