

マルチエージェントによる 自律分散協調M2Mシステムの提案

北上真二^{†1} 宮西洋太郎^{†2} 浦野義頼^{†1} 白鳥則郎^{†1}

人手を介さずにセンサや機器をインターネットに接続し、様々なサービスを提供する M2M(Machine-to-Machine)システムは、クラウド上のサーバがセンサや機器からデータを収集し、その分析結果によってフィードバック制御を行うサーバ集中型システムとして構築されるのが一般的である。しかしながら、大規模な M2M システムにおいては、データの蓄積コストやネットワーク負荷の増大および機器に対するフィードバック制御の遅延などの問題が指摘されている。また、複数のアプリケーションでセンサや機器を共用した場合に、データ収集とフィードバック制御のサービス競合が発生する。本稿では、これらの問題を解決するための自律分散協調 M2M システムを提案する。提案システムは、データ収集、データ蓄積およびフィードバック制御などの M2M システムの共通機能をエージェントとして定義し、M2M サーバと M2M ゲートウェイなどの M2M システムの構成要素に分散配置する。そして、アプリケーション要件や M2M システムの構成要素へのリソース配分に従って、これらのエージェントを協調連携させることで、データ蓄積コストやネットワーク負荷を軽減させる。また、複数のアプリケーションによるサービス競合が発生する場合は、自律的にサービス統合を行うことにより、その影響を最小化する。本研究では、提案システムのプロトタイプ実装を行い、エネルギー管理サービスへの適用性についての評価と考察を行った。

Proposal of Multiagent-based Autonomous Distributed Cooperative M2M System

SHINJI KITAGAMI^{†1} YOHTARO MIYANISHI^{†2}
YOSHIYORI URANO^{†1} NORIO SHIRATORI^{†1}

In general, M2M systems have been built as a server-centric system in which an M2M server collects data from sensors, and controls devices remotely based on analysis results of the collected data. However, in the large M2M system, some problems such as increase in storage cost of collected data and delay of feedback control are pointed out. Also, in case of sharing the sensor and the device among multiple applications, the service conflict occurs in the data collection and in the feedback control. In this paper, in order to solve the problems of server-centric M2M system, we propose an autonomous distributed cooperative M2M system. Proposed system defines agents of common functions such as data collection, data accumulation and feedback control, and deploys the agents to components of the M2M system including M2M servers and M2M gateways. According to the application requirements and the computing resources of the components of the M2M system, the agents cooperate with each other to optimize the system and minimize influences of service conflict. In this study, we discussed the applicability of the proposed system to the energy management service.

1. はじめに

近年、人手を介さずに、センサや機器をインターネットに直接接続し、様々なサービスを提供する M2M システム (Machine-to-Machine System) が注目を集めている [1][2]。M2M システムの応用は、産業分野、家庭分野および社会分野の広範囲に渡る。産業分野では、リモートメンテナンスやサプライチェーン・マネジメントの高度化が期待される [3]。また、社会・家庭分野では、エネルギー管理やヘルスケアなどへの適用が進んでいる [4]。その他に、M2M システムは、交通渋滞緩和や犯罪防止への効果が期待されている [5]。これらの M2M システムは、アプリケーションごとにサーバ集中型のシステムとして構築されるのが一般的である。すなわち、一般的な M2M システムでは、クラウド上のサーバがセンサや機器からデータを収集し、そのデ

ータを可視化したり、その分析結果に従って機器にフィードバック制御を行ったりする [6][7]。しかしながら、このサーバ集中型の M2M システムを、接続するセンサや機器の台数が多い大規模なシステムに適用すると、M2M サーバのデータ蓄積コストやネットワーク負荷が増大すると共に、機器に対するフィードバック制御の遅延が発生するという問題が指摘されている [8][9]。また、複数のアプリケーションでセンサや機器を共用した場合に、データ収集とフィードバック制御のサービス競合が発生する [10][11]。

筆者らは、これらの問題を解決するための分散協調 M2M アーキテクチャを提案し、具体的なアプリケーションとして洪水防災システムへの適用についての研究を進めてきた [12][13][14]。本稿では、この研究を更に発展させて、マルチエージェントによる自律分散協調 M2M システムを提案する。提案方式は、データ収集、データ蓄積、フィードバック制御などの M2M システムの共通機能をエージェントとして定義し、M2M サーバや M2M ゲートウェイなどの

^{†1} 早稲田大学
WASEDA University
^{†2} (株)アイエスイエム
ISEM, Inc.

M2M システムの構成要素に分散配置する。そして、アプリケーションごとのシステム要件や M2M システムの構成要素へのリソース配分に応じて、これらのエージェントを協調連携させることにより、データ蓄積コストやネットワーク負荷を軽減させる。さらに、複数のアプリケーションによるサービス競合が発生する場合は、エージェントがデータ収集やフィードバック制御に関わるサービスを自律的に統合することにより、その影響を最小化する。

本研究では、提案システムのプロトタイプ実装を行い、エネルギー管理サービスへの適用性について考察した。

2. サーバ集中型 M2M システム

これまで、M2M システムはアプリケーションごとに構築されてきたが、その構築コストと運用コストの削減および複数のアプリケーションによる収集データの利活用を目的とする M2M サービスプラットフォームの必要性が提唱されている[2]。M2M サービスプラットフォームは、様々なアプリケーションに対してデータ収集、データ蓄積およびフィードバック制御などの共通機能を提供する。M2M サービスプラットフォームの一般的な構成を図1に示す。図において、アプリケーションと M2M サービスプラットフォームを広義の M2M サーバと捉えれば、この M2M システムはサーバ集中型のアーキテクチャといえる。すなわち、M2M サーバは、センサや機器のデータを収集し、それを可視化すると共に、その分析結果に基づいて機器を遠隔制御する。ここで、M2M ゲートウェイは、プロトコル変換とデータ交換の役割を担う[7]。

サーバ集中型の M2M システムでは、M2M サーバと M2M ゲートウェイ間で、常にデータ収集やフィードバック制御のための通信が発生する。このため、センサや機器の接続台数が多い大規模な M2M システムにおいては、サーバ側のネットワーク負荷が増大し、機器に対するフィードバック制御が遅延するという問題がある [11]。また、収集したデータをすべて M2M サーバに蓄積する必要があるため、そのデータ蓄積コストの増大が問題となる[9]。さらに、複数のアプリケーションが同一のセンサからデータを収集したり、同一の機器に対してフィードバック制御を行ったりすると、センサや機器を接続するためのセンサネットワークの負荷が増大し、データ収集に支障をきたしたり、期待するサービスが提供できなくなったりする[10][15]。本稿では、これらの状況を、M2M システムのデータ収集とフィードバック制御におけるサービス競合と定義する。

これらの問題を解決するためには、M2M システムの機能をすべてクラウドの M2M サーバ上に実装するのではなく、分散配置された M2M ゲートウェイに機能をオフロードすることが有効である[16]。また、2014年10月に開催された Internet of Things World Forum 2014 において提案された IoT Reference Model[17]においても、M2M ゲートウェイ

におけるエッジコンピューティングの重要性が指摘されている。筆者らも、M2M ゲートウェイに M2M システムの機能を効率よく分散するために、イベント駆動データ収集方式とルールベース自律制御方式による分散協調 M2M システムについての研究を進めてきた[12]。

しかしながら、M2M システムにおける機能分散は、M2M サーバや M2M ゲートウェイなどの M2M システムの構成要素のコンピューティング・リソースを考慮する必要がある。たとえば、十分なコンピューティング・リソースを有する M2M ゲートウェイが利用できる場合は、M2M ゲートウェイに収集データの集約機能を搭載することができる。しかしながら、M2M ゲートウェイに十分なコンピューティング・リソースがない場合は、M2M ゲートウェイにはプロトコル変換機能のみを搭載し、収集データの集約は、M2M サーバで行う必要がある。また、M2M 機器に対するフィードバック制御が、そのトリガとなるデータを収集するセンサと同じエリアに限定される場合は、M2M サーバがデータ収集する必要はなく、M2M ゲートウェイのみで、データ収集、データ分析およびフィードバック制御の一連の処理を行う方が効率的である。しかし、M2M ゲートウェイに十分なコンピューティング・リソースがない場合は、非効率ではあるが M2M サーバを経由させる必要がある。

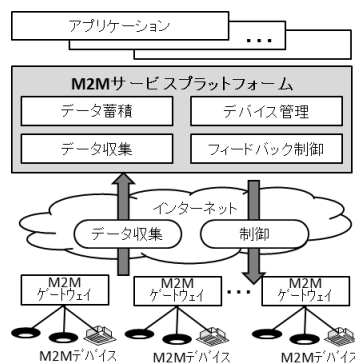


図1 M2M サービスプラットフォーム
 Figure 1 M2M Service Platform

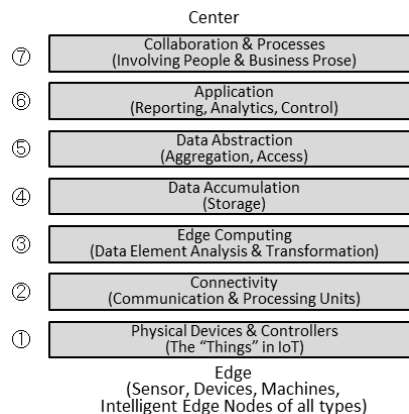


図2 IoT Reference Model [17]
 Figure 2 IoT Reference Model [17]

このように、M2M システムにおける機能分散は、M2M システムの構成要素のコンピューティング・リソースや各アプリケーションのシステム要件に依存し、画一的に決定することができない。

3. 自律分散協調 M2M システム

本稿では、第 2 章で述べた M2M システムの機能分散に関わる問題を解決するための自律分散協調 M2M システムを提案する。提案システムは、データ収集、データ蓄積およびフィードバック制御などの M2M システムの共通機能をエージェントとして定義する。そして、アプリケーションのシステム要件や M2M システムの各構成要素のコンピューティング・リソースの配分に応じて、それらのエージェントを各構成要素に分散配置して協調制御させる。これにより、システム全体でデータ蓄積コストやネットワーク負荷を軽減することが可能となる。また、複数のアプリケーション間でサービス競合が発生する場合は、エージェントがデータ収集やフィードバック制御に関わるサービスを統合することにより、その影響を最小化する。

3.1 全体構成

提案システムの全体構成を図 3 に示す。提案システムは、M2M システムの共通機能であるデータ収集、データ蓄積、イベント配信およびフィードバック制御を実行する M2M サービスエージェント(MSA)、ネットワーク抽象化レイヤ(NAL)およびサービス抽象化レイヤ(SAL)から構成される。MSA は、NAL を介して、センサからデータを収集し、アクチュエータに対して制御を行うと共に、エージェント間でデータ交換を行う。また、アプリケーションは、SAL を介して、収集したデータを取得したり、イベント通知を送受信したりする。

M2M コーディネートサーバ(MCS)は、各エージェントを M2M システムの構成要素に配布すると共に、アプリケーションからの要求に応じて、各エージェントの実行パラメータを配布したり更新したりする。

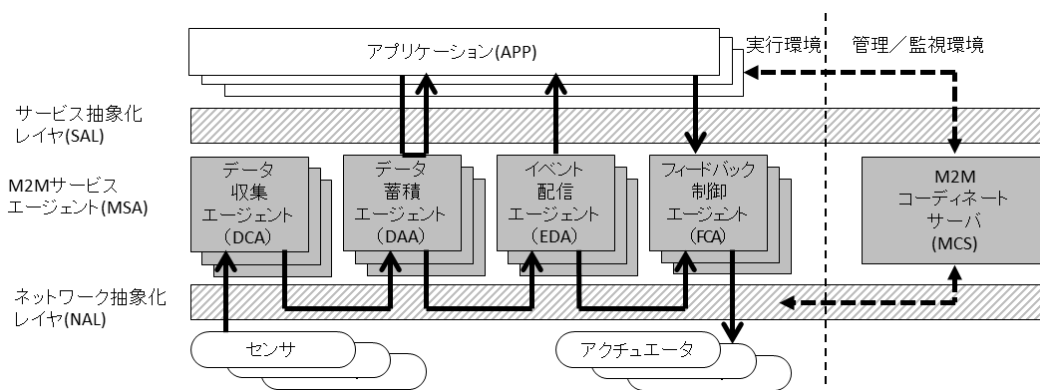


図 3 自律分散協調 M2M システム

Figure 3 Autonomous Distributed Cooperation M2M System

3.2 M2M サービスエージェント

3.2.1 データ収集エージェント(DCA)

データ収集エージェント(DCA)の構成を図 4 に示す。DCA は、データ収集パラメータの内容に従って、複数のセンサからデータを収集し、複数の異なるデータ蓄積エージェント(DAA)に収集データを送信する。データ収集パラメータには、センサのアドレス、DAA のアドレス、データ集約方法および収集間隔などを記述する。データ集約方法としては、区間平均や最大値などの一般的なものの他に、アプリケーションの要求に合わせて、閾値、変化率および外れ値などによるフィルタリングを行うことができる[12]。

複数のデータ収集パラメータに、同一のセンサが収集元として定義されている場合は、1 台のセンサから同時にデータ収集することになり、センサネットワークの負荷が増大する(図 5 左)。そのような状況が発生する場合は、データ収集パラメータを集約し、センサからはもっとも粒度の細かいデータのみを収集する(図 5 右)。DCA は、収集したデータを必要とする粒度に変換して、それぞれの DAA に送信する。これにより、データ収集のサービス競合の影響を最小限に抑えることができる。

3.2.2 データ蓄積エージェント(DAA)

データ蓄積エージェント(DAA)の構成を図 6 に示す。DAA は、複数の DCA から受信したデータを蓄積する。蓄積されたデータは、任意のアプリケーションがサービス抽象化レイヤ(SAL)を経由して、任意の期間、集約方法および各種のフィルタリング条件で取得することができる。また、データ蓄積パラメータに記述された条件に従って、イベント配信エージェント(EDA)にイベント情報を送信する。データ収集パラメータには、EDA のアドレス、データ項目ごとの蓄積期間およびイベント発生条件などを記述する。

3.2.3 イベント配信エージェント(EDA)

イベント配信エージェント(EDA)の構成を図 7 に示す。EDA は、イベント配信パラメータの内容に従って、複数の DAA から受信したイベント情報を複数のフィードバック制御エージェント(FBA)に配信する。また、事前にアプリ

ケーションから要求があった場合は、該当のイベント情報をアプリケーションにも配信する。イベント配信パラメータには、FCA のアドレスやイベント配信条件（時間帯など）などを記述する。

3.2.4 フィードバック制御エージェント(FCA)

フィードバック制御エージェント(FCA)の構成を図 8 に示す。FCA は、複数の EDA とアプリケーションからのイベントをトリガとして、フィードバック制御パラメータに記述された制御ルールに従って、アクチュエータに制御のためのデータを送信する[12]。フィードバック制御パラメータの制御ルールには、トリガとするイベント、トリガに対応するアクション内容および制御ルールの優先度・有効期間などを記述する。

ここで、複数の制御ルールに、同一のアクチュエータが指定されている場合は、フィードバック制御のサービス競合が発生する可能性がある(図 9 左)。そのような状況が発生する場合は、それぞれの制御ルールを集約し、制御ルールの優先度や有効期間を基に、アクチュエータに対する制御をシリアライズ化したり排他制御を行ったりする(図 9 右)。これにより、フィードバック制御のサービス競合の影響を最小化する。

3.3 ネットワーク抽象化レイヤ(NAL)

M2M サービスエージェント(MSA)は、同一の M2M ゲートウェイ内で連携したり、M2M サーバと M2M ゲートウェイに分かれて連携したりする。そのため、提案システムでは、MSA 間の通信は、すべてネットワーク抽象化レイヤ(NAL)を経由させる。NAL は、センサやアクチュエータと M2M ゲートウェイ間、M2M ゲートウェイと M2M サーバ間、M2M ゲートウェイ間および M2M サーバ間の通信を抽象化する。たとえば、センサと M2M ゲートウェイ間では、ZigBee や 6LoWPAN/coAP などのセンサネットワークのプロトコルが選択される。また、途中でルータやプロキシサーバが存在する M2M アクセスネットワークでは、ロングポーリング、WebSocket および MQTT(MQ Telemetry Transport)などのプロトコルが選択される。これにより、MSA を M2M システム内のあらゆる構成要素上で動作させて、それぞれを自由に連携させることが可能となる。

3.4 サービス抽象化レイヤ(SAL)

サービス抽象化レイヤ(SAL)は、ネットワーク抽象化レイヤ(NAL)を内包し、様々なアプリケーションが M2M サービスエージェント(MSA)にアクセスするためのインターフェースを提供する。すなわち、データ蓄積エージェント(DAA)から収集データを取得したり、フィードバック制御エージェント(FCA)にイベント条件を送信したりするために、リクエスト/レスポンス型のインターフェースを提供する。また、イベント配信エージェント(EDA)からイベント情報を取得するために、サブライブ/パブリッシュ型のインターフェースを提供する。

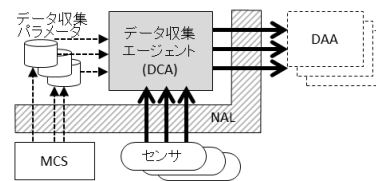


図 4 データ収集エージェント
 Figure 4 Data Collect Agent

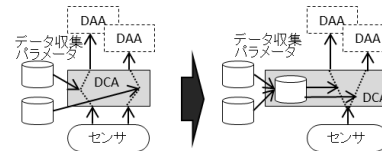


図 5 データ収集の統合
 Figure 5 Fusion of Data Collection

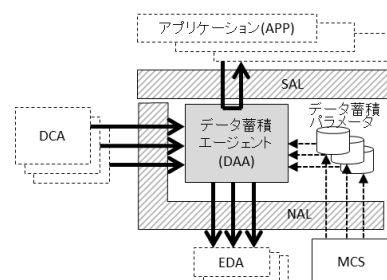


図 6 データ蓄積エージェント
 Figure 6 Data Accumulate Agent

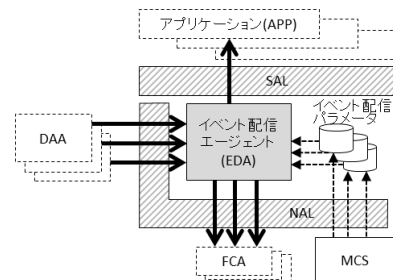


図 7 イベント配信エージェント
 Figure 7 Event Delivery Agent

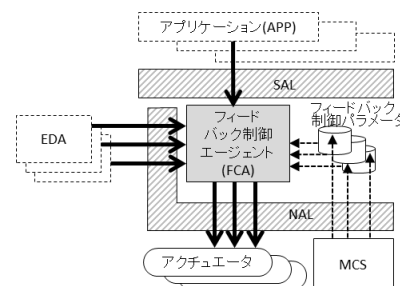


図 8 フィードバック制御エージェント
 Figure 8 Feedback Control Agent

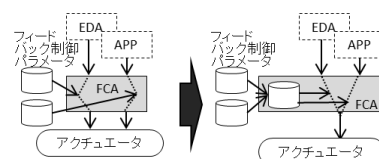


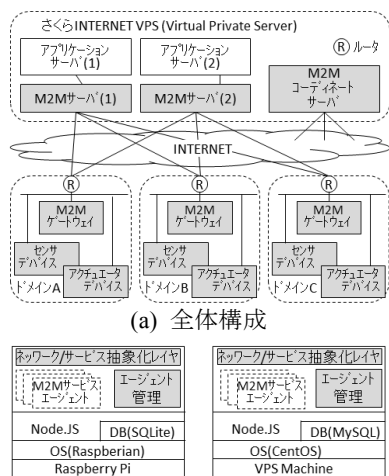
図 9 フィードバック制御の統合
 Figure 9 Fusion of Feedback Control

3.5 M2M コーディネートサーバ(MCS)

M2M コーディネートサーバ(MCS)は、M2M サービスエージェント(MSA)を、M2M サーバやM2M ゲートウェイなどのM2M システムの構成要素に配布すると共に、アプリケーションからの要求に従って、それぞれのエージェントのパラメータファイルを配信したり更新したりする。また、それぞれのエージェントを連携させるためのルーティング情報を管理し、ネットワーク抽象化レイヤ(NAL)による通信ルーティングを制御する。

4. 実装

第3章で提案した自律分散協調M2Mシステムのプロトタイプシステムの構成を図10に示す。プロトタイプシステムでは、M2M サービスエージェント(MSA)の実行環境として、JavaScriptのサーバサイド実行環境のNode.jsを採用した。Node.jsはクロスプラットフォーム対応であるため、JavaScriptで記述したMSAを様々なM2MサーバやM2Mゲートウェイで動作させることができる。M2MゲートウェイのプラットフォームはRaspberry Piを利用し、M2Mサーバ、M2M コーディネートサーバおよびアプリケーションサーバは、商用サービスのさくらINTERNET VPS(Virtual Private Server)上に実装した。また、データ蓄積エージェント(DAA)で利用するデータベースについては、M2MゲートウェイでSQLiteとM2MサーバでMySQLを用いた。ネットワーク・プロトコルとしては、各ドメイン内のM2Mエリアネットワーク内はHTTPとし、M2MゲートウェイとM2Mサーバ間のM2MアクセスネットワークではMQTTを採用した。なお、図10のエージェント管理は、M2Mコーディネートサーバ(MCS)から送信されたMSAを実行したり、そのパラメータファイルを受信したりするための管理プログラムである。



(a) 全体構成 (b) M2M ゲートウェイ (c) M2M サーバ
 図10 プロトタイプシステムの構成
 Figure 10 Configuration of Prototype System

5. 評価と考察

本章では、提案システムをエネルギー管理サービスに適用した場合の有用性について評価と考察を行う。

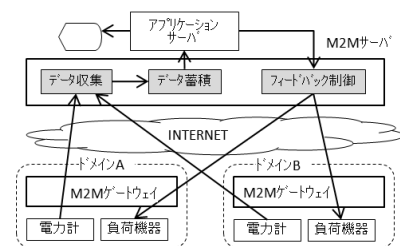
5.1 エネルギー管理サービスへの適用評価

本提案システムの適用評価を行うエネルギー管理サービスは、次の機能を有するものとした。

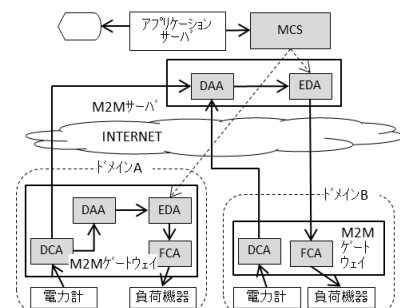
- 家庭やビルなどのドメインごとに消費電力量を計測する。
- 全ドメインの消費電力量の時間当りの合計が、閾値を超える場合は、それぞれのドメインの負荷機器(空調機など)の動作を制御して、システム全体の消費電力量の上昇を抑止する。
- ドメインごとの消費電力量の変化を集中的に可視化することにより、サービス全体の状況を監視する。

サーバ集中型M2Mシステムによるエネルギー管理サービスの構成を図11(a)に示す。図に示すように、サーバ集中型のエネルギー管理システムでは、M2Mサーバが各ドメインの消費電力量のデータを収集し蓄積する。アプリケーションは、蓄積されたデータを集計し、それが閾値を超える場合は、それぞれの負荷機器を遠隔制御する。

自律分散協調M2Mシステムによるエネルギー管理サービスの構成を図11(b)に示す。ここで、ドメインAのM2Mゲートウェイには十分なコンピューティング・リソースがあるものとする。図に示すように、ドメインAのM2Mゲートウェイには、そのドメイン内の負荷機器の制御に関わるデータ収集、データ蓄積、イベント配布およびフィード



(a) サーバ集中型システムによる構成



(b) 自律分散協調M2Mシステムによる構成

図11 エネルギー管理サービスへの適用
 Figure 11 Application into Energy Management Service

バック制御のエージェントを配置する。また、そのドメインの消費電力量の閾値に関する情報は、M2M コーディネートサーバが配信するイベント配信パラメータに含めるものとした。

5.2 提案システムの有用性についての考察

図 11(b)において、ドメイン A の M2M ゲートウェイのデータ収集はフィードバック制御を目的とするが、M2M サーバがドメイン A から収集するデータは可視化のみを目的とする。そのため、M2M サーバはドメイン A から低頻度（たとえば、1 時間単位など）でデータ収集を行えばよい。また、そのデータも粗粒度（たとえば、1 時間単位の合計値など）でよい。これにより、M2M サーバ側のネットワーク負荷を軽減させることができると共に、M2M サーバにおけるデータ蓄積コストを削減することができる。また、ドメイン A の消費電力量の抑止を目的とする負荷機器の制御は、M2M サーバとの通信を必要としないため、ドメイン A の負荷機器の動作抑制の遅延を最小限に抑えることができる。

このように、自律分散協調 M2M システムを採用することにより、M2M サービスエージェント(MSA)を任意の場所で動作させることができるため、データ蓄積コストの最小化、ネットワーク負荷の軽減およびフィードバック制御遅延の最小化など、システム全体の最適化を実現することができる。

本研究では、MSA を M2M サーバや M2M ゲートウェイに静的に配置するものとした。しかしながら、アプリケーションの要件や M2M ゲートウェイのコンピューティング・リソースは、その時々で変化するものと考えられる。そのため、M2M システムの構成要素で動作するエージェントの稼働状況を監視し、サービスを停止させることなくエージェントを最適配置させることが必要となる。

6. 関連研究

上野らは[8]、M2M システムのリソースの消費を抑えつつデータへのアクセスにかかる応答時間の短縮を可能とするデータ最適配備方式を提案しているが、そのデータを収集する方式については言及していない。また、福田ら[16]は、センサからのイベント収集処理を分散配備して通信トラフィックを削減する方式を提案しているが、複数の異なるアプリケーションが混在する環境を取り扱っていない。一方、高橋ら[15]は、複数の異なるアプリケーションでセンサデバイスを共有するためのセンサクラウド環境を提案しているが、サーバ集中型のアーキテクチャであり、その問題点を解決するための研究ではない。さらに、これらの提案は、いずれも M2M システムにおけるデータ収集と蓄積に関する問題を解決するための研究であるのに対して、筆者らによる研究は、データ収集や蓄積だけではなく、収集したデータを活用したフィードバック制御やイベント処

理を含めた M2M システム全体の最適化を目的としている。

7. おわりに

サーバ集中型 M2M システムの課題を解決するためのマルチエージェントによる自律協調分散 M2M システムを提案した。今後は、複数のアプリケーションが混在し、サービス競合が発生するサービスへの適用評価を進めると共に、動的なエージェント最適配置方式についての研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 猿渡俊介, 森川博之: モバイル時代のサービスを支える技術: 3.M2M の情報流, 情報処理, Vol.55, No.11, pp.1269-1274 (2014)
- 2) D.Boswarthick, O.lloumi, and O.Hersent: M2M Communications: A Systems Approach", Wiley, ISBN: 978-1119994756 (2012)
- 3) W.Amer, U.Ansari, A.Ghaffor: Industrial Automation using Embedded Systems and Machine-to-Machine, Ma-to-Machine (M2M) Connectivity for Improved Overall Equipment Effectiveness(OEE), Proc. of the 2009 IEE International Conference on System, Man, and Cybernetics (2009)
- 4) G Lopez: ENERSip: M2M-based platform to enable energy efficiency within energy-positive neighbourhoods, Proc. of Computer Communications Workshops, pp. 217-222 (2011)
- 5) N. Dlodlo, T. Olwal, and P. Mvelase: The Internet of Things in bridging the gap in municipal service delivery in South Africa, IST Africa 2012, Dar es Salaam, Tanzania, pp. 9-11 (2012)
- 6) 辻秀一, 澤本潤, 清尾克彦, 北上真二: M2M(Machine-to-Machine) 技術の動向", 電気学会論文誌 C, Vol.133, No.3, pp.520-531 (2013)
- 7) 藤田隆史, 後藤良則, 小池新: M2M アーキテクチャと技術課題, 電子情報通信学会誌 Vol.96, No 5, pp. 305-312 (2013)
- 8) 上野仁, 的場一峰, 阿比留健一: 複数 M2M システムのリアルタイムな連携を可能とする分散データ交換基盤, 電子情報通信学会技術研究報告, NS, Vol.111, No.468, pp.523-528 (2012)
- 9) 丸山宏: エッジ・ヘビー・データとそのアーキテクチャ, 情報管理, Vol.56, No.5, pp.269-275 (2013)
- 10) 北上真二, 釜坂等, 金子洋介, 小泉寿男: 利用権による機器遠隔サービスの競合回避方式と実装評価, 電気学会論文誌 C, Vol.132, No.1, pp.131-140 (2012)
- 11) 川村慎太郎, 水野修: M2M プラットフォーム実現のための機能連携サービスのモデル化, M2M プラットフォーム実現のための機能連携サービスのモデル化, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.114, No.163, pp.161-166 (2014)
- 12) 北上真二, 岡崎正一, 宮西洋太郎, 浦野義頼, 白鳥則郎: 分散協調 M2M システムアーキテクチャの提案, 情報処理学会第 76 回全国大会予稿集, 3D-4 (2014)
- 13) 北上真二, 宮西洋太郎, 浦野義頼, 白鳥則郎: 協調分散 M2M アーキテクチャに基づく洪水防災システムの提案, 2014 年電子情報通信学会ソサエティ大会予稿集, B-18-22 (2014)
- 14) S. Kitagami, Y. Miyanishi, Y. Urano, and N. Shiratori: Proposal of a Distributed Cooperative M2M System for Flood Disaster Prevention, Proc. of The 14th IEEE International Conference on Scalable Computing and Communications, ScalCom-102 (2014)
- 15) 高橋ひとみ, 串田高幸: センサクラウド: センサデバイスを IT 資源とする拡張クラウド環境, 情報処理論文誌, Vol.54 No.2, pp.672-687 (2013)
- 16) 福田茂紀, 福井誠之, 中川格, 佐々木和雄: "センサネットワークへのイベント処理の分散配置", 2011 年電子情報通信学会ソサエティ大会予稿集 BS-4-7 (2011)
- 17) B. McCarson, and M.Devine: Building the Internet of Things, The Internet of Things World Forum 2014, https://daue6ehqjssah.cloudfront.net/breakouts/2014/H-ARC-01_Cisco-Intel-IBM_FINAL.pdf