

自律分散協調 M2M システムのための ルールベース自律制御方式に関する研究

李 斌^{†1} 劉 江^{†1} 北上 眞二^{†1} 宮西 洋太郎^{†2} 浦野 義頼^{†1} 白鳥 則郎^{†1}

多数のセンサやアクチュエータを接続したサーバ集中型の M2M システムのフィードバック制御では、制御遅延および制御競合の課題がある。本稿では、これらの問題を解決するためのルールベース自律制御方式を提案する。提案方式は、トリガとアクションから構成される制御ルールに基づいて、M2M ゲートウェイが自律的にアクチュエータを制御することにより、制御遅延および制御競合を回避する。また、本方式を採用することにより、サーバを経由せずに M2M ゲートウェイ間を自律的に連携させることができる。本稿では、提案方式に基づく自律分散協調 M2M システムのプロトタイプを構築して、その動作検証を行うことにより、その有効性を示す。

Study of Rule-based Autonomous Control Method for M2M Gateway Collaboration

BIN LI^{†1} JIANG LIU^{†1} SHINJI KITAGAMI^{†1}
YOHTARO MIYANISHI^{†2} YOSHIYORI URANO^{†1} NORIO SHIRATORI^{†1}

The traditional feedback control method of server-centric M2M system, comprising a massive number of sensors and actuators, faces some issues on control delay and control conflict. In this paper, we propose a rule-based autonomous control method for solving these problems. The proposed method controls the actuator autonomously to avoid the control delay and control conflict based on the control rules composed of the triggers and actions. By employing this method, M2M gateways can be cooperated with each other autonomously, without the server controls. We build a prototype of autonomous distributed cooperative M2M system based on the proposed method. The result shows that the proposed method is effective and practical for the large-scale M2M systems.

1. はじめに

近年、インターネットとセンサのコスト削減により、M2M システム(Machine-to-Machine System)が様々な分野で活用されている[1][2]。M2M システムの適用分野としては、防災、家電、農業などが挙げられる。たとえば、被災地に災害探知センサを設置することにより、災害の状況を把握できる。家電と農業分野においても、機器やセンサを設置してデータを収集、分析し、遠隔操作を行うことにより、現地の情報を確認することができる。これらのシステムは、クラウド上のサーバが各機器やセンサからデータを収集し、サーバは収集したデータの結果に基づいて、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場合が多い[3]。サーバ集中型システムは、接続するセンサや機器の台数が増大すると、ネットワークやサーバの負荷が高まり、フィードバック制御が遅延するという課題がある[4]。また、一台の機器に対して複数のサーバがフィードバック制御を行うとサービス競合が生じる[5]。

筆者らは、これらの課題を解決するための自律分散協調 M2M システムについての研究を行っている[6][7]。自律分散協調 M2M システムは、インテリジェント M2M ゲート

ウェイと M2M コーディネートサーバから構成され、制御ルールによる自律制御方式とデータの収集粒度を自動調整するイベント駆動データ収集方式から構成される。本稿は、自律分散協調システムのためのルールベース自律制御方式を提案する。提案方式は、あらかじめインテリジェント M2M ゲートウェイに送信された制御ルールに従って自律的に制御を行う。制御ルールは、システム全体を統括するコーディネートサーバから、それぞれのインテリジェント M2M ゲートウェイに送信される。インテリジェント M2M ゲートウェイは操作対象の機器の近くに設置されているため、インターネット環境に頼らず迅速に制御処理を行うことができる。これにより、サーバの負荷を各ゲートウェイに分散させることが可能となり、従来のサーバ集中型 M2M システムに比べて、ネットワークとサーバの負荷を削減させることができる。また、インテリジェント M2M ゲートウェイが機器を制御するため、制御の遅延課題も解決できる。さらに、制御ルールはインテリジェント M2M ゲートウェイで管理されているため、競合する制御ルールを事前にチェックすることにより、そのサービス競合を回避する。本稿では、提案方式に基づく自律分散協調 M2M システムのプロトタイプを構築し、その動作検証を行うことにより、提案方式の有効性を示す。また、エネルギー管理システムへの提案方式の適用に関して考察する。

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

2. M2M システム

2.1 サーバ集中型 M2M システム (従来型)

M2M システムの応用は、産業分野、社会分野および家庭分野の広範囲にわたる。従来は、これらの M2M システムは、アプリケーション毎にサーバ集中型のシステムとして構築されてきた。図 1 に、従来型のサーバ集中型 M2M システムを示す。サーバ集中型 M2M システムにおいて、M2M サーバは、すべてのセンサや機器のデータを収集し、その分析結果に基づいて機器に対してフィードバック制御を行う。インターネットを介したサーバ集中型の M2M システムは、データ収集や機器制御において、常に M2M サーバと M2M ゲートウェイ間の通信が発生するため、以下に示すような課題がある。

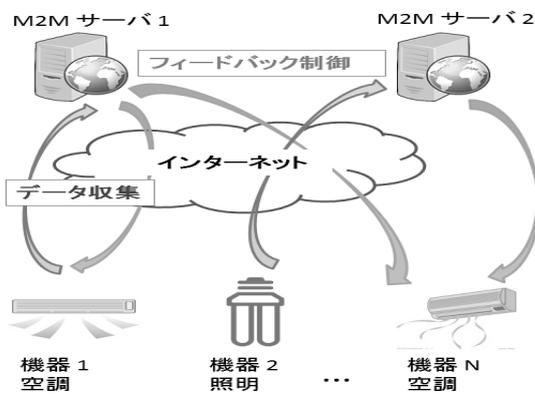


図 1 サーバ集中型 M2M システムの構成

(1) ネットワーク/サーバ負荷 (図 2(a))

サーバ集中型の M2M システムでは、M2M サーバと接続される機器の台数が増えると、M2M サーバと機器を接続するネットワークと M2M サーバの負荷も増大する。たとえば、空調や照明は温度と照度のデータを随時に M2M サーバに転送する場合、空調や照明の数が膨大な場合、そのデータ転送は、ネットワークおよびサーバに負荷をかけることになる。

(2) フィードバック制御遅延 (図 2(b))

サーバ集中型の M2M システムでは、M2M サーバは機器から収集したデータを分析し、その結果に基づいて機器を制御するため、インターネットが混雑していれば制御には遅延が発生する。たとえば、ビルの空調を対象とした省エネサービスにおいて、制御遅延が発生すると、期待するサービスが提供できなくなる。

(3) フィードバック制御競合 (図 2(c))

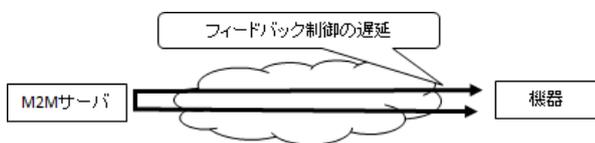
サーバ集中型の M2M システムにおいて、複数の M2M サーバが同時に一つの機器に対して異なる遠隔操作を行うと、フィードバック制御の競合が発生する。たとえば、M2M サーバ 1 が遠隔保守サービスのために機器を試運転している時に、M2M サーバ 2 が省エネサービスのために設定温度を変更すると、利用者が期待するサービスが提供できない。

2.2 自律分散協調 M2M システム

筆者らは、サーバ集中型の M2M システムの課題を解決するための自律分散協調 M2M システムについての研究を行っている[6][7]。自律分散協調 M2M システムは、サーバ集中型の M2M システムにおけるフィードバック制御の課題を解決すると共に、ネットワーク負荷やサーバにおけるデータ蓄積コストの増大というデータ収集の課題の解決を目的としている。図 3 に、自律分散協調 M2M システムの全体像を示す。図において、M2M コーディネートサーバは、システムの全体最適化とアプリケーションの独立性を両立させるために、アプリケーションサーバ間、およびアプリケーションサーバと M2M ゲートウェイ間の調整を行う。自律分散協調 M2M システムは、イベント駆動データ収集とルールベース自律分散機器制御から構成される。



(a) ネットワーク/サーバ負荷の増大



(b) フィードバック制御の遅延



(c) フィードバック制御の競合

図 2 サーバ集中型 M2M システムの課題

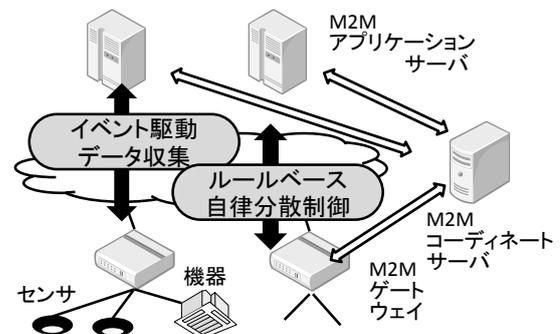


図 3 自律分散協調 M2M システム

3. ルールベース自律制御方式の提案

本稿では、第2章で述べたフィードバック制御の従来方式の問題を解決するためのルールベース自律制御方式を提案する。

3.1 提案方式の概要

図4および図5に、ルールベース自律制御方式の構成を示す。従来のサーバ集中型のM2Mシステムでは、M2Mサーバが機器を集中して制御していたが、提案方式では、M2Mサーバと機器の間に設置したインテリジェントM2Mゲートウェイが、各種センサの値の変化や機器の動作状況に基づき、自律的に制御を行う。

インテリジェントM2Mゲートウェイが自律制御を行うための制御ルールは、あらかじめM2MコーディネートサーバからインテリジェントM2Mゲートウェイに送信しておく。制御ルールはトリガとアクションから構成される。センサから収集されたデータをトリガとする。M2Mコーディネートサーバで作成された制御ルールは自動的にインテリジェントM2Mゲートウェイに転送されており、制御ルールが変更するたびに再転送される。M2Mコーディネートサーバから転送された制御ルールにより、アクションを行い、そのコマンドをアクチュエータに送信する。転送された制御ルールはあらかじめ競合チェックが行われるため、サービス競合を事前に阻止することができる。

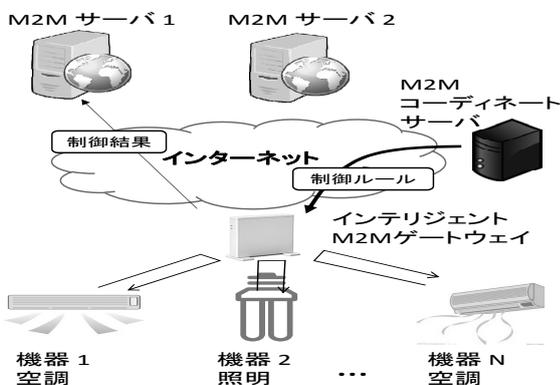


図4 ルールベース自律制御方式

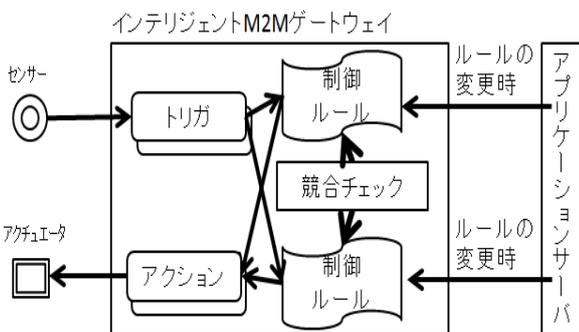


図5 提案方式の構成

3.2 アクチュエータの抽象化

提案方式を様々な機器制御に適用するために、機器のアクチュエータの抽象化が必要となる。提案方式においてアクチュエータの機能の抽象化は、OASISのoBIX(Open Building Information Exchange)のオブジェクトモデル[8]を採用する。oBIXと実際のセンサ/機器との対応付けと実装は、インテリジェントM2Mゲートウェイで行う。空調機と温度センサの機能抽象化の例を図6に示す。この例において、空調機のオブジェクトモデルは、電源ONとOFFのメソッドを持つ。一方、温度センサのオブジェクトモデルは、温度プロパティを持つ。このように、センサや機器の機能を抽象化することにより、異なるメーカーのセンサや機器であっても操作コマンドを統一させることができる。

3.3 制御ルール記述

制御ルールは、トリガとアクションから構成される。アクションには、制御対象とその制御方法をoBIXのInVoke要求によって記述する。一方、トリガは、アクションを実行するための条件をoBIXのRead要求と条件式によって記述する。また、制御ルールには、その制御ルールの優先度と有効期限を記述することができる。制御ルールの記述例を図7に示す。

3.4 フィードバック制御競合の回避

本提案方式では、インテリジェントM2Mゲートウェイに登録された制御ルールの内容を相互チェックする。インテリジェントM2Mゲートウェイにおいて、同一のアクチュエータに対して複数の制御ルールによる制御が実行される場合は、優先度が高い制御ルールによる制御を優先する。ただし、制御を実行した制御ルールは、有効期間が過ぎると、その優先度を最も低い値に変更する。たとえば、優先

```
{ tag: 'obj', href: '/airConditioner', nodes:
  [ { tag: 'bool', name: 'power', val: 'false' },
    { tag: 'op', name: 'on', href: '/on',
      in: 'obox:Nil', out: 'obix:bool' },
    { tag: 'op', name: 'off', href: '/off',
      in: 'obix:Nil', out: 'obix:bool' } ] ]
{ tag: 'obj', href: '/sensor', nodes:
  [ { tag: 'real', name: 'temperature',
    href: 'temperature', is: 'obix:Point',
    units: 'obix:Units/celsius' } ] }
```

図6 機能抽象化の例

```
{ "rule": "under_100_lx", //ルール名
  "trigger": [ //トリガ定義
    { "url": "/sensor-01", //センサデバイス
      "name": "illuminance-01", //センサ名
      "condition": "<100" }, //条件
    { "url": "/actuator-01", //アクチュエータデバイス
      "name": "alarm-01", //アクチュエータ名
      "parameter": [ //invoke要求
        { "alert": "HIGH" } ] ]
  ], //優先度・有効期間
  "action": [ //アクション定義
    { "url": "/actuator-01", //アクチュエータデバイス
      "name": "alarm-01", //アクチュエータ名
      "parameter": [ //invoke要求
        { "alert": "HIGH" } ] ]
  ], //優先度・有効期間
  "priority": "100", "duration": "60m" }
```

図7 制御ルールの記述例

度を 100 に設定している制御ルールを実行した場合は、その有効期間の間は、優先度が 100 以下の制御ルールによる実行は許可しない。そのために、制御ルールには、その優先度と有効期間の記述を可能とした。

4. 実装

4.1 プロトタイプシステムの構成

本研究では、提案方式を評価するためのプロトタイプシステムを構築した。プロトタイプシステムの構成を図 8 に示す。プロトタイプシステムでは、インテリジェント M2M ゲートウェイのプラットフォームとして、Raspberry Pi を採用した。プログラミング言語として Node.js を用いて、DBMS は SQLite3 を用いた。また、サーバは商用サービスの VPS (Virtual Private Server) を用いて、実インターネット環境で実験を行った。

センサデバイスとして照度センサを接続して 1 秒ごとに部屋の照度値をインテリジェント M2M ゲートウェイに転送するように設定した。アクチュエータデバイスには LED 照明とブザを設置して、ルールにより LED 照明を点灯し、ブザを鳴らすようにした。

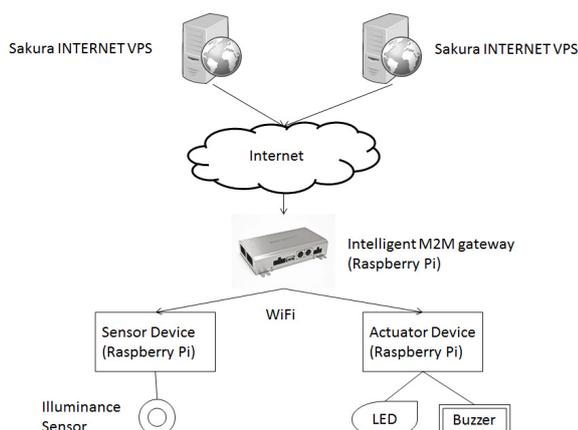


図 8 実装システムの構成

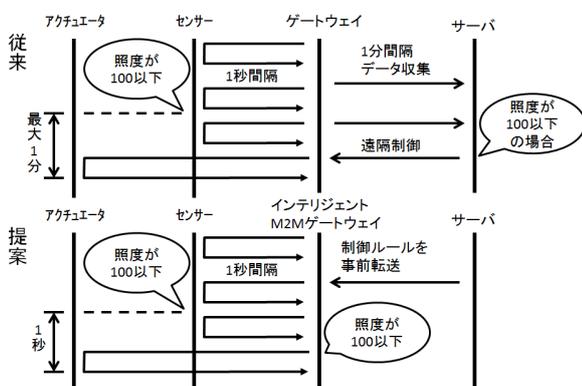


図 9 基本動作シーケンス図

5. 動作確認と考察

5.1 基本動作

評価システムにおける提案方式の基本動作シーケンスを図 9 に示す。上段はサーバ集中型の従来方式、下段が提案方式のシーケンス図である。従来方式において、照度が 100 以下になった場合、サーバがアクチュエータを遠隔制御する際の遅延は最大で 1 分となった。この制御遅延は、サーバによるデータ収集間隔が影響している。制御遅延を改善するためにデータ収集間隔を狭めると、サーバの負荷が高くなる。提案方式では、制御遅延が 1 秒に短縮した。また、サーバによる頻繁なデータ収集が不要となるため、サーバの負荷も減少することが確認できた。

5.2 考察

提案方式を実装したインテリジェント M2M ゲートウェイは、センサの計測値の変化などにに基づき自律的に機器を制御する。その制御にはサーバは関与しないため、ネットワーク負荷が軽減できると共に、機器の制御遅延を回避することができる。また、複数のサーバが同時に同一の機器に対して制御する場合は、制御ルールごとに優先順位を設定することにより、機器制御の競合を回避することができる。

本稿では、単一のアクチュエータにおける制御競合の回避を実現したが、複数の機器に対するアクション間の競合についても対応が必要である。例えば、同じ部屋で、ある制御ルールが加湿器を ON にしている時に、別の制御ルールが除湿機を ON にすると、複数機器間の制御競合になる。

5.3 エネルギー管理システムへの適用

近年、環境問題への関心が高まる中、電力会社の発電した電気を効率的に利用するために、エアコンやテレビなどの家電製品に対するエネルギー管理システムが注目されている。これらの提案は M2M 通信に基づき家電製品の電力消費タイミングを相互にシフトすることにより全体のピーク消費電力を低減させるものである。

しかしながら、これらのシステムではサーバ集中型制御によってエネルギー管理をおこなうことを前提としており、実用化は難しい。電気の使用状況が変化する度に制御のや

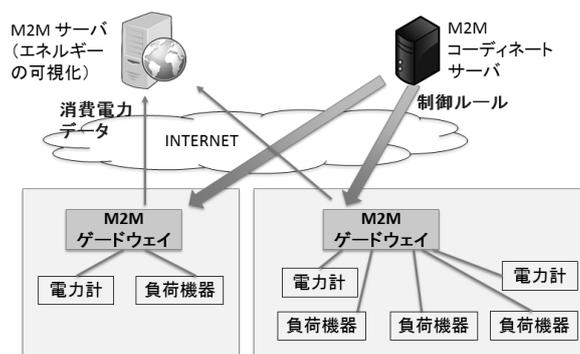


図 10 エネルギー管理への適用例

りとりを必要とし、サーバへの計算負荷、通信負荷が過剰となる。そこで、本稿ではこの問題を解決すべく、分散協調によるシステムを提案した。このシステムでは、図 10 に示すように、M2M ゲートウェイを導入し、これらが相互にやりとりを行うことによって、サーバの負荷を大幅に削減する。特に、M2M ゲートウェイ間で行うべきやりとりと、サーバとの間のやりとりを定義付けし、実用化に向けて大きく貢献することができるものとする。

6. おわりに

本稿では、サーバ集中型 M2M システムのネットワーク負荷の増大、機器制御の遅延および機器制御の競合についての問題を解決するための、ルールベースの自律分散機器制御方式を提案した。今後は、異なるインテリジェント M2M ゲートウェイの制御ルール間の競合回避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) 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)
- 4) 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イエティ大会予稿集 BS-4-7 (2011)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 北上真二, 宮西洋太郎, 浦野義頼, 白鳥則郎: “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”, 情報処理学会, 第 12 回コンシューマデバイス&システム研究会 (2015/01)
- 8) Toby Considine, Paul Ehrlich and Brian Frank, "oBIX 1.0 (Open Building Information Exchange)", OASIS Committee Specification 01, obix-1.0-cs-01 (2006)