

消費電力削減のための ルール制御型エネルギーオンデマンドシステム

藤田 直生¹ 義久 智樹² 塚本 昌彦^{1,a)}

受付日 2013年5月14日, 採録日 2013年10月9日

概要: テレビや空調といった電力機器の消費電力を抑制するためにエネルギーオンデマンドシステムが提案されている。エネルギーオンデマンドシステムでは、ホームサーバが電力を管理しており、総消費電力があらかじめ設定した上限を超えないようにするキャップ制御により、総消費電力を抑制できる。しかし、電力機器の制御方針に従い電力要求を変更することを想定しておらず、制御方針を記述する枠組みが提供されていなかった。利用者が制御方針を記述することで、利用者の方針に沿った消費電力削減が可能になる。そこで、本研究では消費電力削減のためのルール制御型エネルギーオンデマンドシステムを提案する。提案システムでは、利用者が制御方針を If-Then 形式のルールで記述し、機器の電力要求を状況により変更する。ルールと電力機器の情報から電力要求を決定してエネルギーオンデマンドを実現し、電力機器の状況から優先度と電力要求を変化させるシステムを提供する。

キーワード: 電力機器, If-Then ルール, EoD, HEMS

A Rule-based Energy-on-Demand System for Reducing Energy Consumption

NAOTAKA FUJITA¹ TOMOKI YOSHIHISA² MASAHICO TSUKAMOTO^{1,a)}

Received: May 14, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: To restrain the power consumption of appliances such as TVs and air-conditioners, Energy-on-Demand (EoD) systems have been proposed. In EoD systems, the home servers manage the power and restrain the total power consumption by the cap control, which means controlling the total power consumption so as not to exceed a certain value. However, conventional systems do not provide frameworks to describe the appliances control policy since they do not assume changing the power requests based on the policy. We can realize the power consumption reduction based on the user's policy by using the user described appliances control policy. Hence, we propose a rule-based energy-on-demand system for reducing energy consumption. In our proposed system, the user describes the policy with if-then rules. Our proposed system realizes EoD by determining the power requests from the policy and the appliances specifications.

Keywords: power appliances, If-Then rules, EoD, HEMS

1. はじめに

近年の環境問題への関心の高まりにともない、テレビや空調といった電力機器の消費電力削減に対する要求が高

まっている。従来、電力機器をコンセントに差すと電力が供給され、供給される電力に制限がなかったために不必要に給電されることがあった。電力を管理して消費電力を抑制することで、不必要な給電を回避して消費電力の削減につながるため、エネルギーオンデマンド (EoD) システムが提案されている [1], [2], [3], [4], [5], [6]。

EoD システムでは、電力機器がホームサーバに電力を要求し、電力要求が許可されてから電力機器に給電される。ただし、待機電力のように、電力機器が止まっている状態

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University, Nada,
Kobe 657-8501, Japan

² 大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University, Suita, Osaka 565-
0871, Japan

a) tuka@kobe-u.ac.jp

から電力要求を行うために必要な微小な電力は供給されている。電力機器の消費電力は変化するため、要求するのは最大消費電力であり、要求した電力機器がつねに要求した電力を消費しているとは限らない。ホームサーバが電力を管理しており、総消費電力があらかじめ設定した上限を超えないようにするキャップ制御により、総消費電力を抑制できる。たとえば、総消費電力を 800 W に制限し、すでにテレビが 200 W の電力を要求し給電されている状況で、空調を強でつけようとした場合を考える。空調は、強が最大で 700 W 消費するという情報を持っており、700 W の電力をホームサーバに要求する。空調の 700 W の電力要求を許可すると総消費電力が 800 W を超えることから許可されず、空調をつけられない。

従来の EoD システムでは、空調を強でつけようとする 700 W の電力を要求するといったように、操作に対して電力要求が固定されていた。しかし、利用者の電力機器の制御方針に従い電力要求を変更することで、利用者の方針に沿った消費電力削減が可能になる。

例 1：消費電力削減のため、夏場に空調を強でつけようとしたときに扇風機が回っていれば、扇風機を止めてから空調が電力を要求する。

例 2：空調を強でつけようとして給電されなければ、最大消費電力が強より低い中でつける。中でも給電されなければ弱でつける。

例 3：空調を強でつけようとしたときにテレビがついており空調に給電できなければ、テレビを消して電力を確保する。

従来の EoD システムでは、電力要求に対して提供可能な電力がある場合にのみ電力要求が許可されることから、家庭で消費される電力量を一定に規定することで電力を削減することが可能であった。しかし、操作に対する電力要求が固定化されていることから、他の機器の状況とは関係なく事前に規定された電力要求を行い、ホームサーバは要求された電力の総量から電力要求の判断を行う方式であった。すべての機器が、電力機器の制御方針に従い電力要求を変更することを想定しておらず、制御方針を記述する枠組みが提供されていなかった。そのため、電力の制御方針は、機器設計時から決められた優先順位と、先着順により割り当てられることとなる。しかし、制御方針は利用者により異なるため、利用者の方針に沿う消費電力削減を実現するためには、柔軟に制御方針を変更できる枠組みが必要になる。

そこで、本研究では、消費電力削減のためのルール制御型エネルギーオンデマンドシステムを提案する。後に 2, 3 章で説明するが、消費電力削減のためにルールに従い電力機器を制御する研究はこれまでにあったが、ルールに従って電力を要求する研究はなかった。利用者の制御方針に沿った電力要求を行うためには、「状況に応じた電力要

求」、「電力要求が許可されなかった場合の次の電力要求」、「電力機器を制御してからの電力要求」を記述できる必要がある。これまでの電力機器制御とは異なるルール体系が必要となる。本研究は、ルールに従い電力要求する点が新しく、利用者の方針に沿って消費電力を削減できる EoD システムの実現に貢献できる。従来の EoD システムで固定化されていた制御方針を機器の状況に合わせて柔軟に変更することにより、初期状態から決められた優先順位と先着順の電力要求から、機器の状況により優先度と要求を変化させるシステムを提供する。さらに、本研究では、提案システムを実装して評価を行い、提案システムの性能を明らかにして現実的なシステムであることを確認している。

提案システムでは、利用者が制御方針を If-Then 形式の複数のルールで記述する。電力を順序付きで要求し、電力要求が許可されなかった場合に次に行う電力要求を複数個記述することで、利用者の電力機器の制御方針に従って電力要求を変更する。If-Then 形式の簡単なルールを変更することで制御方針を変更でき、柔軟に制御方針を変更できる。さらに、本研究では、実装したルール制御型エネルギーオンデマンドシステムの評価結果について示す。これにより、従来の EoD システムによる、最大電力量を設定することによる電力削減とともに、利用者の制御方針に沿った電力制御を行うことで、全体の消費電力を削減すると同時に利用者の電力削減負担が軽減され、より細かな機器の電力削減が可能となり、全体の消費電力削減に有効と考えられる。

以降、2 章で関連研究を説明し、3 章で制御方針記述の設計を行い、4 章で設計に基づき実装したルール制御型エネルギーオンデマンドシステムを説明する。5 章で提案システムの議論、6 章で評価を行い、7 章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

家庭内の電力管理システムは HEMS (Home Energy Management System) と呼ばれ、活発に研究開発されている [7]。

2.1 従来の HEMS

ほとんどの HEMS では、ホームサーバと呼ばれる電力を管理するサーバが、家庭内情報網であるホームネットワークを介して電力機器と通信し、電力を管理している。ホームサーバと電力機器の通信に関しては、いくつかの標準化が進められているが、機器間サービス連携の仕様である OSGi (the Open Services Gateway initiative, [8]) が広く用いられている [9]。OSGi は、実行環境が豊富な Java を用いており、文献 [10] にあるように幅広い用途に利用でき、提案システムの通信にも利用できる。文献 [11] では、近距離無線通信規格である Zigbee を用いた HEMS を提案している。電流量などの電力情報を Zigbee でホームサーバに送信する装置を既存の電力線に接続して電力を管理してい

る。文献 [12] では、ECA ルールと呼ばれる事象、条件、動作を組にしたルールで電力機器を制御するシステムを開発している。しかし、RFID との連携を対象としてルールが設計されており、EoD システムには利用できない。本研究は、ルールを用いて EoD システムを実現する点が異なる。

従来の HEMS では、電力機器をコンセントに差すと電力が供給されると想定しており、供給される電力に制限がないことから不必要に給電されることがあった。そこで、EoD システムが提案されている。

2.2 EoD システム

本研究で想定する EoD システムの構成を図 1 に示す。電力網は電力を配信する網であり、主な電力源として発電所がつながっており、太線で示している。ホームネットワークは家庭内の情報ネットワークであり、情報線は細線で示している。ホームネットワークにはホームサーバが存在し、EoD システムのサーバとしての役割を果たしており、インターネットに接続されている。テレビや空調といった電力機器は、スマートタップを介して電力網とホームネットワークに接続している。スマートタップは、電力機器への電力供給の開始、停止といった電力制御と、電力機器と通信してテレビを消すといった制御が可能である。文献 [1] のように EoD システムのためのスマートタップは開発されているが、現状でスマートタップと通信できる電力機器は少ないため、テレビのようにリモコンを介して制御することが考えられる。さらにスマートタップはホームネットワークを介してホームサーバと通信できる。近年のホームネットワークやホームサーバの普及により現実的なシステム構成といえ、このような構成の EoD システムを想定した研究が行われている [2], [3]。

EoD システムにおいて、発電所や太陽光発電といった複数の電力源がある場合、パソコンのような安定した電源が必要な機器には発電所からの電源、電灯のように電力が変動してもあまり問題にならない機器に対しては太陽光発電の安い電源といったように、電力機器の用途に応じて電力源を選択できることが望ましい。そこで通信における回線

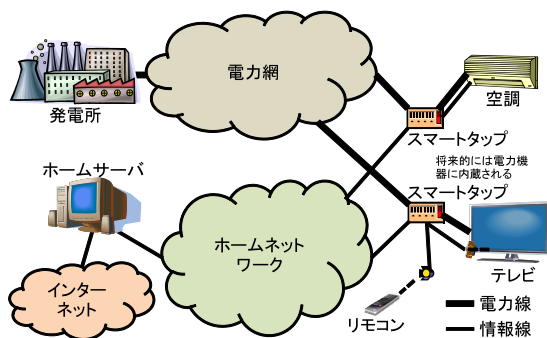


図 1 EoD システムの構成

Fig. 1 An architecture for EoD systems.

交換方式と類似した電力網が提案されている [4], [5]。回線交換方式は、現状の電力網からの移行が容易だが、電力源と電力機器の間で物理的に隔離した電力線を確保する必要がある。この問題を解決するために、通信におけるパケット交換方式と類似した電力網が提案されている [13]。しかし、従来の EoD システムでは、電力機器の制御方針に従い電力要求を変更することを想定しておらず、制御方針を記述する枠組みが提供されていなかった。

3. 制御方針記述の設計

本章では、従来の EoD システムの問題点を挙示し、解決するための制御方針記述の設計について説明する。

3.1 従来の EoD システムの問題点

1 章と 2.2 節に記述したように、従来の EoD システムは、制御方針を記述する枠組みが提供されていなかったため、操作に対して電力要求が固定されており、以下のような電力要求を行えないという問題があった。

状況に応じた電力要求：消費電力削減のため、電力機器が操作されると、不必要な電力を削減してから電力を要求することが考えられる。1 章の例 1 では、夏に扇風機がついている場合には止めてから空調が電力を要求している。しかし、従来の EoD システムは操作に対して電力要求が固定されており、状況に応じた電力要求を行えなかった。

電力要求が許可されなかった場合の次の電力要求：ある電力機器が要求した電力が許可されなかった場合、要求する電力を低くして再度電力要求することが考えられる。1 章の例 2 では、空調の強が許可されなかった場合、中、弱で電力を要求している。

電力機器を制御してからの電力要求：電力要求を許可すると総消費電力が上限を超える場合、電力を要求した電力機器とは別の電力機器の消費電力を削減し、上限を超えないようにしてから電力要求することが考えられる。1 章の例 3 では、テレビを消してから空調が電力を要求している。

利用者の制御方針に沿った消費電力削減を実現するためには、上記の電力要求を行えるように柔軟に制御方針を変更できる枠組みが必要になる。

3.2 解決策

3.1 節で列挙した問題点を解決するために、本研究で以下のような制御方針記述を設計する。

3.2.1 If-Then ルールの利用

様々な状況を条件と見なし、条件が合致した場合に行う電力機器の制御を制御方針として記述することで、状況に応じた電力要求を行える。条件が合致した場合に制御を行うといった制御方針の記述には、If-Then 形式が適してい

る。If-Then 形式の簡単なルールを複数個記述することで、様々な状況に応じた電力要求が可能になり、ルールを変更することで制御方針を変更でき、柔軟に制御方針を変更できる。そこで、提案システムでは、If-Then 形式のルールで制御方針を記述する。具体的な記述は4章で説明し、ルールの記述例を言葉で表現すると、例1の空調におけるルールのIf節は「空調を強でつける操作をして扇風機がついて夏である」という条件になり、Then節は「扇風機を止めて、700Wの電力要求を行って強でつける」となる。これまでに、消費電力削減のためにルールに従って電力を要求する研究はなかった。

3.2.2 順序付の電力要求

順序を付けて複数の電力要求を行うことで、電力要求が許可されなかった場合の次の電力要求を行える。そこで、提案システムでは、Then節に順序付きで複数の電力要求を記述する。例2の空調におけるルールのThen節は「(1) 700Wの電力要求を行って強でつける。(2) 600Wの電力要求を行って中でつける。(3) 500Wの電力要求を行って弱でつける。」となる。数字は順序を示している。各電力要求が許可されなかった場合は、その操作は行われない。

3.2.3 電力要求前の疑似電力機器制御

電力機器を制御してからの電力要求を行えるように、Then節に電力要求する前に行う電力機器制御を記述する。例3の空調のルールは、If節が「空調を強でつける操作をしてテレビがついている」となり、Then節は「(1) 700Wの電力要求を行って強でつける。(2) テレビを消し、700Wの電力要求を行い強でつける。」となる。ただし、(2)の電力要求も許可されなかった場合には、テレビを消す必要がなかったため再びつけることになり、利便性が損なわれる。そこで、提案システムでは、電力要求前の電力機器制御をホームサーバが疑似的に行い、その制御の結果から電力要求を許可できる場合にのみ、実際に電力機器を制御する。これを疑似電力機器制御と呼ぶ。

3.3 EoD システムのためのルール

3.2節で説明したように、If-Then形式のルールを用い、電力要求前に疑似的に電力機器を制御して順序付きの電力要求を行うことで、EoDシステムに制御方針を記述する枠組みを提供できる。ルールのThen節には各電力機器の電力要求が記述されているため、電力を要求する電力機器がつながっているスマートタップがルールを保持して処理する。

If節に記述できる内容は、消費電力削減に関する制御方針であり、空調をつけるといった利用者による操作や、電力機器の状態、日時があげられる。

Then節に記述できる内容は、電力機器の制御と電力要求があげられる。電力機器の制御はスマートタップが電力機器と通信することで実行でき、電力要求はスマートタッ

プがホームサーバに送信する。If節およびThen節の表現方法や通信の方法は実装に依存する。

利用者はルールをホームサーバで記述してスマートタップに送信する。利用者がルールを直接記述する場合、詳細な制御方針を記述できるが、電力機器が要求すべき最大電力と操作をすべて把握したうえで記述しなければならず一般的な利用者が行うことは難しい。さらに、利用者がルールを直接記述する場合、各電力機器がつながったどのスマートタップに送信するか指定する必要がある。電力機器の数が多いと煩雑になる。そこで、ルールコンパイラと呼ばれるルールを変換するソフトウェアを用いて各電力機器のルールを作成することを考える[6]。

3.4 ルールコンパイラ

利用者がルールを直接記述することが難しい理由として、要求電力の把握とルールの送信先決定の2点があげられる。

3.4.1 電力機器情報ファイル

要求電力の把握に関して、電力機器の電力特徴や操作と状態は、電力機器の型番が同じであれば一般的に同じであり、ルールとは別に保持できる。そこで、ルールコンパイラではこれらの電力機器情報を記述したファイル電力機器情報ファイルを用意しておく。電力機器情報ファイルは、インターネットからの入手や、説明書を参考に利用者が入力することが想定される。利用者が、スマートタップにつながっている電力機器の識別子と電力機器情報ファイル名を入力することで、ルールコンパイラは、参照すべき電力機器情報を把握できる。文献[14]の技術を用いることで、スマートタップが自動的に電力機器を認識することもできる。

電力機器情報ファイルを用いることで、利用者は、電力機器が要求すべき最大電力を把握することなくルールを記述できる。提案システムでは、電力機器に関して操作と状態のみで制御方針が記述されたルールをグローバルメタルールと呼ぶ。例1の空調におけるグローバルメタルールのIf節は「空調を強でつける操作をして扇風機がついて夏である」、Then節は「強でつける」となる。グローバルメタルールは、利用者が記述することのほかに、「空調を強でつける操作をすると、強でつける」といった一般的な制御方針が記述された標準的なグローバルメタルールはあらかじめ用意されている。グローバルメタルールを、電力機器情報ファイルを用いて電力要求のための制御方針が記述されるように変換したルールをグローバルルールと呼ぶ。例1の空調におけるグローバルルールのIf節は「空調をつける操作をして扇風機がついて夏である」、Then節は「700Wの電力要求を行い強でつける」となる。

3.4.2 ルールの送信先決定方法

ルールの送信先決定に関して、ほとんどのルールのIf節

には、利用者による電力機器の操作が記述されている。電力機器の操作は、その電力機器がつながっているスマートタップで認識されるため、If 節に操作が記述されている電力機器がつながっているスマートタップでルールを処理することで、冗長な通信を行うことなく操作を認識できる。そこで、ルールコンパイラでは、操作を認識できるスマートタップにルールを送信するように決定する。たとえば、例 1 の空調におけるグローバルルールの If 節には空調の操作が含まれているため、空調がつながっているスマートタップに送信する。If 節に電力機器の操作が記述されていない場合には、Then 節に記述された制御を行う電力機器がつながっているスマートタップに送信する。複数の電力機器を制御するように記述されている場合には、複数のルールに分けてから各電力機器に送信する。提案システムでは、グローバルルールから、各電力機器のルールとして送信先を決定したルールをローカルルールと呼ぶ。グローバルルールは、ルールコンパイラでローカルを作成するための一時的なルールとなる。

ルールコンパイラの手順のイメージ図を図 2 に示す。利用者の電力機器の制御方針が変わった場合に、グローバルメタルールが変更されてローカルルールに変換され、スマートタップに送信される。また、電力機器が増減した場合にも、それらの電力機器のローカルルールをルールコンパイラで作成し送信される。

本研究では、以上のように設計されたルール制御型エネルギーオンデマンドシステムを提案する。

3.5 利用シナリオ

EoD 対応の空調を持っている利用者が、EoD 対応のテレビを購入する。EoD 対応のテレビは、上記のスマートタップの機能を内蔵しており、標準のグローバルメタルールと、電力機器情報ファイルも保持している。利用者は、購入したテレビを電源とホームネットワークに接続する。テレビを初めて起動すると、テレビからホームサーバへ電力が要求され、ホームサーバはテレビとその電源を認識し、現在のグローバルメタルールと電力機器情報ファイルを収集する。利用者は、例 3 の制御方針を持っており、ホームサーバでグローバルメタルールを修正する。修正時、ホー

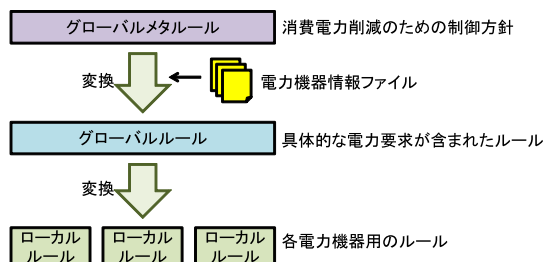


図 2 ルールコンパイラの手順

Fig. 2 A process of rule compilers.

ムサーバはテレビがつながっていることを認識しているため、電力機器の選択肢には「テレビ」が現れていて「テレビがついていれば」といった記述が可能になる。修正を完了すると、ルールコンパイラが動作してローカルルールが作成され、各電力機器に送信される。

4. ルール制御型エネルギーオンデマンドシステムの実装

本章では、実装したルール制御型エネルギーオンデマンドシステムを説明する。

4.1 スマートタップ

消費電力を計測しネットワーク接続できるスマートタップが市販されているが、ルールを受信して処理できるスマートタップはなかった。そこで、ローカルルールの受信し処理できるスマートタップを開発した。開発したスマートタップを図 3 に示す。開発したスマートタップは、2 個のコンセントがあり、各コンセントの電圧と電流を計測部で計測し消費電力を算出する。計測部はリレーを備えており、電力機器の電源接続を物理的に切断できる。制御部は、Armadillo と呼ばれる Linux ボードであり、独自に開発したプログラムを実行でき、ホームネットワークに接続してホームサーバと通信できる。

4.2 電力機器情報ファイル

バイナリ形式や、表形式などの記述形式が考えられるが、実装したシステムでは、編集の容易さと可読性から XML 形式の記述を用いた。

電力機器情報ファイルの要素を表 1 に示す。電力機器情報ファイルは、大きく分けて電力機器の操作を記述する Operation 要素と状態を記述する Status 要素で構成される。たとえば、空調の電力機器情報ファイル aircon.xml の一部は図 4 のように記述される。

4.3 ルールコンパイラ

ルールコンパイラは、様々な機器からホームネットワークを介して実行できるように、Web アプリケーション (PHP+Java) として実装した。

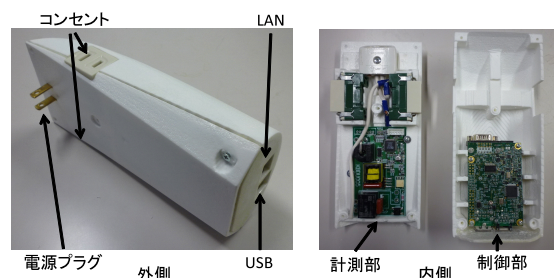


図 3 開発したスマートタップ

Fig. 3 Our developed smart power strip.

表 1 電力機器情報ファイルの要素

Table 1 Elements for appliance information file.

要素名	属性名	意味	
Appliance	Model	-	型番
		Operation	-
	Status	ID	操作番号
		Power	最大消費電力
		-	状態変数名
		ID	状態変数番号
	Name	-	状態名
		ID	状態番号

```

<Appliance>
<Model>12345ABCDE </Model>
<Operation ID="1" Power="700W">強にする</Operation>
<Operation ID="2" Power="600W">中にする</Operation>
<Operation ID="3" Power="500W">弱にする</Operation>
<Operation ID="4" Power="0W">切る</Operation>
<Status ID="1" Name="風量">
<Name ID="1">強 </Name>
<Name ID="2">中 </Name>
<Name ID="3">弱 </Name>
</Status>
<Status ID="2" Name="電源">
<Name ID="1">オン </Name>
<Name ID="2">オフ </Name>
</Status>
:
</Appliance>
    
```

図 4 空調の電力機器情報ファイルの例 (抜粋)

Fig. 4 A part of an example of appliance information file for an air-conditioner.

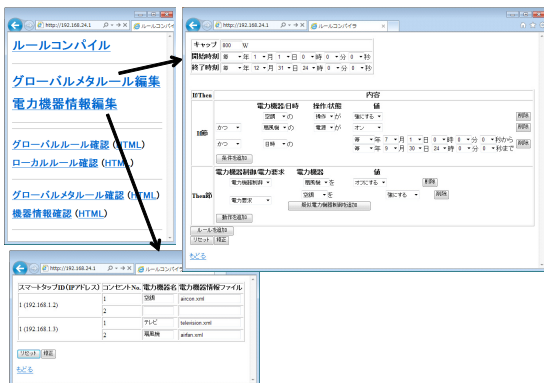


図 5 ルールコンパイラの画面

Fig. 5 Screenshots of our developed rule compiler.

スクリーンショットを図 5 に示す。左上がメイン画面で、クリックにより各画面へ遷移する。ルールコンパイラをクリックすると、ルール変換され、ローカルルールが作成され、スマートタップへ配信される。右上がグローバルメタルールの編集画面である。利用者は、この画面でグローバルメタルールの If-Then ルールを記述する。左下が電力機器の名前と電力機器情報ファイルを入力する画面であり、ルールコンパイラはこの入力から電力機器情報ファイルを参照して、電力機器が要求すべき最大電力や操作、状態を把握できる。グローバルメタルールは、表 2 に示すよう定義されている。If 節は、すべての条件が AND 条件で評価され、すべての条件が満たされた場合に Then 節を実行する仕様としている。ローカルルールの定義を表 3 に示す。ローカルルールの If 節は、すべての条件が AND

表 2 グローバルメタルールの要素

Table 2 Elements for a global meta rule sets.

要素名	属性名	意味	
GlobalMetaRule	-	ルール変数名	
	ID	ルール変数番号	
If	-	If 要素	
	OpeCon	-	操作状態
		Appliance	機器名
		ApplianceModel	機器型番
		Operation	操作内容
	StaCon	-	機器状態
		Appliance	機器名
		ApplianceModel	機器型番
		Name	状態名
	Then	-	Then 要素
Operation		-	操作状態
	Appliance	機器名	
	ApplianceModel	機器型番	
	Operation	操作内容	
Demand	-	デマンドレスポンス定義	
	Priority	優先度	
	Appliance	機器名	
	ApplianceModel	機器型番	
	Operation	操作内容	
	QuasiOperation	-	疑似モード

表 3 ローカルルールの要素

Table 3 Elements for a local rule sets.

要素名	属性名	意味	
Appliance	-	機器定義	
	Address	IP アドレス	
	Socket	スマートタップソケット ID	
LocalRule	-	ルール変数名	
	ID	ルール変数番号	
	If	-	If 要素
		Operation	-
	ID		操作変数番号
	Status	-	機器状態条件
		Address	IP アドレス
	DateTime	Socket	スマートタップソケット ID
		ID	状態 ID
	Then	From	時間条件
To		条件終了時間	
Demand	-	Then 要素	
	Operation	操作状態	
	Address	IP アドレス	
	Socket	スマートタップソケット ID	
	ID	操作 ID	
	Priority	EoD デマンドレスポンス定義	
QuasiOperation	-	優先度	
	Appliance	機器名	
	ApplianceModel	機器型番	
	Power	要求電力	
	OperationID	操作 ID	

で評価され、すべての条件が満たされた場合に Then 節を実行し、複数のローカルルールが定義されており、すべてのルールをつねに評価する。

たとえば、グローバルメタルール globalmetarule.xml の一部は図 6 のように記述され、空調のローカルルールの一部は図 7 のように作成される。作成されたローカルルールは、電力機器がつながっているスマートタップに送信され、処理される。

```
<GlobalMetaRuleSet>
<GlobalMetaRule ID="1">
<If>
<OpeCon Appliance="空調" Operation="強にする" />
<StaCon Appliance="扇風機" Name="電源" Value="オン" />
<DateTimeCon From="-/7/1 0:0:0" To="-/9/30 24:0:0" />
</If>
<Then>
<Operation Appliance="扇風機" Operation="オフにする" />
<Demand Priority="1" Appliance="空調" Operation="強にする" >
<QuasiOperation />
</Demand>
</Then>
</GlobalMetaRule>
:
</GlobalMetaRuleSet>
```

図 6 グローバルメタルールの例 (抜粋)

Fig. 6 A part of an example of global meta rules.

```
<LocalRuleSet>
<Appliance Address="192.168.1.1" Socket="1">空調
</Appliance>
<LocalRule ID="1">
<If>
<Operation ID="1" />
<Status Address="192.168.1.2" Socket="2" ID="2" Value="1" />
<DateTime From="-/7/1 0:0:0" To="-/9/30 24:0:0" />
</If>
<Then>
<Operation Address="192.168.1.2" Socket="2" ID="2" />
<Demand Priority="1" Power="700W" OperationID="1" >
<QuasiOperation />
</Demand>
</Then>
</LocalRule>
:
</LocalRuleSet>
```

図 7 空調のローカルルールの例 (抜粋)

Fig. 7 A part of an example of a local rule for an air-conditioner.

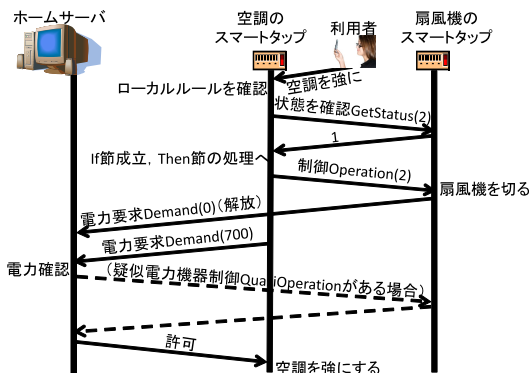


図 8 ルール処理エンジンの処理の流れ

Fig. 8 A process flow of rule processing engine.

4.4 ルール処理エンジン

ルール処理エンジンは、スマートタップで動作するローカルルールを処理するプログラムである。ホームサーバや他のスマートタップと通信してローカルルールを処理する。電力要求する Demand, 状態を確認する GetStatus, 電力機器の制御する Operation という通信メソッドがある。例 1 の処理の流れを図 8 に示す。

利用者が空調を強にしようとする時、空調のスマートタップがローカルルールを確認する。ローカルルール 1 の If 節に強にする操作が含まれているため、ローカルルール 1 を確認する。ローカルルール 1 の If 節には、扇風機の状態が含まれるため、扇風機のスマートタップに状態を確認する。If 節が成立していると、Then 節に従い扇風機を切り電力要求を行う。成立していない場合には何も行わない。例 1 では疑似電力機器制御は行われていないが、行う場合

には点線で示した処理が発生する。

5. 議論

5.1 制御方針記述に関する議論

従来の EoD システムでは、電力機器の制御方針に従って電力要求を変更することを想定しておらず、制御方針を記述する枠組みが提供されていなかった。提案するルール制御型エネルギーオンデマンドシステムでは、利用者が記述した If-Then 形式のルールに従い電力機器が電力要求を行うため、ルールを用いて制御方針を記述する枠組みを提供できる。さらに、利用者が容易に制御方針を記述できるようにするため、ルール制御型エネルギーオンデマンドシステムでは、グローバルメタルールと呼ぶ電力機器に関する操作と状態のみを利用者は記述し、グローバルメタルールを具体的な要求電力や記述されたローカルルールに変換している。これらにより、提案システムでは、柔軟に制御方針を記述できる枠組みを提供できる。

利用者は、グローバルメタルールを記述する必要があるが、3.5 節に記述したように、標準のグローバルメタルールを用意しておくことで、利用者の制御方針に沿わない部分のみ修正できる。修正にかかる時間は利用者により異なるため厳密な評価は困難だが、一般に、細かい制御方針を記述する場合には長く、標準のグローバルメタルールをあまり変えない場合には短い。

5.2 ルールの数

提案システムでは、電力機器はローカルルールに従い電力要求を行う。後に 6.1 節で普段の生活に大きく影響を及ぼさないと考えられることを確認しているが、ルール処理時間はローカルルールの数に依存する。

ローカルルールの数は、電力機器によって異なるが、電力機器の操作ごとに 1 個のローカルルールがある場合、筆者の所有している電力機器では、テレビが 47 個、空調が 31 個、扇風機が 9 個のローカルルールになる。これは、主に機器本体とリモコンによる操作それぞれがローカルルールとなるためである。具体的な例としてテレビの場合には、電源操作、チャンネル変更操作、音量操作、消音、放送電波選択 (地上波, BS 放送, CS 放送), 音声切替え, 字幕放送, 入力切替えなどの操作ごとにローカルルールが作成されローカルルール数が 47 個となる。操作が単純な機器である扇風機では、ローカルルールが 9 個と少なくなる。筆者の家庭にある他の電力機器の操作も含めると、ローカルルールは合計で 258 個になった。電力機器の操作ごとに 1 個のローカルルールがあると、あるグローバルルールから複数のローカルルールが作成されないため、グローバルメタルールやグローバルルールの数はローカルルールの合計と等しくなり、258 個になる。ただし、利用者は標準で用意されているグローバルメタルールを用いることで、すべ

てのグローバルメタルールを記述する必要はない。

6. 評価

6.1 ルールに従った電力要求による電力供給の遅延

提案システムでは、電力機器はローカルルールに従い電力を要求するため、操作に対して電力要求が固定されていた従来の EoD システムと比べて電力が供給されるまでの時間が長くなると考えられる。電力機器が操作されてから電力が供給されるまでの時間は、電力機器が操作されてから電力要求を出すまでの時間と、電力要求を出してから電力が供給されるまでの時間に分けられる。後者については、従来の EoD システムにおいても費やされる時間になる。

まず、電力要求を出してから電力が供給されるまでの時間に関して、実装したルール制御型エネルギーオンデマンドシステムを用いて計測した。ホームネットワークは無線 LAN で構築した。計測した結果、10 回の平均は 20.95 ミリ秒であった。利用者の普段の生活に影響を及ぼさないほど短い時間であると考えられる。20.95 ミリ秒のうち、電力要求をホームサーバに送信してから許可が返信されるまでの通信時間が平均 6.05 ミリ秒、許可されてからスマートタップのリレーを切り替えて供給するまでが平均 20.9 ミリ秒であり、通信時間に比べて電力を供給する時間が長くなっていた。

次に、電力機器の操作から電力要求を出すまでの時間に関して、1 章の例を用いて計測した。

電力機器が電力を要求してから、ホームサーバが許可して給電するまでの時間は、従来の EoD システムにおいても費やされる。そこで、電力機器が操作されてからローカルルールに従って電力を要求するまでの時間を 10 回計測した。計測した結果、例 1 が平均 14.2 ミリ秒、例 2 が平均 6.2 ミリ秒、例 3 が平均 8.9 ミリ秒となった。1 秒以下に抑えられ、利用者の普段の生活に大きく影響を及ぼさないと考える。さらに、電力機器の動作遷移時間が長い連続制御がある機器においては、短時間での許可では不十分に考えられる。電力供給制御においては従来の EoD システムと同様に、機器が必要とする最大電力を一定時間許可されるため、機器動作の遷移時間にかかわらず必要とされる最大電力が一定時間内に許可されるシステムが提供されることで、すべての電力機器が動作できる。また、EoD においては電力要求が許可されなければ機器が動作できないことから、電力の全体量が一定以下に抑制され安定動作できる。例 1 の時間が長いのは、扇風機も制御しているためである。

6.2 ルールのデータ量

提案システムでは、ホームサーバやスマートタップに、ルールを保存しておく記憶容量が必要になる。そこで、ルールのデータ量がどの程度になるのかを示す。

1 章の例のルールのデータ量を表 4 に示す。グローバル

表 4 ルールのデータ量

Table 4 Data sizes for rules.

例	グローバルメタルール	グローバルルール	空調のローカルルール
1, 2, 3	1,247	1,169	1,118
1 のみ	510	467	512
2 のみ	462	393	378
3 のみ	435	388	433
平均	469	416	441

[バイト]

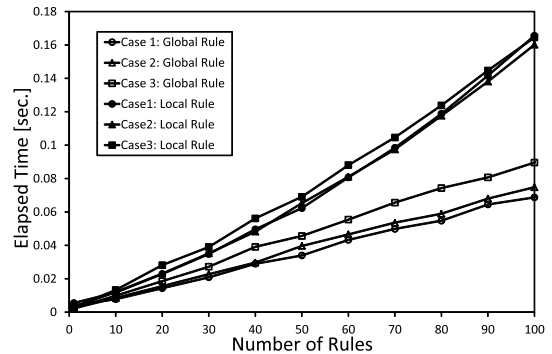


図 9 ルールの変換時間

Fig. 9 Compile times of rules.

メタルールには、利用者の制御方針が記述されており、すべてのルールが記述されているが、比較のため、例 1 のみの場合なども記載した。実装したシステムでは、XML でルールが記述されており、グローバルメタルール 1 個あたり平均 469 バイト、ローカルルール 1 個あたり平均 441 バイトになっている。実装したスマートタップには 64M バイトの不揮発性メモリがあり、記憶容量に比べてルール 1 個あたりのデータ量はとても小さいことが分かる。バイナリ符号化を行うことで、さらにデータ量を小さくできる。

6.3 ルールの変換時間

提案システムでは、利用者が記述したグローバルメタルールを変換して各電力機器のローカルルールを作成している。ルールの変換は、グローバルメタルール変更時に行われ、頻繁に行われるものではないが、変換に長くかかると変換作業が煩雑になる。そこで、変換時間を計測した。

グローバルメタルールの数が変換時間に及ぼす影響を調べるため、数を変更して計測した。影響を把握しやすくするため、実運用時には考えにくい、1 章の各例の同じルールをグローバルメタルールに記述して数を変更した。結果を図 9 に示す。

縦軸が変換時間、横軸がグローバルメタルールの数であり、'Case 1'、'Case 2'、'Case 3' がそれぞれ例 1、例 2、例 3 を示し、'Global Rule' がグローバルルールを作成するまでの時間、'Local Rule' がローカルルールを作成するまでの時間を示す。このグラフより、グローバルメタルールの数が多くなるほど、処理するルールが多くなって変換に時間がかかっていることが分かる。また、最終的にローカルルールが作成されるまでの時間はそれぞれの例で大きな違いはないが、グローバルルールを作成するまでの時間は、

例3が長いことが分かる。これは、例3ではテレビがグローバルメタルールに含まれており、テレビの操作の数は多く、操作の識別子といった変換に必要な情報を電力機器情報ファイルから取得するのに時間がかかっているためである。ルールの変換時間は、ルールの数にほぼ比例しており、100個のグローバルメタルールの変換で0.17秒程度、300個でも0.51秒程度であり、変換が煩雑になるほど長時間の変換時間ではないと考える。

7. おわりに

本研究では、消費電力削減のためのルール制御型エネルギーオンデマンドシステムを提案した。また、機器の制御する制御方針のルールを議論し、制御方針に基づきルールを作成するルールコンパイラについて評価した。提案システムでは、利用者が制御方針をIf-Then形式で柔軟に記述でき、複数のグローバルメタルールで記述する。あらかじめ用意されている電力機器情報ファイルを用いてグローバルメタルールを変換し、電力要求を含めたローカルルールを作成する。ルールに従って電力要求する点が新しく、If-Then形式の簡単なルールを変更することで制御方針を変更でき、柔軟に制御方針を変更できる。

今後、利用者の生活習慣からグローバルメタルールの自動生成や、複数の利用者を対象に利用者ごとでグローバルメタルールを変更するシステムを考えている。

謝辞 本研究の一部は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」の助成によるものである。本プロジェクトのメンバーおよび関係者に心より感謝する。

参考文献

- [1] Morimoto, N., Fujita, Y., Yoshida, M., Yoshimizu, H., Takiyamada, M., Akehi, T. and Tanaka, M.: Policy-based Power Router with Power Sensors for Efficient Allocation of Energy, *Proc. IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2012)*, pp.477-480 (2012).
- [2] Kato, T., Yuasa, K. and Matsuyama, T.: Energy on Demand: Efficient and Versatile Energy Control System for Home Energy Management, *Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smart-GridComm2011)*, pp.410-415 (2011).
- [3] 松山隆司: エネルギーの情報化とは: 背景, 目的, 基本アイデア, 実現手法, *情報処理*, Vol.51, No.8, pp.926-933 (2010).
- [4] Miyamoto, T., Koyama, Y., Sakai, K. and Okabe, Y.: A GMPLS-based Power Resource Reservation System toward Energy-on-Demand Home Networking, *Proc. IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet (SAINT2012)*, pp.138-147 (2012).
- [5] Shibata, T., Sakai, K. and Okabe, Y.: The Design and Implementation of an On-demand DC Grid in Home, *Proc. IEEE/IPSJ International Symposium on Application and the Internet (SAINT2011)*, pp.152-159 (2011).
- [6] Yoshihisa, T., Fujita, N. and Tsukamoto, M.: A Rule Generation Method for Electrical Appliances Management Systems with Home EoD, *Proc. IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2012)*, pp.253-255 (2012).
- [7] Niyato, D., Xiao, L. and Wang, P.: Machine-to-Machine Communications for Home Energy Management System in Smart Grid, *IEEE Communications Magazine*, Vol.49, No.4, pp.53-59 (2011).
- [8] The OSGi Alliance: OSGi Service Platform, Release 4, Version 4.2 (2007), available from <http://www.osgi.org/>.
- [9] Wacks, K.: The Successes and Failures of Standardization in Home Systems, *Proc. IEEE International Conference on Standardization and Innovation in Information Technology*, pp.77-88 (2001).
- [10] Yang, C.-S., Liao, M.-Y. and Chen, C.-X.: Design and implementation of HEMS based on RFID and OSGi, *Proc. International Conference on Anti-Counterfeiting, Security, and Identification in Communication*, pp.250-253 (2009).
- [11] Han, J., Choi, C.-S. and Lee, I.: More Efficient Home Energy Management System Based on ZigBee Communication and Infrared Remote Controls, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol.57, No.1, pp.85-87 (2011).
- [12] Yoshihisa, T., Kishino, Y., Terada, T., Tsukamoto, M., Sagara, R., Sukenari, T., Taguchi, D. and Nishio, S.: A Rule-Based RFID Tag System Using Ubiquitous Chips, *Proc. IEEE International Conference on Active Media Technology (AMT'05)*, pp.423-428 (2005).
- [13] Takuno, T., Koyama, M. and Hikiyama, T.: In-Home Power Distribution Systems by Circuit Switching and Power Packet Dispatching, *Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smart-GridComm)*, pp.427-430 (2010).
- [14] 伊藤雅仁, 大亦寿之, 井上智史, 重野 寛, 岡田謙一, 松下 温: 消費電力波形の特徴を利用した家電機器検出手法と制御システム, *情報処理学会論文誌*, Vol.44, No.1, pp.95-105 (2003).



藤田 直生 (正会員)

2002年奈良工業高等専門学校卒業, 2004年同専攻科修了。2006年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了, 2010年同経済学研究科修士課程修了, 2011年神戸大学大学院工学研究科博士課程退学。同年神戸大学大学院工学研究科学術推進研究員となり現在に至る。工学および経営学修士。ユビキタスコンピューティングの研究に従事。電子情報通信学会会員。



義久 智樹 (正会員)

2002年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2003年同大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程を修了し、2005年同専攻博士後期課程修了。博士(情報科学)。2005年京都大学学術情報メディアセンター助教。2008年大阪大学サイバーメディアセンター講師を経て2009年より同准教授となり、現在に至る。この間、カリフォルニア大学アーバイン校客員研究員。センサネットワークおよびインターネット放送に興味を持つ。電子情報通信学会、IEEE各会員。



塚本 昌彦 (正会員)

1987年京都大学卒業。1989年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年シャープ株式会社入社。1995年大阪大学大学院工学研究科講師、1996年同助教授。2002年同大学院情報科学研究科助教授。2004年神戸大学工学部教授。2007年同大学院工学研究科教授、現在に至る。NPO法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事長。工学博士。2001年よりウェアラブルコンピュータの装着生活を行っている。