

住宅におけるエネルギーマネジメントの効果を検証する 実証的ホームシミュレータの提案と実装

岡田 崇^{1,2,†1,a)} 牧野 義樹^{1,2} キム ジュンスー^{1,2} 中田 潤也^{1,2} 丹 康雄^{1,2,3}

受付日 2011年3月31日, 採録日 2011年10月3日

概要: 温室効果ガス排出量の削減や非常時, 災害時におけるエネルギー確保を実現するため, エネルギーマネジメントはわが国の重要な課題である. 近年, 情報家電の普及にともない宅内にホームネットワーク (HN) が構築され, スマートハウス構想の実現に向け, HEMS (Home Energy Management System) や DSM (Demand Side Management) に対する期待が高まっている. 新しい HEMS 技術の有効性の検証には, 実証実験かシミュレーションによる手法が用いられる. しかし, 実証実験は時間やコストがかかり, 実験規模, 実験期間, 網羅的な検証が困難であるという利便性に欠ける問題がある. 一方シミュレーションは, HN の多様性, 複雑性という性質からモデルの精度に関する問題がある. これらの問題に対し本論文では, 実証的ホームシミュレータを提案し, その精度の評価および HEMS アプリケーション例の効果を検証する. 本シミュレータは, HN の要素を住宅, 家電, 環境, 電力, 人間の 5 要素に切り分け, 要素間で相互作用する現象を再現可能とした. また実世界とのインタフェースを持ち実システムと同時に実時間で動作することで高い精度のシミュレーション結果を得ることができる. さらに統計情報やパターンを指定し異なるパラメータの実験を繰り返し実行することや, 実世界と接続しない場合は複数の計算機を用い多数の世帯を高速にシミュレート可能である. 評価として, 本シミュレータの環境要素の精度を実験住宅 iHouse で計測した実実験のデータとその再現実験のシミュレーション結果より検証した. 検証のパターンとして, 季節, 天候, また窓閉め時, 窓開け時, エアコン動作時の 3 シナリオについて検証を行い, 結果から約 5% の相対誤差内で環境の再現が可能であることを確認した. さらに実住宅の実消費電力量データとシミュレーション結果の比較を行い, その再現性を確認した. また住宅の効率的なカーテン開閉による消費電力量削減効果をシミュレータにより検証し, 約 8% の削減効果が見込めることを確認した.

キーワード: ホームネットワーク, 大規模シミュレーション, 実証実験, CPS, ユビキタスコンピューティング

An Experimental Home Simulator for Verification of Home Energy Management

TAKASHI OKADA^{1,2,†1,a)} YOSHIKI MAKINO^{1,2} KIM JUNSOO^{1,2} JUNYA NAKATA^{1,2}
YASUO TAN^{1,2,3}

Received: March 31, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: Energy management is an important issue for our country to fulfill reducing CO₂ emission or saving energy in emergency or disaster situation. Recently, due to the popularization of Home network (HN) comprised by smart home appliance, the need for HEMS (Home Energy Management System) or DSM (Demand Side Management) is stronger than ever. A field trial or a simulation method is adopted to evaluate the efficiency of new HEMS technology. But a field trial is associated with problems such as lack of convenience, time, cost, scaling difficulty, duration and exhaustive verification. On the other hand, a simulation has accuracy problems stemming from the diversity and complexity of HN. In this paper, we propose an experimental home simulator solving these problems. Furthermore, we evaluate the accuracy of the simulator and verify the effects of HEMS application. The simulator classifies elements of HN into categories such as house, appliance, environment, power consumption and human. It allows the reproduction of interactions between them. It can generate simulation results with high accuracy by having interfaces to real world and being executed in real-time. Moreover it has the functionality of a repetition of the experiment with statistics or parameters. If it does not connect to real world, it can simulate large-scale houses with high speed execution by using multiple computers. As the evaluations, we verify the accuracy of the environment simulation from the comparison between real experimental results and the simulation. The verification parameters are season, weather and user scenarios (window opening, window closing, air conditioner). We confirm that the simulator can accurately reproduce the environment with a five percent relative error. In addition, the reproducibility of power consumption simulation is confirmed by comparing the energy consumption measured in a real house with the simulation. Finally, as an example of HEMS application, we simulate an intelligent curtain control application and confirm eight percent reduction of energy consumption.

Keywords: home network, large-scale simulation, practical experiment, cyber physical systems, ubiquitous computing

1. はじめに

2020年に向け、わが国では1990年比で25%の温室効果ガス削減を目標として掲げており、この目標に対し省エネルギー対策は非常に重要な課題である。また非常時、災害時における住宅のエネルギー確保、エネルギーマネジメントは社会的に見直されるべき課題といえる。これらの目標に向けて家電の省エネルギー化や太陽電池、蓄電池、燃料電池の利用に加え、スマートハウス構想による消費電力量削減が期待されている。HEMSはHNによる家電の接続性とそれらの状態の参照および制御により、消費電力量の「見える化」や省エネルギー運転を実現する省エネルギー対策の主要なアプリケーションである。今後、より効率的な省エネルギー対策を進めるためには、HEMSに対しデマンドサイド側のユーザのライフスタイルや地域などに最適化された省エネルギー運転、ユーザに対する省エネルギー情報の提示による省エネルギー運転の啓発などユーザの省エネルギー化に対する積極的な参加が必要となってくる。

このようなスマートハウス構想、新しいHEMSの実現

のためには、その有効性やシステムの信頼性の検証が重要である。住宅のような非常に多くの世帯を対象としたシステムの検証は、実証実験かシミュレーションにより行われることが一般的である。実証実験による検証は利便性の問題があり、時間やコストがかかること、広範囲の実験や長期間の実験、大規模な実験、また対象の網羅的な検証が困難であることなど多くの課題がある。一方シミュレーションによる検証は精度の問題があり、HNのシステムの多様性、複雑性からシステムに関連する対象をすべて再現することが困難であるという課題がある。

HNに関する研究はこれまで様々な研究機関で行われてきており、MicrosoftのEasyLiving[1]やMITのHouse of Futureなど多くのプロジェクトが実施されてきた[2]。HN、HEMSの実証的な検証は国内でも行われており、スマートハウス情報活用基盤整備フォーラム[3]では、スマートハウスの実証的検証として、マルチベンダに対応したホームサーバのAPIの開発、太陽電池、蓄電池、燃料電池を用いたエネルギーシステム、住宅の設備とセンサを用いた省エネルギー運転、さらにデマンドサイドの複数のユーザを対象としたスマートハウス機能についてと多岐にわたり研究されている。しかし、このような大規模なプロジェクトの実証実験においても対象となる世帯は東京都1カ所のみに限られており、世帯数も11世帯である。またCO₂削減効果のシミュレーションとして、電気・熱の流れを解く機器・システムモデル、これらの機器の運転操作を行う制御モデルにより夏、冬、中間期ごとに評価を行っている。しかし、現実のHNシステムは住宅内に多数の家電が存在し、住民がそれらを自らの意思で操作しながら消費電力量が変

¹ 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology, Nomi, Ishikawa 923-1292, Japan

² 情報通信研究機構
National Institute of Informations and Communications Technology, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

³ 国立情報学研究所
National Institute of Informatics, Chiyoda, Tokyo 101-8430, Japan

^{†1} 現在、産業技術総合研究所つくばセンター
Presently with National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST Tsukuba

a) takashi.okada@aist.go.jp

化する複雑なシステムであり、状況に応じて動的にシステムの振舞いに変化するシミュレーションは実施されていない。新エネルギー・産業技術総合開発機構では、人の好みや行動パターンに応じた HEMS/BEMS 技術の研究開発を行っているが、本報告書では人間の行動の不確実性からシミュレーションは困難であるとしている [4]。今後実施される実証実験として、経済産業省は次世代エネルギー・社会システム実証地域に横浜市、豊田市、京都府（けいはんな学研都市）、北九州市を選定し、エネルギーマネジメントの構築をはじめとした様々な実証を実施される [5]。

シミュレーションについては、スマートハウスを対象としたセンサデータ、コンテキストデータの生成が提案されている [6], [7]。玉井ら [8], [9] のスマートスペースシミュレータは、3D 空間上におけるスマートスペース設計支援、可視化、またネットワーク、物理環境をシミュレートする機能を持つ。しかし、センサやコンテキストのデータは物理環境により変化し、また物理環境も住宅の建設場所、建物の構成、室内の家電の状態、人間の影響を受け時々刻々と変化する。エネルギーマネジメントは、このような変化するセンサデータ、コンテキストデータをもとにその振舞いが変わり、その振舞いにより物理環境や家電の状態も変化するという特徴を持つため住宅における物理環境の変化を再現する必要がある。HEMS によるエネルギーマネジメント、省エネルギー化に対し、石川ら [10] は、太陽電池とエコキュートを用いた省電力化のシミュレーションを行っており、そのシミュレーション手法は省電力化シナリオごとに電力データをシミュレーションフローに従い各種係数の積算を行っている。松本ら [11] は、マクロ経済モデル評価手法からユビキタス社会シナリオについて CO₂ 削減効果の検証を行っている。省エネルギー化の対策効果は住宅や人間によって異なるため、検証の対象となる世帯、人間に対する省エネ効果を導出することは困難である。また筆者らは StarBED プロジェクト [12] において、大規模テストベッドを用いユビキタスネットワークのシミュレーションに関する研究を進めてきた。実時間で動作するユビキタスネットワークのミドルウェア、アプリケーションの検証を行うシミュレーションフレームワークの開発を行ったが [13]、HN、HEMS の検証という特定の分野に関するシミュレーションは現在検討中の課題であった [14], [15]。

以上のように HN、HEMS 技術の検証には、実証実験、システムの技術の一部に関するシミュレーション、マクロ的視点によるシミュレーションと様々な手法が用いられている。しかし大規模な世帯、HN の多様性、複雑性を満たすエネルギーマネジメントの検証手法は存在しない。また過去の研究事例は、住宅の特性と物理環境の変化や人間の行動を含めた大規模な HEMS の検証に対しそのまま適用することも不可能であるため、新しい手法を提案する。本論文では新規に導入されるエネルギーマネジメントの効果

を実証的に検証可能なホームシミュレータを提案する。シミュレータは、複数の計算機上での大規模な世帯を再現する自動化機構や、住宅、家電、環境、電力、人間の 5 要素から構成されるシミュレーションモデルにより HN の多様性、複雑性を再現する。また設定ファイルを変更することにより、再現する住宅の構造、間取り、場所、設置される家電、家族構成や季節の異なるシミュレーションを実行することができる。

以下、2 章では HN の現状を明らかにし、HEMS の検証に関する問題点と解決手法について述べる。3 章では提案するホームシミュレータの設計および実装について、4 章ではシミュレータの評価として環境、電力を評価し HEMS のアプリケーション例について検証を行い、5 章において本論文の提案と実証的検証による結果をまとめる。

2. HN、HEMS の有効性検証の課題

2.1 HN の現状

今日、インターネットは日本の世帯の 92.7% に普及し [16]、住宅内の情報家電により HN が構築されるようになってきた。宅内の情報家電、ネットワーク機器、アクチュエータなどを接続するための技術は、比較的研究の進んでいる分野であり [17]、UPnP [18]、DLNA [19]、ECHONET [20] といった標準のミドルウェアに対応した情報家電が市場に流通している。このような情報家電の普及により、遠隔からの家電の状態の参照や制御が可能となる。さらに住宅に多数のセンサを設置することで、住宅内の環境や消費電力量に関する詳細な情報を得ることができる。

HEMS によるエネルギーマネジメントは家電の状態の参照や制御による省エネルギー運転から、デマンドサイドとサプライサイド間の連携による柔軟かつ状況に最適なエネルギーマネジメントが地域ごとや変電所単位で提供されることが可能となる。家電を HN に接続するだけで、ユーザへ消費電力量を提示する「見える化」のシステムにその家電が反映されることや、気象予測や住宅内の太陽電池、蓄電池、燃料電池を最適に利用したエネルギー確保、エネルギーマネジメントが可能となる。またユーザの行動や地域の特徴を活かした省エネルギー対策を事業者から提示することも可能となってくる。図 1 に住宅のエネルギーマネジメントシステムの全体像を示す。

2.2 HN、HEMS の検証の課題

次世代の HN、HEMS の実現のためには、新しいシステムの有効性や信頼性を評価するため、検証がきわめて重要である。HN、HEMS の検証は実証実験かシミュレーションにより実施されることが一般的である。しかし実証実験には実験の利便性の問題があり、シミュレーションには実験の精度の問題がある。以下に実証実験、シミュレーションがかかえる課題を列挙する。

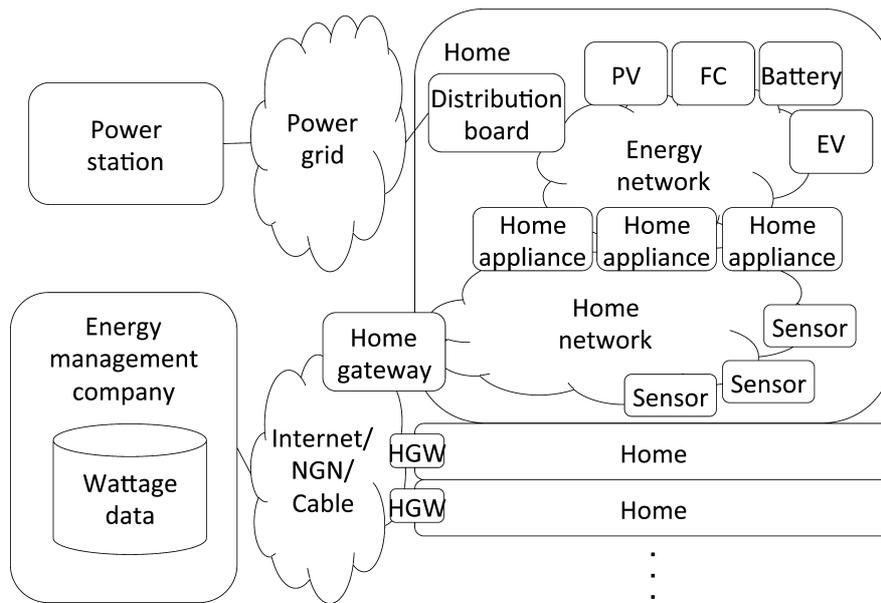


図 1 住宅のエネルギーマネジメントシステムの全体像
 Fig. 1 Overview of energy management system in home.

- 実証実験の課題
 - － 対象選定, 機器の設置, 実験, データ収集, 検証に要する時間
 - － 一連の実験, またその規模を拡大するためのコスト
 - － パラメータの異なる繰返し実験や条件に対する網羅的検証が困難
- シミュレーションの課題
 - － HN の多様性, 複雑性を再現する精度
 - － 利用者の要求する住宅を再現する汎用性
 - － 大規模な世帯を対象とした実験の自動化を行う利便性

HN, HEMS の対象は住宅であり, その数は日本国では数千万世帯に及ぶ. 実証実験では, その対象の選定, 機器の設置, 実験, データ収集, 評価および検証を完了するまで, 実験の規模にも依存するが数カ月, または年単位の時間がかかる. 1 軒の住宅を対象とした実験でもセンサ, アクチュエータなどの機器に関するコストがかかり, さらにその規模を拡大する場合, 機器のみでなく対象の選定やデータ収集の手法などの課題が出てくる. HEMS のような多数の利用者が存在する場合, 住宅の場所, 構造, 季節, 地域の特徴に加え HEMS の各種パラメータを変更した際の効果が最適化の観点で重要となるが, 実証実験でこのような検証を行うためには上記であげた時間コストをさらに拡大しなければならない.

一方シミュレーションによる検証を行う場合, HN の多様性, 複雑性をシミュレーションにより再現することが困難である. 次世代の HN, HEMS は機器どうしの接続性のみではなく, センサから得られる実世界情報, 家電やアクチュエータによる実世界への影響, さらにそれら両方に対し影響を与え合う人間が作用するため, 単純なモデルでと

らえることは困難な非常に複雑なシステムといえる. このようなシステムのシミュレーションには, HN 上の多様な実世界要素, サイバースペースを再現しなければならないという課題がある. また大規模な世帯を対象とした HEMS の検証を行うために, 住宅の場所, 構造, 季節, 地域の特徴, さらにそこで生活する人間を容易に変更し, 再現できる汎用性が求められる. また実験の自動化, パラメータの異なる繰返し実験や条件に対する網羅的検証を可能とする利便性が必要である.

2.3 課題の解決手法

以上に述べた課題に対し, 実証実験による検証に加え, このような大規模な世帯の事象を再現できる高度なシミュレーションによる検証技術を提案する.

シミュレーションによる検証を行うにあたり最も課題となる点はその精度であるが, 本シミュレータは実時間での動作, 大規模な世帯の再現という精度とはトレードオフの関係にある性質を持つ. シミュレータの精度は, これらの性質を満たすうえで最大限の精度を保つことが重要となる. 本提案では実証実験, 実実験の結果のシミュレータへの反映, また実世界とシミュレータの連携を可能とする実世界指向のシミュレーションを実現する. 石川県に建設された実験住宅 iHouse は, 日本建築学会標準住宅モデル [21] に基づく住宅であり, 情報家電, センサ, アクチュエータ, 太陽電池, 蓄電池を備えた次世代の HN, HEMS の実証的検証が可能である. iHouse 建設以前に検証に利用した実験住宅 TANS2 でのシステム構築や iHouse での知見をもとにシミュレータでは, HN の要素を住宅, 家電, 環境, 電力, 人間の 5 要素に分類した. これらの要素が互いに影

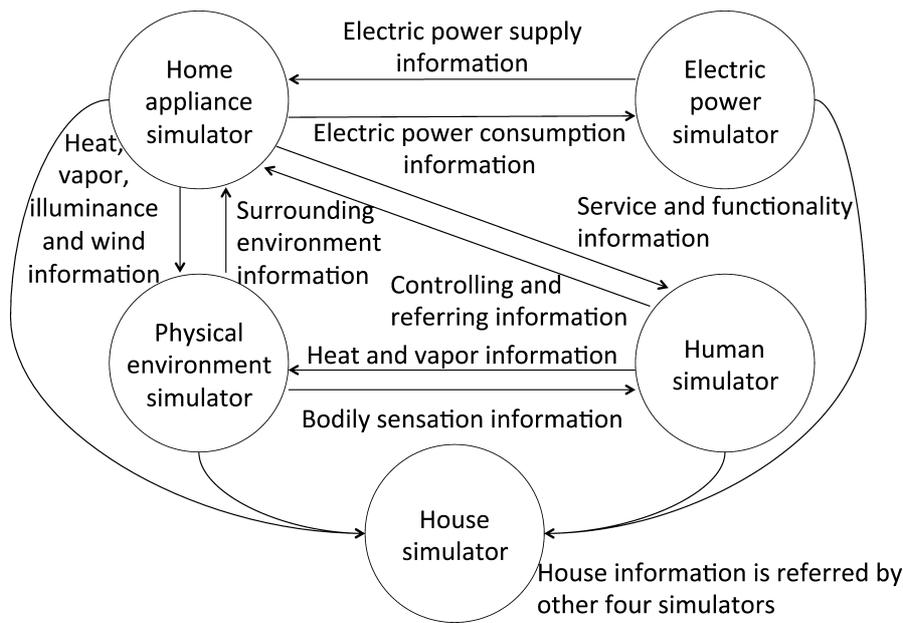


図 2 ホームシミュレータの 5 要素
 Fig. 2 Five elements of Home Simulator.

響を及ぼし合いながら個々の要素の状態を変化させることで、HN の実世界を取り入れた複雑なシステムの再現を可能とする。iHouse において継続的に季節、天候、センサから得られる環境情報、家電の利用にともなう消費電力量を計測し、そのデータをシミュレータの基本データとして利用することにより、高い精度のシミュレーション結果を生成する。実世界との連携は、シミュレータの各要素が実システムと同様の API を提供することで、利用者が検証対象を容易にシミュレートすることが可能となるよう設計されている。また実世界との連携には、シミュレータの実時間での実行が必須であるため、シミュレータの時間管理機構により実時間性の保証の可否を通知する。

より大規模なシミュレーションを行うためには、実住宅、精度の高いシミュレーション、精度の低いシミュレーションを組み合わせ、限られたコンピュータ上で世帯数を増やすための工夫が必要である。そのためシミュレーションモデルは、詳細度が高いが実行時間の遅い高精度なモデルと、詳細度が低いが実行時間の早い低精度なモデルから選択可能である。またテストベッドのような複数の計算機クラスター上で大規模なシミュレーションを実行するための自動化機構を備えている。

シミュレーションにかかるコストはシミュレータが動作する計算機およびシミュレーションの構築に要する時間であるが、1 度シミュレーションを構築すれば繰り返し実行することや、パターンに対し網羅的な検証が可能である。また実世界との接続を考慮しなければベストエフォートでの高速なシミュレーションの実行が可能である。

3. ホームシミュレータ

3.1 シミュレーションモデル

本節では提案するホームシミュレータのモデルについて述べる。これまでの HN システムの構築や実験の知見に基づき、HN システムをシミュレートするために必要な 5 要素を以下に分類した (図 2)。

- 住宅
 - － 住宅の構造 (間取り, 部屋, 床, 壁, 窓, カーテン), 場所, 向き
- 家電
 - － 家電, センサ, アクチュエータ, ネットワーク機器, PC
- 環境
 - － 住宅内および屋外の環境 (温度, 湿度, 照度, 風速, 風向)
- 電力
 - － 発電所, 変電所, 分電盤, 分岐回路, コンセント, 家電の電力および電力の需給
- 人間
 - － 住宅内で行動する人間

シミュレータは有向グラフにより構成されており、5 要素の各要素は類似した性質を持つ集合である。たとえば住宅内のあらゆる機器は家電要素に分類され、温度、湿度、照度といった物理環境は環境要素に分類される。グラフの辺は、頂点から頂点への影響を指定されたタイミングで伝える役割を持つ。その振舞いや細かいパラメータ設定はそれぞれの設定ファイルにより変更可能である。たとえば家電が電力を消費する辺や、部屋に対し発熱する辺などを構成

でき、その電力量や発熱量、またどのコンセントに接続しどの部屋に設置されているかにより宛先の頂点が変わる。以降それぞれの要素について詳しく説明する。

3.2 住宅シミュレータ (House simulator)

住宅シミュレータは、住宅の構造に関するデータを管理する役割を持つ。住宅の構造に関するデータとは、住宅の建設場所の緯度、経度、住宅の向き、部屋の間取り、外壁、内壁、床、屋根の材質や厚さ、窓、カーテンの日射遮蔽係数を表す。建設場所や向きの情報は環境シミュレータにおいて日射の熱計算に利用される。また部屋の間取りは、環境シミュレータの熱計算、人間の移動モデルに用いる。壁、窓、カーテンも環境シミュレータの熱計算に利用される。これらの情報は設定ファイルに記述されており、検証したい住宅を設定ファイルを変更することで再現できる。壁の材質は一般的に利用される材質（ガルバリウムやシーリングボードなど）の熱伝導率、比熱、密度がすでに定義されており、材質と厚さにより壁を生成できる。

3.3 家電シミュレータ (Home appliance simulator)

家電シミュレータは、情報家電、センサ、アクチュエータなどの機器をシミュレートする。実験住宅 TANS2, iHouse の HN システムの構築の知見から、家電シミュレータのインタフェースを ECHONET [20] に対応させ、家電の制御、状態の参照を可能にした。ECHONET では、家電をクラスグループコード（大まかな家電種別の分類、センサ関連機器、空調関連機器など）、クラスコード（より詳細な分類、人体感知センサクラス、温度センサクラスなど）により分類し、それぞれの家電のプロパティ（温度センサであれば、動作状態、温度計測値など）とその値の種別、範囲を定義している。家電シミュレータの機能はこの ECHONET と同様のクラス分類、プロパティ定義を用いている。また家電ごとの性能差は家電設定ファイルにより指定することができる。性能差とは、たとえば状態ごとの消費電力量や冷房能力を表す。さらに家電が影響を与えるまたは受ける要素を指定し辺を貼ることで任意の要素に対し動的に影響を受け合うことが実現できる。たとえば人体感知センサの場合、人間に対し辺を貼るように家電設定ファイルで指定することで、センサの設置された室内にきた人間に対し動的に辺が貼られる。

家電の制御、状態の参照は ECHONET の SET（家電の状態の設定）、GET（家電の状態の参照）形式の電文により実現される。つまり家電シミュレータの家電は、実システム上の ECHONET の SET、GET の電文に対応したエミュレータである。家電シミュレーションが動作し、その状態を変化させる際、環境、電力、人間にも影響を及ぼす。環境、電力に与える影響は家電設定ファイルに記述された能力により決定され、離散的な実時間内にその影響が反映

される。現在 ECHONET 家電のうち、iHouse に設置されている 22 種の家電について実装済みである。ECHONET 家電のスーパークラスはすでに実装済みであるため、その他の家電の実装はいくつかの状態を追加することで実装可能である。

3.4 環境シミュレータ (Physical environment simulator)

環境シミュレータは、住宅内、住宅外の環境情報（温度、湿度、照度、風速、風向）をシミュレートする。シミュレーションモデルには、数値流体力学を用いた詳細度の高いシミュレーションと熱力学を用いた詳細度の低いシミュレーションが選択できる。

詳細度の高い数値流体力学を用いたシミュレーションは、室内の 3 次元座標ごとの細かい環境情報を計算することができる。しかし単一の計算機では実時間性の保証が困難なため、異なる計算時間のモデルを複数の計算機上で並列動作させ、実時間性を守りかつ最も詳細度の高いモデルを利用する機構により、その実時間性の保証とシミュレーションの精度の高さを維持した。実装は OpenFOAM を利用し、シミュレーションを指定された離散時間ごとに実行することで上記の機構を動作させた。

熱力学を用いたシミュレーションは、大規模な世帯をシミュレートするため単一の計算機上での世帯の多重化を想定しており、部屋を 1 つの単位としてとらえる。シミュレーションモデルは熱回路網法 [22] をもとに、部屋、外気、家電、人間による熱輸送のグラフを生成し離散時間ごとの変量により環境の変化を再現する。部屋間、部屋と外気間の変量は内壁、外壁の情報を住宅シミュレータから参照し、熱の伝導、対流、放射に日射量を加え計算する。日射量は住宅の緯度、経度と時刻、天気をもとに壁または窓、カーテンへの放射熱として計算される。家電については、家電設定ファイルに記述された振舞いに従い、状態によりその量は変化する。外気および日射に関するデータは、気象庁の過去の気象データを利用することができる。その他のデータでも、指定のフォーマットの入力データを用意することで任意の場所の外気、日射のデータを扱うことが可能である。各部屋の環境のシミュレーションは、住宅シミュレータの部屋の間取り（向き、広さ、隣接する部屋、隣接する壁と向き）を指定することでシミュレータ内にインスタンス化されるため、住宅設定ファイルの変更により汎用的な住宅に対応できる。

このような異なる詳細度のシミュレーションを組み合わせることで、シミュレーションの振舞いを詳細に検証したい世帯と、より多くの世帯をシミュレーションしたい世帯とを使い分けることが可能である。また実住宅の計測結果とその再現シミュレーションの比較を行うことにより、提案したシミュレーションモデルの精度を保証する。

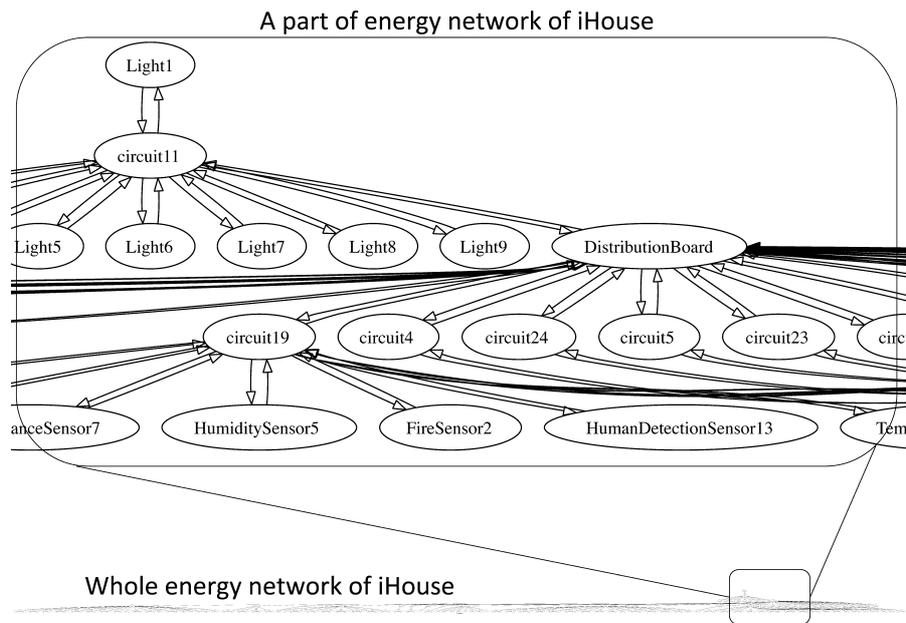


図 3 iHouse の電力シミュレーションの木構造
 Fig. 3 Tree of electric power simulation of iHouse.

3.5 電力シミュレータ (Electric power simulator)

電力シミュレータは、住宅内に提供される電圧、電流、力率、電力量をモデル化し、さらに変電所、発電所から構成される電力網をシミュレートする。電力は住宅ごとに電力会社から提供される。住宅には静的な電圧、電流の供給量が定義され、電力会社から電力が供給されている。さらに住宅内の分電盤では分岐回路ごとに電流を分配し、分岐回路ごとに家電が電力を利用するモデルをとっている。分電盤、分岐回路、コンセント、家電は木構造となっており、木の子から親へ電力の需要を要求し、親から子へ電力を供給する。図 3 に iHouse の電力シミュレーションの木構造を示す。図中の頂点は、分電盤 (DistributionBoard)、分岐回路 (circuit)、家電を表している。分電盤は、供給量を超える電流が要求された際や、自然現象 (たとえば落雷) により停止する。

家電の状態に対し消費電力量が一定の家電の消費電力量は、家電設定ファイルに記述された状態ごとの家電の消費電力量の値により決定する。住宅の瞬時消費電力量は、その家電の状態ごとの消費電力量をコンセントに要求し、供給された電力量をすべての家電分積算し計算する。一定期間の住宅 1 軒の積算消費電力量は、瞬時電力量の時間積分により計算される。また、より大規模な 1 変電所単位の消費電力量も同様に住宅の数だけ積算することで再現できる。

家電の状態ごとに消費電力量が一定家電については上記の積算が可能であるが、消費電力量が連続的に変化する家電については詳細なモデル化や解析を行う必要がある。また消費電力量が変化する家電についても、一定時間おきに同様のパターンの消費電力量を繰り返す家電、運転から停止までの間ほぼ同様のパターンの消費電力量を持つ家電、

温度や湿度など状況により消費電力量が変化する家電に分類できる。消費電力量が一定の家電の例としては、照明、各種家電の待機電力などが該当する。消費電力量が変化する家電の例としては、エアコン、洗濯機などが該当する。このように消費電力量が変化する家電に対し、時間に依存し消費電力量が推定できる家電については iHouse の計測結果による実データを用い、消費電力量をシミュレートする。またエアコンのような状況 (温度、湿度など) により消費電力量が変化する家電については消費電力量に関与すると思われる変数を回帰分析を用い推定し、エアコンごとに消費電力関数を用いシミュレートを行う。推定例として iHouse のエアコンの消費電力量の解析を行った。推定する関数を 3 パターンに分類し、(1) 住宅外温度、湿度、室内温度、湿度を従属変数とし 8 月から 11 月までそれぞれ月ごとの 4 つの式を導出したパターン、(2) (1) の従属変数に加え相関を追加したパターン、(3) (2) の 8 月から 11 月のデータを 1 つのデータとし、1 つの式を導出したパターン、以上のパターンに対し推測結果を調べた。結果として (2) のパターンを用いた解析を行うことで最も誤差の小さい予測を行うことができた。図 4 に住宅外温度、湿度、室内温度、湿度を従属変数とし、消費電力量を目的変数とした重回帰分析より得た消費電力関数と実測値との比較を示す。

電力シミュレータの消費電力量は、分岐回路やコンセントに設置された電力計 (家電シミュレータのインスタンス) から参照できる。電力の設定は、電力設定ファイルに記述されており、分電盤、分岐回路、コンセントからなる電力網、電圧、電流を変更することでシミュレーションしたい住宅を再現できる。

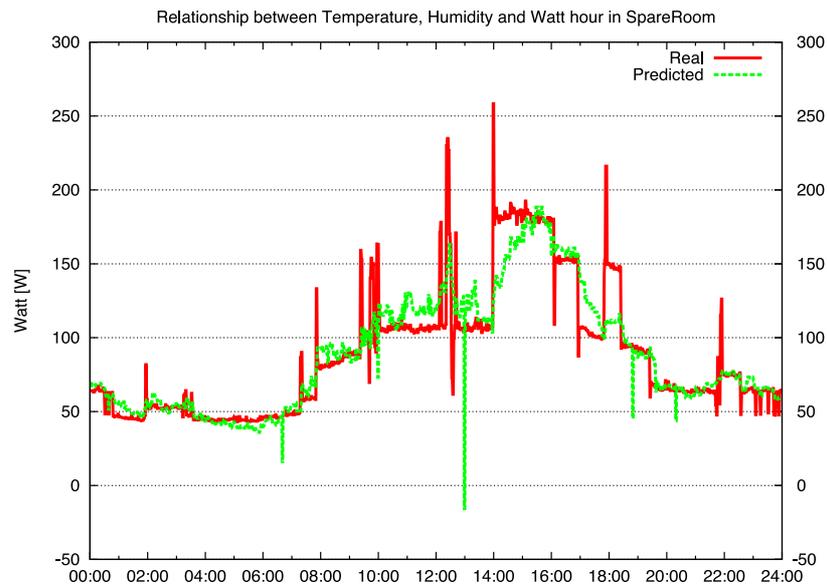


図 4 8月のエアコンの消費電力量の予測と実データの比較
 Fig. 4 Comparison of energy consumption of air conditioner in August.

3.6 人間シミュレータ (Human simulator)

人間シミュレータは、住宅における家族の行動を生成するシミュレータである。住宅における家族は、世帯の場所、世帯種別、家族構成、家族1人1人のプロフィール(年齢、性別、世帯における続柄、職業)を指定する。この家族の情報は、大規模な世帯を対象とするため総務省の国勢調査の統計情報と確率により生成することも可能である。行動の生成は、スケジュール、状況、欲により動的に決定する。まず家族1人1人のプロフィールから習慣的スケジュールを総務省の社会生活基本調査の統計情報と確率を用いて生成する。このスケジュールは、社会生活基本調査の行動種別(睡眠、仕事、食事など)を何時から何時まで行うという行動の列である。動的な行動の決定は、この習慣的スケジュールを参照し状況や自身の欲に応じ実行行動を生成する。実行行動とは、行動種別の睡眠を行うにあたり、移動、消灯、空調、飲水などの付随する行動や家電操作を指す。状況については、現在自分のいる部屋の環境、家電の状態、家族の状態、時刻などを表す。欲はマズロー [23] の自己実現論のモデルを参考に定義し、状況によりそれぞれの欲の値を変化させ、その値により実行行動の発生率に影響を与える。行動の決定は、スケジュール、その行動の起因となるすべての状況、欲からの影響値を総合し、すべての行動の中から最もその影響の高いものを選ばれる。以上で述べた欲のモデル、行動の決定モデルは行動設定ファイルに記述されており、欲の変化を表す関数(線形、指数、シグモイド関数)や欲に影響を与える状況を変更することができる。また新しい欲(たとえば暑がり、使わないときは家電を切るなど)を欲設定ファイルに追加し、行動への影響を定義することで任意の欲を定義することが可能である。

3.7 要素間の相互作用

図 2 で示した 5 要素の要素間の相互作用を以下にまとめる。

- 住宅とその他 4 要素
 住宅シミュレータにおいて管理される情報はその他 4 要素から参照される。
- 家電と環境
 家電から環境へは、熱、水蒸気、光、風が影響を及ぼす。たとえばエアコン動作時の空調の影響がこれに該当する。この影響は家電設定ファイルで指定する。
 環境から家電へは温度、湿度、照度などの周囲の環境情報が影響を及ぼす。たとえば温度センサが感知する温度がこれに該当する。この影響も家電設定ファイルで指定する。
- 家電と電力
 家電から電力へは電力の要求を、電力から家電へは電力の供給が影響する。この影響は家電設定ファイルで指定した家電の状態ごとの消費電力量に依存する。
- 家電と人間
 家電から人間へは、家電の機能が影響する。たとえばテレビのような人間が享受する家電の機能や、HEMS の「見える化」による人間の行動への影響がこれに該当する。人間の行動への影響は欲設定ファイル、欲の変化設定ファイルに欲の定義とその影響を記述する。
 人間から家電へは、家電の状態の参照、制御の影響を及ぼす。たとえばテレビが OFF, ON の制御がこれに該当する。
- 環境と人間
 環境から人間へは、室内の物理環境が感知される。たとえば温度、湿度が高い場合不快に感じる事が該当

する。環境から人間への影響はシミュレータが人間の部屋間の移動に従い動的に決定する。

人間から環境へは熱、水蒸気が影響を及ぼす。これも環境から人間と同様シミュレータが動的に決定する。

3.8 シミュレータの汎用性

ホームシミュレータは、設定ファイルを変更することで様々なバリエーションの住宅を再現可能である。以下に各種設定ファイルにより変更できる項目を列挙する。

- 住宅設定ファイル
住宅の建設場所（緯度、経度）、世帯種別、家族構成、家族のプロファイル
- 部屋設定ファイル
向き、部屋の間取り、外壁、内壁、床、屋根の材質や厚さ、窓、カーテン
- 壁設定ファイル
壁、床、屋根に利用される材質の熱伝導率、容積比熱、密度。窓、カーテンの日射遮蔽係数
- 家電設定ファイル
家電の機種ごとの能力、家電の状態ごとの消費電力量、環境への影響値
- 電力設定ファイル
発電所、変電所、分電盤、分岐回路、コンセントからなる木構造、葉の上流、下流の電圧、葉の限界値（たとえば停電の発生のため）
- 行動設定ファイル
行動種別、関連する実行動
- 欲設定ファイル、欲の変化設定ファイル
欲の変化、任意の欲の定義と変化

住宅の構造は材質をもとに壁、屋根、床から構成しているため、このような構造に関する情報さえあればどのような住宅でもシミュレートできる。また参照データとして気候のデータ（たとえば気象庁で公開されている過去の気象データ）や消費電力量のパターンのデータをもとに特定の場所、特定の家電をシミュレータで利用することも可能である。

4. シミュレータの評価

本章では、ホームシミュレータの評価について述べる。評価はシミュレータの環境要素、電力要素、また省エネルギーシナリオとしてカーテンの適切な開閉による消費電力量の削減効果を調べた。

従来研究でも住宅の温熱環境および省エネルギー効果の検証が行われている。岩嶋ら [24] は、集合住宅のパッシブ空調による環境の変化を計測し、シミュレーションにより省エネルギー効果を検証している。しかしシミュレーションで利用した住宅モデルは実測を行った集合住宅とは異なる。またシミュレーションによる環境の再現結果と実測の

比較は示されておらず消費電力量のみが記述されており、シミュレーション結果の消費電力量効果がどの程度現実の値と近いかは示されていない。野村ら [25] は、実住宅の環境を長期間計測しシミュレーションプログラムにより高い精度で再現している。これらの研究では、居住空間の温熱環境を空調機器を利用するシナリオで検証しているが大規模な世帯を対象とした HEMS の検証を行うための、世帯の多重化や現実の様々な世帯を再現する機能は備えていない。またシミュレーションに要する時間、住宅における要素間の相互作用、HEMS サービスの効果をどのように反映するかといった課題があげられる。

そのためこのような大規模な世帯を対象として HEMS の効果を検証するためのシミュレーションが必要となる。

4.1 実験住宅 iHouse における計測

評価用比較データとして、実験住宅 iHouse に設置されたセンサにより計測された時系列センサ生データを利用した。センサデータは、温度、湿度、照度、風向、風速センサ、電力計センサのデータを用いた。iHouse 外に温度、湿度、照度、風向、風速センサを設置し、iHouse 内の全室に温度、湿度、照度センサを設置した。電力計センサは各部屋の分岐回路ごと、コンセントごとに装備されている。センサは ECHONET 機器として実装されており、ECHONET 電文を用いて 10 秒間隔でデータを収集した。計測は 8 月から 11 月にかけて毎月 7 日程度データを収集した。

4.2 環境シミュレータによる再現シミュレーション

環境要素の評価は実験住宅 iHouse の住宅外、住宅内に設置したセンサ情報とシミュレータによる再現実験の結果を比較することにより行った。評価パターンとして、通常時、窓開け時、エアコン動作時についての 3 シナリオで評価を行った。窓開け時およびエアコン動作時については、午前 9 時に窓を開放またはエアコンを運転し、午後 5 時に窓を閉めまたはエアコンの運転を停止させた。

ホームシミュレータの環境は、熱力学を用いたシミュレーションにより再現した。シミュレータへは、各種設定ファイルと住宅外で計測された温度、湿度、照度、風向、風速データを入力とし、環境シミュレータにより再現した iHouse 内の全室の環境のシミュレーション結果と実測値を比較した。

図 5 に 8 月の窓閉め時の比較結果を示す。図の実線はシミュレーション結果、破線は実測値、点線は摂氏温度を基準とした相対誤差を表している。iHouse の全 14 室（廊下、階段含む）の比較結果はおおむね相対誤差 5% 以内に収まり、最大で 10% の差があった。同様に図 6 に 8 月の窓閉め時の比較結果を示す。iHouse の全 14 室の比較結果はおおむね相対誤差 4% 以内に収まり、最大で 5% の差があった。同様に図 7 に 8 月のエアコン動作時の比較結果

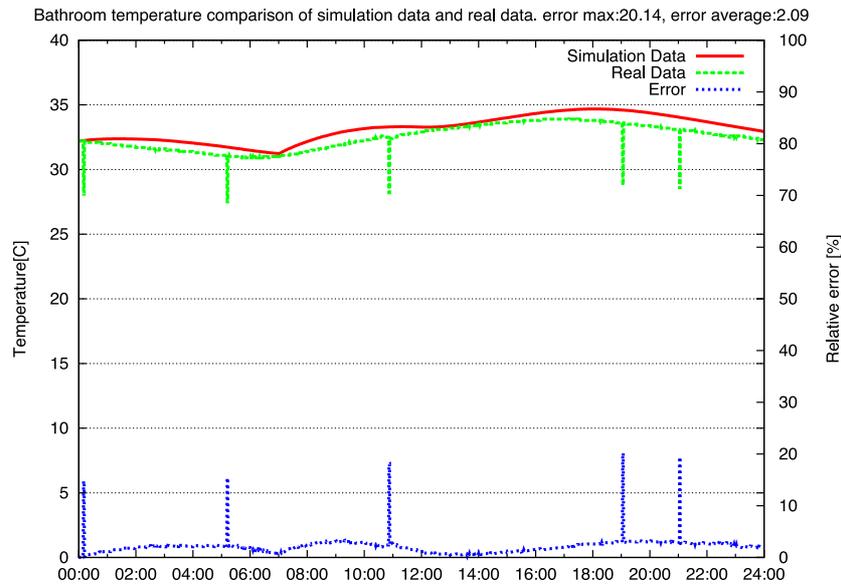


図 5 8月の窓閉め時の温度シミュレーションの比較

Fig. 5 Comparison of temperature with window closing in August.

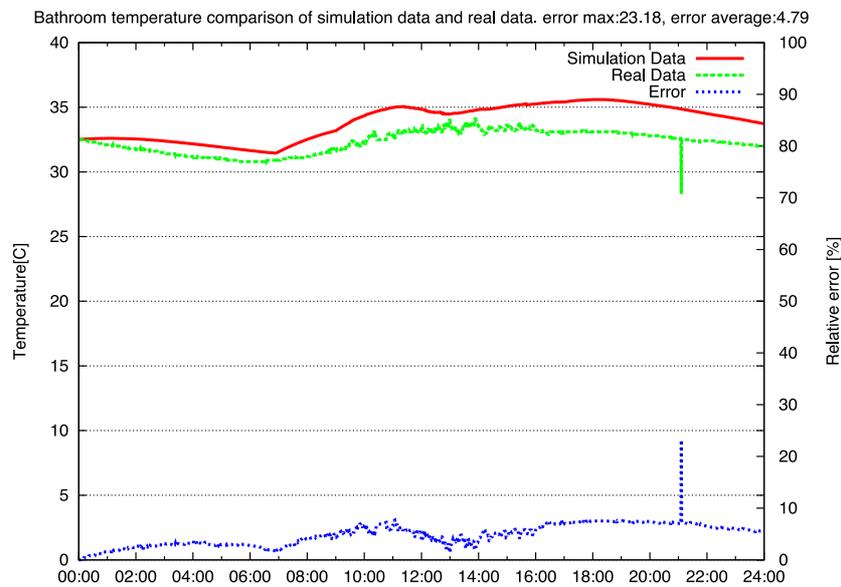


図 6 8月の窓開け時の温度シミュレーションの比較

Fig. 6 Comparison of temperature with window opening in August.

を示す. iHouse の全 14 室の比較結果はおおむね相対誤差 4%以内であり, 最大で 8%の差があった.

表 1 に, 季節ごと, 窓閉め時, 窓開け時, エアコン動作時の平均相対誤差の結果を表にまとめる. 8月の誤差に比べ 11月の誤差が増加しているが, 摂氏温度の相対誤差を算出しているため 8月の 30°C 以上の温度と 11月 20°C 程度の温度による差である. 誤差 5%で 8月で 1.5°C, 誤差 8%は 11月で 1.6°C である.

4.3 省エネルギー効果の検証例

総務省による研究報告 [26] では, HEMS の省エネルギー効果の代表例としてエアコンの省エネルギー運転があげら

れている. エアコンの省エネルギー化は, エアコンのみではなくセンサによる状況認識と, その状況に最適化された断熱, 換気により大きく効率化する. 本実験では, エアコンの消費電力量を削減するため, 暖房使用期間において効率的なカーテンの開閉を行うアプリケーションの効果を調べた. シミュレーション対象は, 2月時の iHouse で得られた実データをもとに 4 人家族の世帯を想定する. 家電の消費電力量は, iHouse により計測された実データを家電設定ファイルに反映させた. 家族は会社員の父, 専業主婦の母, 中学生の長女, 小学生の長男で構成され, 平日時の行動を設定する. 行動は統計情報 [27] に基づき一般的な世帯で多くとられている行動を決定した.

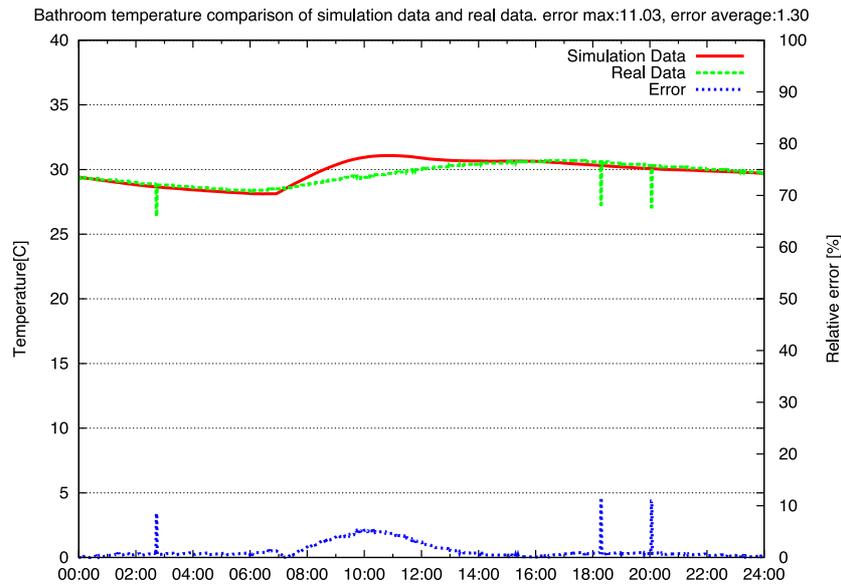


図 7 8月のエアコン動作時の温度シミュレーションの比較
 Fig. 7 Comparison of temperature with air conditioner in August.

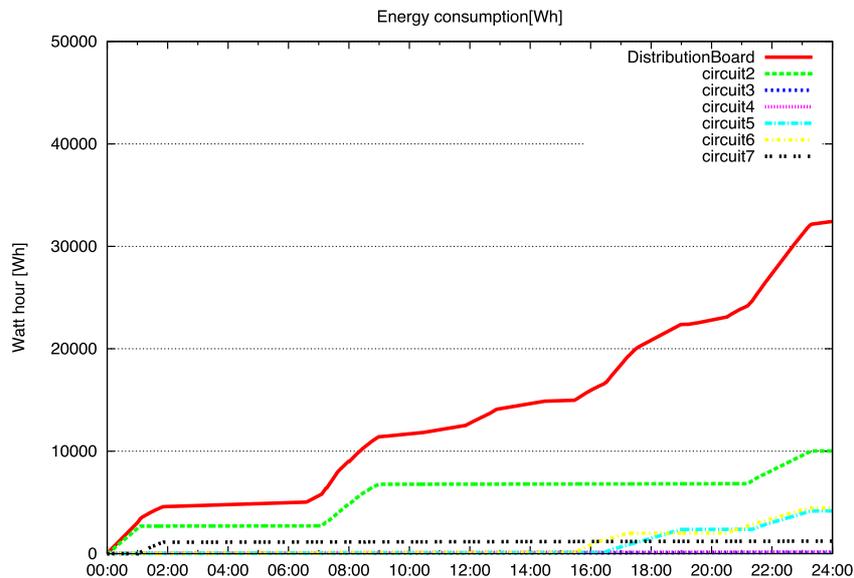


図 8 2月の通常の積算消費電力量の変化
 Fig. 8 Summation of energy consumption in February.

効率的なカーテンの開閉とは、シミュレータ上でカーテンの開閉状態によって熱収支を予測し、空調、照明などの消費電力量が低くなるよう開閉を行うことである。カーテンの開閉により断熱性の向上、採光が可能であり、室内の照明、エアコンの利用に影響する。またエアコンの運転については不快指数をもとに室内の人間が判断するよう設定した。図 9 に効率的なカーテンの開閉を行った1日の積算消費電力量の変化を、図 8 に通常の1日の積算消費電力量の変化を示す。実線の DistributionBoard は住宅全体の消費電力量を、破線、点線の Circuit は上からリビング、和室、主寝室、洋室1、洋室2、予備室の分岐回路（エアコン）の消費電力量である。結果より効率的にカーテン

を開閉することで7.97%の消費電力量の削減効果を見込むことができた。このように本シミュレータにより、ユーザが想定する様々な家族、住宅における HEMS アプリケーションの効果を、パターンやバリエーションを変更した網羅的なシミュレーションにより検証可能となった。

5. まとめ

本論文では、次世代の住宅におけるエネルギーマネジメントを検証するための、HN、HEMS の多様性、複雑性に対応する実証的なシミュレータの提案と実装について述べた。実験住宅 iHouse、TANS2 における HN システムの構築およびアプリケーション開発の知見から HN を住宅、家

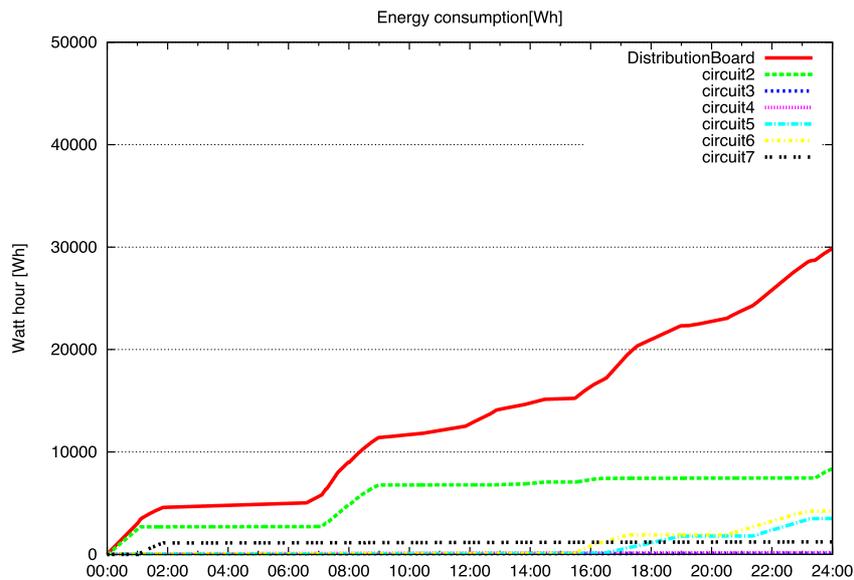


図 9 2月の効率的なカーテン開閉時の積算消費電力量の変化

Fig. 9 Summation of energy consumption with effective curtain control in February.

表 1 環境シミュレータの平均相対誤差結果

Table 1 Averages of relative error of environment simulator.

月	8月	9月	10月	11月
窓閉め時	6.32	3.71	5.73	7.80
窓開け時	4.88	3.96	8.94	13.08
エアコン動作時	4.77	4.95	4.76	—

電, 環境, 電力, 人間の5要素に分類し, 各要素を再現するシミュレータを開発した. シミュレータは実証実験では得ることの困難な, 様々な種類の世帯, 地域, 季節のシミュレーションを繰り返し, 網羅的に実行することができる. また大規模な世帯を対象とした検証により, エネルギーマネジメントを街や全国に向けて提供した際の社会的な影響を評価することが可能となる.

評価として, シミュレータの環境要素, 電力要素, また効率的なカーテンの開閉による消費電力量削減効果について検証を行った. 結果として4カ月間のデータに対して住宅内の環境を窓の開閉, エアコンの利用というシナリオにおいて高い精度で再現した. また家電の消費電力量について検討を行い, 正確に各家電の消費電力量を再現するため頻繁に消費電力量が変化する家電について回帰分析を用いた解析を行いシミュレータへ適用した. 省エネルギーアプリケーションの例として, 状況に合わせたカーテンの開閉を行い, その消費電力量削減効果を検証した. 以上より, 提案するホームシミュレータは, HNの多様性, 複雑性を高い精度で再現すること, またシミュレータを用いエネルギーマネジメントの効果を実証的に検証可能であることを確認できた.

参考文献

- [1] Shafer, S., Krumm, J., Brumitt, B., Meyers, B., Czerwinski, M. and Robbins, D.: The New EasyLiving Project at Microsoft Research, *Proc. DARPA/NIST Smart Spaces Workshop* (1998).
- [2] Jiang, L., Llu, D.-Y. and Yang, B.: SMART HOME RESEARCH, *Proc. 3rd International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pp.659-663 (2004).
- [3] スマートハウス情報活用基盤整備フォーラム:平成21年度スマートハウス実証プロジェクト報告書, 財団法人日本情報処理開発協会電子情報利活用推進センター(オンライン), 入手先 (http://www.jipdec.or.jp/dupc/forum/eships/results/h21report_dl.html) (参照 2011-03-31).
- [4] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構:人の好みや行動パターンに応じたHEMS/BEMS技術の研究開発, 社団法人人間生活工学研究センター(オンライン), 入手先 (<http://www.hql.jp/research/before/069.html>) (参照 2011-03-31).
- [5] 経済産業省:次世代エネルギー・社会システム協議会(オンライン), 入手先 (<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/index.html>) (参照 2010-10-21).
- [6] Park, J., Moon, M., Hwang, S. and Yeom, K.: CASS: A Context-Aware Simulation System for Smart Home, *5th ACIS International Conference on Software Engineering Research, Management & Applications (SERA 2007)*, pp.461-467 (2007).
- [7] Carolis, B.D., Cozzolongo, G., Pizzutilo, S. and Plantamura, V.: Agent-Based Home Simulation and Control, *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Vol.3488, pp.59-84 (2005).
- [8] 玉井森彦, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤 実:スマートスペースを対象としたデバイス間通信シミュレータの開発, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム(DICOMO2006) 論文集, pp.689-692 (2006).
- [9] Nishikawa, H., Yamamoto, S., Tamai, M., Nishigaki, K., Kitani, T., Shibata, N., Yasumoto, K. and Ito, M.: UbiREAL: Realistic Smartspace Simulator for Systematic Testing, *Proc. 8th Int'l Conf. on Ubiquitous Computing (UbiComp2006)*, pp.459-476 (2006).
- [10] 石川和美, 諏訪敬祐:家庭用住宅システムにおける省電

- 力化技術に関する研究, 武蔵工業大学環境情報学部情報メディアセンタージャーナル, Vol.6, pp.61-67 (2005).
- [11] 松本光崇, 浜野絢子, 田村徹也, 井口浩人: 2010年のユビキタス社会のマクロ環境影響評価, エコデザインジャパンシンポジウム論文集, Vol.2004, pp.42-45 (2010).
- [12] Hokuriku-Research-Center: StarBED Project, NICT (online), available from <http://www.starbed.org/> (accessed 2011-03-25).
- [13] Nakata, J., Beuran, R., Kawakami, T., Okada, T., Chinen, K., Tan, Y. and Shinoda, Y.: Distributed Emulator for Developing and Optimizing a Pedestrian Tracking System Using Active Tags, *International Journal On Advances in Intelligent Systems*, Vol.2, No.1, pp.152-161 (2009).
- [14] 岡田 崇, 中田潤也, 金 準修, 丹 康雄: 実世界指向ホームネットワーク実証環境, 電子情報通信学会 2010年総合大会 (2010).
- [15] 岡田 崇, 中田潤也, 牧野義樹, 金 準修, Marios, S., 丹康雄: ホームネットワークにおける人間行動シミュレータ, 電子情報通信学会 2010年ソサイエティ大会 (2010).
- [16] 総務省: 情報通信統計データベースインターネット普及率の推移 (オンライン), 入手先 <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/tsuushin01.html> (参照 2011-03-31).
- [17] TELECOMMUNICATION-STANDARDIZATION-SECTOR-OF-ITU(ITU-T): ITU-T Recommendation J.190: Architecture of MediaHomeNet (online), available from <http://www.itu.int/rec/T-REC-J.190-200707-I> (accessed 2011-03-31).
- [18] UPnP-Forum: UPnP (online), available from <http://www.upnp.org/> (accessed 2011-03-14).
- [19] Digital-Living-Network-Alliance: DLNA (online), available from <http://www.dlna.org/> (accessed 2011-01-06).
- [20] ECHONET-CONSORTIUM: ECHONET (online), available from <http://www.echonet.gr.jp/> (accessed 2011-03-31).
- [21] 宇田川光弘: 標準問題の提案—住宅用標準問題, 日本建築学会環境工学委員会熱分科会第15回熱シンポジウム, pp.22-33 (1985).
- [22] 奥山博康: 熱回路網によるシミュレーションの理論と応用, 空気調和衛生工学会学術論文集, pp.541-544 (1983).
- [23] Maslow, A.H.: *Psychological Review*, No.50, pp.370-396 (1943).
- [24] 岩嶋洋平, 広瀬拓哉, 清瀬英人, 唐津 淳, 高口洋人: 夏季の外断熱集合住宅におけるパッシブ手法の快適性とその省エネルギー効果に関する研究, 2008年度日本建築学会関東支部研究報告集 (2009).
- [25] 野村幸司, 林 徹夫, 佐々木靖, 野見山修嗣: 通気工法住宅の温熱環境シミュレーション, 日本建築学会技術報告集, No.22, pp.351-354 (2005).
- [26] 総務省: ユビキタスネット社会の進展と環境に関する調査研究会報告書 (オンライン), 入手先 http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/chousa/yubi_pande/0503_houkoku.html (参照 2011-03-31).
- [27] NHK放送文化研究所: 日本人の生活時間・2005—NHK国民生活時間調査, 日本放送出版協会 (2005). ISBN4-14-009337-4.



岡田 崇 (正会員)

平成 23 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。現在、産業技術総合研究所サービス工学研究センターサービス設計支援技術研究チーム特別研究員。



牧野 義樹 (正会員)

在学中。

平成 15 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。平成 23 年情報通信研究機構北陸 StarBED 技術センター研究員。平成 23 年 10 月現在、北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程



キム ジュンスー

科学技術大学院大学高信頼ネットワークイノベーションセンター研究員。

平成 17 年 Graduate school of Information communication, Youngsan University, Korea 修士課程修了。平成 23 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程単位取得退学。平成 23 年 10 月現在、北陸先端



中田 潤也 (正会員)

て、平成 23 年より慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特任准教授、および World Wide Web Consortium アジア地域事業開発リーダー。

平成 19 年北陸先端科学技術大学院大学博士後期課程単位修得満期退学。博士 (情報科学)。ノキア・ジャパン株式会社ノキアリサーチセンターリサーチエンジニア、情報通信研究機構北陸リサーチセンター専門研究員などを経



丹 康雄 (正会員)

平成5年東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。同年より北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。同情報科学センター助教授を経て、平成13年情報科学研究科助教授、平成19年教授。計算機ネットワーク、ユビキタスコンピューティング、情報家電等に興味を持つ。電子情報通信学会、IEEE、ACM、ソフトウェア科学会、電気学会、日本神経回路学会各会員。