

Title	ホームネットワークサービスおよびそのシステムの実証的検証に関する研究
Author(s)	岡田, 崇
Citation	
Issue Date	2011-09
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/9899
Rights	
Description	Supervisor:丹 康雄, 情報科学研究科, 博士

博 士 論 文

ホームネットワークサービスおよびそのシステムの実証
的検証に関する研究

指導教員 丹 康雄 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報ネットワーク分野

岡田 崇

2011年9月

要旨

インターネットの普及により多種多様な機器がネットワーク化し、メーカーやコンテンツ事業者がPCを始めこれらの機器に対して様々なサービスを提供するようになってきた。このようなサービス提供の背景には、家庭内に構築されているホームネットワークの高度化と、ホームネットワークに対応した家電や機器が市場に増加して来たという要因が挙げられる。今後、サービスは更に高度化し、状況に合わせた最適なサービスや履歴、蓄積したデータから予測を行うサービスなど、単一のサービスや世帯のみでなく、複数のサービスや街レベルの情報が連携するようなシステムが構築されていくと予想される。対象が大規模となる技術の検証には、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、ホームネットワークの多様性、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、数万世帯を再現する実証的ホームシミュレータを提案し、その精度を実測値により評価し、更にシミュレータを用いた検証を2例示す。本シミュレータは、ホームネットワークの要素を住宅、家電、環境、電力、人の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。更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。実証的検証例として、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、高い精度でシミュレータ内に環境の再現が可能であることを確認した。また新規の HEMS の有効性を本シミュレータを用い評価し、システムの消費電力量の削減効果に対する検討を行い、更に消費電力量から家族の行動の推定を行った。本シミュレータにより、大規模な世帯を対象としたホームネットワークサービスおよびそのシステムの検証のみならず、様々な要因が関与する社会システムを検証するシミュレーションの基盤を築いた。

目次

1	はじめに	1
1.1	ホームネットワークの現状	2
1.2	関連研究	4
1.3	問題点	6
1.3.1	実証実験の課題	7
1.3.2	シミュレーションの課題	7
1.4	解決手法	8
1.5	本論文の構成	9
2	住宅のシミュレーション	11
2.1	住宅のシミュレーション要件	11
2.2	実験住宅	12
2.2.1	TANS	12
2.2.2	TANS2	15
2.2.3	iHouse	20
2.3	住宅のモデル化	21
2.4	住宅のシミュレーション	22
2.4.1	住宅の構造	22
2.4.2	部屋の構造	23
2.5	家電のシミュレーション	24
2.6	電力のシミュレーション	25
3	環境のシミュレーション	26
3.1	環境のシミュレーション要件	26
3.2	環境のシミュレーションモデル	27

3.3	数値流体力学による環境のシミュレーション	28
3.3.1	空間モデル	28
3.3.2	CFD プログラム群	29
3.3.3	可視化ツール	31
3.3.4	実時間性の検討	32
3.3.5	TANS における計測実験	35
3.3.6	TANS2 における計測実験	36
3.3.7	シミュレーションによる評価実験	42
3.4	熱力学による環境のシミュレーション	44
3.4.1	計算モデル	45
4	人間のシミュレーション	49
4.1	人間のシミュレーションの要件	49
4.2	人間のシミュレーションモデル	50
4.2.1	行動	51
4.2.2	スケジュール	56
4.2.3	欲	57
4.2.4	行動生成の流れ	61
5	実装	63
5.1	実装モデル	63
5.2	ホームシミュレーションの実装	65
6	検証	67
6.1	環境のシミュレーションの検証実験	67
6.1.1	iHouse における環境の計測	67
6.1.2	シミュレーションの設定	68
6.1.3	シミュレーション結果	68
6.1.4	精度に関する議論	70
6.2	電力と人間のシミュレーションの検証実験	72
6.2.1	アドバイス機能付 HEMS	72

6.2.2	アドバイス機能付 HEMS とシミュレータ	72
6.2.3	アドバイスが消費電力量へ与える影響の特徴量の算出	73
6.2.4	未知な住宅における消費電力量と行動の推定	81
7	議論	85
7.1	精度の高いシミュレーション	85
7.1.1	シミュレーションの規模	86
7.1.2	単一計算機上でシミュレート可能な世帯数	87
7.1.3	実世界との連携	91
7.1.4	精度の異なるシミュレーションの組み合わせ	93
7.1.5	シミュレーションのマクロモデル	93
7.2	利便性の高いシミュレーション	94
7.2.1	シミュレーションの自動化機構	95
7.2.2	繰り返しや網羅的な検証	95
7.2.3	高速なシミュレーション	95
7.3	展望	96
7.3.1	ホームシミュレータを用いて可能となる検証例	96
7.3.2	シミュレーションが切り開く新しい領域	97
8	むすび	99
	謝辞	101
	参考文献	102
	本研究に関する発表論文	110
	査読付き国際会議	110
A	コンフィグレーションファイル	112
A.1	コンフィグレーションの種類	112
A.1.1	シミュレーションに関するコンフィグレーションファイル	113
A.1.2	世帯に関するコンフィグレーションファイル	114
A.1.3	部屋に関するコンフィグレーションファイル	116

A.1.4	壁に関するコンフィグレーションファイル	118
A.1.5	家電に関するコンフィグレーションファイル	123
A.1.6	電力に関するコンフィグレーションファイル	125
A.1.7	人間の行動に関するコンフィグレーションファイル	126
A.1.8	人間の欲に関するコンフィグレーションファイル	127

目次

1.1	次世代のホームネットワーク	4
1.2	シミュレーションの概要図	10
2.1	TANS 概観	12
2.2	TANS における ECHONET システム概要	13
2.3	TANS における ECHONET システム詳細	14
2.4	TANS におけるエアコン可視化アプリケーション	15
2.5	TANS における電力可視化アプリケーション	15
2.6	TANS2 概観 1	16
2.7	TANS2 概観 2	17
2.8	TANS2 のソフトウェア	18
2.9	TANS2 のサーバーで利用するメッセージ	18
2.10	TANS2 のデモシステムの概要	19
2.11	iHouse の概観	20
2.12	住宅の 5 つのコンポーネント	22
2.13	部屋と壁の関係	23
2.14	部屋のグラフ構造	24
2.15	電力の木構造	25
3.1	TANS の図面	29
3.2	TANS の空間モデル: 100mm ピッチ	30
3.3	TANS の空間モデル: 75mm ピッチ	30
3.4	TANS の空間モデル: 50mm ピッチ	31
3.5	TANS の圧力のシミュレーション	32
3.6	TANS の速度のシミュレーション	32

3.7	TANS の温度のシミュレーション (机有り)	33
3.8	TANS の温度のシミュレーション (机無し)	33
3.9	Paraview による指定位置の解析	34
3.10	Paraview によるグラフの出力	34
3.11	TANS に設置したセンサ	36
3.12	TANS の温度の計測結果	37
3.13	TANS2 のセンサ 1	38
3.14	TANS2 のセンサ 2	38
3.15	TANS2 のセンサ配置図 1	39
3.16	TANS2 のセンサ配置図 2	39
3.17	TANS2 の温度, 湿度, 照度の可視化	42
3.18	TANS2 の 1 日の温度変化	43
3.19	TANS2 の 1 時間の温度変化	43
3.20	TANS の温度の比較結果	44
3.21	熱力学によるモデルの概略図	45
3.22	熱輸送のグラフ	45
4.1	行動の分類	52
4.2	行動種別「睡眠」の実行動を表すグラフ	54
4.3	4 人の家族のスケジュール (父)	58
4.4	4 人の家族のスケジュール (母)	58
4.5	4 人の家族のスケジュール (姉)	59
4.6	4 人の家族のスケジュール (弟)	59
4.7	Maslow の欲の分類	60
4.8	欲と睡眠との関連性	61
4.9	行動生成フロー	62
5.1	ノード, エッジ, ネットワーク	64
5.2	iHouse の熱伝導ネットワーク	65
6.1	8 月窓閉めシナリオの温度シミュレーションの比較	69
6.2	8 月窓開けシナリオの温度シミュレーションの比較	69

6.3	8月エアコン動作シナリオの温度シミュレーションの比較	70
6.4	アドバイス機能付 HEMS とシミュレータの関係	73
6.5	アドバイス前の一週間の消費電力量の変化	77
6.6	アドバイス後の一週間の消費電力量の変化	77
6.7	アドバイスの実行率	78
6.8	導出1 (冷蔵庫) の回帰診断図	82
6.9	導出2 (全体) の回帰診断図	82
6.10	乱数のシード値1の消費電力量の比較と距離	84
7.1	400世帯の住宅のシミュレーション	87
7.2	異なるネットワークに接続した200件ごとの住宅の比較	88
7.3	世帯数ごとのCPU時間使用率, メモリ	89
7.4	世帯数ごとのシミュレーション初期化時間	90
7.5	世帯数ごとのページイン, ページアウトサイズ	91

表 目 次

3.1	メッシュ間隔と要素数の違い	29
3.2	OpenFAOM のシミュレーションの設定	35
3.3	メッシュ間隔と要素数, 計算時間の違い	35
3.4	TANS2 における環境の計測実験シナリオ	40
6.1	環境のシミュレーションの平均相対誤差結果	70
6.2	世帯ごとの有効データ数	75
6.3	冷蔵庫に関する季節, アドバイスの消費電力量への影響	76
6.4	アドバイスのインデックス番号とアドバイスの対応関係	76
6.5	導出 1 (冷蔵庫) に関する季節, アドバイスの消費電力量への影響	80
6.6	導出 2 (全体) に関する季節, アドバイスの消費電力量への影響	81
7.1	テストベッド CHADANS の各計算機の性能	88

第 1 章

はじめに

インターネットの普及に伴い多種多様な機器がネットワーク化することで、メーカー、コンテンツ事業社、サービス事業者がPCを始めこれらの機器に対して様々なサービスを提供可能なインフラが住宅内にも構築されるようになってきた。このようなサービス提供の背景には、家庭内にホームネットワークを構築することが一般化してきたことや、ホームネットワークに対応した家電や機器が市場に増加してきたことに起因していると考えられる。次世代のホームネットワークでは、より高度なサービスが提供される様になると考えられており、その実現のため住宅の機器の状態を参照及び制御する技術、住宅の状況を認識する技術、状況に合わせた最適なサービスを提供する技術、蓄積したデータからユーザーの嗜好を予測する技術などの新しい技術的要求が多数挙げられている。

また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に関する要求が急速に高まっている。HEMS (Home Energy Management System) はホームネットワークによる家電の接続性とそれらの状態の参照及び制御により、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。

このような次世代のホームネットワークサービスおよびシステム、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。住宅の様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、ホームネットワーク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全て再現することが困難であるという課題がある。

このような現状をふまえ、本論文では新規に導入されるホームネットワークサービスおよびシステム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。

シミュレータは精度を高めるため、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が可能である。実システムとの連携を考慮しシミュレーション要素を住宅、家電、環境、電力、人の5要素に分類し、要素間が相互作用しながら動作し、各要素は実システムと同様のインタフェースを持つことで要素ごとに実世界の要素を取り入れることができる。また利便性を高めるため、シミュレーションの設定を変更することで異なるパラメータの実験を繰り返し実行する機能や、実行速度を実時間、実時間のN倍時間、ベストエフォートから選択する機能、また複数の計算機上での大規模な世帯のシミュレーションを実行するための自動化機構を備える。

1.1 ホームネットワークの現状

今日、インターネットは日本の世帯の92.7%に普及し [1]、住宅内の情報家電によりホームネットワークが構築されるようになってきた。現在住宅内の情報家電を接続する有線技術、無線技術の多様化によりホームネットワークは、様々はデバイスを取り込んだ複合的なシステムとなっている。有線技術では、Ethernetファミリー [2] を始めとして電力搬送通信PLC(Power Line Communication)やITU-T(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector) [3] のG.hn, HomePNA(Home Phoneline Networking Alliance) [4] が今後国際標準として住宅に普及すると予想される。また無線技術では、すでに広く普及しているIEEE802.11

ファミリーを始め、Bluetooth, IrDA, WiMAX また住宅内においてセンサネットワークを形成する ZigBee, Z-Wave が挙げられる。これらの複数のネットワークが混在する中で、アプリケーションから機器を利用するためのミドルウェアも多数存在する。日本による IEC, ISO/IEC 標準の ECHONET, UPnP, DLNA, またホームゲートウェイに利用される OSGi など用途によりそれぞれ異なる機能を有している。またホームネットワークの基本アーキテクチャとして、ネットワーク構成、機能および機能配置のモデルが ITU-T において、J.190 として勧告化されている。

これまで述べてきた技術動向は、あくまでも住宅内におけるホームネットワークの接続性や運用などに関するものが主であり、住宅外のサーバーやサービスとの連携については不十分である。ホームネットワークサービスの具体的な提供例としては、東芝フェミニティのホーム IT システム [5] やアクトビラのビデオオンデマンド [6] などサービスがサービス事業者ごとに個別に提供されている。このようなサービスを受けるためには、サービス事業者のハードウェアを購入が必要な場合や、サービス事業者の指定する機器が必要な場合、また課金の仕組みは個々のサービス事業者により異なるなどホームネットワークとサービス事業者の関係は一对多となっている。今後、このようにサービス事業者別にサービスを提供される形式から、サービス事業者を統合する中間サービス事業者 [7] と呼ばれる仲介者により、契約、サービスの選択、提供などが共通の枠組みの上で統合化されると予想されている。中間サービス事業者による次世代ホームネットワークの概要図を **図 1.1** に示す。

このような新しいホームネットワークサービスの提供の枠組みの中で、様々な新しいホームネットワークサービスが各社から提供され、中間サービス事業社に登録され、ユーザーは多数のサービスの中から好みのサービスを円滑に導入できるようになる。次世代のホームネットワークでは、住宅内の情報家電、センサにより状況を認識、また状況の情報を蓄積することにより、状況に最適なサービスの提供や、過去の履歴に基づく予測や提案をホームネットワークサービスが行うことや、ユーザーの指定するルールの自動実行など様々な高度なサービスが提供され、また発展していくことが期待できる。住宅内の状況を認識できることにより、住宅内の安心・安全を確保するためのサービスもよりユーザーにとってパー

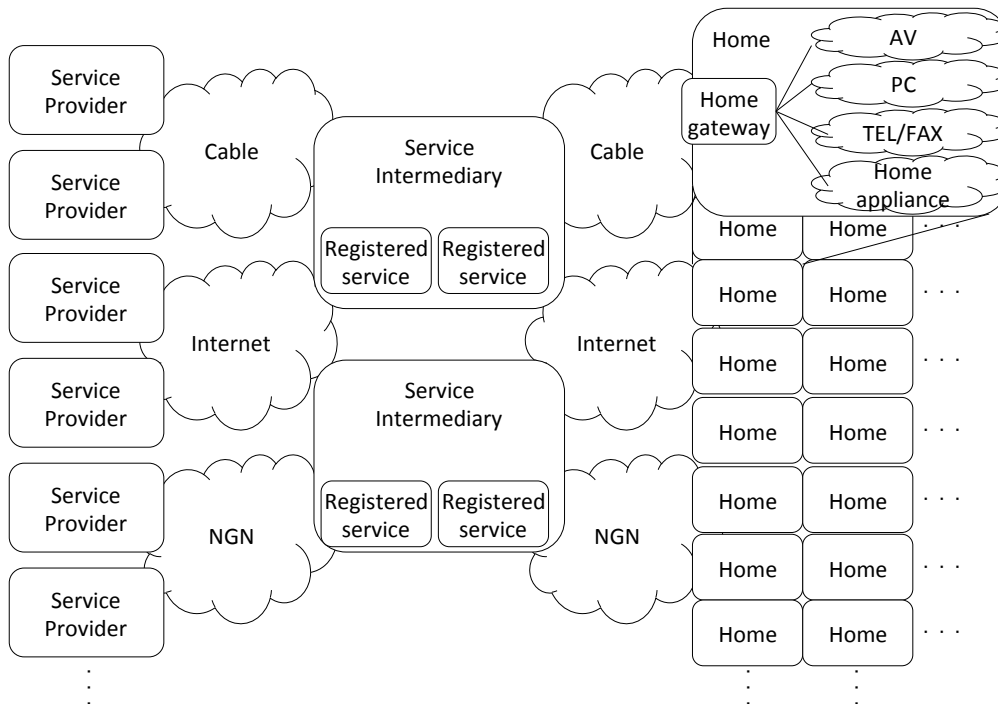


図 1.1: 次世代のホームネットワーク

ソナライズ化され、子どもや介護の必要な方々の安全、住宅の防犯がリアルタイムに対応できるようになる。また電力量の「見える化」により、現在の消費電力量をリアルタイムな実データとして確認できるようになる。情報家電の制御と電力量のネットワーク化により、省エネルギー運転や地域的な大規模な停電の防止や蓄電池、燃料電池による電力の伝送を行うエネルギーマネジメントの実現も可能である。

1.2 関連研究

ホームネットワークに関する研究はこれまで様々な研究機関で行われて来ており、Microsoft の EasyLiving [8] や MIT の House of Future など多くのプロジェクトが実施されて来た。Li らは、スマートホームに関する研究を調査し、2004 年時の本領域における研究の進捗についてまとめている [53]。ホームネットワーク、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 [57] 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、更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渡り研究されている。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のみであり、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、現実のホームネットワーク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る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。[49] 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。[61]

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検討されている [51] [52]。玉井ら [9] [10] 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元にその振る舞いが変わり、その振る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 [44] 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いるが、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 [45] 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。また筆者らは StarBED プロジェクト [56] 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来た。本プロジェクトにおいて、実時間性、実世界の再現を行うシミュレーションフレームワークの開発し、アクティブタグを用いた歩行者追跡システムの検証を行ってきた [48]。

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。

1.3 問題点

次世代のホームネットワークの実現のためには、新しいシステムの有効性や信頼性を評価するため、検証が極めて重要である。ホームネットワーク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抱える課題を列挙する。

- 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り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

以降実証実験、シミュレーションの課題について詳しく述べる。

1.3.1 実証実験の課題

ホームネットワークの対象者は住宅であり、その数は日本国では約5千万世帯に及ぶ。システムの検証を行うためにはある程度条件を限定したとしても一定数以上の大規模な検証が必要である。このような場合、実証実験による検証が行われ、得られた実データからその特性を分析する手法がよく用いられる。しかし実証実験によるデータ収集は、その規模を拡大するためには時間とコストがかかるという問題、また異なるパラメータを用い繰り返し実験を実行することやある条件について網羅的な検証を行うことが困難であるという問題がある。時間という観点では、データの収集、また検証により評価したい対象によっては年単位の実験が必要なケースもある。コストの観点では、世帯を対象とし、かつ検証の精度を求めるためには一定数以上の世帯に対し実験を行う必要があるが実験期間を考慮すると被験者の負担が大きい。このコストを削減するため、アンケートやWebによる登録を行った場合、詳細なセンサデータや家電の状態に関するデータ、消費電力量データなどの生データが得られないことや、収集したデータは実験対象者の主観的なものとなってしまいう可能性もある。また網羅性の観点では、実証実験を行う場合時間、場所、世帯（家電、間取り、家族構成）、ユーザ（プロファイル、プリファレンス）など様々なパターンを網羅的に検証することは実験対象者の規模または実験期間を大幅に拡大する必要がある。

1.3.2 シミュレーションの課題

一方シミュレーションによる検証を行う場合、ホームネットワークの多様性、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。ホームネットワークは、有線(Ethernet, PLC, 電話線, ケーブル)、無線(IEEE802.11ファミリー, IrDA, Bluetooth, ZigBeeのセンサネットワーク)といった異なるネットワークが混在し、また情報家電、センサ、アクチュエータといった異なる機器も混在する。このヘテロジニアスなシステムに対し、デバイス、サービスによって多種のミドルウェアが存在し、更にホームネットワークシステムを複雑にしている。次世代のHN, HEMSは機器同士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、更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、単純なモデルで捉えることは困難な非常に複雑なシステムと言える。この様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検証を行うために、住宅の場所、構造、季節、地域の特性、更にそこで生活する人間など様々な要素を容易に変更し、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り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

1.4 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、本提案では大規模な世帯を対象とするため単一の計算機上で多数の世帯をシミュレート可能であり、その上で精度を最大限に高めることを指針としている。精度を高める手法として、実証実験、実実験の計測結果のシミュレータへの反映することで実世界指向のシミュレーションを実現する。また実世界とシミュレータの連携を可能とするインタフェースにより、シミュレータへ実世界の情報を取り込むことやシミュレーションの結果を実世界へ反映することができる。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 [11] 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ホームネットワーク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 TANS, TANS2 でのシステム構築や iHouse での知見を元にシミュレータでは、ホームネットワークの要素を住宅、家電、環境、電力、人の 5 要素に分類した。これらの要素が互いに影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、ホームネットワーク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、家電の利用に伴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様な複数の計算機クラスタ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及びシミュレーションの構築に要する時間であるが、一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。

このようにして大規模な世帯を対象とした次世代のホームネットワークサービスおよびそのシステムの検証を実現する。図 1.2 にシミュレーションの概要図を示す。シミュレーションは計算機クラスタにより構成されるテストベッド上で実行され、単一の計算機上で複数の世帯を再現する。シミュレートされた多数の世帯は地域ごとに異なる変電所から電力を利用し、また異なる環境から影響を受ける。また住宅内では様々なホームネットワークサービスを検証するため、センサ情報や家電の状態の参照及び制御メッセージをサービス事業者と通信することで、街レベルのトラフィックや環境や電力に付随する様々な現象を再現することができる。

1.5 本論文の構成

本論文は、8章から構成される。2章では、住宅のシミュレーションについて論じ、5要素からなる住宅のシミュレーションモデルを提案する。また5要素の中の住宅、家電、電力のシミュレーションについて述べる。3章では、5要素の中の環境のシミュレーションについて述べ、実験住宅における実験シミュレーション実験について述べる。4章では、5要素の中の人間のシミュレーションについ

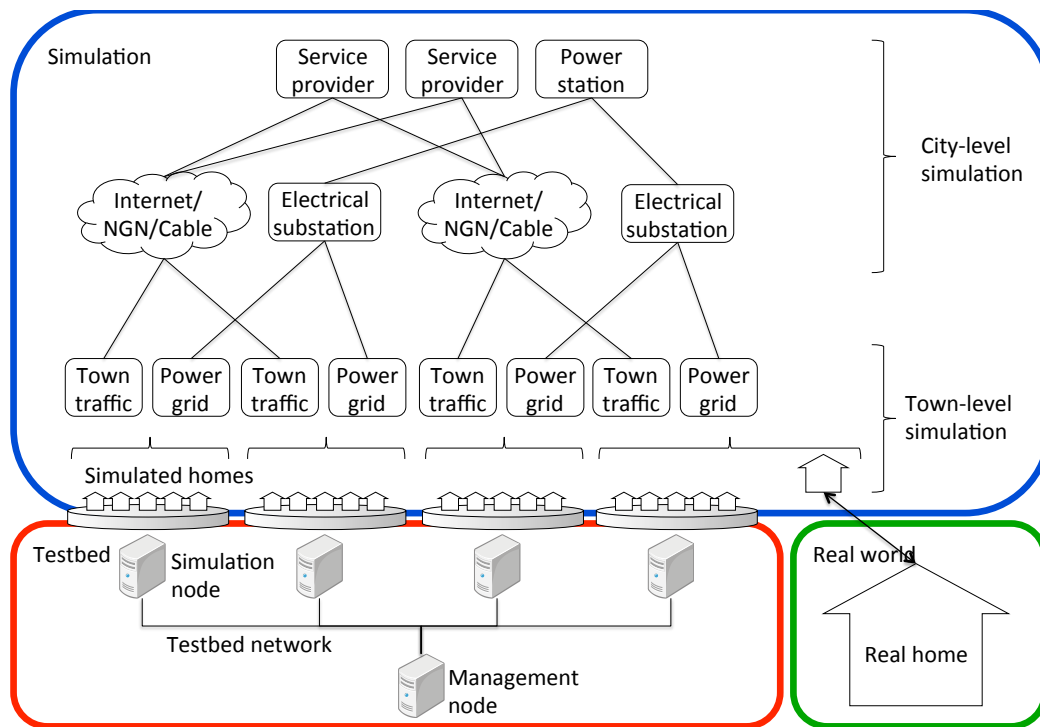


図 1.2: シミュレーションの概要図

て、人間の行動のシミュレーションモデルについて述べる。5章では、住宅のシミュレーションの実装モデルと、実装について解説する。6章では、シミュレータを用いた実証的検証実験2例について述べる。7章では、提起したホームネットワークの問題点に対する本研究の解決策について議論し、8章において全体を総括する。

第 2 章

住宅のシミュレーション

2.1 住宅のシミュレーション要件

ホームネットワークサービスおよびそのシステムを検証する住宅のシミュレーションは、前章で述べた様に利便性と精度を兼ね備えることが求められる。前章で述べた解決手法を以下にまとめる。

- 利便性
 - － シミュレーションを実行するための自動化機構
 - － シミュレーションの繰り返し実行
 - － パターンに対する網羅的な検証
 - － 非実時間時の高速なシミュレーションの実行
- 精度
 - － 実世界と同様の規模
 - － 実世界のデータの反映
 - － 実世界との連携
 - － 実システムと同様のインタフェース
 - － 実時間、または実時間の N 倍時間での実行
 - － 精度の異なるシミュレーションを組み合わせた実行

以上の要件を満たすシミュレータを構築するにあたり，次世代のホームネットワークサービスおよびそのシステムを一般化，普遍化したモデルを作成する．そのためにシミュレータが模倣する実システムに関する知見が重要となる．本章では，まず実システムである実験住宅 TANS，TANS2，iHouse について述べ，これらの実システムの構築の知見から上記の要件を満たす住宅のシミュレーションモデルを提案する．更にシミュレーションモデルで定義した，住宅，家電，電力の要素について述べる．

2.2 実験住宅

2.2.1 TANS

TANS (図 2.1) は，北陸リサーチセンターの一室に ECHONET 対応家電を設置し，ホームネットワークの実験を行うことを目的とした実験室である．TANS に



図 2.1: TANS 概観

は ECHONET ゲートウェイと ECHONET 対応エアコン，電力計及びセンサーを

設置されており，室内の状態を計測しながら家電の自動制御を行うアプリケーションの検証が可能である。

TANS において ECHONET 家電の状態の参照及び制御を確認することを目的とした ECHONET アプリケーションの動作実験，エアコン動作時の温度変化の計測実験を行った。エアコン動作時の温度変化の計測については環境のシミュレーションで詳細を記述する。ECHONET アプリケーションのテストでは，TANS を住宅内の一室と想定しエアコンの状態の取得と制御を行うシステムを構築した。また仮想的にテレビと冷蔵庫が設置されていることを想定し室内の電力をモニタリングした。図 2.2 にシステムの概要を示す。

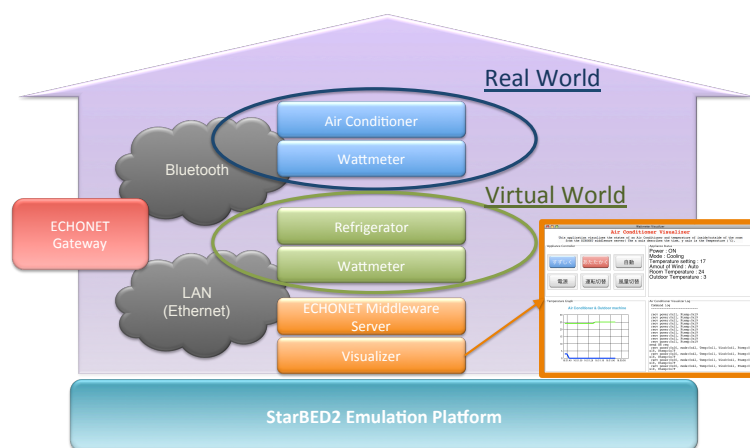


図 2.2: TANS における ECHONET システム概要

本システムの ECHONET 機器は，Bluetooth または Ethernet で通信を行い，ECHONET ゲートウェイがこの双方のメディアのブリッジングを行っている。これによりモニタリングするアプリケーション及びワットメーターサーバから ECHONET 家電の状態の参照及び制御が可能になる。図 2.2 のシステムの詳細図を図 2.3 に示す。図中の Controlling Visualizer は P C であり，以降のアプリケーションはこの Controlling Visualizer 上で実行した。ECHONET Server は Controlling Visualizer とは異なる P C 上で動作するサーバであり，Controlling Visualizer から送信される家電

の参照，制御メッセージを受信し，ECHONET ミドルウェアを通して ECHONET 電文を IT home gateway へ送信する役割を担う。

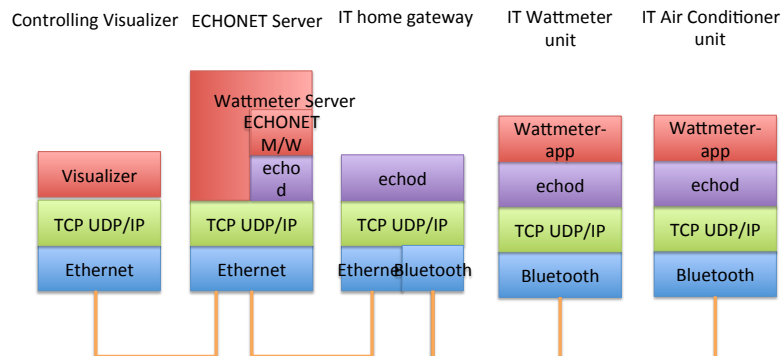


図 2.3: TANS における ECHONET システム詳細

モニタリング用アプリケーションとしてエアコン可視化アプリケーションと電力可視化アプリケーションを開発した。エアコン可視化アプリケーションは，エアコンの制御を行うリモコン風ユーザインタフェースとエアコンの状態の取得及びエアコンの吹き出し口，室外機の温度センサ情報を取得する機能を備えている。状態と温度の取得は一定期間ごとに ECHONET 電文を送信し，結果をロギングする。また制御ボタンが押された際もエアコンに向けえ ECHONET 電文を送信する。図 2.4 は 2 月時の実験のものである。

電力可視化アプリケーションは，本システムのエアコン，テレビ，冷蔵庫の消費電力量の取得と制御を可視化する。図 2.2 の通りテレビ，冷蔵庫は仮想的な家電である。エアコンは TANS に設置されている実際の家電であり，消費電力量は電力量センサから取得する。図 2.5 に示す通り，消費電力量の変化及び制御ボタンにより家電のオンオフが可能である。

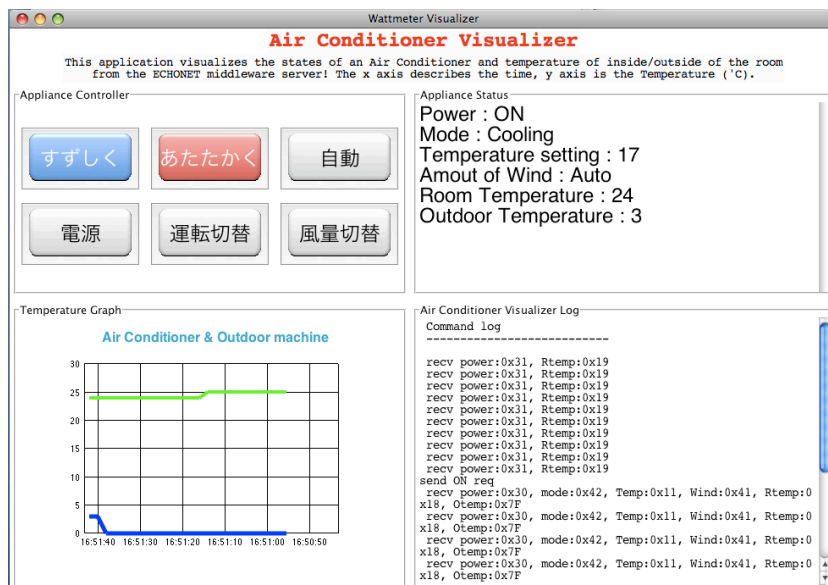


図 2.4: TANS におけるエアコン可視化アプリケーション

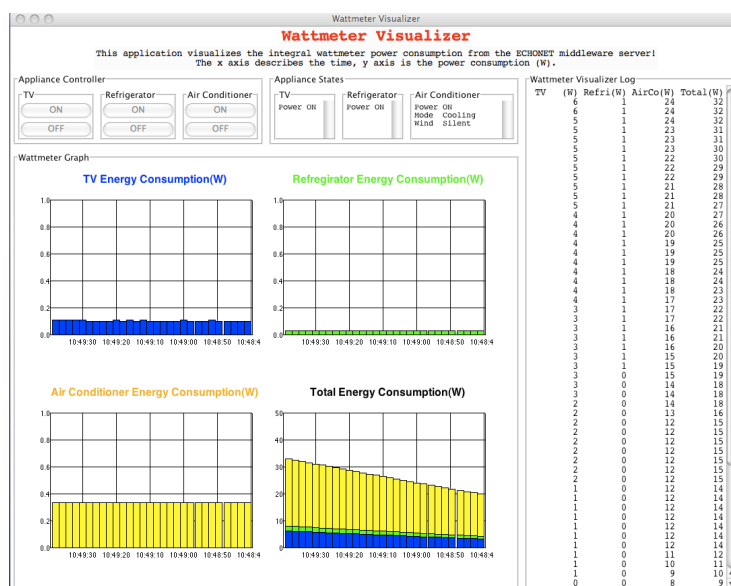


図 2.5: TANS における電力可視化アプリケーション

2.2.2 TANS2

TANS2 は、隣接した二棟のプレハブ住宅に電動住設設備、ECHONET 家電、センサを設置した実験住宅である。(図 2.6 図 2.7) 二棟の住宅は全く同一の住宅が

隣接して建設されており、形状のみでなく、住宅内の家電においても全く同一のものが設置されている。二棟の同一の住宅を利用することで、パラメータを変化させながら比較実験を行うことが可能である。



図 2.6: TANS2 概観 1

TANS2 には電動住設設備としてカーテン、窓、オーニング、ECHONET 家電として ECHONET ゲートウェイ、照明、エアコン、電気錠、インターフォンが設置されている。TANS 同様 TANS2 の設備及び家電もネットワーク化されており、状態の参照、制御が可能である。電動住設設備はそれぞれ制御用ハードウェアを通してネットワークから制御できるよう設計されている。

TANS2 において、ホームネットワークサービスの円滑な実装とテストを可能とするため、ECHONET ベースのメッセージを用いて電動住設設備と ECHONET 家電を制御、参照するシステムを構築した。システムの通信媒体及びソフトウェアの機能の概略図を **図 2.8** に示す。本システムは Client Node 中の libmessage を通し ECHONET 電文を Server Node へ送信することで TANS2 の家電、電動住設設備の状態の参照と制御を行うシステムである。送信された ECHONET 電文は、Server Node 中の OSGi バンドルとして実装された Message Handling Server が処理



図 2.7: TANS2 概観 2

し宛先の機器を調べる。宛先の機器がECHONET家電であれば電文をECHONET Middleware Serverへ転送する。これ以降の処理はTANSのシステムと同様であり、ECHONET Middleware ServerがECHONET電文をECHONET gatewayへ送信しEthernetからBluetoothへのブリッジングにより各家電へECHONET電文が送信される。また宛先の機器が電動住設設備であれば宛先の機器ごとに処理を行う。機器がカーテンの場合curtaindへ、窓の場合windowdへ、オーニングの場合Xportへそれぞれ指定のメッセージを送信する。XportはEthernetとシリアル(RS-232)のブリッジングを行う機器である。元のECHONET電文にはカーテン、窓、オーニングのどの機器を開閉するかを指定できるようなEOJ、プロパティを独自に設定した。例えば西向きのカーテンを開ける、といった制御が可能である。

本システムのECHONETベースのメッセージは、ECHONETのSET及びGETリクエストに相当する処理を仲介し、TANS2内の電動住設設備とECHONET家電に送信する。図 2.9 にメッセージフォーマットを示す。基本的なメッセージフォーマットはECHONET電文を踏襲しており、厳密な指定をする箇所はEBC, DEOJ, ESV, EDTである。ECHONET家電向けのメッセージは、DEOJで指定した家

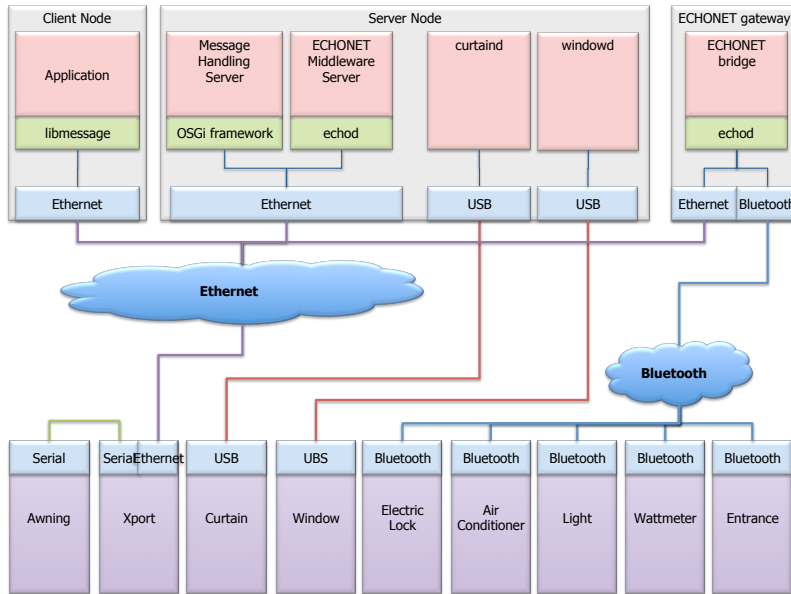


図 2.8: TANS2 のソフトウェア

EHD (1byte) 0x80	SEA (2byte) 0x0000	DEA (2byte) 0x0000	EBC (1byte) 0x0A	OHD (1byte) 0x82	SEOJ (3byte) 0x000001	DEOJ (3byte) 0x013001	EPC (1byte) 0x30	ESV (1byte) 0x61	EDT (0~247byte) 0x42
------------------------	--------------------------	--------------------------	------------------------	------------------------	-----------------------------	-----------------------------	------------------------	------------------------	----------------------------

EBC: OHD以降のメッセージ長(10byte)
 DEOJ: 宛先オブジェクト指定(エアコンオブジェクト)
 EPC: プロパティ指定(電源)
 ESV: サービス指定(書き込み)
 EDT: データ指定(電源オフ)

図 2.9: TANS2 のサーバーで利用するメッセージ

電があれば上記の EBC, DEOJ, ESV, EDT をコピーし, それ以外の箇所は適切な値が利用される. 電動住設設備については ECHONET オブジェクトのスーパー

クラスの機能を継承し，簡単なオンオフの処理を受け付ける．電動住設設備向けのメッセージは，あらかじめ電動住設設備の DEOJ をサーバーに登録することで，電動住設設備宛の DEOJ をサーバーが受信した際，**図 2.8**にあるように適切な通信媒体宛にメッセージが送信される．例えば窓を開けるメッセージの場合，サーバーに接続している USB 宛に制御メッセージを送信する．

このように統一したメッセージにより家電を制御できるシステムを構築することで，家庭内の状況の取得，家電の制御のオートメーションが可能となる．本システムを用いて StarBED2 プロジェクトにおいて家庭内の状況を見ながら遠隔から家電の状況の取得及び家電の制御を行うデモンストレーションを行った．デモンス

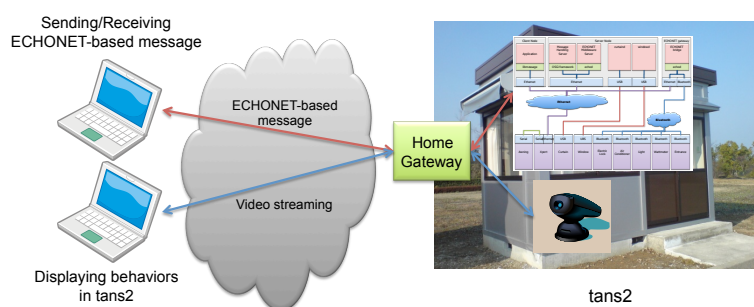


図 2.10: TANS2 のデモシステムの概要

トレーションでは，TANS2 内に上記のシステムと Web カメラを設置し，遠隔地から Web カメラの様子を写しながら，PC またはタッチパネルを用いて家電を制御した．PC またはタッチパネルは**図 2.8**に記述されている Client Node の libmessage を利用し**図 2.9**の形式のメッセージをサーバーに向けて送信する．このようにして，遠隔地から窓の開閉，カーテンの開閉，オーニングの開閉，照明のオンオフ，エアコンの制御，電気錠の制御，インターフォンの状況の取得を実演した．

また TANS2 では，多数のセンサを用いた環境のシミュレーションの実験を行っ

たが、これは環境のシミュレーションで述べる。

2.2.3 iHouse

iHouse は、石川県能美市に建設されている木造二階建てのホームネットワークの実証的検証を目的とした実験住宅である。iHouse は TANS, TANS2 とは異なり一戸建ての住宅であり、住宅用標準問題 [11] に準拠している。図 2.11 に iHouse の概観を示す。



図 2.11: iHouse の概観

iHouse には TANS, TANS2 で述べた全ての家電が ECHONET 家電として設置されており、全ての部屋に温度、湿度、照度、人感センサが設置されている。また電力計センサが全ての系統に設置され、UPnP/ECHONET ゲートウェイを用い UPnP を通して全ての家電、センサからの情報を収集することが可能である。iHouse では定期的に計測実験を行い、季節ごとの住宅に関する様々なデータを収集した。本データは、6章の検証において実データとして利用した。

2.3 住宅のモデル化

これまで述べた実験住宅のシステムの構築の知見に基づき，住宅のシミュレータを構築するにあたり，住宅を「住宅」「家電」「環境」「電力」「人間」の5つのコンポーネントに分類した．5つのコンポーネントとその関係を図 2.12 に示す．

- 住宅

住宅の構造や家電に該当しない設備を定義する．住宅の部屋数，部屋の位置関係，屋根，壁，窓，カーテン，サッシ，オーニングなどの構造と仕様(大きさ，向き，素材)の情報を管理する．これらの情報は家電，環境，人間のコンポーネントにより参照される．

- 家電

住宅内の家電を定義する．家電の種別は ECHONET オブジェクトの記述を参考とし，ECHONET オブジェクトに記載の無いものは独自に定義する．詳細は家電のシミュレーションで述べる．

- 環境

住宅内の部屋ごとの物理環境，また住宅外の物理環境を定義する．住宅内の環境は部屋ごとに独立しつつ，部屋間，また家電，人間と影響を及ぼし合う．詳細は環境のシミュレーションで述べる．

- 電力

住宅における電力系統，また電力会社までの電力を定義する．電力会社を根とした木構造を形成する．詳細は電力のシミュレーションで述べる．

- 人間

住宅内における家族の行動を定義する．個性を持ち，周囲の状況に応じた行動をし，また家電，環境，人間と影響を及ぼし合う．詳細は人間のシミュレーションで述べる．

個々のコンポーネントの独立性を保つことで，シミュレータのみでなくシミュレータの代わりに実システムを利用したり，他の研究で利用されているシミュレー

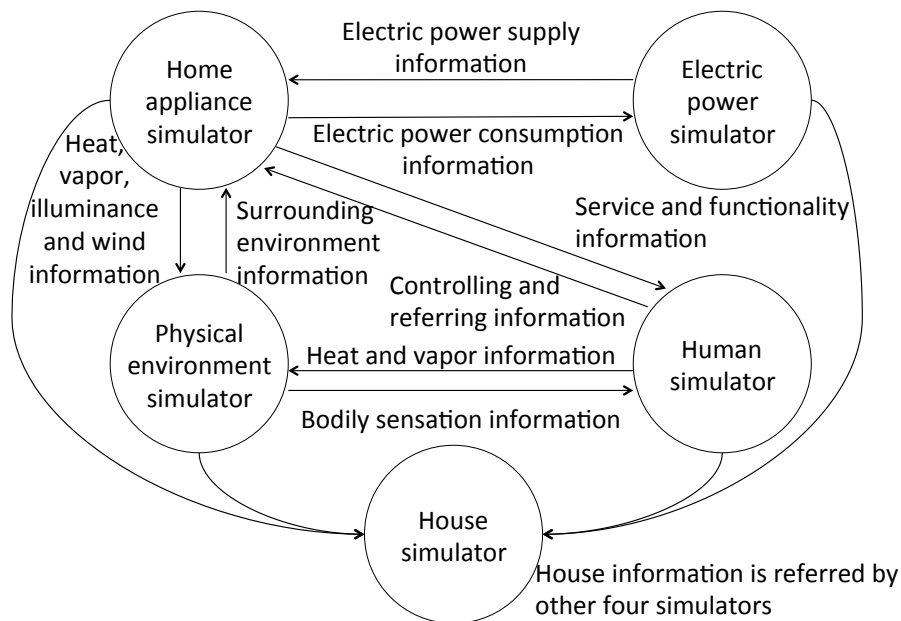


図 2.12: 住宅の5つのコンポーネント

タを利用することが可能になる。例えば住宅，家電，電力については開発したシミュレータを利用し，環境については実システムからリアルタイムに取得できるセンサデータを利用することができる。またそれぞれのコンポーネントのインタフェースを定義することで，コンポーネント間の相互作用を実現する。

2.4 住宅のシミュレーション

前節で述べた住宅のモデル化に基づき，本節では住宅のシミュレーションについて述べる。住宅のシミュレーションは，家電，環境，電力，人間といったコンポーネントが作用する住宅の大枠を管理している。大枠とは住宅の構造，部屋の構造などを表し，それらの物理的仕様についても細かく設定できる。

2.4.1 住宅の構造

住宅の構造は部屋同士及び外部との連結により構成されている。ここで外部とは外気や地面を指す。また部屋とは，壁により仕切られた一室を指す。壁とは室

内の内壁，外壁，屋根，床更にドア，障子，窓，カーテンを含む．この構造の定義は後述する環境のシミュレーションにおいて，住宅の構造と環境における現象を切り分けている．部屋と壁の関係を図 2.13 に示す．

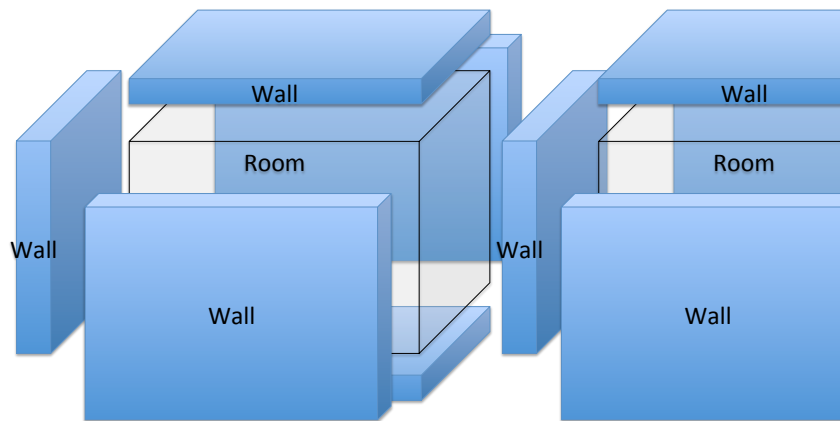


図 2.13: 部屋と壁の関係

2.4.2 部屋の構造

部屋は3次元の直方体または複数の直方体の連結した構造で定義され，縦，横，高さの長さにより形状が決定される．また部屋に隣接する壁は，上記した種別，縦，横，方位，隣接する部屋により決定される．壁の性能は名前で指定し，材質，比熱などの環境に関する性能が別途指定される隣接した部屋同士はグラフ構造で指定し，ドアや通路の有無により部屋のグラフがシミュレータ内に生成され，人が移動する際参照される．図 2.14 に部屋のグラフ構造の例を示す．

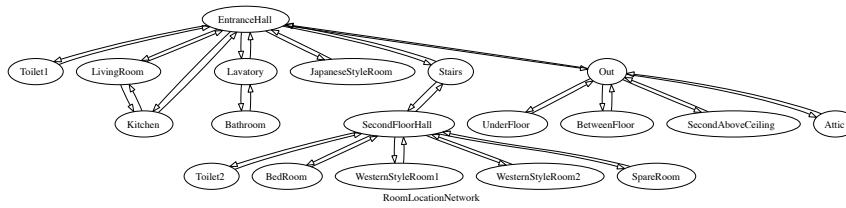


図 2.14: 部屋のグラフ構造

2.5 家電のシミュレーション

住宅の家電をシミュレートするにあたり、実験住宅 TANS, TANS2, iHouse で利用されている ECHONET をベースとした家電のモデル化を行った。これは家電のシミュレーションのインタフェースを実物と同一のものとすることを目的としており、またシミュレーションの振る舞いをインタフェースレベルで実物を模倣する。TANS, TANS2, iHouse におけるホームネットワークシステムをシミュレートする際、実物とシミュレーションを混合したシミュレーションが可能である。

家電が ECHONET としての振る舞いをすると同時にシミュレータ内において、家電は家電としての機能による影響を他のシミュレーションコンポーネントへ与えることが必要である。例えば、照明であれば室内を明るくし、その明るさはセンサによってセンシングされる必要がある。住宅内の人は部屋が暗ければ照明を点けるであろうし、日光により室内が十分に明るければ照明をわざわざ点けないであろう。エアコンの例であれば室内を涼しくまたは暖かくし、住宅内の全てのエアコンがフルパワーで動作した場合、ブレーカーは落ちるかもしれない。このような現象を再現するため、家電のシミュレーションは図 2.12 に示す様に環境、電力、人間と相互関係性を持つ。家電がどの要素とどれくらいの相互関係性を持つかは家電の種別、機種により異なる。例えば 6 畳用のエアコンと 20 畳用のエアコンでは温度変化も消費電力量も全く異なる。

本シミュレータでは、家電の一般的な機能、動作については ECHONET を参考とし、その機種、性能については別途指定できるように設計し、機種及び性能を指定することで多種の家電をシミュレータ内にインスタンス化できる。

2.6 電力のシミュレーション

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)は今後のエネルギーマネジメントにおいて非常に重要な技術である。住宅をシミュレーションする際、住宅における消費電力量を正確に再現することは、このような技術課題への必須要件と言える。本シミュレータは、情報家電、センサ、アクチュエータなどの電力を利用して動作する機器を全て機器からの電力の需要と電力のシミュレーションからの電力の供給によって動作するように設計している。電力は電力会社、住宅の分電盤、系統、電源コンセントが木構造となっている。木構造を図 2.15 に示す。

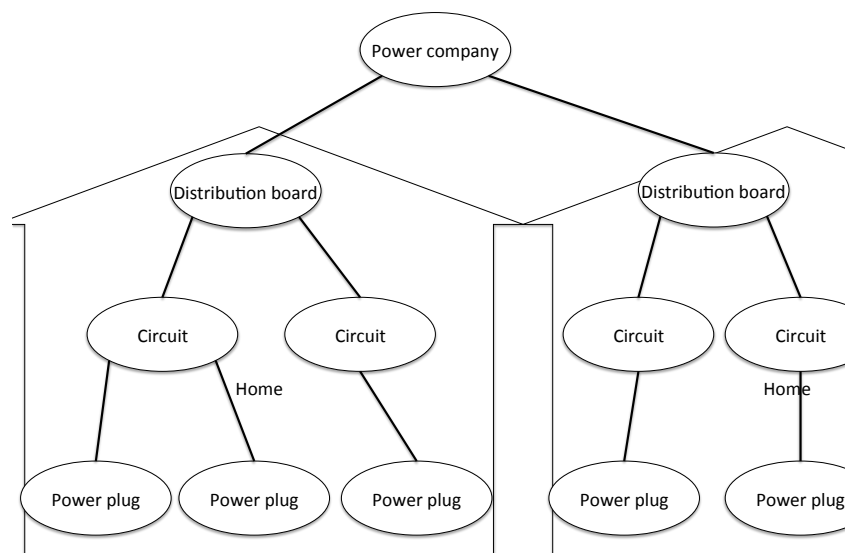


図 2.15: 電力の木構造

図では電力会社から住宅の分電盤が直接接続しているが、木構造はコンフィグを変更することで柔軟に変更できる。木構造の葉は、上流、下流に電力を供給する機能を有しており、下流から電力の需要、上流から電力が供給される。葉の性能もコンフィグにより指定可能であり、電圧や電流制限などの値を設定可能である。

第 3 章

環境のシミュレーション

本章では、住宅を取り巻く環境に関するシミュレーションについて述べる。これらの環境情報は、周辺の要素(例えば家電、人間など)と互いに影響を及ぼし合いながら、その状態を変化させる。住宅を取り巻く環境とは、住宅内外の温度、湿度、照度、圧力、風速、風向などを指し、またこれらに影響を与える要因、天気、気候、日射などを含む。

3.1 環境のシミュレーション要件

近年ユビキタスコンピューティング、ホームネットワーク、クラウドコンピューティングなど多種の領域において、状況を認識することの要求が高まり、状況を認識するためのデータ収集基盤が構築されつつある。これらのデータには、サービス利用のログや購買履歴といった計算機内の情報のみではなく、その場の温度や湿度、その場に人がいるか、といった実空間に関連する情報が大量に含まれ、これらの実空間に関連する情報は、多種多量のセンサとセンサネットワークによって収集されている。

次世代のホームネットワークのサービスを検証するためには、このようなセンサによって収集される実世界の生データが必要不可欠であり、この生データの計測元である環境はサービスの挙動によって動的に変化する。例えばあるホームネットワークサービスが住宅内の温度、湿度をセンシングしながら空調機器を動作させる場合、空調機器により住宅内の温度、湿度が変化し、更にその変化に伴いサー

ビスの振る舞いも変化する。同じサービスの検証においても、住宅は建設されている地域により気候はもちろん住宅の構造も異なる。このような住宅ごとに異なる環境への影響をふまえた環境の計算モデルが、ホームネットワークの検証には必要である。

前章で述べたホームネットワークシミュレータへの要件と合わせ、この環境の計算モデルは以下の要件を満たす必要がある。

- 温度、湿度、照度などの住宅を取り巻く環境情報をシミュレートする
- 環境情報は、天候だけでなく周囲の家電や人間の影響を受けながら変化する
- 環境のシミュレーションは、実世界とのインタフェースを持つ
- 環境情報の計算は、実時間または実時間の N 倍時間で計算する

3.2 環境のシミュレーションモデル

環境のシミュレーションには多数の既存研究、ソフトウェアが存在する。温度や湿度を厳密に計算する場合、数値流体力学 (CFD: Computational Fluid Dynamics) を用いる研究が多く、また計算結果の精度も高い。しかし、この手法はモデルによるが一定の精度の計算結果を得るためには多大な計算量を要するため、本研究の要件にある実時間内での計算に対し不向きであると言える。数値流体力学の本質は、有限要素法や有限体積法による微分方程式と解の収束によるものであり、計算量を減らすためには、微分方程式をより簡略なものにする、であるとかシミュレート対象の部屋のモデルをより簡略なものにすることによって計算時間を短縮できる。

一方建築学会では、物理的な熱伝導、熱力学によるモデルが多数提案されており、精度の高い実験結果も報告されている。

本研究では、上記の 2 通りの手法の両方を取り入れ、実験の目的、対象に合わせてモデルを選択できるように環境のシミュレーションルの設計を行った。両モデルとも環境のシミュレーション結果を外部プログラムに対し同一のインタフェースで参照できるよう設計し、中身のモデルを取捨選択することができる。また数

値流体力学のモデルでも，微分方程式や部屋のモデルを変更することで，計算の精度，時間を調節することが可能である．数値流体力学，熱力学の両モデルともに，シミュレーション時間の設定による計算時間の短縮も可能である．

3.3 数値流体力学による環境のシミュレーション

本節では，環境のシミュレーションを数値流体力学によって解く手法について論じる．数値流体力学による環境のシミュレータ (以下 CFD 環境シミュレータ) は，シミュレーションターゲットとなる空間の環境情報をシミュレートするソフトウェアモジュール群である．CFD 環境シミュレータは，空間モデルと CFD プログラム群，可視化ツールから構成される．空間モデルは，シミュレーション対象の室内，家電，家具をモデリングする．CFD プログラム群は，シミュレーション対象の温度や湿度などの物理環境をシミュレートするプログラム群である．可視化ツールは空間モデル，CFD プログラム群を用いてシミュレートした結果を可視化するツールである．CFD 環境シミュレータは，オープンソースの CFD ツール集である OpenFOAM [17] を利用して開発した．モデリングされた空間モデル上の環境情報を，CFD プログラム群を用いてそれぞれ計算する．空間モデル，CFD プログラム群は，それぞれ異なる詳細度を表現可能であり，更に実時間性をもったシミュレーションが実現可能である．以下に空間モデル，CFD プログラムの詳細を記述する．

3.3.1 空間モデル

空間モデルは，シミュレーション対象の空間図面を元に作成されたモデルデータである．空間モデルは，CFD プログラム群で利用する事を前提とする．ここでは，具体的に北陸リサーチセンター内の一室 TANS をモデリングし，空間のメッシュデータを作成した例について述べる．室内の形状は直方体状であり，キャビネット，机，エアコンが配置されている．メッシュデータは複数の異なる詳細度のシミュレーションを実現するため，室内に机を置く場合と置かない場合，メッシュの間隔を複数選択できる．以下の図 3.1 にシミュレーション対象 TANS の図

面，**図 3.2**，**図 3.3**，**図 3.4** にそれぞれ空間を 100mm，75mm，50mm ピッチに分割した空間モデル図を示す。

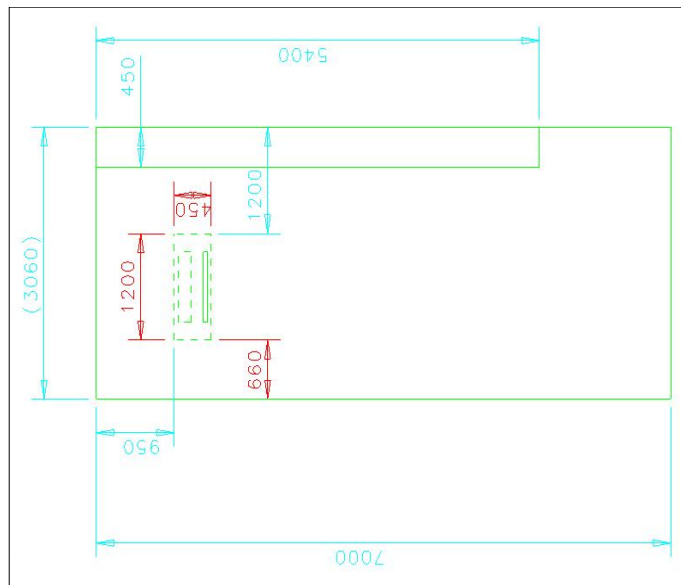


図 3.1: TANS の図面

メッシュの間隔を変更する事でシミュレーションの詳細度を変更する事が可能となる。メッシュの間隔を変更した際の詳細度は，空間を表現する要素数で決まる。以下の**表 3.1** にメッシュ長を 50mm，75mm，100mm とした場合の要素数を示す。

表 3.1: メッシュ間隔と要素数の違い

100mm ピッチ (机有り)	75mm ピッチ (机有り)	50mm ピッチ (机有り)	50mm ピッチ (机無し)
77392	168027	506529	505909

3.3.2 CFD プログラム群

CFD プログラム群は，シミュレーション対象の温度や湿度などの環境情報をシミュレートするプログラム群である。シミュレーション対象となる環境は温度，湿

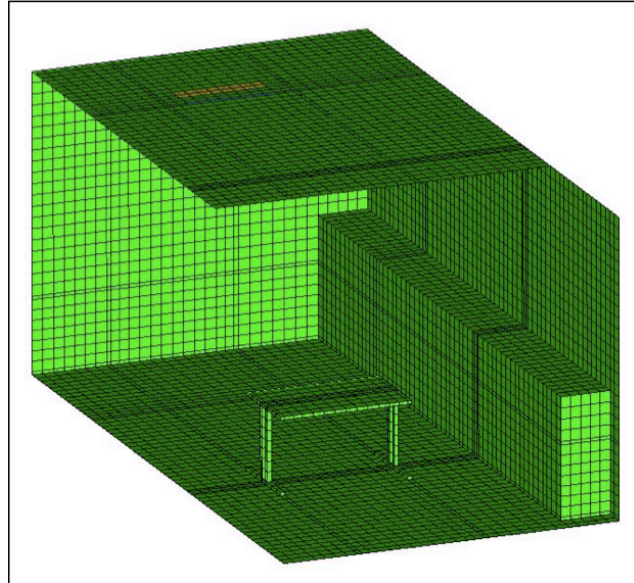


図 3.2: TANS の空間モデル: 100mm ピッチ

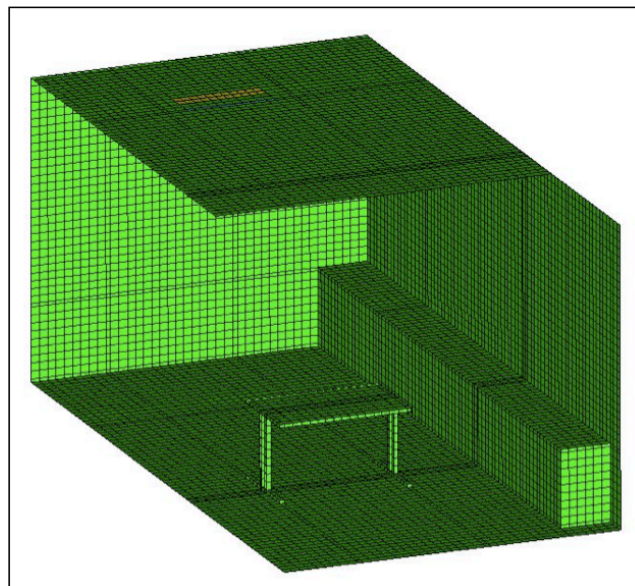


図 3.3: TANS の空間モデル: 75mm ピッチ

度, 圧力, 速度である. 環境のシミュレーションには, 複数の異なる詳細度のシミュレーションを実現するため, 異なる差分スキームの微分方程式を開発した. 温度

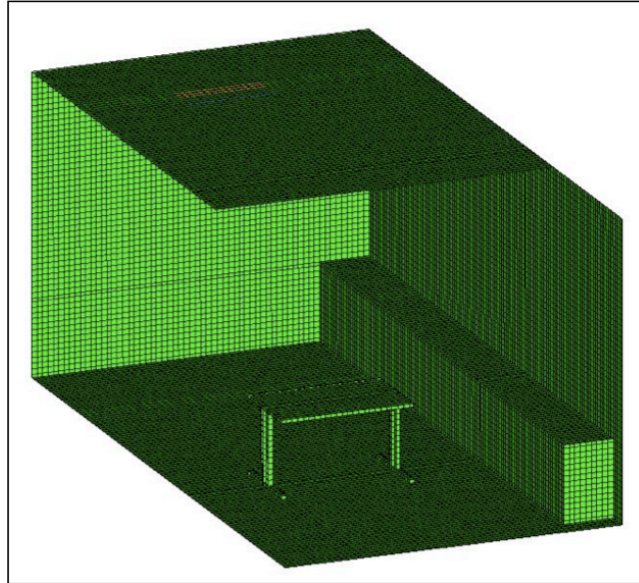


図 3.4: TANS の空間モデル: 50mm ピッチ

のシミュレーションには圧縮性乱流・浮力流用の非定常コードを、圧力、速度のシミュレーションには、非圧縮性乱流コードを用いた。以下の図 3.5 に圧力、図 3.6 に速度、図 3.7、図 3.8 に温度のシミュレーションの様子を示す。

それぞれの環境シミュレーションは、各々ある一定時間内に OpenFOAM の仮想時間上の 1 イベントループ処理を終了することを保証することで、実時間性をもったシミュレーションが可能となる。

3.3.3 可視化ツール

可視化ツールは、空間モデル、CFD プログラム群を用いてシミュレートした結果を可視化するツールである。可視化には Paraview [16] を利用した。Paraview は、シミュレーション結果の詳細な解析も GUI で行う事できる。例えば指定した位置の解析結果の出力や (図 3.9)、選択したポイント／セルのグラフ出力 (図 3.10) が可能である。

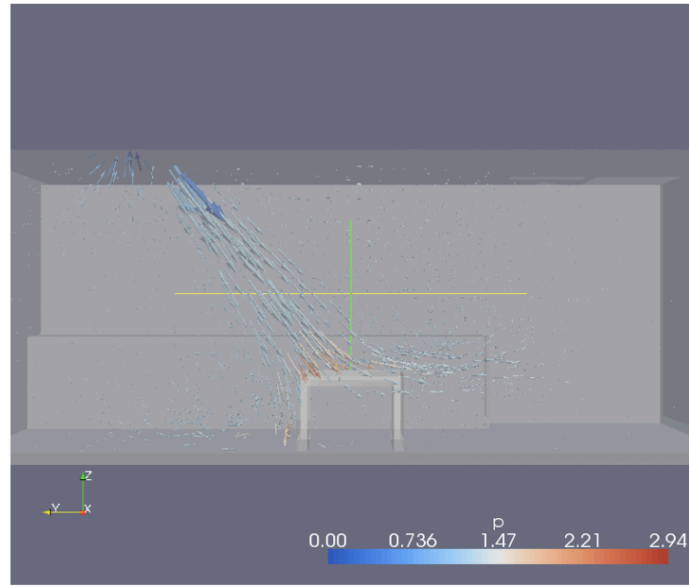


図 3.5: TANS の圧力のシミュレーション

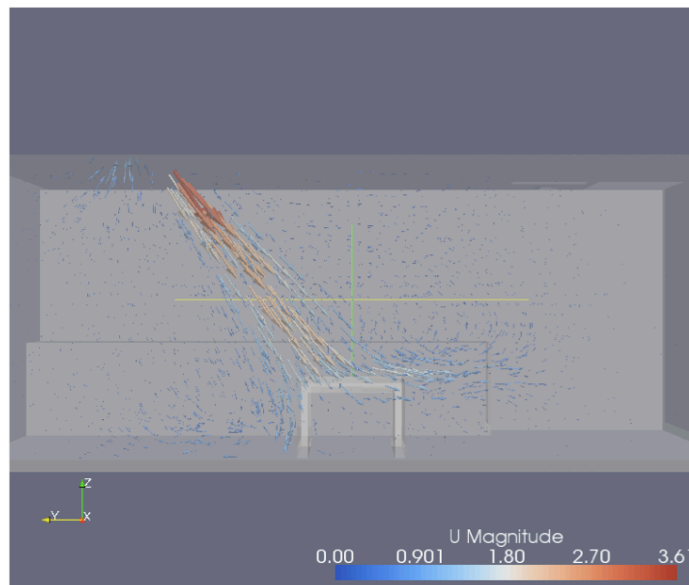


図 3.6: TANS の速度のシミュレーション

3.3.4 実時間性の検討

シミュレーションターゲットの空間モデルに対して、計算時間を計測するために表 3.1 に挙げたメッシュ間隔毎のモデルを利用しシミュレーションを実行した。

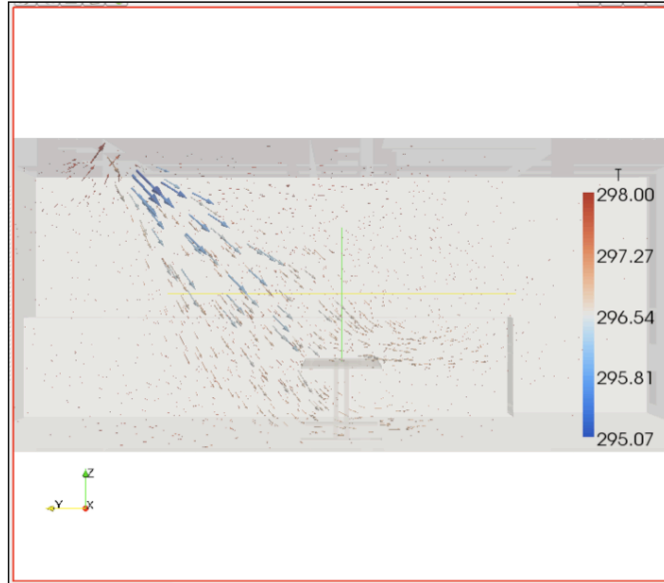


図 3.7: TANS の温度のシミュレーション (机有り)

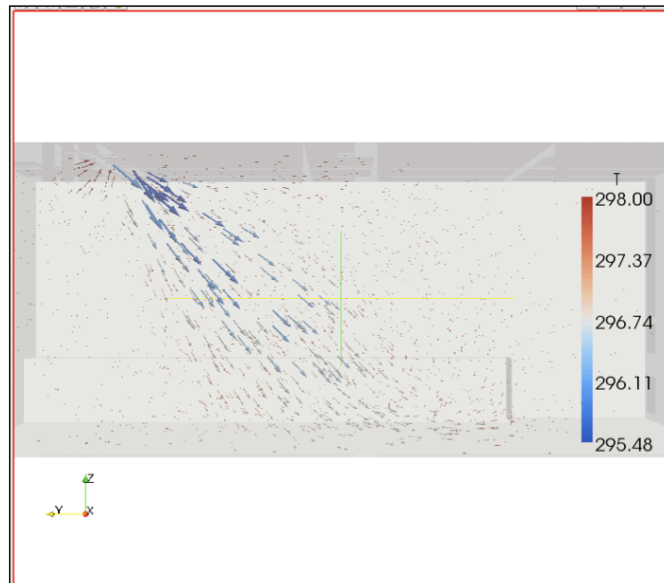


図 3.8: TANS の温度のシミュレーション (机無し)

シミュレーション対象の環境情報は温度を計測した。OpenFOAMにおけるシミュレーション実行時の設定を以下の表 3.2 に示す。

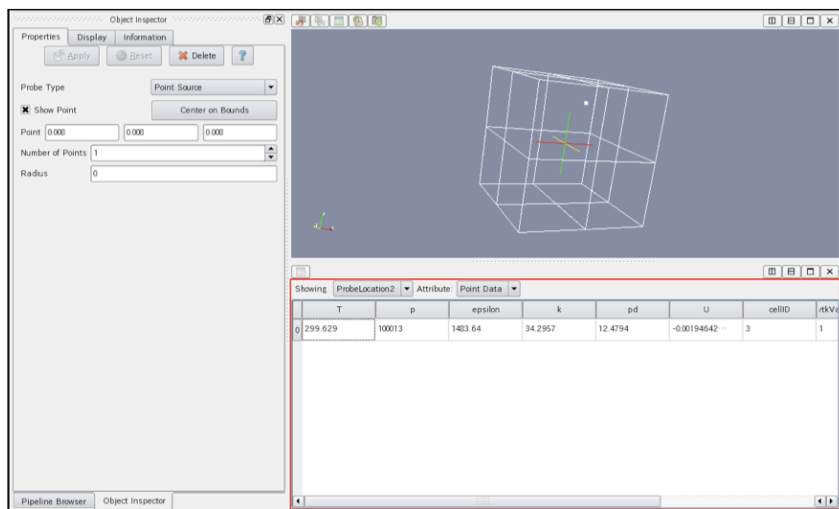


図 3.9: Paraview による指定位置の解析

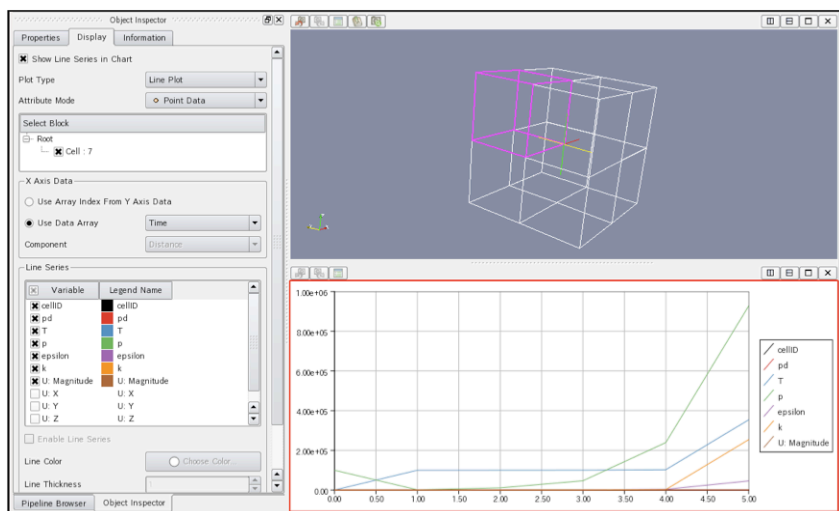


図 3.10: Paraview によるグラフの出力

シミュレーションにはCPU2.4GHz, メモリ 1GB のマシンを利用した。以下の表 3.3 にシミュレートした空間モデル設定と計算時間を示す。

表 3.2: OpenFOAM のシミュレーションの設定

OpenFOAM バージョン	1.5
乱流ソルバ	壁関数付き標準 k- ϵ モデル
計算ソルバ	buoyantFoam
時間項	PISO 法 (非定常)
流入条件	速度: 4m/sec, 温度: 293K
流出条件	一定
初期条件	温度:298K, 気圧: 100000kg/m * sec ²
解析時間	10sec
解析時間間隔	0.01sec

表 3.3: メッシュ間隔と要素数, 計算時間の違い

	100mm ピッチ (机有り)	75mm ピッチ (机有り)	50mm ピッチ (机有り)	50mm ピッチ (机無し)
要素数	77392	168027	506529	505909
計算時間 (H)	1	1.9	8.6	9

本シミュレーションでは 10 秒のシミュレーションに対して最短で 1 時間の実行時間がかかった。100mm ピッチのモデルと 50mm ピッチのモデルを比較すると計算時間が 1/9 になっている点からメッシュ長は計算時間に大きく影響を与える。

しかし表 3.3 のように, CFD のプログラムを単純に動作させるだけでは実時間の制約を守ることが非常に困難であることが分かる。この問題に対し, 複数の計算機クラスタを利用した実時間制約を保証する CFD プログラム用ミドルウェアを開発した。

3.3.5 TANS における計測実験

まず TANS 内の温度, 湿度を計測するため Jennic 社の ZigBee センサを立体的に設置し, 室内の温度, 湿度を計測した。図 3.11 にセンサの配置図を示す。TANS

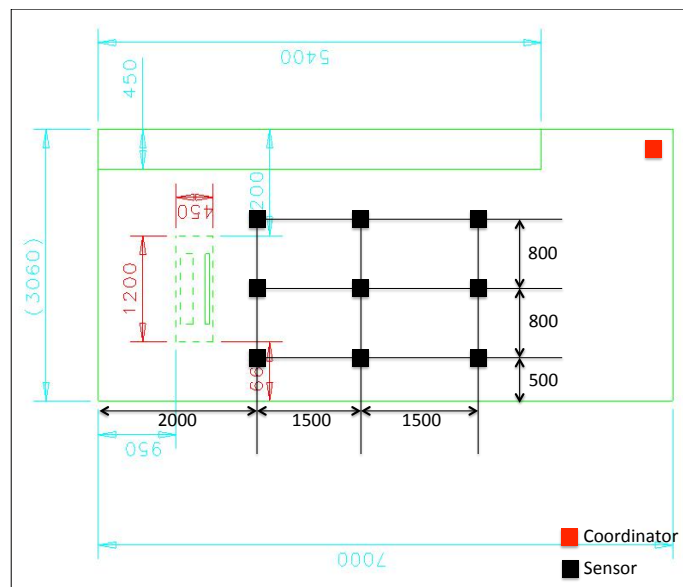


図 3.11: TANS に設置したセンサ

の床から 1.0m の位置に 9 個のセンサを配置した。9 個のセンサは一定間隔おきに図中のコーディネータへ向けて時刻、センサ番号、温度、湿度、照度、電池残量、受信感度、ホップ数を送信する。コーディネータは受信したパケットをテキストファイルに保存する。このようにしてエアコンの動作開始時刻、設定をシナリオとして記録し、シミュレータによる再現実験を行うための情報とした。またエアコンから流入する風の温度や風速は、風速、風量計と温度センサを用いて事前に計測を行った。図 3.12 に TANS における温度の計測結果を示す。

3.3.6 TANS2 における計測実験

TANS での実験結果をふまえ、TANS2 において TANS における実験と同様の実験を行った。TANS2 は TANS のような建物内の一室と異なり、独立して建設されているプレハブ住宅である。またネットワークから窓、オーニング、カーテン、エアコンの制御が可能な住宅であるため、エアコン動作時に加え、窓の開閉による温度変化を計測することも可能である。更に TANS における実験では 9 個のセンサを用いて温度、湿度を計測したが、TANS2 ではセンサの数を 120 個に増やし、

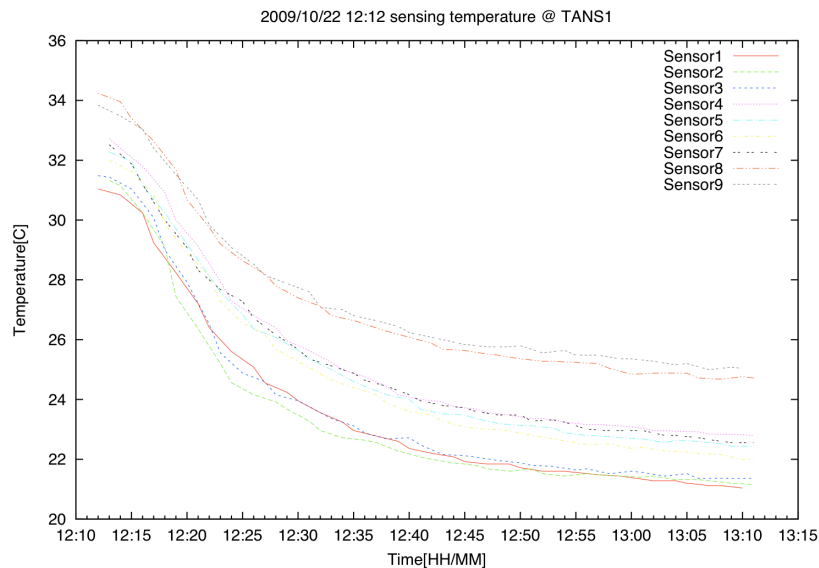


図 3.12: TANS の温度の計測結果

より精密な 3 次元的な位置ごとの温度、湿度変化を計測することができる。図 3.13, 3.14 に TANS2 内に設置したセンサの様子を示す。

センサの台数が増えたことにより、同一チャンネルで 120 個のセンサが同時に動作することによるコリジョンが発生することが懸念されたため、コーディネータを 4 台に増やし、4 チャンネルを利用することによりパケットロスを削減することにした。図 3.15, 3.16 にセンサの配置とチャンネルの割り当ての様子を示す。

TANS2 における環境の計測実験はいくつかのシナリオに分け、計測を行った。シナリオは、エアコンの動作モード、窓の開閉のパターンを組み合わせ作成した。以下の表 3.4 に計測実験とシナリオを示す。

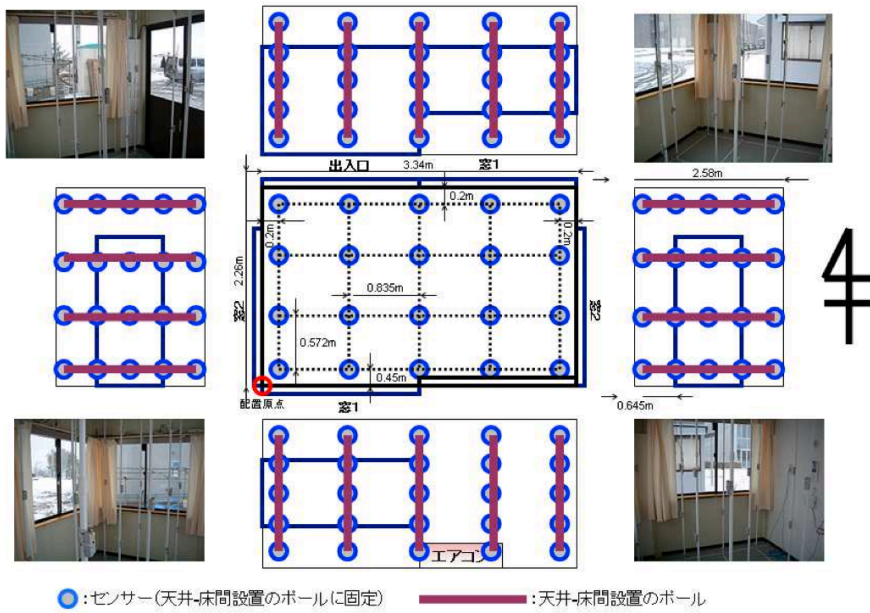
TANS2 の計測実験では、しばしばセンサの故障があり数カ所のデータが欠落することがあった。これはセンサが電池駆動であることや初期不良の問題などの原因によるものであった。この様なセンサにより得られた計測データを即時確認するため、センシングデータをネットワークから参照できるようにし、データを変換し Paraview で確認することができるようにした。コーディネータが収集するデー



図 3.13: TANS2 のセンサ 1



図 3.14: TANS2 のセンサ 2



4

図 3.15: TANS2 のセンサ配置図 1

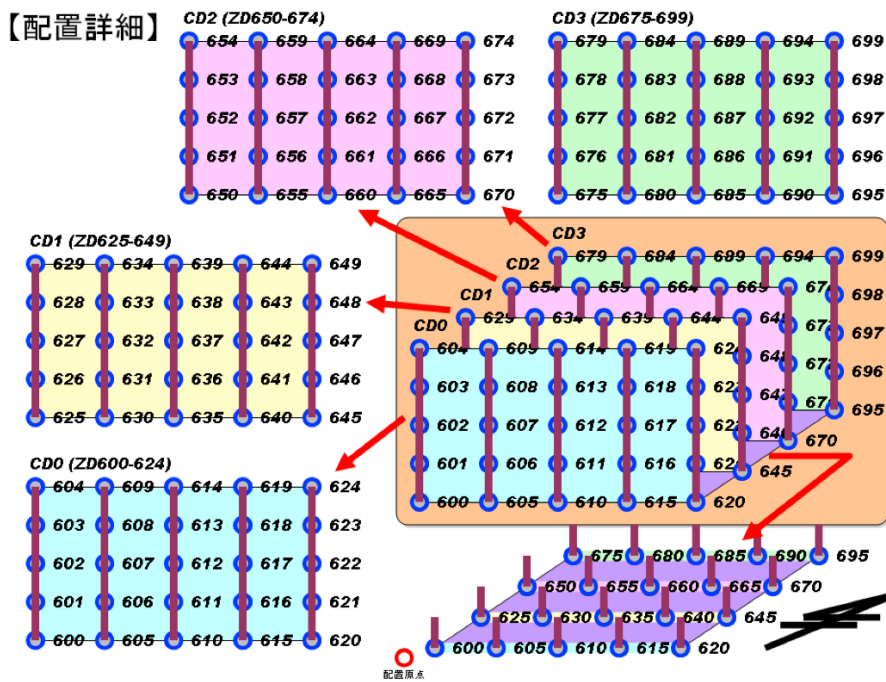


図 3.16: TANS2 のセンサ配置図 2

表 3.4: TANS2 における環境の計測実験シナリオ

期間	実験内容
2/1 19:00-	動作検証
2/2 10:23-11:23	暖房, 窓閉
2/2 11:23-12:23	エアコンオフ, 北側窓開放
2/2 12:28-13:42	暖房, 窓閉
2/2 13:42-14:43	冷房, 窓閉
2/2 14:43-14:59	エアコンオフ, 窓閉
2/2 14:59-16:00	暖房, 窓閉
2/2 16:00-17:00	冷房, 窓閉
2/2 17:00-18:00	暖房, 窓閉
2/2 18:00-	暖房, 窓閉
2/3 10:23-11:23	エアコンオフ, 北側窓開放
2/3 11:23-11:30	エアコンオフ, 窓閉
2/3 11:30-12:28	暖房, 窓閉
2/3 12:28-13:42	暖房, 窓閉
2/3 13:42-14:43	冷房, 窓閉
2/3 14:43-14:59	エアコンオフ, 窓閉
2/3 14:59-16:00	暖房, 窓閉
2/3 16:00-17:00	冷房, 窓閉
2/3 17:00-18:00	暖房, 窓閉
2/3 18:00-	暖房, 窓閉

タは時間, センサ ID, センシングデータであり, このデータを可視化するためには, センシングデータを 3次元上にマップし, 時系列に並べる必要がある. 以下にセンシングデータの一部を示す.

2010/06/29 13:49:32,619,25.16,55.85,648,3,3,0

2010/06/29 13:49:33,607,26.64,52.01,1158,3,3,0

2010/06/29 13:49:35,602,25.64,55.54,1185,3,3,0

2010/06/29 13:49:36,616,25.28,56.99,1201,3,3,0
2010/06/29 13:49:40,315,24.72,57.85,1176,3,3,0
2010/06/29 13:49:41,621,24.64,58.99,1171,3,3,0
2010/06/29 13:49:42,611,25.52,55.85,1191,3,3,0
2010/06/29 13:49:42,609,25.84,54.07,617,3,3,0
2010/06/29 13:49:42,612,24.92,57.56,1194,3,3,0
2010/06/29 13:49:43,604,26.12,53.5,527,3,3,0
2010/06/29 13:49:43,603,25.72,54.96,761,3,3,0
2010/06/29 13:49:43,601,25.2,56.42,1190,3,3,0
2010/06/29 13:49:43,623,24.88,57.56,734,3,3,0
2010/06/29 13:49:44,610,25.08,55.85,1180,3,3,0
2010/06/29 13:49:46,318,25,59.84,1212,3,3,0
2010/06/29 13:49:48,319,24.56,62.37,1110,3,3,0
2010/06/29 13:49:49,613,25.24,57.56,833,3,3,0
2010/06/29 13:49:49,600,25,56.42,1047,3,3,0
2010/06/29 13:49:51,618,24.64,57.85,820,3,3,0
2010/06/29 13:49:51,614,25.88,54.96,705,3,3,0
2010/06/29 13:49:51,622,25.72,54.96,1174,3,3,0
2010/06/29 13:49:52,605,25.44,56.42,1180,3,3,0
2010/06/29 13:49:53,620,24.44,59.28,1183,3,3,0
2010/06/29 13:49:54,606,26.72,52.35,1180,3,3,0
2010/06/29 13:49:54,624,25.52,55.85,540,3,3,0
2010/06/29 13:49:55,617,25.12,57.56,1185,3,3,0
2010/06/29 13:49:56,317,25.12,57.85,1196,3,3,0
2010/06/29 13:50:00,342,25.12,59.28,826,3,3,0
2010/06/29 13:50:00,608,25.68,55.54,840,3,3,0

このデータ形式を Paraview により認識できる VTK 形式のフォーマットへ変換することで、3次元の可視化が可能となる。また変換データを連続して表示することでアニメーションによる表示が可能である。図 3.17 に Paraview による TANS2 内の温度、湿度、照度の可視化した様子を示す。

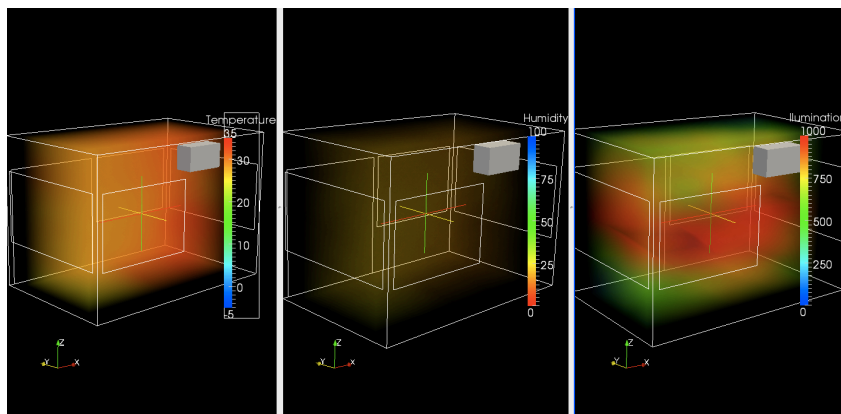


図 3.17: TANS2 の温度，湿度，照度の可視化

また特定のセンサのみの情報を確認したい場合であれば，上記のような大量のセンシングデータを処理する必要は無い．このような場合のため，センシングデータを gnuplot により可視化可能な形式に変換するプログラムを作成し，指定したセンサ，時間における環境の変化を確認した．**図 3.18** に TANS2 で計測した 1 日の温度変化を，**図 3.19** に 1 時間の温度変化を示す．

3.3.7 シミュレーションによる評価実験

これまで述べてきた CFD 環境シミュレータの評価実験を，TANS の環境において行った．評価実験は，設置されたセンサにより温度，湿度を計測しながらエアコンを動作させる．次に計測された温度，湿度の実データに対し，全く同一の条件をシミュレータ内に再現し，同一箇所の温度，湿度を比較することでシミュレータの性能を評価する．

OpenFOAM を用いて TANS における温度，湿度の再現シミュレーションを行い，実験結果を比較した．**図 3.20** に TANS のセンサの温度の比較結果を示す．実線はセンサから得られたセンシングデータを，破線はシミュレーションから得ら

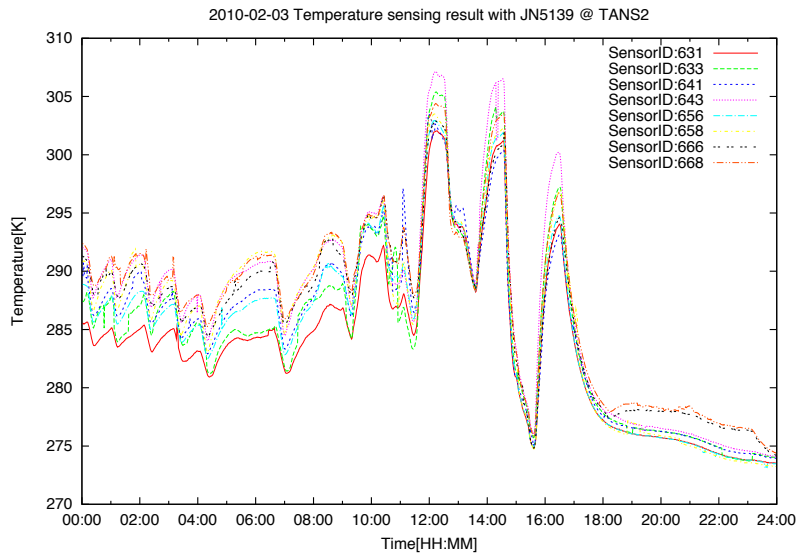


図 3.18: TANS2 の 1 日の温度変化

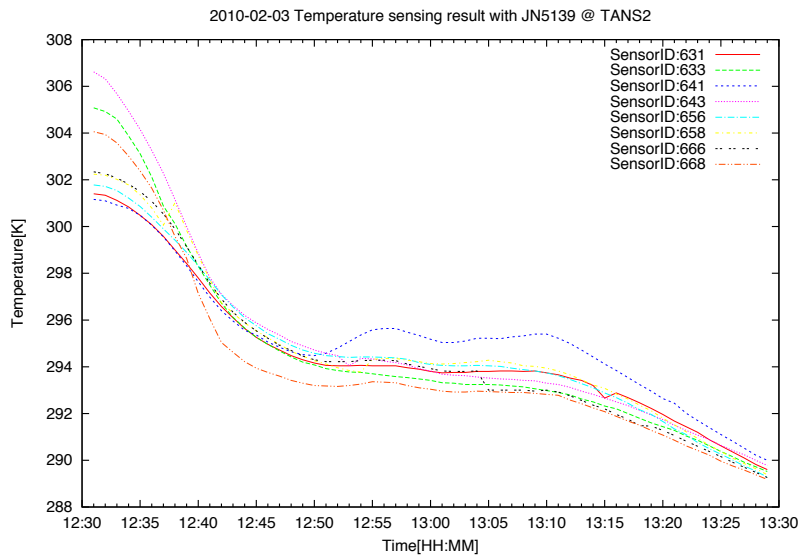


図 3.19: TANS2 の 1 時間の温度変化

れた結果を表す。

TANS は部屋の利用上の問題や、センサの数の問題からこれ以降実験を行わな

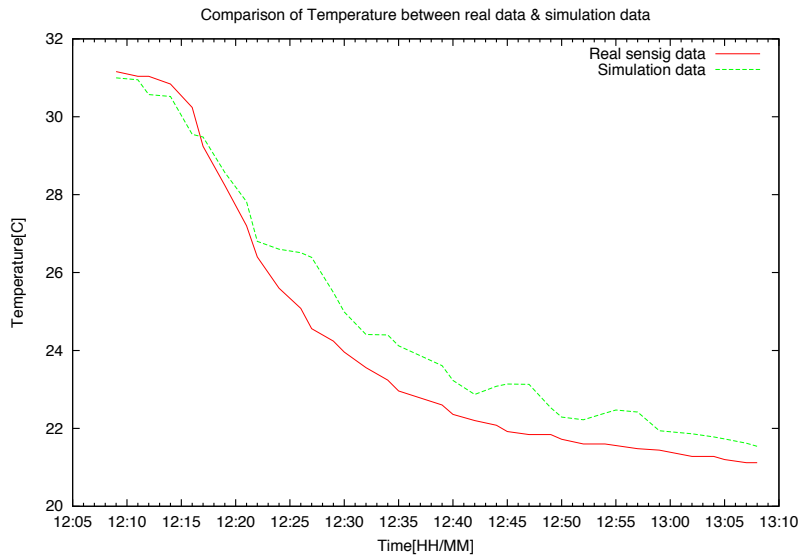


図 3.20: TANS の温度の比較結果

かったが、センサを用いた温度、湿度計測のシステム構築やセンサデータとシミュレータのデータ比較を行う上で多くの知見を得ることができた。

3.4 熱力学による環境のシミュレーション

本節では、環境のシミュレーションを熱力学によって解く手法について論じる。熱力学とは本計算手法を分かり易く表現している言語であり、本質は熱回路網 [18] による手法を取り入れ計算を行っている。熱回路網とは、壁、室内を抵抗やコンデンサとみなし、微小時間ごとの熱の伝導を解く手法である。本研究では、この熱回路網の手法と熱貫流率による熱伝導の計算手法を組み合わせ、より高速にシミュレーションを動作するような熱力学モデルを用いて環境をシミュレートした。図 3.21 にモデルの概略図を示す。

図に示す様に、住宅を部屋単位の細かい空間に分割し、その空間を壁、屋根、床により閉じている。空間の環境(温度、湿度、照度など)は、壁、屋根、床を通して影響を及ぼし合い、その状態を変化させる。変化の量は環境により異なり、例えば温度や湿度は徐々に伝搬するが、照度は瞬時に反映される。本シミュレーショ

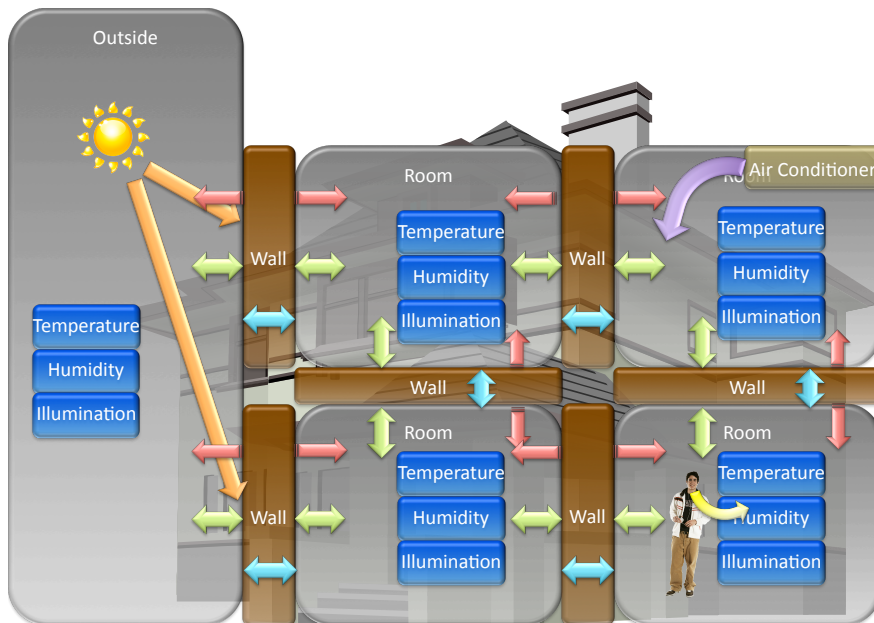


図 3.21: 熱力学によるモデルの概略図

ンでは、部屋、壁、外部を含めた環境の輸送のグラフを生成し、シミュレーション時間ごとに状態を変化させる。図 3.22 に熱輸送を解くグラフを示す。

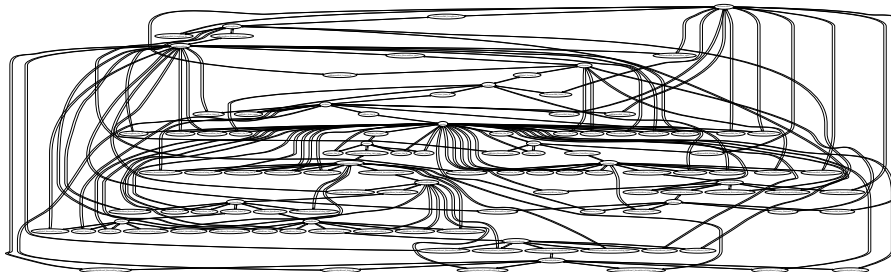


図 3.22: 熱輸送のグラフ

3.4.1 計算モデル

熱力学を用いた手法による環境のシミュレーションにおいて用いられている計算モデルについて詳細を説明する。計算モデルは複数の物理的計算要素を統合し、離散時間における環境の変量を計算し、状態を変化させる。例えば部屋の温度を

計算する際、単位離散時間内における、家電、人、外気、隣接する全ての壁からの熱収支、更に換気モデルに基づく空気の入出力、更に太陽光や放射による熱を考慮し最終的な温度を決定する。

以下に本計算モデルに用いられる物理量と計算モデルについて述べる。

熱貫流率

熱貫流とは、ある固体の材質を挟んだ流体間の熱の移動を指す。熱貫流率とは、この熱貫流の割合であり、具体的には1平方メートルあたり、1時間あたりどれくらいの熱が流れるかを表す。また熱貫流率 $K(W/m^2K)$ は、熱伝導率 $R(m^2K/W)$ の逆数で表される。

$$K = \frac{1}{R} \quad (3.1)$$

壁は一般的に複数の材質が層になっている。このような n 個の材質からなる壁の熱貫流率 K は、以下で表せる。

$$K = \frac{1}{R_i + \sum_{k=0}^n R_k + R_o} \quad (3.2)$$

ここで、 R_i は室内側熱伝導率、 R_o は室外側熱伝導率である。熱貫流率の値から、ある固体の材質を挟んだ流体間の熱の移動 $Q(W)$ は、それぞれの流体の温度を $T_1(K)$ 、 $T_2(K)$ 、表面積 $S(m^2)$ を用いて

$$Q = K(T_1 - T_2) \quad (3.3)$$

と表せる。

日射

日射吸収率 a 、日射透過率 τ 、日射反射率 r の関係は以下で表せる。

$$a + \tau + r = 100 \quad (3.4)$$

熱貫流率では、壁を挟んだ流体間の熱の移動を求めることができるが、片方の壁面に日射による放射がある場合、相当外気温度 (SAT) を用いて日射の影響を反映

する。相当外気温度 $SAT(K)$ は、外気温度 $\theta_0(K)$ 、壁面の日射吸収率 $\epsilon(-)$ 、日射量 $J(W/m^2)$ 、壁面の熱伝達率 $\alpha_0(W/m^2K)$ を用いて以下で表せる。

$$SAT = \theta_0 + \frac{J\epsilon}{\alpha_0} \quad (3.5)$$

また壁面がガラスの様な透過性を持つ材質の場合、日射遮蔽係数 SC と日射熱取得率 η の関係は、

$$SC = \frac{\eta}{0.88} \quad (3.6)$$

放射

壁面から放射される放射量 E を、長波放射率 ϵ 、ステファン・ボルツマン定数 $\sigma(5.67 * 10^{-8}W/m^2K^4)$ 、表面温度 $T(K)$ を用いて表すと、

$$E = \epsilon\sigma T^4 \quad (3.7)$$

更に太陽からの日射量を $Q_s(W/m^2)$ 、日射吸収率を a 、壁面の表面積を $S(m^2)$ とすると、全熱放射 $Q_r(W)$ は、以下によって表せる。

$$Q_r = (E - Q_s a)S \quad (3.8)$$

また、壁面の表面熱伝達率 $h(W/m^2K)$ と、壁面の温度 T_1 、外気または室温 T_2 を用いると、熱放射 $Q_r(W)$ は、以下によって表せる。

$$Q_r = hS(T_1 - T_2) - Q_s a S \quad (3.9)$$

伝導

壁面において、両面の温度をそれぞれ $T_1(K)$ 、 $T_2(K)$ 、厚さを $L(m)$ 、表面積を $S(m^2)$ 、壁の熱伝導率を $k(W/mK)$ とすると、熱伝導 $Q_{cond}(W)$ は、以下によって表せる。

$$Q_c = \frac{kS(T_1 - T_2)}{L} \quad (3.10)$$

対流

壁面の表面熱伝達率 $h(W/m^2K)$, 壁面の温度を T_1 , 外気または室温を T_2 , 表面積を $S(m^2)$ とすると, 熱対流 $Q_{conv}(W)$ は, 以下によって表せる.

$$Q_{conv} = hS(T_1 - T_2) \quad (3.11)$$

熱輸送の計算

上記のモデルにより単位時間あたりの熱輸送の総和により, 室内の熱を決定する.

$$Q(t+1) = Q(t) + \sum_i Q_i \quad (3.12)$$

第 4 章

人間のシミュレーション

本章では、住宅内で行動する人間のシミュレーションについて述べる。

4.1 人間のシミュレーションの要件

次世代のホームネットワークでは、住宅内の状況を認識することにより状況に最適なサービスや、住人一人一人の嗜好に合わせたサービスが提供されることが期待される。このようなサービスは、多数のセンサから得られた情報から状況を表すコンテキストを得るための技術や、サービスごとに利用履歴を蓄積しユーザーの嗜好を推定する技術、またライフログからユーザーの習慣や嗜好を推定する技術などへの要求がある。これらの認識や推定は、人間から得られる情報を元になされるため、ホームネットワーク内で生活する人間に関する研究が非常に重要と言える。

シミュレータ内で、人間の行動を再現するだけであれば、人間の行動シナリオを実実験や統計データから生成し、シミュレータ内で動作させれば良い。しかし、人間の行動は周囲の状況により変化するものであり、更にホームネットワークサービスと人間がインタラクションを取る場合、あらかじめ決められた行動シナリオを用いる場合、そのサービスごとに行動シナリオを作成する必要がある。またサービス内容が環境に応じて動的に変化する場合、季節、地域、人間の個性の違いにより異なる行動をする場合も考えられる。

このような多数の要素が関連し合い、その状況ごとに人間の行動が変化するよ

うな人間のシミュレーションが、次世代のホームネットワークの検証には必要である。またホームネットワークサービスの規模を考慮すると、街レベル、都市レベルの多数の世帯が対象となる可能性が高く、住宅も住人も様々なバリエーションが考えられる。そのため住宅、世帯には尤もらしい家族構成、プロフィールが設定され、家族には個々にプリファレンスを持ち、家族内においても、世帯ごとにおいても異なる構成がされるべきである。また個々の人間については、尤もらしい行動をすることが望まれる。

要件を整理すると、

- 状況によって変化する人間の行動をシミュレートすること
- 一人一人プロフィール、プリファレンスの異なる個性を持った人間をシミュレートすること
- 尤もらしい世帯、家族を構成すること
- 尤もらしい行動をシミュレートすること

以上の要件を満たす人間のシミュレーションが要求される。

4.2 人間のシミュレーションモデル

前節で述べた人間のシミュレーションへの要件に対し、これらを満たす人間のシミュレーションモデルについて述べる。

本モデルでは、まず統計と確率から世帯の場所、世帯種別、家族構成、家族のプロフィールを生成する。次に統計と確率から家族の基本スケジュールを生成する。以上により構成されたプロフィール、基本スケジュール、周囲の状況また人間の感情に相当する欲、これら全てが行動を決定する要素となり、それぞれが行動を起こす影響を与えモデル内において行動が決定される。行動の決定モデルにはグラフが用いられ、上記に挙げた要素がそれぞれ異なる影響をそれぞれ異なる行動に与える。その中で最も行動への影響の和が大きいものが行動として選ばれる。

ここまでモデルの概略のみを述べたが、行動、スケジュール、欲などの詳細について説明する。

4.2.1 行動

人は、ある時間にある行動をすると決めた後、特に優先度の高い割り込みが無い限り一定期間その目的を達成するまでその行動を継続する。しかし例えば工作中、喉が乾けば飲み物を飲み、トイレにも行く。このような「仕事」というある一定期間継続して行う行動と、その行動中状況に応じて割り込む短期的な行動を実行動として分類する。別の例では「テレビを見る」行動の際、画面が見え辛ければカーテンを閉め、暑ければエアコンを入れる。これらの行動は、「テレビを見る」という行動を実現するための、「カーテンを閉める」「エアコンをつける」という実行動から成ると言える。

行動の分類

人間の行動についてモデル化する際、いくつかの種別に分類することが一般的である。NHK 国民生活時間調査では、人間の行動を3段階の入れ子構造に分類している。本研究も人間の行動をモデル化するにあたり、3段階の入れ子構造に分類する。

- 行動種別

「睡眠」「食事」「仕事」など統計情報で利用し分類される行動のカテゴリ名。

- 実行動

「移動」「照明」「空調」など行動種別を更に詳細化した行動。行動種別は、1つまたは複数の連続した実行動によって構成される。

- 家電操作

実行動によって決定される家電操作コマンドまたはイベント。本シミュレータの場合 ECHONET 形式の家電操作となる。また家電が関連しない最小単位の行動イベントもこれに含む。

これらの行動の分類の例を  4.1 に示す。

行動種別は、統計情報に基づいた行動の分類である。例えば NHK 国民生活時間調査のデータを利用する場合、人間の行動を 33 種に分類する。社会生活基本

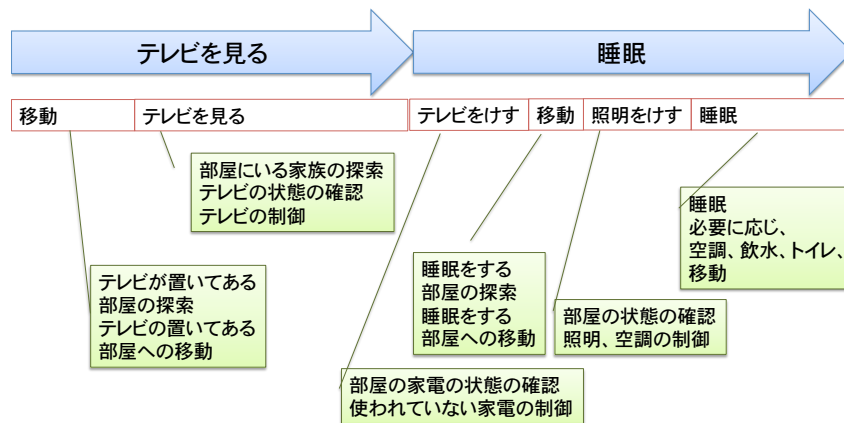


図 4.1: 行動の分類

調査では、2種のデータがあり、一方はNHK 国民生活時間調査と非常に似た行動分類となっているが、もう一方では、より詳細な分類を行っている。本研究では、NHK 国民生活時間調査、社会生活基本調査、また人間行動に関する研究を参考に、以下のように行動を分類した。

- 必需行動
 - － 睡眠
 - － 身の回りの用事
 - － 食事
 - － 受診・療養
- 拘束行動
 - － 通勤・通学
 - － 仕事
 - － 学業

- 家事
- 介護・看護
- 育児
- 学習・研究(学業以外)
- ボランティア活動・社会参加活動
- 自由行動
 - 買い物
 - 移動(通勤・通学を除く)
 - テレビ・ラジオ・新聞・雑誌
 - 休養・くつろぎ
 - 趣味・娯楽
 - スポーツ
 - 交際・付き合い
- その他
 - その他

必需行動，拘束行動，自由行動，その他は以下に定義する。

- 必需行動
 - 「固体を維持向上させるための必要不可欠性の高い行動」(NHK 生活時間調査 [43] より抜粋).
- 拘束行動
 - 「仕事，学業，家事，社会参加など社会や家庭を維持向上させるための行動」(NHK 生活時間調査 [43] より抜粋).
- 自由行動
 - 「人間性を維持向上させるための自由裁量性の高い行動」(NHK 生活時間調査 [43] より抜粋).

- その他

以上に該当しない行動.

全ての行動分類は必需行動, 拘束行動, 自由行動, その他のいずれかに分類される.

実行動

実行動は, 行動の分類を更に詳細化した行動である. 同じ曜日に同じ行動を行っていても, 実行動は環境, 状況など多種の要因により変化する. 実行動は状態遷移として表され, 個々の状態ごとに周囲の状況やスケジュール, 欲を元に家電操作や行動イベントを生成する. 図 4.2 に行動種別「睡眠」の実行動を表すグラフを示す.

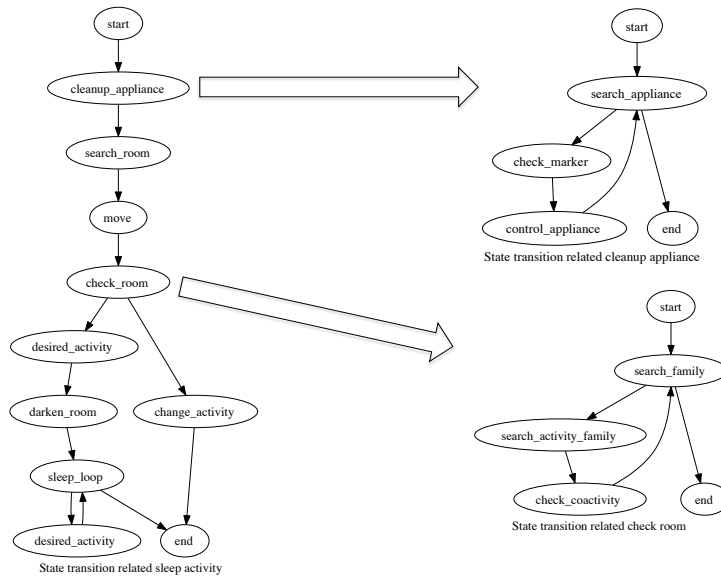


図 4.2: 行動種別「睡眠」の実行動を表すグラフ

図のように, 実行動も更に細かいグラフ構造を持つ. この実行動から家電操作や, 行動イベントが生成される際周囲の状況によって家電が操作されたり, 操作するコマンドが異なってくる. 以下に実行動へ影響を及ぼす要素について列挙する.

- 環境

- 温度
- 湿度
- 不快指数
- 照度
- ダスト

- 家電

- 家電の状態
- 現在いる部屋にある家電
- 家にある家電

- 家族

- 現在いる部屋にいる家族
- 家族の状態

- 習慣

- どの部屋でどのような行動を行うかという習慣

- 欲

以上の要素がどのような状態にあるかにより、人がとる実行動が変化する。また実行動は更に「行動の種別に関連するもの」と「何時でも共通に発生するもの」に分類される。「行動お種別に関連するもの」の例としては、行動の種別「身の回りの用事」に対し「洗顔」「化粧」などが該当し、「何時でも共通に発生するもの」は「移動」「トイレ」などが該当する。

家電操作

家電操作は、実行動により決定される家電の操作コマンド、また家電が関連しない最小単位の行動イベントである。しかし、シミュレータ内において人間が単純に目的に合わせて家電を操作すると家族同士で競合が発生する。例えばお父さんはエアコンを冷房20℃急風に設定したいが、お母さんはエアコンをつけず窓を開ければ良いと考えている場合などがある。またお母さんはもう寝るため居間から寝室に移動するが、お父さんは居間でテレビを見ている。このような状況でお母さんはテレビ、照明を消すことはしない。

このような家電の競合問題に対し、本シミュレータでは家電の使用者とその優先度を付けるため、家電へマーカーを設定し、場所または家電ごとに優先度を設定する。マーカーは家電の利用を表し、家族一人ずつ利用している家電に設定する。先程のエアコンの競合の例の場合、お父さんとお母さんのマーカーがエアコンに設定される。優先度は、単一の家電にマーカーが設定された場合どのマーカーを優先するかを選択するものであり、この場合お母さんの優先度が高いと、エアコンはつけず窓を開けることとなる。

このようにして、家電を家族で共用していても矛盾した操作をされることがなくなる。

4.2.2 スケジュール

人間は、自分の決めたスケジュールに従い行動する。スケジュールは、年、月、週、日ごとに立てられており、常に変更し、調整される。スケジュールには幾つかの種類があり、その人にとって例えば必ず守るべき行動や行わなくても良い行動などがある。

また人の行動は年、月、週など一日24時間の整数倍単位の周期性を持ち[?]スケジューリングされる。その観点から本シミュレータでは、スケジュールを月、週、一日単位で生成し、行動生成の指標とすることとした。

スケジューリングされる行動は、行動の種別とした。行動の種別は統計情報と関連付けることができるため、人間のプロフィールに対し統計的な行動を生成す

ることができる。つまり無限の人数の人間の行動時間を統計情報から生成し、平均をとると統計情報と合致することとなる。

スケジュールの生成例

両親と子どもから成る世帯のスケジュール生成例について述べる。ここで家族構成は父、母、姉、弟とした。スケジュールの生成は、統計情報と確率を利用した行動の種別の選択と、制約による行動の並べ替えにより決定される。統計情報は社会生活基本調査の行動の種別ごとの行為者率、平均行動時間を利用した。制約とは、行動の種別の並びに対する制約であり、家族のプリファレンスなども影響する。家族のプリファレンスとは、例えば「家族全員がそろって食事をする」「食事中はテレビを見ない」など、プリファレンスの有無により行動の並びが変化する。家族個々の行動の種別の並びは父親の例を挙げると、起床時間、就寝時間、出社時間、通勤時間、退社時間、帰宅時間などからおおまかに決定し、勤務中の行動、帰宅後の行動が選択された行動の種別を並び替えることにより決定される。

以下に父 (図 4.3)、母 (図 4.4)、姉 (図 4.5)、弟 (図 4.6) の4人の家族のスケジュール生成例を示す。

4.2.3 欲

本シミュレータは、欲の変化により人間の行動が変化する仕組みを取り入れている。欲は人間行動を決定する根源的な要素であり、様々な状況や人間の身体的な変化に伴い変化する。これらの欲は、人間が生きるために必須となるような動物的な欲求から、人間の社会性に関連するような高次の欲求まで多種に分類されている。Maslow [12] らは、人間の欲を人間が優先度付けする順に、5段階の階層構造に分類した。本シミュレータは、Maslow の欲の分類に従い、それらの欲が状況により変化する様子を再現することで、人間行動の変化の動機付けの一要因としている。

Maslow による欲の分類

図 4.7 に Maslow の欲の分類を示す。

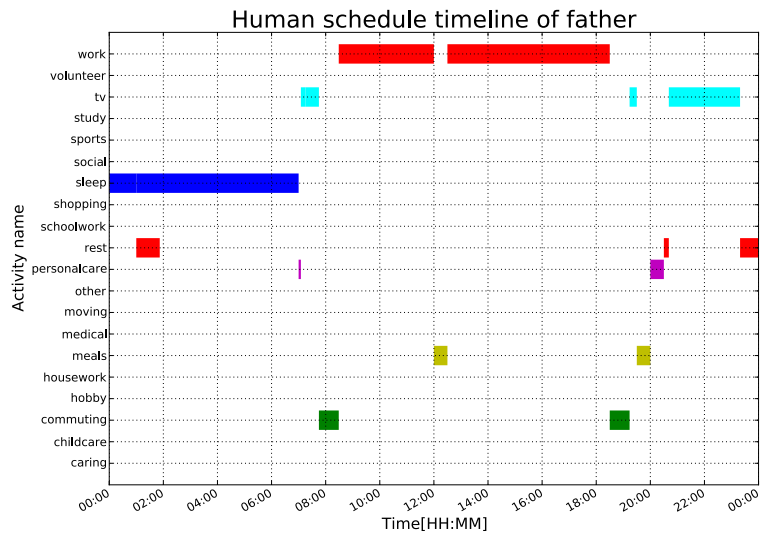


図 4.3: 4 人の家族のスケジュール (父)

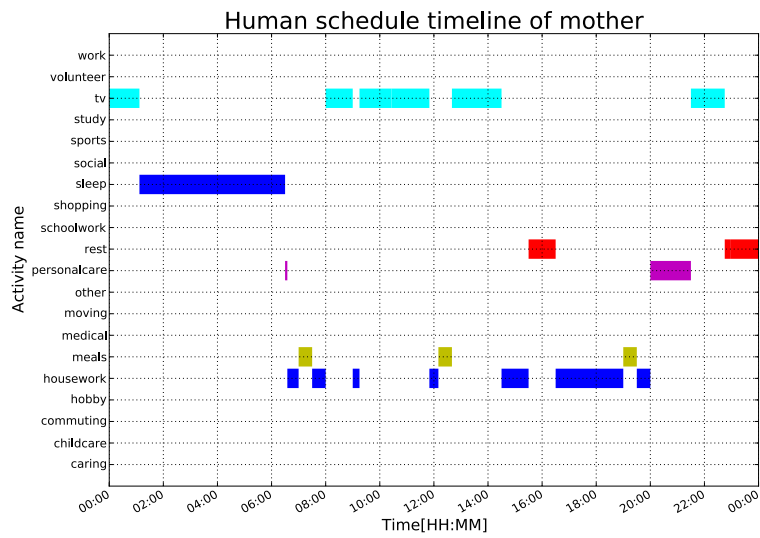


図 4.4: 4 人の家族のスケジュール (母)

- Physiological(生理的欲求)

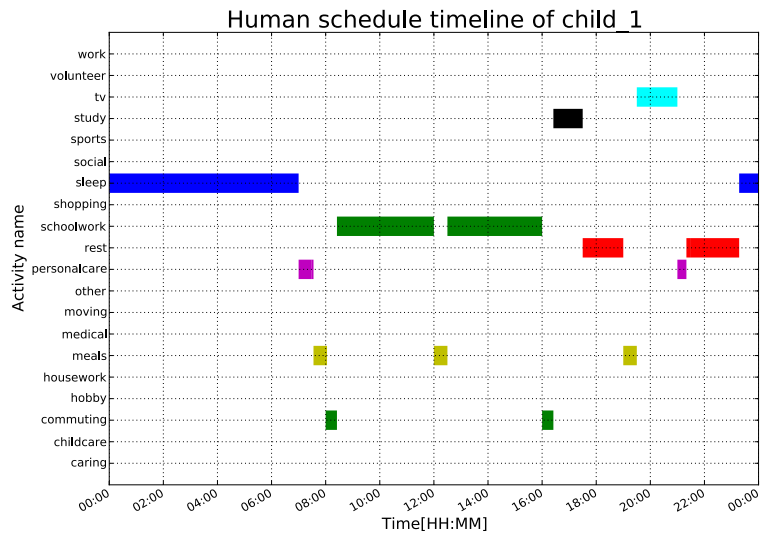


図 4.5: 4 人の家族のスケジュール (姉)

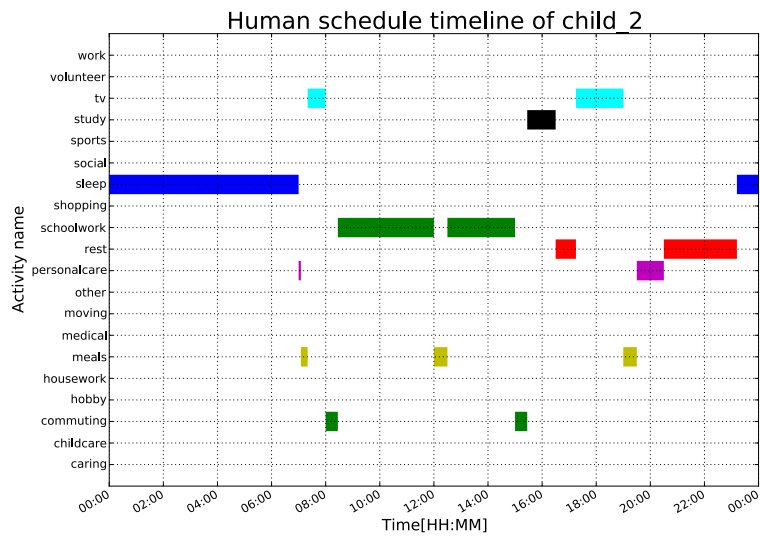


図 4.6: 4 人の家族のスケジュール (弟)

breathing, food, water, sex, sleep, homeostasis, excretion

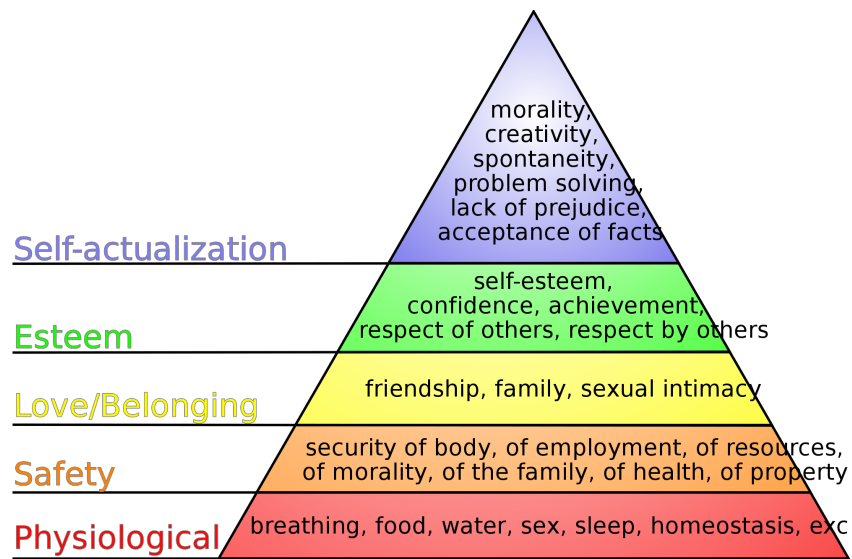


図 4.7: Maslow の欲の分類

- Safety(安全の欲求)
security of body, employment, resources, morality, family, health, property
- Love/belonging(所属と愛の欲求)
friendship, family, sexual intimacy
- Esteem(承認の欲求)
self-esteem, confidence, achievement, respect of others, respect by others
- Self-actualization(自己実現の欲求)
morality, creativity, spontaneity, problem solving, lack of prejudice, acceptance of facts

欲の変化

人間の欲は様々な状況に従い変化する。この欲の変化を再現するためには、それぞれの欲がどのような要因とどのような関連性を持ち変化するかをモデル化する

る必要がある。

図 4.8 に欲と行動の種別「睡眠」との関連性を表す図を示す。

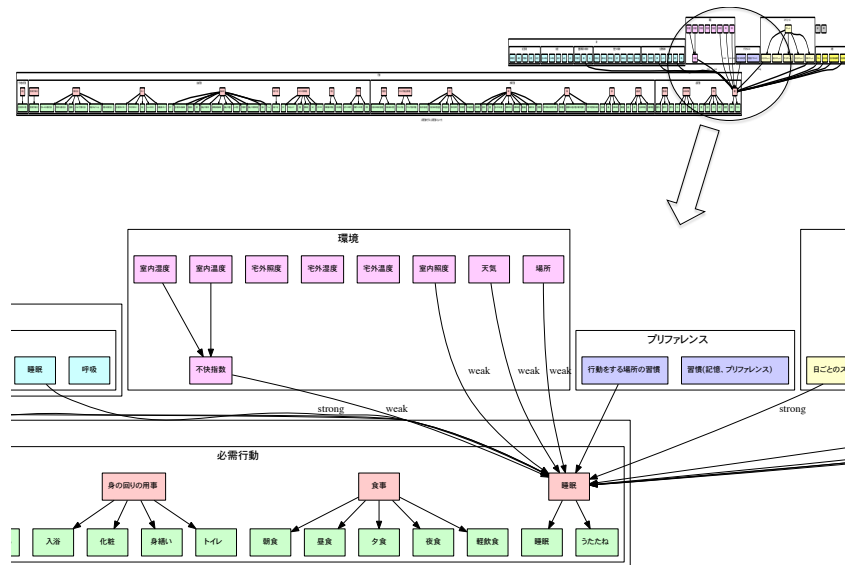


図 4.8: 欲と睡眠との関連性

欲はその種別によって時間とともに徐々に変化するものや、行動を実行したことにより変化する。本シミュレータでは、この変化を時間または行動の有無による関数で表し、徐々に眠く睡眠欲や、水を飲むことで満たされる飲水の欲求を表現した。関数には、線形、指数、シグモイド関数を用意し、設定ファイルを変更することで、関数の種別や係数を柔軟に変更することが可能である。

4.2.4 行動生成の流れ

これまで述べた行動生成に関連する情報をまとめ、行動生成フローを図 4.9 に示す。

1. プロファイルに基づき生活時間統計データを選定

指定がなければ世帯種別、家族構成を決定。次に家族の年齢、職業を決定し、NHK 国民生活時間調査、社会生活基本調査などから統計情報として利用する情報を選定する。

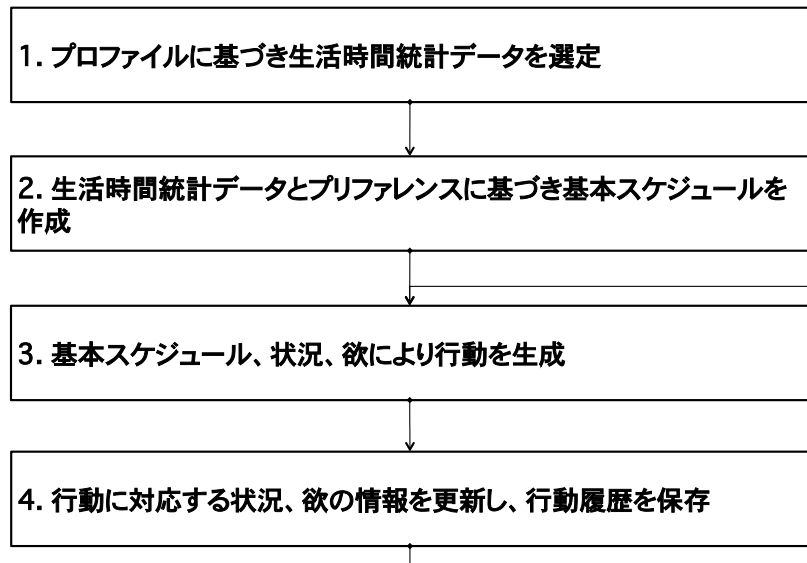


図 4.9: 行動生成フロー

2. 生活時間統計データとプリファレンスに基づき基本スケジュールを作成

1で選定したデータに基づく確率的とスケジュールの選定，決定モデルに従いスケジュールを作成する。家族，個人のプリファレンスが設定されている場合，これを反映する。
3. 基本スケジュール，状況，欲により行動を生成

ここからシミュレーションのループに入る。現在の時刻に基づく基本スケジュールを参照し，状況，欲によって行動の種別，実行動，家電操作を決定する。
4. 行動に対応する状況，欲の情報を更新し，行動履歴を保存

3で決定した行動の影響を状況（環境），欲に対し反映する。また実行した行動は履歴として保存する。

第 5 章

実装

5.1 実装モデル

シミュレータは HN の 5 要素の分類に従いコンポーネント化され、要素ごとに振る舞いを独立させ、要素間の相互作用を切り分けている。この切り分けにより要素に関する実装はその要素のみについて注力し、要素間の関係については要素内のどのような状態が影響を及ぼし合うかを別途実装する。

このような要素と要素間の相互作用を実現するため、「ノード」、「エッジ」、「ネットワーク」によるシミュレータの実装モデルを用い実装を行った。(図 5.1)

- ノード

要素を更に細分化したシミュレーション単位。例として住宅の部屋、壁、窓、家電、部屋の温度、湿度、系統の電力など。

- エッジ

ノード同士の関係。例として住宅の壁と部屋の環境の温度伝導、部屋と人のロケーション、家電とコンセント、電力計と電力など。

- ネットワーク

ノードとエッジの集合であり、ある統一の法則性を持ちノード間のエッジへ情報を伝達する単位。例として環境の熱伝導ネットワーク、電力ネットワークなど。

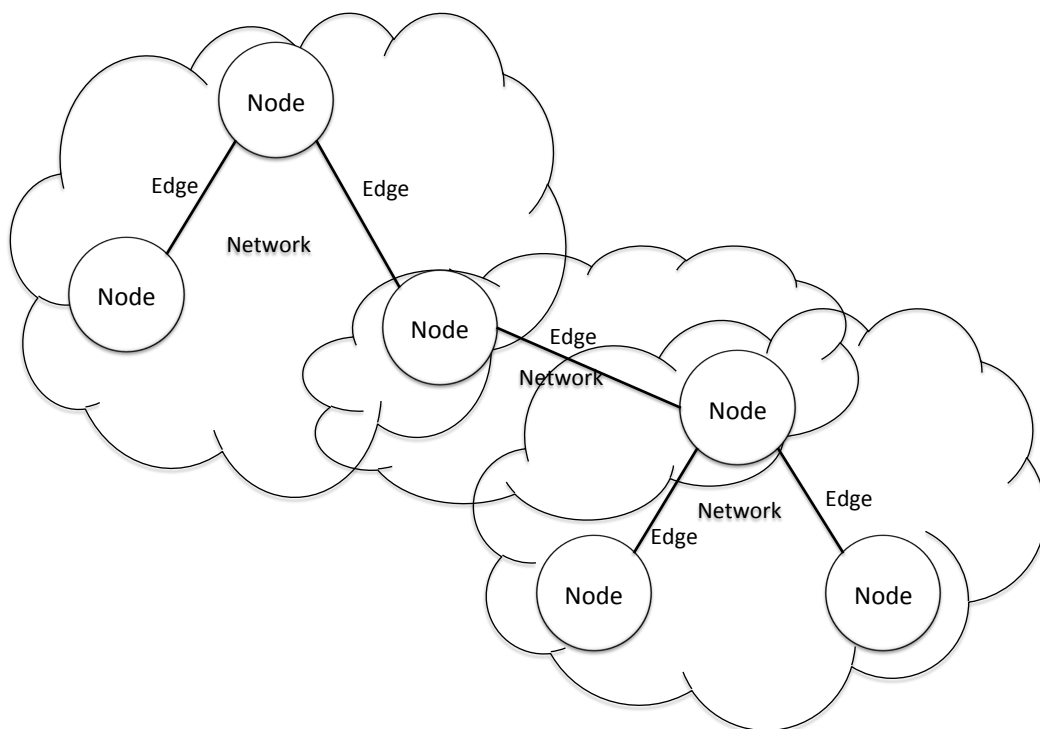


図 5.1: ノード, エッジ, ネットワーク

このようなノード、エッジ、ネットワークのグラフ構造を複数組み合わせること
 ことでHN, HEMSのシミュレーションを実現する。ネットワークはそのノード間
 のエッジへの情報の伝達をどのタイミングで行うかを指定することが可能であり、
 ネットワーク同士つまりは現象から現象への流れを指定できる。図 5.2 に iHouse
 の熱伝導のネットワークのグラフ構造を例として示す。

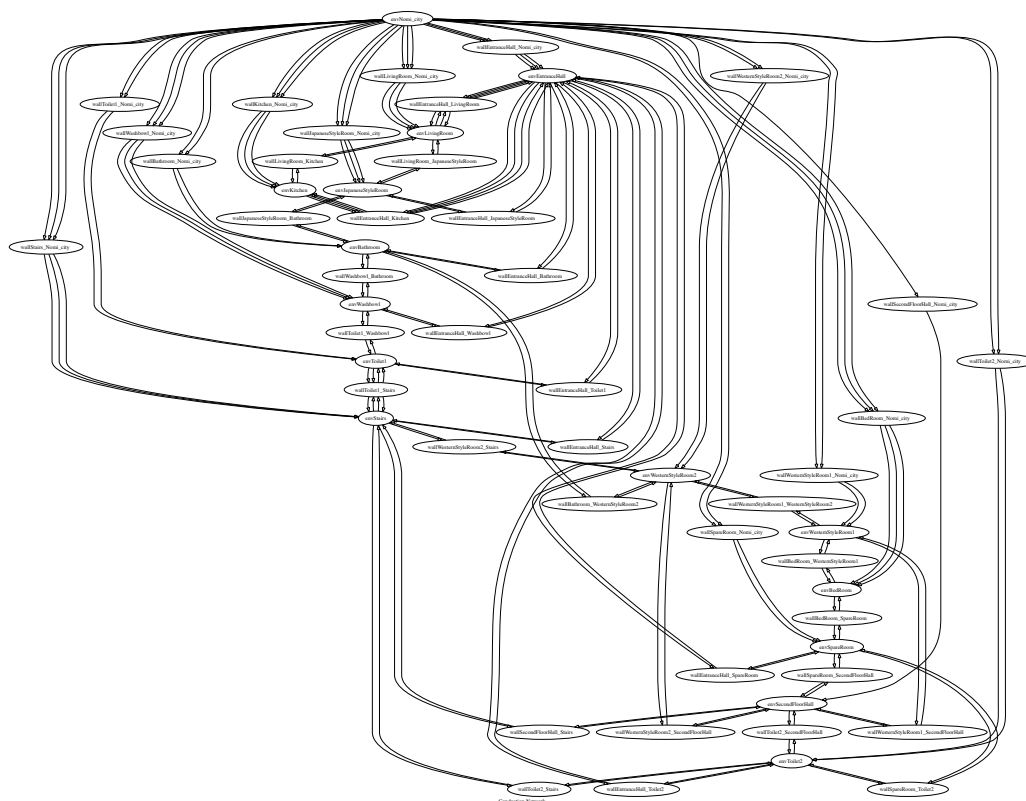


図 5.2: iHouse の熱伝導ネットワーク

5.2 ホームシミュレーションの実装

シミュレータは利用者による利便性や再利用性の向上を目的とし、要素ごとに
 設定ファイルを記述することでシミュレーションを実行できるよう実装されてい
 る。実装では実装モデルで述べたノード、エッジ、ネットワークを利用した基本的
 な住宅、家電、環境、電力、人についてそれぞれHN, HEMSの検証に必要な実装
 を行った。

住宅については、住宅の間取り、部屋の大きさ、壁、窓、カーテン、ドア、部屋間のつながりについて設定が可能である。設定ファイルを変更することで、本シミュレーションで対象とした iHouse とは異なる住宅のシミュレーションを実行することができる。

家電については、ECHONET の家電のクラスグループ、クラスによる分類を利用し、家電ごとに実装を行った。家電の状態は ECHONET のプロパティを利用し、家電に対し ECHONET 電文と同一の形式のメッセージを送信することで家電の状態の取得や制御が可能である。設定ファイルへは、家電の種類、機器名、機器ごとの特徴（状態に依存した消費電力量や環境への影響値）を記述することで、同一の種類の家電でも異なる機種の家電を用いたシミュレーションを容易に行える。

電力については、分電盤、系統、コンセントの接続と電圧、電流に関する設定ファイルを修正することでシミュレーションしたい住宅を再現できる。

また要素間の関係を伝達する際の基本的な関数群を実装し、伝達の特徴を設定ファイル内で定義できる。例を挙げると線形関数、指数関数、シグモイド関数などの種別と変数を与えることで実現する。

第 6 章

検証

本章では，これまで述べてきたシミュレータを用いた実証的検証例 2 件について述べる．

6.1 環境のシミュレーションの検証実験

本検証実験では，iHouse の 1 日の環境の情報を計測し，それを熱力学による環境のシミュレーションを用いて再現し，再現の精度を計る．シミュレータへの入力は，1 日を通した外気の温度，湿度，風向，風速，日照の時系列データと初期条件として全ての部屋の温度，湿度，照度を与えた．比較対象は全ての部屋の温度とした．

6.1.1 iHouse における環境の計測

環境の情報は，iHouse に設置されたセンサにより計測した．iHouse には，全ての部屋に温度，湿度，照度センサが設置されており，iHouse の外には代表値として温度，湿度，照度，風向，風速センサが設置されている．これらのセンサから 10 秒おきにデータを収集し，評価用比較データとして利用する．

6.1.2 シミュレーションの設定

シミュレーションを実行するにあたり、iHouseの構造、壁、部屋に関する情報を詳細にシミュレータ内に再現する必要がある。部屋の間取り、大きさについてはiHouseの図面を参照した。また壁、床、天井については、冷暖房負荷試験 /citeの情報を参照し、壁の材質、厚さ、熱伝導率、容積比熱などの情報を得た。窓、カーテンについては、メーカーの仕様を参照した。

またシミュレーションシナリオとして、窓閉め、窓開け、エアコン動作の3シナリオについて評価を行った。窓閉めは、全ての窓、カーテンを一日中閉めるシナリオ、窓開けは午前9時から午後5時まで窓、カーテンを開放するシナリオ、エアコン動作は窓、カーテンを閉め、午前9時から午後5時までエアコンを動作させた。

6.1.3 シミュレーション結果

図 6.1 に 8 月の窓閉めシナリオにおける温度の比較結果を示す。図は縦軸が温度(左)と相対誤差(右)であり、横軸が時間を表す。図中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 6.2 に 8 月の窓開けシナリオにおける温度の比較結果を、図 6.3 に 8 月のエアコン動作シナリオにおける温度の比較結果を示す。窓開けシナリオの比較結果は、iHouseの全14室の比較結果は相対誤差5%以内に収まり、最大で10%の差があった。エアコン動作シナリオでは、iHouseの全14室の比較結果は相対誤差4%以内に収まり、最大で8%であった。

表 6.1 に、季節ごと、窓閉め、窓開け、エアコン動作シナリオ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℃以上の温度と11月の20℃程度の温度による差である。8月の誤差5%で1.5℃、11月の誤差8%で1.6℃の差となる。

以上より、異なる季節、シナリオにおいてiHouseの室内の環境のシミュレーションを高い精度で再現し、実測値との一致を確認することができた。シミュレータは、住宅の構造、部屋の間取り、壁などを、コンフィグレーションファイルを変更

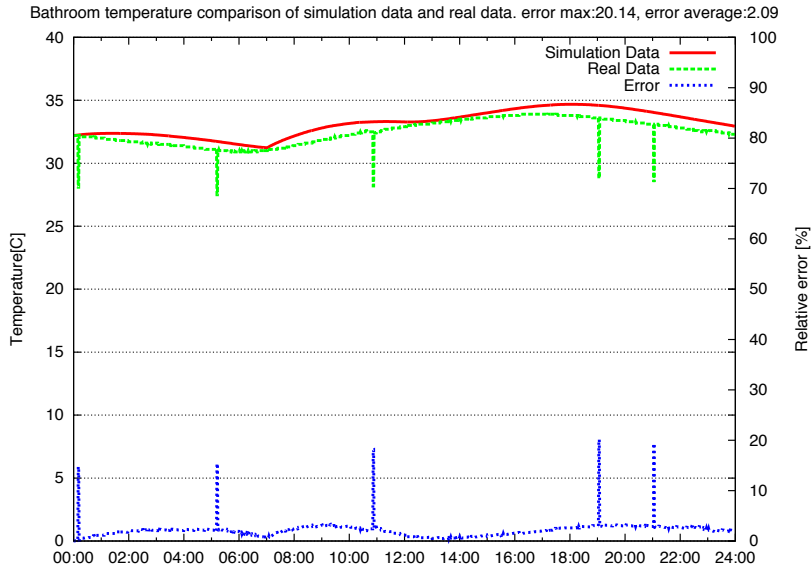


図 6.1: 8月窓閉めシナリオの温度シミュレーションの比較

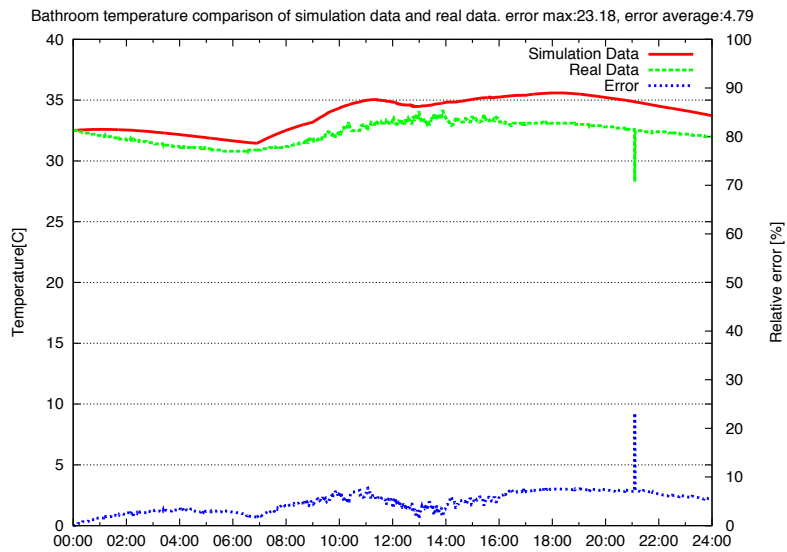


図 6.2: 8月窓開けシナリオの温度シミュレーションの比較

することにより柔軟に入れ替えることが可能である。更に緯度，経度や気候（外気の情報）を変更することにより異なる地域のシミュレーションが可能である。この

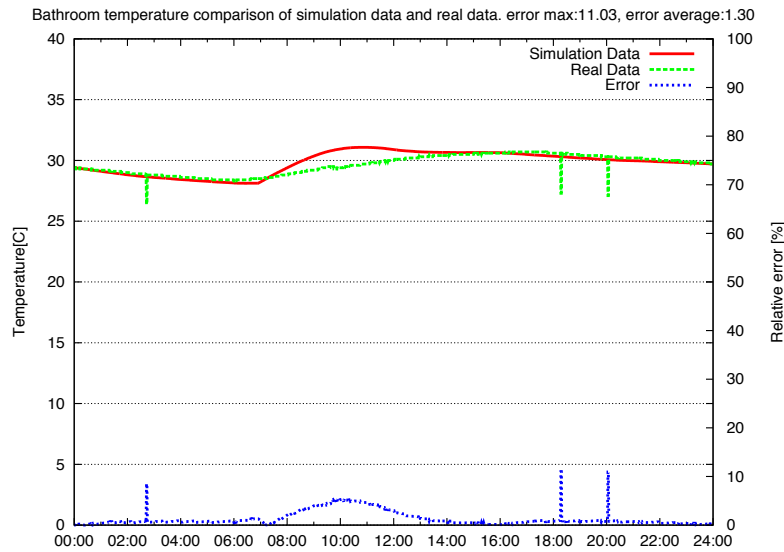


図 6.3: 8月エアコン動作シナリオの温度シミュレーションの比較

表 6.1: 環境のシミュレーションの平均相対誤差結果

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	—

様にユーザーが検証したい住宅を柔軟に選択，構築し，エアコンの動作や窓の開閉といった様々なシナリオの実験をシミュレータ上で検証することができる。

6.1.4 精度に関する議論

本検証において，iHouse の環境の再現を 2°C 以内に再現することを確認したが，この精度について議論する。住宅における環境の情報を記録しシミュレーションにより再現，評価を行う研究は，これまでも多数行われてきているが，本研究のような実住宅において窓閉，窓開，エアコン更に季節の異なる様な長期間の実測結果に対し比較を行っている研究は少ない。野村ら [13] は，埼玉県の実住宅に

において外界気象，室内，床下，小屋裏の空気温度を1年間計測し，春季，夏季のシミュレーションと計測結果の比較を示している．シミュレーション結果と計測結果はよく一致しているが，精度の高いグラフで1℃，精度の低いグラフで2℃の誤差があることが分かる．また大崎ら [14] は，実住宅に複数の計測点を設置し冷房運転を含む夏季2日間の温度を計測し，シミュレーションと比較を行っている．谷川ら [15] は，夏季の冷房運転時の垂直温度分布のシミュレーション結果を実測値と比較している．これらの研究でもシミュレーション結果と実測値の誤差は1℃から2℃である．

これらの研究から本研究の2℃の誤差は，住宅における環境のシミュレーションとして妥当であると言える．また本検証のシミュレーションでは，室内の環境の3次元温度分布は考慮しておらず，代表値を取っている．3.3.6に示す様に，室内の計測点によって温度は大きく変化するため室温を代表値として扱う場合必ずある程度の誤差が発生する．検証によっては，例えば室内の結露を防ぐなど，このような室内の3次元温度分布の情報が必要となる場合があるが，このような検証では例えば数値流体力学のような別のモデルを利用することが必要である．

2℃の温度差は，人間にとって大きな値であり，例えば温度26℃湿度50%と温度28℃湿度50%とでは，不快指数で2.61の差が生まれ後者では体感で熱いと感じる様になる．また電力に関しても，熱いと感じる様になりエアコンを運転することで消費電力量に関しても大きな差が生まれる．このような空調機器の運転に関わる要因は人であるため，人間周辺の温度が重要である．しかしこの温度の誤差の問題は，シミュレータのみではなく実世界のセンサ情報にも同様の問題が生じる．住宅内の部屋に設置されたセンサは，室内の環境を3次元的に満遍なく計測することはできないため，この情報も人間の体感温度とは異なる値である．このような問題に対しては，数値流体力学や多数のセンサが室内に無い場合，室内の3次元空間の中で少ない参照点（センサにより計測された環境情報）から任意の点（例えば人間がいる場所）を推定，予測する技術が必要である．

6.2 電力と人間のシミュレーションの検証実験

本節では、NTT 環境エネルギー研究所との共同研究にて行ったアドバイス機能付 HEMS のデータを用いた検証実験について述べる。アドバイス機能付 HEMS は、住宅における消費電力量を元にユーザーに対し省エネアドバイスを提示し、住宅の消費電力量抑制効果を期待するシステムである。本検証では、アドバイス機能付 HEMS で得られた実データを用いて電力と人間のシミュレーションの評価を行った。

6.2.1 アドバイス機能付 HEMS

アドバイス機能付 HEMS は、住宅内の電力計センサから得られる消費電力量を元にその住宅向けの省エネアドバイスを提示し、ユーザーがそのプランを実行することで消費電力量抑制につながる行動を促進していくシステムである。システムは、住宅の消費電力量として冷蔵庫と住宅全体のデータを収集、集積する。そのデータから住宅の電力の消費パターンを独自のアルゴリズムで分析し、そのパターンに合った省エネアドバイスを月に 1 度複数個提示する。ユーザーは提示されたアドバイスに対し、毎週どのアドバイスを実施したかをシステムに報告する。アドバイスは、家電に関連する利用法のアドバイスであり今回は 12 個の家電を対象としたアドバイスが用いた。

6.2.2 アドバイス機能付 HEMS とシミュレータ

アドバイス機能付 HEMS のデータを利用したシミュレーションをする際、シミュレータ内に対象となる住宅、家族を再現しなければならない。しかし本検証において対象となる住宅、家族に関する情報は、床面積、家族構成程度であった。そのため、本来シミュレーションに必要となる、住宅の構造、間取り、部屋数、部屋に設置された家電、家電の詳細、家族のプロファイル、スケジュールなどが全て未知の情報であった。図 6.4 にアドバイス機能付 HEMS とシミュレータの関係を示す。

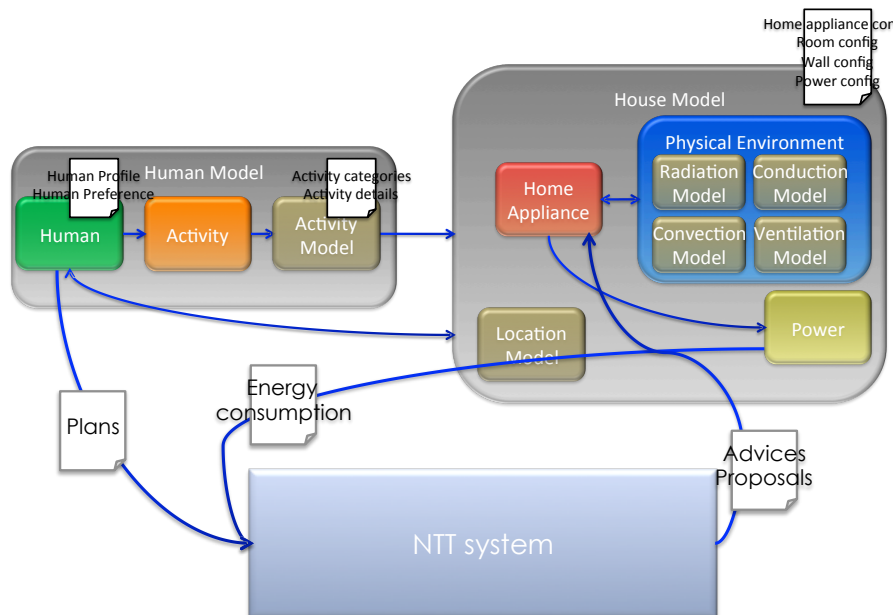


図 6.4: アドバイス機能付 HEMS とシミュレータの関係

このような問題から，本検証では，まず実験データからアドバイスがどの程度消費電力量に影響を与えるかを特徴量として算出することで，実験で利用された住宅だけでなくその他の住宅に同様のアドバイスが提供された場合の効果を特徴量を反映することで再現できるようにした。

6.2.3 アドバイスが消費電力量へ与える影響の特徴量の算出

特徴量算出手法

アドバイスの特徴量算出にあたり，まずアドバイス機能付 HEMS の実データを，アドバイスを実行する週単位に分割する。次に 7 月から 1 月までの各世帯の消費電力量のデータを冷蔵庫の消費電力量，全体の消費電力量，アドバイスを時系列順に並べる。このデータから，冷蔵庫の消費電力量，全体の消費電力量をそれぞれ目的変数をし，月，アドバイスを説明変数とした回帰分析を世帯毎に行い，得られた結果からアドバイスと消費電力量の関係を表す関数を得る。

有効データ数の検討

「アドバイス付 HEMS の省エネシステム」の実データとして、約 20 世帯の実データを解析に利用した。特徴量の算出の前にこれらの実データの有効データ数を調べ、解析に利用可能な世帯を調査した。有効データ数の条件として、

- 一週間の消費電力量データが計算できること
- 消費電力量に抜けが無いこと
- 冷蔵庫、全体の消費電力量データが揃っていること

また有効アドバイスデータ数の条件として上記の条件に加え、

- 「実施」されたアドバイスが必ず一つ以上あること

とした。以下の表 6.2 に世帯コード、有効データ数、有効アドバイスデータ数を示す。

この結果より、一定数以上の有効アドバイスデータ数を持つ世帯コード hems 0 1, hems 0 4, hems 0 9, hems 1 8 の世帯を対象とし、解析を行った。

冷蔵庫に関するアドバイスの特徴量

冷蔵庫の消費電力量を目的変数とし、月、アドバイスを説明変数とした回帰分析を行った。その結果から、通常の消費電力量の値に比べ、それぞれの説明変数が消費電力量に対しどの程度影響があるかの割合を以下の表 6.3 に示す。

1 列目は説明変数、2 から 5 列目は世帯を示す。また 1 列目、8 から 13 行目の番号はアドバイスのインデックス番号を表す。以下の表 6.4 にアドバイスのインデックス番号とアドバイスの関係を示す。

表 6.3 の結果から、アドバイスのインデックス番号 1 0 0 2 0 1, 1 0 0 2 0 3, 1 0 0 2 0 4, 1 0 0 2 0 5 については消費電力量の削減効果があったアドバイスであり、逆に 1 0 0 2 0 2, 1 0 0 2 0 6 は消費電力量が上がったアドバイスであった。

表 6.2: 世帯ごとの有効データ数

世帯コード	有効データ数	有効アドバイスデータ数
hems01	15	5
hems02	0	0
hems03	16	2
hems04	24	14
hems05	18	0
hems06	10	0
hems07	10	2
hems08	13	0
hesm09	15	4
hems10	5	0
hems11	3	0
hems12	5	0
hems13	9	0
hems14	1	0
hems15	2	0
hems16	0	0
hems17	5	0
hems18	5	3
hems19	5	0
hems20	0	0

冷蔵庫以外の家電に関するアドバイスの特徴量

冷蔵庫以外の家電に関するアドバイスの特徴量を求めるにあたり、全体の消費電力量から冷蔵庫の消費電力量を減じた値からアドバイスの解析を行った。しかし説明変数となる変数の数が月で6、アドバイスで30以上あり、その変数に対しデータ数は有効アドバイス数で述べたように精々10程度であったため十分な解析効果が得られなかった。しかし冷蔵庫のように、家電を限定した消費電力量

表 6.3: 冷蔵庫に関する季節，アドバイスの消費電力量への影響

	hems01	hems04	hems09	hems18
8月	-0.06157	-0.01241	-0.03660	
9月	-0.08673	-0.11677	-0.15969	
10月		-0.21917	-0.27615	
11月		-0.30624	-0.31633	
12月	-0.47648	-0.47278		
1月	-0.48565	-0.46944	-0.47369	
100201		-0.00057	-0.05222	
100202		+0.06323		
100203	+0.00828	-0.06763		-0.02731
100204			-0.03800	
100205				
100206	+0.03194	+0.01255		

表 6.4: アドバイスのインデックス番号とアドバイスの対応関係

100201	熱い物は冷ましてから冷蔵庫に入れましょう
100202	壁に接することなく適切な間隔で設置しましょう
100203	季節に合わせて温度調整をしましょう
100204	ドアを開けている時間は短くしましょう
100205	物を出し入れするときのみ開閉しましょう
100206	冷蔵庫の中は詰め込み過ぎず整理しましょう

のデータがあり，かつより多くのデータを収集することで，解析は可能である．全体の中で比較的顕著なデータとしてエアコンに関するアドバイス「冷房使用中はカーテンを併用したりすだれを使用しましょう」に関しては約4%の削減効果があった．以下の図にアドバイス前(図 6.5)とアドバイス後(図 6.6)の同じ世帯での消費電力量の変化を示す．図の横軸は時間であり一週間，縦軸は瞬時消費電力量である．アドバイス前の図の最初の2日間ほどはお盆期間であったため，消費

電力量が少ないと推測される。

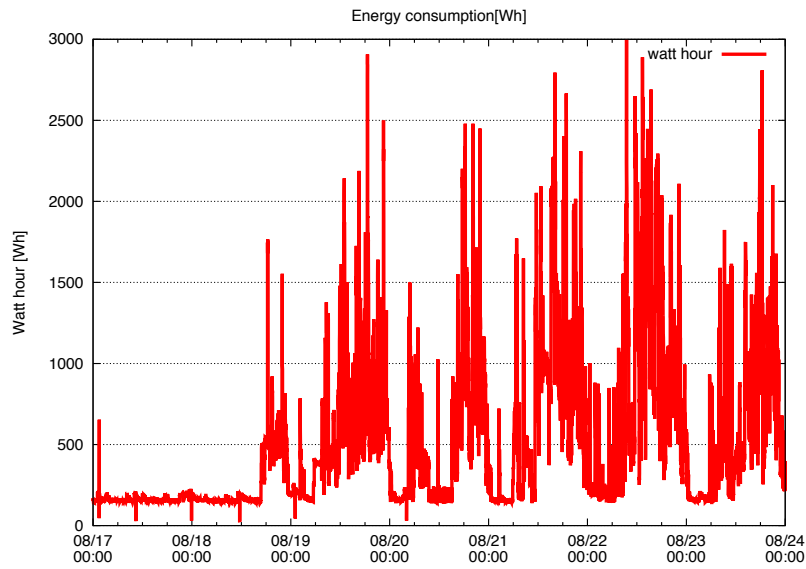


図 6.5: アドバイス前の一週間の消費電力量の変化

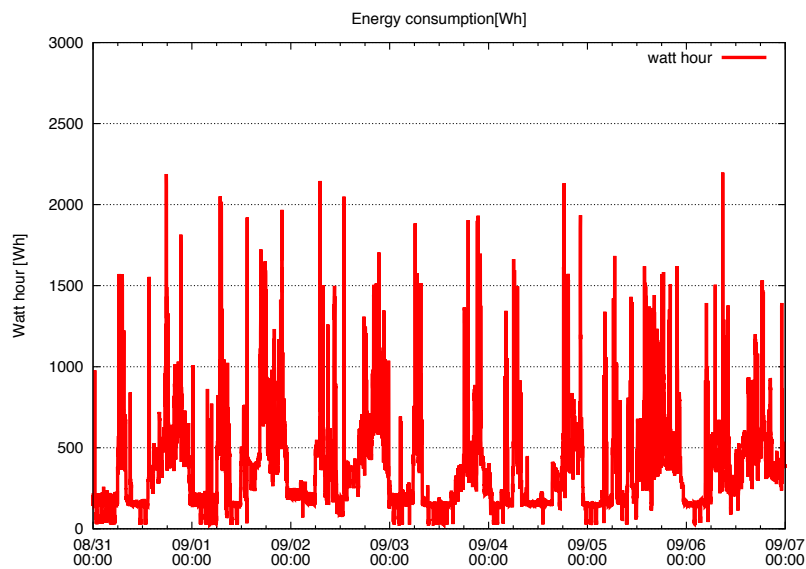


図 6.6: アドバイス後の一週間の消費電力量の変化

アドバイスの実行率

これまでアドバイスの消費電力量への影響を調べる目的で、特徴量の算出について述べたが、データ数の関係で十分な結果が出ているとは言い難い。また得られた特徴量をシミュレータに適用する際、これまででは冷蔵庫とエアコンに関する効果のみ可能である。そこで週単位で計算していた消費電力量とアドバイスのデータを日単位で解析し、アドバイスの実行率を求めることで、その世帯がアドバイスをどの程度実行するかの指標として利用することとした。この実行率を求めることで、これまで提示されていないアドバイスや、データ量が少なくアドバイスの効果が不明のアドバイスに関しても、実行率とその効果を家電の消費電力量から機械的に求めることで未知のアドバイスの影響を推測する。図 6.7 にアドバイスの実行率を示す。図の横軸は世帯コードの番号、縦軸(左)はアドバイス数、縦軸(右)はアドバイスの実行率、実線はアドバイス総数、点線はアドバイスの実行数、点線の棒グラフはアドバイスの実行率を表している。

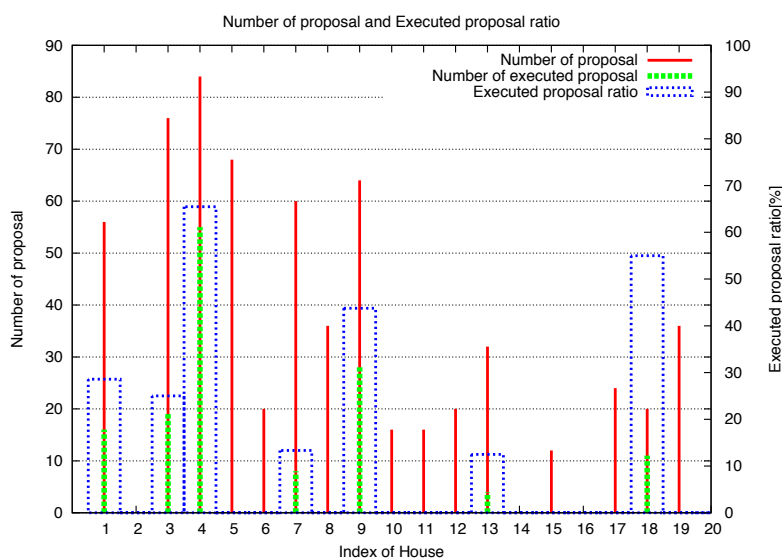


図 6.7: アドバイスの実行率

アドバイスの効果

前述した特徴量の解析では、1週間ごとのデータを利用したが、ここでは1日単位のデータを利用することで標本数を増やす。図 6.7 の結果から hems 0 1, hems 0 4 を対象としアドバイスの効果を解析した。

- 導出 1

目的変数として全体の消費電力量、説明変数として月、冷蔵庫以外の家電が関連するアドバイスの有無

- 導出 2

目的変数として冷蔵庫の消費電力量、説明変数として月、冷蔵庫が関連するアドバイスの有無

hems 0 1, hems 0 4 についてそれぞれ導出 1 (表 6.5), 導出 2 (表 6.6) の結果を示す。今回の結果は、割合ではなく消費電力量の値となっている。また導出 2 では、効果を算出できなかったアドバイスに関しては省いている。

アドバイスの効果の評価

導出結果の評価を行うため、自由度調整済み決定係数 \hat{R}^2 を求めた。 \hat{R}^2 は、標本数 n , 説明変数の数 k , 決定係数 R^2 を用いて、

$$\hat{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1}(1-R^2) \quad (6.1)$$

と表せる。また R^2 は、目的変数の予測値の分散 $s_{\hat{y}}^2$ と目的変数の実測値の分散 s_y^2 を用いて、

$$R^2 = \frac{s_{\hat{y}}^2}{s_y^2} \quad (6.2)$$

と表せる。

hems 0 4 の導出については、導出 1 (冷蔵庫) で \hat{R}^2 が 0.997, 導出 2 (全体) で \hat{R}^2 が 0.9317 と高い再現性を持つ重回帰分析が実行できた。この回帰診断図を図 6.8, 図 6.9 に示す。回帰診断図は、左上図に残差とフィット値の散布図, 右上図に標準

表 6.5: 導出 1 (冷蔵庫) に関する季節, アドバイスの消費電力量への影響

	hems01	hems04
7月	3.19944444	3.26752356
8月	3.07440000	3.23022688
9月	2.91886093	2.91966667
10月		2.58296455
11月		2.38485427
12月	1.78652337	1.76513456
1月	1.64773036	1.75116250
100201		0.04329668
100202		0.13812332
100203	-0.01759382	-0.27489365
100204		
100205		
100206	0.01936411	0.02523436

化した残差の Q-Q プロット, 左下図に残差の平方根プロット, 右下図に楕円値とクックの距離を表している。

本解析において, 月を説明変数として選択しているのは月ごとの消費電力量の変化がアドバイスによる変数に比べ非常に大きいからである。参考に説明変数から月を除きアドバイスのみの重回帰分析を行い, 自由度調整済み決定係数を求めた。月の説明変数を除くと消費電力量全てがアドバイスにより決定されると考えるのは不自然であったため, その月の消費電力量の平均値を減じた値をデータとして利用した。結果として, hems 0 1, hems 0 4, 導出 1, 導出 2 の自由度調整済み決定係数は精々 0.04 であった。

表 6.6: 導出 2 (全体) に関する季節, アドバイスの消費電力量への影響

	hems01	hems04
7 月	6.7714286	13.662446886
8 月	6.6983405	9.106445886
9 月	4.0675454	5.797179487
10 月		6.208744884
11 月		7.770173414
12 月	8.2552066	9.064299548
1 月	8.9460638	10.908922045
100101		-7.624446886
100102	0.3843291	
100103	-2.4235773	
100104	3.3221488	
100105	1.30733471	-0.281064902
100401		-0.363929150
100402		0.635280688
100403		-0.007169751
100501		-4.032446886
200205		-0.082316313

6.2.4 未知な住宅における消費電力量と行動の推定

アドバイス機能付 HEMS の実データは, 消費電力量とアドバイスに関する情報のみであり, 具体的な住宅に関する情報が少ない. これまで述べた特徴量を用いたシミュレーションは, 以前に行った実験の住宅データをテンプレートとして利用し, 家族構成, 家族のプロファイル, 家電, そして特徴量を導入することで実現可能だが, よりシミュレーションの精度を高めるため住宅の詳細を推定する.

このようなデータの推定には多くの手法が存在するが, 本研究ではシミュレータにより確率を用いて総当たりに未知の値を変化させながら 1 日のシミュレー

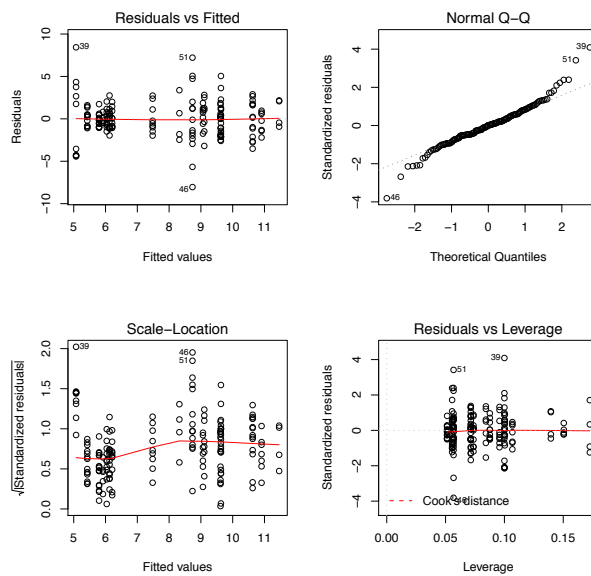


図 6.8: 導出1 (冷蔵庫) の回帰診断図

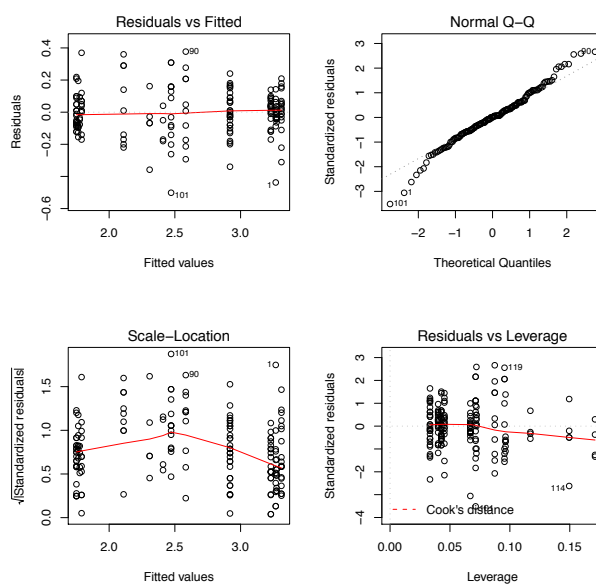


図 6.9: 導出2 (全体) の回帰診断図

ションを実行する。そして1日の消費電力量とアドバイス機能付 HEMS の消費電力量の実データとの類似性を比較し、一定の繰り返し数に対し最も消費電力量パ

ターンの近いものを導出する。消費電力量の比較には時系列データの類似性を求める手法 [63] [64] を用い、ユークリッド距離による探索を行った。

距離の算出手法は、時系列 $x = [x_t]$ (シミュレーション結果の時系列消費電力量データとする)、 $y = [y_t]$ (アドバイス機能付 HEMS の時系列消費電力量実データとする) に対し、

$$D(x, y) = \sqrt{\sum_{t=0}^{n-1} (x_t - y_t)^2} \quad (6.3)$$

で表せる。探索は以下の流れで行った。

1. シミュレーションの実行
2. 類似度の計算
3. 乱数のシード値、類似度を保存
4. 探索条件を満たせば5へ、満たしていなければ1へ
5. 最も類似度の高い乱数のシード値と類似度を結果として出力

またシミュレーション対象の住宅の場所が異なる場合は、気象庁の過去の気象データから、該当する日の気温、湿度、風向、風速、日照時間を取得し利用した。

図 6.10 に乱数のシード値 1 の消費電力量の比較、距離の図を示す。図の横軸は一日の時刻を表し、縦軸 (左) は消費電力量を、縦軸 (右) は消費電力量の距離を表す。1 分ごとの距離を求めたところ距離は 19481.088205 であった。

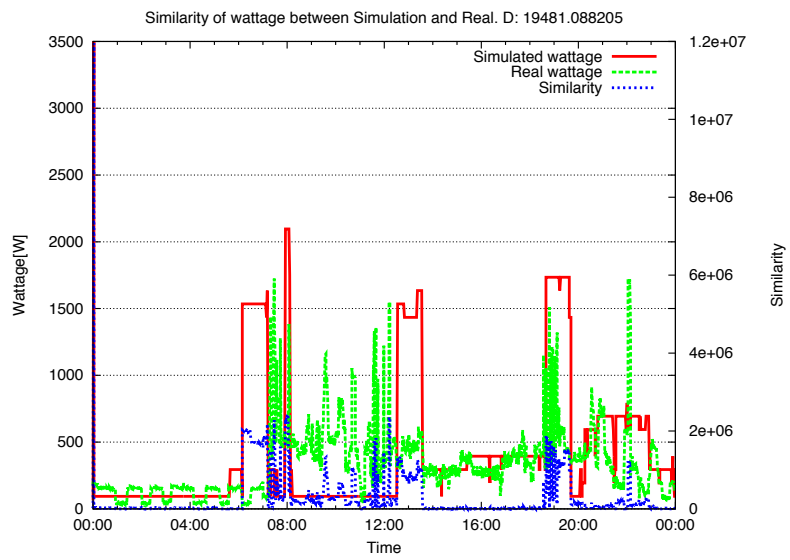


図 6.10: 乱数のシード値 1 の消費電力量の比較と距離

第 7 章

議論

本章では、ホームネットワークサービスおよびシステムの抱える問題点に対し、これまで述べてきたシミュレーションを用いてどのようにそれらを解決するかを論じる。2章において、住宅のシミュレーション要件を大きく利便性と精度に分類し、それぞれの要件をまとめた。本章でも、この分類に乗っ取りシミュレーションの利便性と精度に関する議論を行う。

7.1 精度の高いシミュレーション


本研究では、シミュレーションの精度を高めるため実世界を強く意識したシミュレーションの設計を行っている。具体的にはシミュレーションを現実と同様の規模で実現する、シミュレーションの要素を実世界と入れ替えたシミュレーションを行う、または要素が実世界と同様のインタフェースを持つ、などである。まずシミュレーションの規模について、実際に行った実験をふまえ議論する。次に実際にシミュレータの特定の要素を実世界と入れ替えた場合、どのような点を考慮シミュレーションを実行すべきかを、要素ごとに検討する。また精度を高めつつ規模を拡大するため、精度の異なるシミュレーションを組み合わせ利用する点について議論する。

7.1.1 シミュレーションの規模

本研究で想定する次世代のホームネットワークサービスまたはシステムの対象は、数万、または数十万というオーダーであり、そのような大規模なシミュレーションの実現を考慮した設計をしている。シミュレータは単一の計算機上で複数の住宅のシミュレーションを、または複数の計算機上で多数の住宅のシミュレーションを実行する機能を持つ。これらの機能はロボットのシミュレーションにおいて行った大規模実験の知見を元に、テストベッド上の大規模計算機クラスタを利用し大量の住宅のシミュレーションを実行する。

ある計算能力を持った計算機上で実行できるシミュレーションの並列度は限られており、単一のシミュレーションの計算量で決まる。つまりシミュレーションの計算のモデルを簡略化したものを利用すればする程並列度は増す。またこの前提は実時間の制約を前提としているため、実時間の N 倍時間 (N は正の整数) という緩い制約に変更すると更に並列度は増加する。この問題に関する詳しい議論は 3.3.4 で述べている。

複数のシミュレーションを並列して実行する場合、実世界との連携の一部に問題が発生する可能性がある。これはネットワーク的な解決が一意になされなくなることが原因である。この問題に対する解決策はネットワークインタフェースを増やす方法や、より上位のレベルでアドレッシングを行う方法などがあるが、いずれも実験の本質とは異なる部分の作業が必要となる。

大規模な実験を行った具体例として、StarBED2 プロジェクトの最終ヒアリングでのデモが挙げられる。デモンストレーションの概要図を  7.1 に示す。本デモンストレーションでは、2種類の異なるネットワークに接続した400世帯の住宅をシミュレートした。住宅は全て4人家族が生活していることを想定し、住宅のモデルはiHouseを踏襲した。住宅の消費電力量を逐次計測し、消費電力量をデマンドコントロールサーバへ送信する。デマンドコントロールサーバは一定量の電力要求を超えるとデマンドレスポンスメッセージを住宅へ送信する。デマンドレスポンスメッセージを受信した住宅は、住宅内のエアコンのモードを自動的に調節し、消費電力量を抑える。

住宅の内半数の200軒は障害の無いネットワークに、半数の200軒は不定期に障害の起きるネットワークに接続している。そのため、半数の住宅はネット

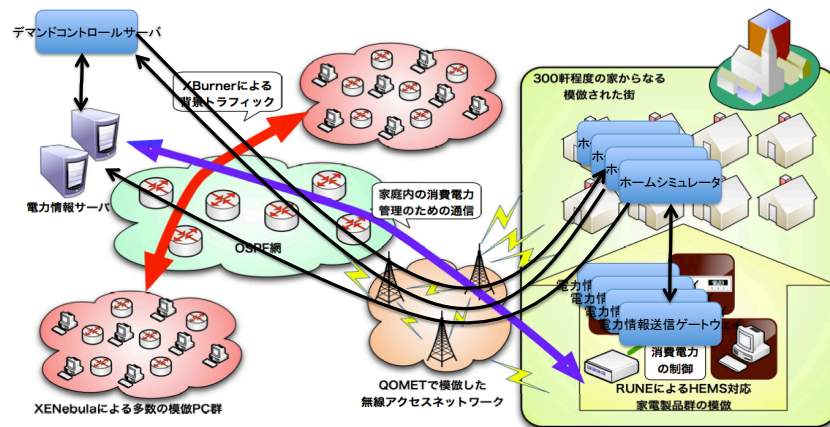


図 7.1: 400世帯の住宅のシミュレーション

ワークに障害が起こってもデマンドコントロールサーバまで消費電力量のメッセージが届かずデマンドレスポンスメッセージを受信しない。この200件ずつの消費電力量を可視化した図を図 7.2 に示す。

図のように、障害の起こるネットワークに接続した世帯の消費電力量がデマンドコントロールサーバに届いていない様子が確認できた。

7.1.2 単一計算機上でシミュレート可能な世帯数

本シミュレータが単一計算機上で再現可能な世帯数を調べるため、テストベッド上で実験を行った。テストベッドは北陸先端科学技術大学院大学の CHADANS を利用した。CHADANS は、45 台の計算機クラスタと 1 台の管理用サーバにより構成されるホームネットワーク用テストベッドである。CHADANS 上の各計算機上でシミュレートする世帯数を変更し、本シミュレータを実時間で実行した。表 7.1 に CHADANS の計算機の性能を示す。

実験は管理用ノードから実験制御用スクリプトを実行し、実験の開始、実験の停止、ログの回収を行った。実験シナリオは、iHouse における 4 人家族の 1 日の

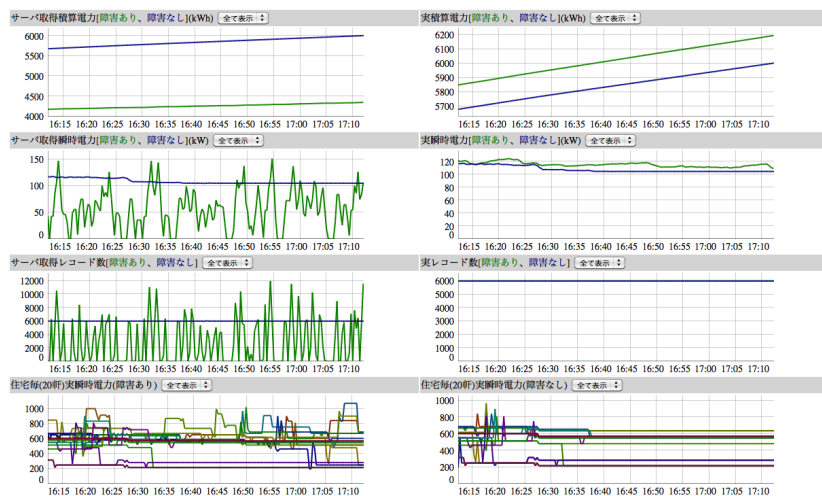


図 7.2: 異なるネットワークに接続した 200 件ごとの住宅の比較

表 7.1: テストベッド CHADANS の各計算機の性能

項目名	性能
プロセッサ名	Intel Core 2 Duo
プロセッサ周波数	2.26GHz
プロセッサ数	1
コア数	2
二次キャッシュ	3MB
メモリ	4GB
バス速度	1.07GHz

シミュレーションを再現し、計算量を同一にするため全ての世帯は同一の乱数のシードを用いて実行した。便宜上 40 台の計算機に 1 から 40 までの名前を付ける。世帯数は計算機ごとに変更し、計算機 1 では 1 世帯、その他の計算機では名前 \$NAME に対し、 $(\$NAME - 1) * 10$ 世帯をシミュレートした。

結果として、本計算機上では 170 世帯を実時間でシミュレートすることがで

きた。180世帯以上のシミュレーションでは、実時間内に1ループを終了することができなかった。本実験において、180世帯以上のシミュレーションではどのような要因により実時間の実行が不可能となったかを調べるため、ps, vmstatコマンド、またシミュレータの時間管理機構のログからその原因を調べた。

図 7.3 に単一計算機上でシミュレートした世帯数ごとの計算機のCPU時間使用率とメモリサイズを示す。CPU時間使用率とは、システム時間 $time_{sys}$ 、ユーザー時間 $time_{usr}$ 、経過時間 $time_{elp}$ に対し、

$$Ratio = (time_{sys} + time_{usr}) / time_{elp} * 100 \quad (7.1)$$

により求めた。またメモリサイズは、シミュレータが利用した物理メモリサイズと仮想メモリサイズの和である。図の横軸は単一の計算機上でシミュレートした世帯数を、左の縦軸はCPU時間使用率を、右の縦軸はメモリサイズを表す。C

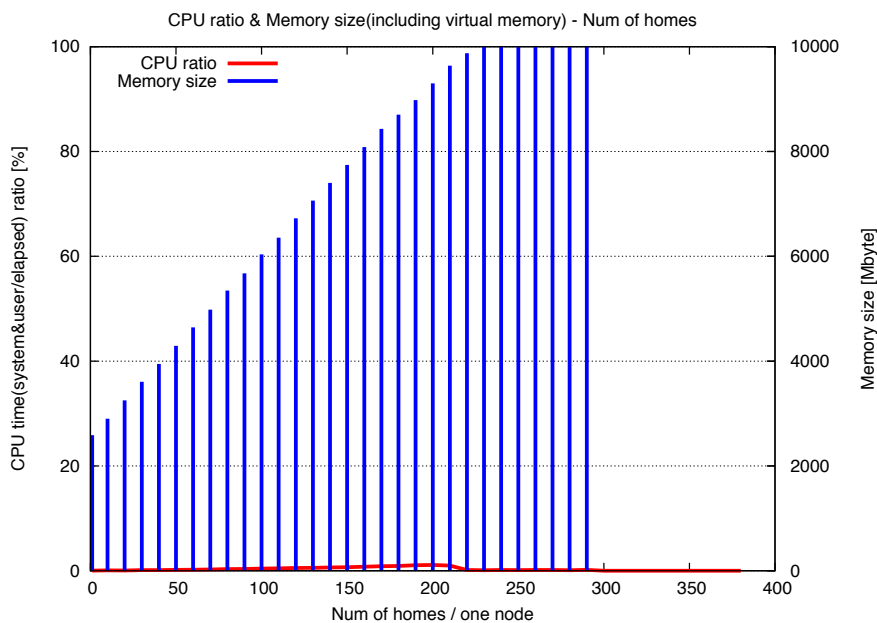


図 7.3: 世帯数ごとの CPU 時間使用率, メモリ

PU時間使用率は実時間内の実行が不可能であった180世帯のシミュレーションにおいても精々1%であった。しかしメモリサイズは世帯数に対し正比例して増加していることが分かる。世帯数が310以上のメモリサイズが0である原因は、初期化ができずシミュレーションが開始していないためである。

図 7.4 に単一の計算機上でシミュレートする世帯数ごとのシミュレーションの初期化時間と 1 ループに要した時間を示す。初期化時間とは、シミュレータが複数の世帯をインスタンス化しシミュレーションループに入るまでに経過した時間である。図の横軸は単一の計算機上でシミュレートした世帯数を、縦軸は時間（秒）を表す。世帯数が増加すると初期化時間は指数的に増加することが分かる。

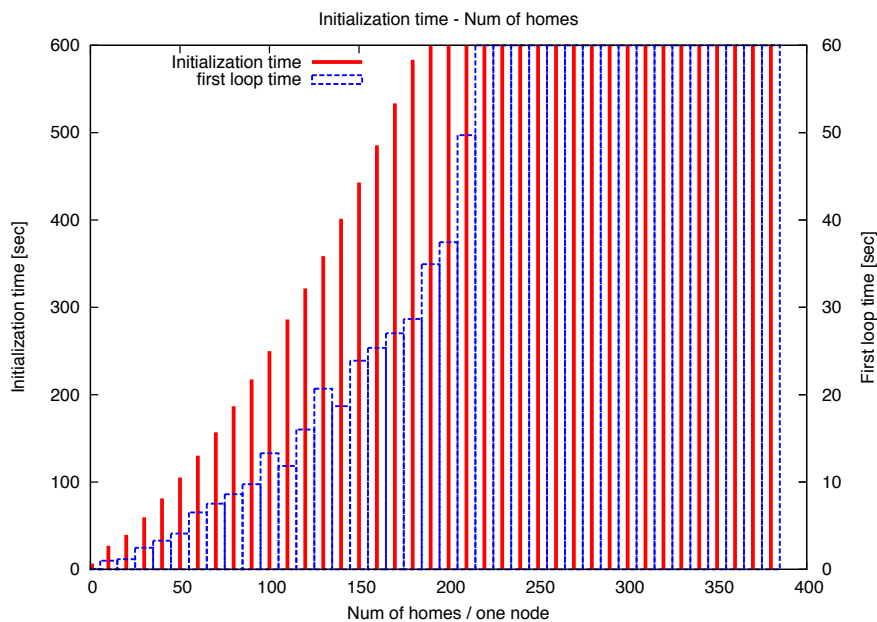


図 7.4: 世帯数ごとのシミュレーション初期化時間

図 7.5 に単一計算機上でシミュレートした世帯数ごとの計算機のページイン、ページアウトのサイズを示す。図の横軸は単一の計算機上でシミュレートした世帯数を、左の縦軸はページインのサイズを、右の縦軸はページアウトのサイズを表す。ページインのサイズは実時間の限界である世帯数 170 の直前である 160 まで増加し、それ以降減少するが、世帯数 190 から再度増加する。一方ページアウトのサイズは実時間の限界である 170 から急激に増加する。

実時間での実行が不可能になった要因は多数の世帯をインスタンス化するため、多量のメモリ領域が必要となりページインのみでなくページアウトが急激に増加したことで I/O の処理が実時間内に終了しなかったためである。

単一計算機上でシミュレートする世帯数を増やすためには、ページングのボトルネックを解消するための対策として、例えば物理メモリを増やすことや高速な

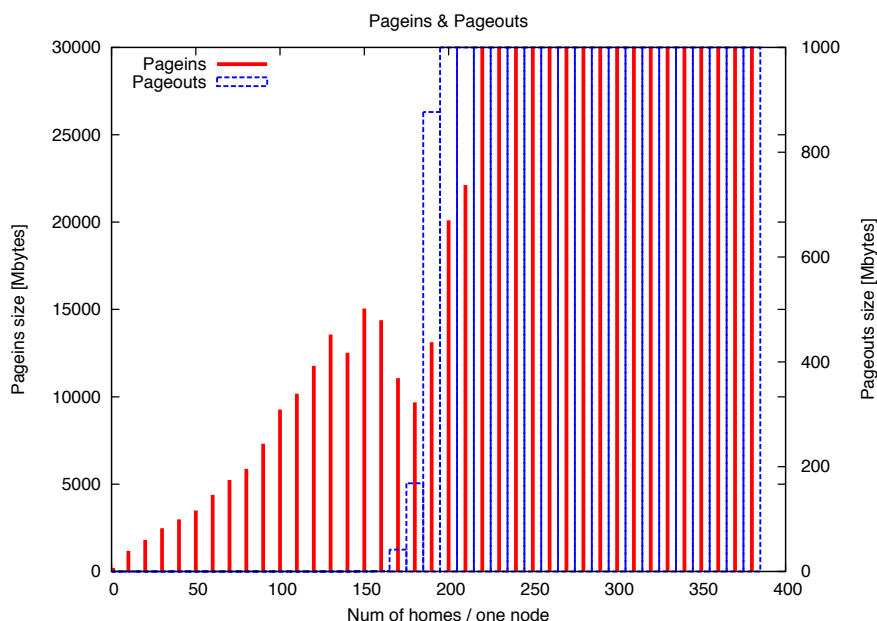


図 7.5: 世帯数ごとのページイン，ページアウトサイズ

I/O 処理が可能なディスクを利用することなどが有効である。本テストベッドでは，45 台の計算機クラスタを用いて約 7650 世帯のシミュレーションが可能である。

7.1.3 実世界との連携

- 住宅

住宅は，2.3 で定義している通り，住宅そのものの構造や仕様を指す。これらの情報は，家電，環境，人間の行動をシミュレートする際参照される情報であるため，住宅の構造や仕様をシミュレータに与えず計算をすることはできない。ただし，住宅の全てのモノに対しタグが埋め込まれ，住宅の構造から壁の材質の仕様までネットワーク越しに参照可能であったり，その住宅の構造や仕様がある場所から参照できる場合は，シミュレータはこの情報を利用して実世界の情報を参照できる。またシミュレータ内で，窓，カーテン，サッシ，オーニングの制御が行われた場合，シミュレータで定義する ECHONET に対応する設備が備わっていればシミュレータからこれらの機

器を制御することが可能である。

- 家電

シミュレータ内の家電は ECHONET に対応したコマンドにより制御，参照される。そのためネットワーク的な解決がされれば，シミュレータから家電を操作する際実際の家電を制御することが可能である。ネットワーク的な解決とは，例えばシミュレータ内で住人がエアコンを動作させた場合実機の家電へのネットワーク的なリーチャビリティ，家電が ECHONET に対応していること，住宅内に ECHONET ゲートウェイが存在し ECHONET のアドレスが振られていること，これらを満たせば可能である。また逆に実機の家電の状態の変化からシミュレータ内の家電の状態を変化することは容易に実現できる。これは実機の家電の状態を監視し，状態が変化した際同時にシミュレータ内の家電の状態を変化させれば良い。

- 環境

実世界の環境とシミュレータを組み合わせるためには，実世界の環境を参照するためのセンサとセンサへのネットワーク的なリーチャビリティが必要である。更にシミュレータ内で例えばエアコンを動作させた場合，実世界の環境も変化することが期待される。そのため，実世界はシミュレータ内と同様の家電が設置してあり，シミュレータから実世界の家電を操作することが必要となる。

- 電力

電力も環境と同様の性質を持つ。電力を参照するためには，電力計センサが住宅内に設置されている必要がある。シミュレータ内の家電が使用された際，実世界でも同様の電力が使用されるべきであり，実世界の住宅にはシミュレータと同様の家電が設置されている必要がある。また実世界の電力は，精々 1 世帯の情報を参照することがやっとなり，多数の世帯を想定する場合，これは実証実験と変わらないものである。

- 人間

実世界の人間とシミュレータを連携させるためには，上記に挙げた全ての要素がシミュレータの情報を反映して変化する仕組みが必要となる。

以上から、最も容易に実世界と連携可能な要素は家電であり、環境、電力についても可能であると言える。しかし住宅、人間とシミュレータの連携は非常困難、またはコストのかかる課題がある。

7.1.4 精度の異なるシミュレーションの組み合わせ

本シミュレータでは、シミュレータの精度、詳細度を様々な形で変更することができる。まずシミュレーションの要素ごとの精度の変更について述べる。

環境のシミュレーションは、精度もモデルも全く異なるシミュレーションを選択することができる。またそれぞれのモデルについても、数値流体力学による環境のシミュレーションの場合、空間モデル、CFD プログラム群を変更することで精度の変更が可能である。またシミュレーションの1ステップの時間を変更することでも精度の変更ができる。熱力学による環境のシミュレーションでは、計算モデルの中から熱貫流率を用いて熱の移動を計算する場合と熱の伝導を用いて熱の移動を計算する場合などモデルを組み合わせ、精度を変更することが可能である。またここでも同様に1ステップの時間を変更することで精度のへこうができる。

シミュレーション全体については、時間に関する変更で精度を変更できる。シミュレーションの1ステップをより短くし精度を高めることや、1ステップを長くし高速なシミュレーションが可能である。またログの機能を省くことによる高速化も可能である。

以上で述べた異なる精度のシミュレーションは、同時に実行するシミュレーションに適用することによって限られた計算機上での実験規模を増加することができる。時間に関してシミュレーション間で異なる設定をした場合、それぞれの同期機構が必要となるが、それ以外であればシミュレーションのモデルは異なった場合でも、共通のインタフェースにより設計してあるため、同時に異なる精度のシミュレーションがインタラクションしながら動作することが可能である。

7.1.5 シミュレーションのマクロモデル

限られた計算資源上でより精度の高いシミュレーション結果を得るためにはより精度の高いモデルを用いることが必要であるように、よりシミュレーションの

規模を拡大するためにはより抽象的なモデルを用いることが必要である。7.1.2で示した様に、テストベッド CHADANS 上では約7650世帯の実時間シミュレーションが可能であるが、日本全国の世帯数は5千万程度であり、ある特定のホームネットワークサービスの利用者が仮に1%と仮定しても必要となる世帯数は50万世帯である。StarBEDのハードウェアを利用する場合、約1000台の計算機を利用できるため単純計算で17万世帯のシミュレーションが可能であるが、やはり50万世帯には及ばない。

このような規模のシミュレーションを実行するためには、ある一定数のシミュレーションから得られたデータ、知見を元にマクロモデルを作成することが有効である。本シミュレーションから作成するマクロモデルは、従来のマクロモデルとは異なり一軒一軒のシミュレーションを高い精度で再現し、その実データを用いてマクロモデルを作成する点にある。例えば数万の人口の街のトラフィックを解析し、その街のパターンを様々なパラメータを用いて変更する。このパターンごとのトラフィックにより、どのようなパラメータが街のトラフィックに影響を与えるかを解析し街のトラフィックマクロモデルを作成する。このようなマクロモデルを利用することで、シミュレート可能な世帯数を大幅に増やすことが可能である。

しかしこのようなマクロモデルには、動的なイベント、インタラクションに対する処理が問題となる。動的なイベントやインタラクションの影響を反映するためには、この影響の反映もモデル化する必要がある。本来このようなマクロモデルの作成は実データや統計情報を元に作成されることが多いが、本シミュレータを用いることでパラメータを変更しながら何度も様々なシミュレーションを再現できるため、上記のような動的なイベントやインタラクションに対応したマクロモデルを作成するためのデータを何度も生成することが可能である。

7.2 利便性の高いシミュレーション

本節では、2で列挙したシミュレーションの利便性について議論する。利便性に関する解決手法はシミュレータの機能による部分が多く、住宅のシミュレーション要件であげた要件に対し、対応する機能について述べる。

7.2.1 シミュレーションの自動化機構

シミュレータには基本的な実装の他に様々なツール群が用意されている。自動化機構はその一部であり、特に複数の計算機上で多数の住宅のシミュレーションをするためのシェルスクリプト群を用いることで実験を容易に自動化可能である。またシミュレーションのコンフィグレーションファイルを変更した際、全ての計算機にその変更を反映する機能、実験の開始、実験の停止、ログの収集などの機能を備える。

7.2.2 繰り返しや網羅的な検証

シミュレーションの繰り返し実行や、網羅的な検証について議論する前にシミュレータの基本設計について簡単に述べる。本シミュレータの実装は、多数のシミュレーションコンポーネント及びツールから成る。基本モデルは、5.1で述べた実装のモデルであり、ユーザーが本シミュレータを用いて設定を変更する場合や、独自のシミュレータを実装する場合、この基本モデルに沿うことで既存のシミュレーションコンポーネントを流用することができる。既存のシミュレーションコンポーネントを組み合わせグラフ構造を構成することでユーザーは全く新しいシミュレーションを構築することが可能である。グラフ構造の構成は、最も簡単な例としては、5.1で述べた既存の「ネットワーク」を「エッジ」で連結することで実現できる。

繰り返しや網羅的なシミュレーションを実行する場合、既存の住宅のシミュレーションを指定のルールに合わせたループで構成すれば良い。例えばシミュレーションの結果、1日の消費電力量が5KWを下回るまでシミュレーションを繰り返す際は、住宅のシミュレーションを1日実行し、最終的な積算消費電力量の値を評価し条件を満たせば終了する簡単なループにより実現できる。網羅的な検証例としては、6.2.4の例で説明している。

7.2.3 高速なシミュレーション

本シミュレータは、厳密ではないが時間管理機構を持つ。ここで厳密とは、異なる計算機間の実時間及びシミュレーション時間の高い精度での時間同期機構を指す。厳密ではないとは、それぞれの計算機同士の時刻が同期していることを前提としていることを指している。時間管理のため、シミュレータは内部に実時間、シミュレーション時間を保持し、実時間の制約を守れているかを常時確認しながら動作する。ユーザーはコンフィグレーションファイル内において、実時間のシミュレーション開始時間、実時間のシミュレーション1ステップの時間、シミュレーション時間のシミュレーション開始時間、シミュレーション時間のシミュレーション1ステップの時間を指定することでシミュレーションの速度を設定することができる。ここで、実時間のシミュレーション開始時間を0以下の値に設定することで、シミュレータは1ステップごとに待ち状態に入らず実行される。7.1.1で実施したデモの場合、待ち状態無しでテストベッドの1台の計算機上で1シミュレーションを実行した際1日のシミュレーションを約2分程度で実行できた。

7.3 展望

本節では、提案するシミュレータを用いることで期待できる様々な検証や、今後展開されるシミュレーションによる新領域の可能性について述べる。

7.3.1 ホームシミュレータを用いて可能となる検証例

提案するシミュレータを用いることで、住宅に関連する様々な検証が可能となる。ホームネットワークに関する研究は、検証に利用可能な代表的な分野である。本シミュレータの特性上、低レイヤのネットワークやセンサネットワークに関する研究との親和性は低いですが、上位のサービスレベルの研究に対しては計算機上で仮想的に動作する住宅を再現できることは非常に大きなメリットとなる。本シミュレータは、環境、家電、電力、人間が相互作用しながら動作する住宅を再現するため、ユーザーが想定する検証シナリオに合わせ住宅の要素が変化する情報を得ることができる。

例として、住宅内の空調制御アルゴリズムを検証する際、センサから得られる各部屋の温度、湿度情報、家電の状態の参照と制御、消費電力量、人間の行動から人間が不快に感じない空調制御を行いその中で消費電力量を最小限に抑えるなど様々な条件を変化させながらシミュレーションを実行することが可能である。気象庁の天候データを入力することで、日本全国のカーテン、窓、オーニングなどの住設設備を制御するパッシブ空調の検証も行うことができる。消費電力量に関しても、単純な家電の制御と環境のみではなく、アルゴリズムに基づく空調を行った場合の人間の行動の変化も含めた、より現実的な消費電力量を算出することが可能である。

また環境の情報、家電の状態、人間の行動を元としたコンテキストアウェアネスに関する研究に関してもコンテキストを利用した様々なサービス、アプリケーションの検証を行うことができる。本シミュレータは、環境、家電、人間、電力の全ての要素が3次元空間における位置情報を持っているわけではないため、コンテキストの生成の段階の研究に対しては不向きであるが、人間の行動を始めとした、認識されたコンテキストを生成することができる。このコンテキストを利用し状況に応じた最適なサービスやアプリケーションを住宅に提供する際の効果の検証を行うことが可能である。

更に大規模な住宅をテストベッド上で実行することで、街レベルの規模の住宅に対するシミュレーションが可能である。近年注目を集めているスマートシティに関する研究の検証として、ユーザーが検証したい様々な分野のシステムまたは機器を導入した街をシミュレーションにより再現し、その効果を検証することができる。街は統計情報を利用することで、特定の県、全国の人、世帯を対象としたシミュレーションが可能である。

また本シミュレータの環境、家電、電力、人間から得られる多種多様なデータを収集するクラウドコンピューティングのシステムと組み合わせることで、街レベルの大量のセンサデータ、家電または住宅の状態、家庭の消費電力量、人間の行動履歴のトラフィックを生成することができる。この様にして、住宅を対象とした次世代の大規模なデータ、サービス、アプリケーションの様々な検証が可能となる。

7.3.2 シミュレーションが切り開く新しい領域

計算機によるシミュレーションは、解析対象を計算機上で再現可能なモデルを作成し、離散時間内のモデルの状態変化を計算することで解析対象の振る舞い、出力を得ることで様々な現象の予測を立てる際に用いられる。例えばシステムに網羅的な入力を与え欠陥が無いか検証したり、効率的な出力を探すという用途や、災害時の被害などの予測、ゲームなどにも利用されている。

本研究では、本来順方向に進むシミュレーション内の離散時間を逆方向へ遡ることにより、得られたデータからその入力は何であったかを推定するシミュレーションを行った。具体的には消費電力量の時系列データから住宅内の家族の行動を推定したが、このようなシミュレーションの利用方法は今後様々な問題に適用可能であると考えられる。例えば同様の推定として家族構成、住宅内の家電構成、住宅の地域などが挙げられる。本論文で示した推定の例の対象は単一世帯であるが、街レベルのマクロモデルをホームシミュレータにより生成することで、生成したマクロモデルを用いて同様の解析を行うことが可能である。

今後各家庭に高度なホームネットワークが構築され、様々なホームネットワークサービスが提供されるようになると予想されるが、単一世帯のみではなく大規模な街レベルの世帯において世帯ごと、地域ごとに多様なデータが得られる。これらのデータは住宅における家電の消費電力量、センシングデータ、サービスの利用履歴など様々であるが、このような多量のデータからそのデータの表す特徴を解析する技術の一つとして本論文で示したシミュレータを用いた解析が考えられる。このような解析手法には機会学習、データマイニング、パターン認識などが用いられるが、本シミュレータの様なモデルとデータを照合することにより既存の手法では発見できない特徴や知識を得ることができる。世帯ごとの家族のプロファイル、習慣的行動、家電、電力消費パターンなど様々な情報を推定し、仮想世界の中に様々なパターンのライフスタイルを再現、評価することにより、対象の世帯にとって快適なライフスタイルの提案を対話的に行うシステムやロボットの検証を本シミュレータとマクロモデルにより実現することも可能となってくる。

第 8 章

むすび

本論文では、次世代のホームネットワークサービスおよびシステムを実証的に検証可能なシミュレータについて述べた。

ホームネットワークの現状について整理し、次世代のホームネットワークサービスおよびそのシステムの検証の関連研究をまとめた。従来の実証実験やシミュレーションでは解決不可能な問題点について述べ、その解決手法として実証的ホームシミュレータを提案した。

まず実験住宅におけるシステム構築の知見を元に住宅を住宅、家電、電力、環境、人間の5つの要素に分類した。それぞれの要素のシミュレーションモデルについて述べ、環境の要素のシミュレーションに対し、実験住宅 iHouse において収集した実データとシミュレーション結果を比較し、高い精度で環境を再現できることを確認した。また HEMS の実験データを元に、世帯がシステムのアドバイスに対しどの程度消費電力量削減効果があるかを解析し、未知の住宅における消費電力量の特徴を網羅的シミュレーションにより推定することができた。

シミュレーションの精度に対し、大規模な世帯への対応、実世界との連携、精度の異なるシミュレーションの組み合わせ、マクロモデルについて議論した。またシミュレーションの利便性に関しては、シミュレーションの自動化機構、繰り返しや網羅的な検証、実時間で実行しない際の高速なシミュレーションについて述べた。

本論文を通し、家電、環境、電力、人間が相互作用する住宅の様々なサービス、システムのシミュレーションに関する知見を得るとともに、提案するシミュレー

タの解決可能な領域と今後解決が必要となる問題を明らかにした。

謝辞

本研究を行なうにあたり，終始ご指導を賜りました丹 康雄教授に深く感謝します。

また審査委員をお引き受けいただいた本学 篠田 陽一教授，本学 知念 憲一特任准教授，本学 Lim Azman Osman 准教授，産業技術総合研究所／本学客員准教授 山下 倫央氏には，本論文を執筆するにあたり多大な助言をいただきました。深く感謝致します。

副テーマにおいてご指導を賜りました本学 Defago Xavier 准教授に感謝致します。

StarBED プロジェクトにおいて，多大な助言をいただいた慶応義塾大学 大学院 政策・メディア研究科 中田 潤也特任准教授（元 情報通信研究機構 研究員），情報通信研究機構 研究員 Razvan Beuran 氏に感謝致します。また本学 高信頼ネットワークイノベーションセンター（元 インターネットリサーチセンター），情報通信研究機構 北陸 StarBED 技術センター（元 情報通信研究機構 北陸リサーチセンター）の皆様にも感謝致します。

富士通株式会社，富士通研究所，富士通長野システムエンジニアリングの皆様には実験住宅におけるデータ収集を始め，研究に対し助言を頂いたことを感謝致します。

本論文をまとめるに当たって御協力いただいた丹研究室の諸兄に厚く御礼申し上げます。

最後に，遠方から支えて頂いた高山家の皆様にも，また私の研究に対し理解を示して頂いた家族に最大の感謝を致します。

参考文献

- [1] 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, (2010).
- [2] IEEE STANDARDS ASSOCIATION, IEEE 802.3 ETHERNET WORKING GROUP, (online), available from (<http://www.ieee802.org/3/>) (accessed 2011-07-15).
- [3] International Telecommunication Union Telecommunication standardization sector(ITU-T), Standardization(ITU-T), (online), available from (<http://www.itu.int/ITU-T/>) (accessed 2011-07-15).
- [4] HomePNA Appliance, (online), available from (<http://homepna.org>) (accessed 2011-07-15).
- [5] TOSHIBA HOME APPLIANCES CORPORATION, 東芝ネットワーク家電 フェミニティ, (online), available from (<http://feminity.toshiba.co.jp/feminity>) (accessed 2011-07-15).
- [6] Actvila Corporation, (online), available from (<http://actvila.jp>) (accessed from 2011-07-15).
- [7] 今井智大, 岡田 崇, 中田 潤也, 丹 康雄, “ホームネットワークにおけるリモート管理を考慮したサービスインタフェースに関する提案”, ユビキタスコンピューティング研究会 (UBI) , 30, 6, pp.626–634 (2008).
- [8] Steve Shafer and John Krumm and Barry Brumitt and Brian Meyers and Mary Czerwinski and Daniel Robbins, “The New EasyLiving Project at Microsoft Research”, *Proc. DARPA/NIST Smart Spaces Workshop*, (1998).

- [9] 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”, (July.2006).
- [10] H Nishikawa and S Yamamoto and M Tamai and K Nishigaki and T Kitani and N Shibata and K Yasumoto and M Ito, “UbiREAL: Realistic Smartspace Simulator for Systematic Testing”, *Proc. of the 8th Int’l Conf. on Ubiquitous Computing (UbiComp2006)*, pp.459–476, (2006).
- [11] 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).
- [12] A.H.Maslow, “A Theory of Human Motivation”, *Psychological Review*, vol.50, pp.370–396, (1943).
- [13] 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, vol.22, pp.351–354, (2005).
- [14] 大崎聡, 佐藤誠, 宇田川光弘, 石田建一, 木村建一, “住宅の夏季の熱環境に関する実測とシミュレーションとの比較検討: その1 天井断熱の異なる同形2室での比較”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.55–56, (1997).
- [15] 谷川朗子, 石田建一, 宇田川光弘, 佐藤誠, 藤田哲典, 木村建一, “住宅の夏季の熱環境に関する実測とシミュレーションとの比較検討: その2 垂直温度分布の比較”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.57–58, (1997).
- [16] Paraview, (online), available from (<http://www.paraview.org>) (accessed 2011-07-15).
- [17] OpenFOAM, “The open source CFD toolbox”, (online), available from (<http://www.openfoam.com/>) (accessed 2011-07-15).
- [18] 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).

- [19] 青木尊之, “フル GPU による CFD アプリケーション,” 情報処理学会会誌, vol.50, no.2, pp.107–115 (2009).
- [20] Wangda Zuo and Qingyan (Yan) Chen, “REAL TIME AIRFLOW SIMULATION IN BUILDINGS,” *6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings. (IAQVEC 2007)*, (Oct. 2007).
- [21] Steven Pelley and Yifan YangGong and David Meisner and Thomas F. Wenisch and James W. VanGilder, “Maelstrom: Real Time Data Center Temperature Modeling,” *Fourteenth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS '09)*, (March. 2009).
- [22] Dennis C.Jespersion, “Acceleration of a CFD Code with a GPU,” *NAS Technical Report NAS-09-003*, (Nov. 2009).
- [23] Bernard P. Zeigler and Hessam S. Sarjoughian, “CREATING DISTRIBUTED SIMULATION USING DEVS M&S ENVIRONMENTS,” *Winter Simulation Conference (WSC'00) Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation Orlando, Florida*, pp.158–160
- [24] 坂本雄三, 松尾陽, 野村豪, 鎌田元康, “2 方程式モデルによる 3 次元熱対流の数値解析,” 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1978)
- [25] IEEE, “IEEE 1588,” (online), available from (<http://ieee1588.nist.gov/>), (accessed 2011-07-15).
- [26] OpenCL, “OpenCL - The open standard for parallel programming of heterogeneous systems,” (online), available from (<http://www.khronos.org/opencl/>), (accessed 2011-07-15).
- [27] K. Konishi and K. Maeda and K. Sato and A. Yamasaki and H. Yamaguchi and K. Yasumoto and T. Higashino, “MobiREAL Simulator - Evaluating

- MANET Applications in Real Environements,” *13th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOT2005)*, pp.499–502, (2005).
- [28] T. McLean and R. Fujimoto, “Repeatability in Real-Time Distributed Simulation Executions,” *Workshop on Parallel and Distributed Simulation*, pp.23–32, (2000).
- [29] P. Levis and M. Wlsh and D. Culler, “TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications,” *The first ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys2003)*, Los Angeles, California, U.S.A., (2003).
- [30] Seong Myun Cho and Tag Gon Kim, “REAL TIME SIMULATION FRAMEWORK FRO RT-DEVS MODELS,” *Special Issue of the Transactions of the Society for Computer Simulation*, (2001).
- [31] M. H. Hwang, “Tutorial: Verification of Real-time System Based on Schedule-Preserved DEVS,” *Proceedings of 2005 DEVS Symposium*, San Diego, (Apr. 2005).
- [32] Jianping Shi, Norman I. Badler, Michael B. Greenwald, “Joining a Real-Time Simulation: Parallel Finite-State Machines and Hierarchical Action Level Methods for Mitigating Lag Time,” *Proceedings of the 9th Conference on Computer Generated Forces*, (May. 2000).
- [33] N. Audsley, A. Burns, M. Richardson and A. Wellings, “Stress: a simulator for hard real-time systems,” *Software - Practice and Experience*, pp.543–564, (June. 1994).
- [34] Kaushik Ghosh, Kiran Panesar, Richiard M. Fujimoto and Karsten Schwan, “PORTS: A Parallel, Optimistic, Real-Time Simulator,” *Proceedings of the eighth workshop on Parallel and distributed simulation*, pp.24–31, Edinburgh, Scotland, United Kingdom (Jul. 1994).

- [35] Matthew F. Starch and Jane W.S. Liu, “DRTSS: A Simulation Framework for Complex Real-Time Systems,” *In Proceedings Complex Systems Design and Synthesis Technology Workshop*, (1994).
- [36] Jane W. S. Liu and Juan-Luis Redondo and Zhong Deng and Too-Seng Tia and Riccardo Bettati and Ami Silberman and Matthew Storch and Rhan Ha and Wei-Kuan Shih, “PERTS: A Prototyping Environment for Real-Time Systems,” *Technical report*, University of Illinois, Urbana, (May. 1993).
- [37] Hokuriku research center, “StarBED project,” (online), available from (<http://www.starbed.org/>), (accessed 2011-07-15).
- [38] T. Miyachi and K. Chinen and Y. Shinoda, “StarBED and SpringOS: Large-scale General Purpose Network Testbed and Supporting Software,” *Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (Valuetools 2006)*, ACM Press, ISBN 1-59593-504-5, Pisa, Italy, (Oct. 2006).
- [39] R. Beuran and L. T. Nguyen and K. T. Latt and J. Nakata and Y. Shinoda, “QOMET: A Versatile WLAN Emulator,” *IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2007)*, Niagara Falls, Ontario, Canada, pp.348–353 (May. 2007).
- [40] J. Nakata and T. Miyachi and R. Beuran and K. Chinen and S. Uda and K. Masui and Y. Tan and Y. Shinoda, “StarBED2: Large-scale, Realistic and Real-time Testbed for Ubiquitous Networks,” *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TridentCom 2007)*, Orlando, Florida, U.S.A., (May. 2007).
- [41] JoonSeok Park and Mikyeong Moon and Seongjin Hwang and Keunhyuk Yeom, “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).

- [42] Jalal Al-Muhtadi and Manish Anand and M. Dennis Mickunas and Roy Campbell, “Secure Smart Homes using Jini and UIUC SESAME”, *Proceedings of the Sixteenth Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC'00)*, (2000).
- [43] 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, ISBN4-14-009337-4, (2005).
- [44] 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, (2005).
- [45] 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”, *NEC 基礎・環境研究所*, (2010).
- [46] 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).
- [47] 岡田 崇, 中田 潤也, 牧野 義樹, 金 準修, Sioutis Marios, 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).
- [48] Junya NAKATA and Razvan BEURAN and Tetsuya KAWAKAMI and Takashi OKADA and Kenichi CHINEN and Yasuo TAN and Yoichi SHINODA, “Distributed Emulator for Developing and Optimizing a Pedestrian Tracking System Using Active Tags”, *International Journal On Advances in Intelligent Systems*, (2009).
- [49] 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”, エネルギー使用合理化技術戦略的開発/ エネルギー使用合理化技術戦略的開発 (FS 事業), (2007).
- [50] 大山 力, “情報技術を活用した新しいデマンドサイドマネジメントの枠組みに関する検討”, 平成盟年度 平成薦年度科学研究費補助金 (基盤研究 (聳))(2) 研究成果報告書, (2005).

- [51] JoonSeok Park and Mikyeong Moon and Seongjin Hwang and Keunhyuk Yeom, “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).
- [52] , B. De Carolis and G. Cozzolongo and S. Pizzutilo and V.L. Plantamura, “Agent-Based Home Simulation and Control”, *Lecture Notes in Computer Science(LNCS)*, pp.59—84, (2005).
- [53] LI JIANG and DA-YOU LIU and BO YANG, “SMART HOME RESEARCH”, *Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, (2005).
- [54] “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, (2005).
- [55] 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, “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”, (2005).
- [56] NICT, “StarBED Project”, (online), available from (<http://www.starbed.org/>), (accessed 2011-03-25).
- [57] 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, (online), available from (<http://www.jipdec.or.jp/>), (accessed 2011-01-26).
- [58] UPnP, “UPnP Forum”, (online), available from (<http://www.upnp.org/>), (accessed 2011-03-14).
- [59] DLNA, “Digital Living Network Alliance”, (online), available from (<http://www.dlna.org/>), (accessed 2011-01-06).
- [60] ECHONET, “ECHONET CONSORTIUM”, (online), available from (<http://www.echonet.gr.jp/>), (accessed 2010-10-30).

- [61] 経済産業省, “次世代エネルギー・社会システム協議会”, (online), available from (<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/index.html>), (accessed 2010-10-21).
- [62] IBEC, “CASBEE”, (財) 建築環境・省エネルギー機構, (online), available from (<http://www.ibec.or.jp/CASBEE/>), (accessed 2011-03-22).
- [63] 小山克正, 宝珍輝尚, 中西秀哉, 小嶋護, “時系列データの周波数に基づく類似度について”, 情報処理学会研究報告, (2006-11-16).
- [64] 櫻井保志, 吉川正俊, “ダイナミックタイムワーピングのための類似探索手法”, 情報処理学会論文誌 データベース, pp.23—36, (2004-03).

本研究に関する発表論文

- [1] 岡田 崇, 丹 康雄: “自律型ロボットの衝突回避経路計画”, 情報処理学会研究報告, UBI14, pp.29-36(平成 19 年).
- [2] Takashi OKADA, Junya NAKATA, Razvan BEURAN, Yasuo TAN and Yoichi SHINODA: “Motion Planning of Autonomous Robots”, UCS2007, pp.57-58(平成 19 年)
- [3] Takashi OKADA, Razvan BEURAN, Junya NAKATA, Yasuo TAN and Yoichi SHINODA: “Collaborative Motion Planning of Autonomous Robots”, CollaborateCom2007, pp.1-8(平成 19 年)
- [4] T. Okada, J. Nakata, R. Beuran, Y. Tan, Y. Shinoda: “Large-scale Simulation of Mobile Robots”, 2nd International Symposium on Universal Communication (ISUC 2008), (平成 20 年 12 月)
- [5] T. Okada, J. Nakata, R. Beuran, Y. Tan, Y. Shinoda: “Large-scale Simulation Method of Mobile Robots”, 2nd International Symposium on Universal Communication (ISUC 2008), pp.309-314(平成 20 年 12 月)
- [6] 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開発環境”, 電気情報通信学会 2010 総合大会, (平成 22 年)
- [7] T. Okada, M. Sioutis, J. Kim, J. Nakata, Y. Tan, Y. Shinoda: “A Component-based Simulation Environment for Large-scale Simulation of Home Network Systems”, 6th International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities (TridentCom 2010), (平成 22 年 5 月)

- [8] 岡田 崇, 牧野 義樹, 中田 潤也, Kim JUNSOO, 丹 康雄: “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”, 情報処理学会論文誌 投稿中.

第 A 章

コンフィグレーションファイル

本章では、提案したホームシミュレータの様々な設定を変更可能なコンフィグレーションファイルについて述べる。

A.1 コンフィグレーションの種類

ホームシミュレータの入力であるコンフィグレーションファイルの一覧を以下に示す。

- シミュレーションに関するコンフィグレーションファイル
- 世帯に関するコンフィグレーションファイル
- 部屋に関するコンフィグレーションファイル
- 壁に関するコンフィグレーションファイル
- 家電に関するコンフィグレーションファイル
- 電力に関するコンフィグレーションファイル
- 人間の行動に関するコンフィグレーションファイル
- 人間の欲に関するコンフィグレーションファイル

A.1.1 シミュレーションに関するコンフィグレーションファイル

Listing A.1: シミュレーションに関するコンフィグレーションファイル

```
[Generic]
Vstart = 2010:10:17:00:00:00
VdeltaT = 60.0
Rstart = 2010:11:17:00:00:00
RdeltaT = 0.0

[Path]
HOUSE_CONF_PATH = ./conf_household.cfg
RESULT_PATH = ./results/

[Environment]
jma = True
DATA_PATH = ./data/

# Nerima, Tokyo
latitude = 35.7325
longitude = 139.6616
```

- Vstart
シミュレーション時間の開始時刻を定義 (YYYY:mm:dd:HH:MM:SS).
- VdeltaT
シミュレーション時間が1ステップで進む時間を定義 (秒).
- Rstart
実時間の開始時刻を定義 (YYYY:mm:dd:HH:MM:SS).
- RdeltaT
実時間が1ステップで進む時間を定義 (秒).

- HOUSE_CONF_PATH
世帯に関するコンフィグレーションファイルのパスを定義.
- RESULT_PATH
結果のログを保存するパスを定義.
- jma
気象庁のデータを利用するかを定義.
- DATA_PATH
外気温度, 外気湿度などの入力データのパスを定義.
- latitude
住宅の緯度を定義.
- longitude
住宅の経度を定義.

A.1.2 世帯に関するコンフィグレーションファイル

Listing A.2: 世帯に関するコンフィグレーションファイル

```
[Generic]
PATHPOWE = ./conf_power.cfg
PATHROOM = ./conf_room.cfg
PATHWALL = ./conf_wall.cfg
PATHAPPL = ./conf_appliance.cfg
PATHLACT = ./conf_activity.cfg
PATHDES = ./conf_desire.cfg

[household]
types = 5
family = father , child , child , mother
name = father , child_1 , child_2 , mother
```

```
[ father ]
age = 46
sex = male
todo = sleep , personalcare , meals , commuting , work
not = schoolwork , housework , caring , moving , medical , other
bedroom = BedRoom
myroom = SpareRoom
```

...

- PATH_POWE
電力に関するコンフィグレーションファイルのパスを定義.
- PATH_ROOM
部屋に関するコンフィグレーションファイルのパスを定義.
- PATH_WALL
壁に関するコンフィグレーションファイルのパスを定義.
- PATH_APPL
家電に関するコンフィグレーションファイルのパスを定義.
- PATH_ACT
人間の行動に関するコンフィグレーションファイルのパスを定義.
- PATH_DES
人間の欲に関するコンフィグレーションファイルのパスを定義.
- types
世帯の種別を定義. 数値は国勢調査の世帯の分類から引用している.
- family
家族構成を定義.
- name
家族の名前を定義. 以降この名前で定義した家族のプロファイルを定義する.

- age
father の年齢を定義.
- sex
father の性別を定義.
- todo
father の習慣的行動に必ず入れる行動種別を定義.
- not
father の習慣的行動に入れない行動種別を定義
- bedroom
就寝する部屋名を必要であれば定義.
- myroom
自室を必要であれば定義.

A.1.3 部屋に関するコンフィグレーションファイル

Listing A.3: 部屋に関するコンフィグレーションファイル

```
[EntranceHall]
width = 3.185
depth = 3.185
height = 2.400
nextroom = Toilet1 , LivingRoom , Lavatory , Kitchen , ...
walls = 14
  [[ wall1 ]]
  room = LivingRoom
  width = 2.73
  height = 2.4
  wallname = partitionWall
  direction = S
```

```

windows = None
...
[[ appliance ]]
num = 6
    [[[ appl1 ]]]
    name = light
    type = led
    circuit = circuit11
    ...
...

```

- width, depth, height
部屋の広さを定義.
- nextroom
隣接する全ての部屋の名前を定義.
- walls
壁の数を定義.
- room
壁を挟んで隣接する部屋の名前を定義.
- width, height
壁の広さを定義.
- wallname
壁の名前を定義. この名前により, 壁に関するコンフィグレーションファイルから壁の性能を参照.
- direction
壁の方向を定義.
- windows
壁に窓がある場合定義.

- num
部屋に設置されている家電の数を定義.
- name
家電の種類を定義. この名前により, 家電に関するコンフィグレーションファイルで定義された家電を参照.
- type
家電の機種を定義. この名前により, 家電に関するコンフィグレーションファイルで定義された家電の性能を参照.
- circuit
家電がどの分岐回路から電力を供給されるかを定義. この名前により, 電力に関するコンフィグレーションファイルで定義された分岐回路から電力が供給される.

A.1.4 壁に関するコンフィグレーションファイル

Listing A.4: 壁に関するコンフィグレーションファイル

```
[Material]
namelist = steel , asphalt , sheaghing , siding , gypsum , thermowool , ...
  [[ steel ]]
  lamda = 53.01
  cp = 1044.175
  rho = 8.05
  [[ asphalt ]]
  lamda = 0.11
  cp = 255.556
  rho = 1.04
  ...
```

```

[Wall]
wallist = foundationInnerWall , foundationOuterWall , ...
[foundationInnerWall]
A = 3.189
a_A = 0.8
a_B = 0.8
e_A = 0.9
e_B = 0.9
conv_A = 4.4
conv_B = 4.4
radi_A = 4.7
radi_B = 4.7
c_A = 1896.26
c_B = 1896.26
thick = 0.15
numpart = 1
    [[part1]]
    ratio = 100.0
    nummaterials = 1
        [[[material1]]]
        type = concrete
        thick = 0.15
...

[Window]
window_name = KA-01,KA-04,KA-06,KA-07,KA-11,KB-06
    [[KA-01]]
    K = 3.81
    conv_A = 20.3
    conv_B = 4.4

```

```
radi_A = 4.7
radi_B = 4.7
SCR = 0.71
SCC = 0.02
Alpha = 0.7
a = 1.0
N = 1.4
...
```

[Curtain]

```
curtain_name = Blind , Syoji , NetCurtain
[[ Blind ]]
SRT = 0.7
SRR = 0.51
VT = 0.2
R = 0.0
...
```

[Directions]

```
direction_names = N,S,E,W, upper , lower , roof
[[ N ]]
theta = 180.
phai = 0.
...
```

- namelist

材質名の定義. 以降この名前で定義した材質の詳細を定義する.

- lamda

熱伝導率の定義 ($[W/mK]$).

- cp

比熱の定義 ($[Wh/m^3K]$) .

- rho

密度の定義 ($[10^3kg/m^3]$) .

- wallist

壁の名前の定義. 以降この名前で定義した壁の詳細を定義する.

- A

熱貫流率 ($[W/m^2]$) .

- a_A, a_B

日射吸収率.

- e_A, e_B

長波放射率.

- conv_A, conv_B

表面对流熱伝導率 ($[W/m^2K]$) .

- radi_A, radi_B

表面放射熱伝導率 ($[W/m^2K]$) .

- thick

壁の厚さ ($[m]$) .

- numpart

壁を構成する材質の数.

- ratio

壁の広さに対する材質の占める割合.

- nummaterials

材質の数.

- type

材質の名前.

- thick
材質の厚さ ($[m]$).
- window_name
窓の名前の定義. 以降この名前で定義した窓の詳細を定義する.
- K
熱貫流率 ($[W/m^2]$).
- SCR
放射日射遮蔽係数.
- SCC
対流日射遮蔽係数.
- Alpha
流量計数.
- a
係数.
- N
指数.
- curtain_name
カーテン名の定義. 以降この名前で定義したカーテンの詳細を定義する.
- SRT
日射透過率.
- SRR
日射反射率.
- VT
可視光線透過率.

- R
熱抵抗 ($[m^2K/W]$).
- direction_names
方位名の定義. 以降この名前で定義した方位の詳細を定義する.
- theta
南を 0 とした水平方向の角度.
- phai
水平を 0 とした鉛直方向の角度.

A.1.5 家電に関するコンフィグレーションファイル

Listing A.5: 家電に関するコンフィグレーションファイル

```
[Generic]
appliances = light , temperaturesensor , humiditysensor , ...
```

```
[light]
class = LightAppliance
[[ type ]]
types = led , fluorescent
prop = maxlumen ,
[[ [ led ] ] ]
maxwatt = 100.
minwatt = 0.
maxlumen = 1200.
[[ [ fluorescent ] ] ]
maxwatt = 100.
minwatt = 0.
maxlumen = 1200.
```

```

[[ env ]]
edges = send1 ,
      [[[ send1 ]]]
      edge = ApplianceEdge
      sender = appliance
      sendFunc = sendLumen
      recvFunc = recvLumen
      level = 10

```

...

- appliances
家電の全種類を定義。ここで定義した家電名を元に以降家電の種類ごとに詳細を定義する。
- class
家電のクラスを定義。このクラスの名前はソースコード中の家電クラス名と同一とする。
- types
家電クラスの機種を定義。この名前を元に以降家電の機種ごとに詳細を定義する。
- prop
プロパティ名を定義。
- maxwatt
最大消費電力量を定義（ワット）。
- minwatt
最小消費電力量を定義（ワット）。
- maxlumen
prop で定義したプロパティ名の値を定義。

- edges
環境要素へのエッジを定義。この名前を元に以降エッジの詳細を定義する。
- edge
エッジ名を定義。この名前はソースコード中のエッジクラスと同一とする。
- sender
エッジに対する送信側を定義。
- sendFunc
エッジを利用する際呼び出される送信側の関数名を定義。この名前はソースコード中の送信側クラスに実装されているメソッド名と同一とする。
- recvFunc
エッジを利用する際呼び出される受信側の関数名を定義。この名前はソースコード中の受信側クラスに実装されているメソッド名と同一とする。
- level
エッジを利用するタイミングを定義。

A.1.6 電力に関するコンフィグレーションファイル

Listing A.6: 電力に関するコンフィグレーションファイル

```
[Power]
DistributionBoard = distributor
circuits = circuit1 , circuit2 , circuit3 , circuit4 , circuit5 , ...
  [[ distributor ]]
  type = PowerStation
  parent = 100.
  children = 100. , 200.
  maxA = 75.
  location = Kitchen
  [[ circuit1 ]]
```



```
type = Distributor
parent = 200.
children = 200.,
maxA = 30.
location = Kitchen
...
```

- DistributionBoard
分電盤名を定義.
- circuits
分岐回路名を定義. この名前を元に以降分岐回路の詳細を定義する.
- type
分岐回路または分電盤のクラス名を定義. この名前はソースコード中のクラスと同一とする.
- parent
電力の木構造の親側の電圧を定義.
- children
電力の木構造の子側の電圧を定義.
- maxA
最大電流量を定義.
- location
設置場所を定義.

A.1.7 人間の行動に関するコンフィグレーションファイル

Listing A.7: 人間の行動に関するコンフィグレーションファイル

[Generic]

```
activities = sleep , personalcare , meals , commuting , work , ...
```

```
activity_types = necessity , restraint , free , other
```

```
[sleep]
```

```
type =          necessity
```

```
details =      None
```

```
method = SleepRealActivity ,
```

```
lux = 0. ,
```

```
...
```

- activities

人間の行動の種別を定義.

- activity_types

人間の行動の種別の分類を定義.

- type

人間の行動の種別の分類名を定義.

- detail

人間の行動の種別に該当する実行動を定義.

- method

人間の行動の種別のクラス名を定義. この名前はソースコード中の実行動を実装したクラス名と同一とする.

- lux

人間の行動の種別を実行する際一般的に人間が必要とする照度を定義.

A.1.8 人間の欲に関するコンフィグレーションファイル

Listing A.8: 人間の欲に関するコンフィグレーションファイル

```
[Generic]
```

```
desire = breathing , food , water , sleep , homeostatis , excretion , ...
```

```
types = phisiological , safety , love-belonging , esteem , ...
```

```
[breathing]
```

```
characters = v1 ,
```

```
activities = None
```

```
environments = dust ,
```

```
  [[ default ]]
```

```
  function = constant
```

```
  variables = v1 ,
```

```
  [[ v1 ]]
```

```
  function = linear
```

```
  variables = 1.0 , 0.0 , dust
```

```
...
```

- desire

人間の欲を定義.

- types

人間の欲の分類を定義.

- characters

人間の欲の変化を計算する際利用する変数名の定義.

- activities

人間の欲の変化を計算する際特に異なる変化が起こる行動名を定義. この行動名を元に以降その変化を詳細を定義する. 行動名が無い場合 default で定義された計算式に基づき変化する.

- environments

人間の欲の変化を計算する際影響を与える環境名.

- function

人間の欲の変化を計算する際利用される関数名。この名前はソースコード中に定義された関数名と同一とする。

- variables

function で定義された関数名の引数を定義。任意の数値及び characters, environments で定義した名前が利用可能。