

Title	住宅における温熱環境シミュレータの開発と評価実験
Author(s)	グエン, ホアイソン; 牧野, 義樹; リム, アズマン オスマン; 丹, 康雄; 篠田, 陽一
Citation	電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク, 112(4): 31-36
Issue Date	2012-04-05
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/11584
Rights	Copyright (C) 2012 The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE). グエン ホアイソン, 牧野 義樹, リム アズマン オスマン, 丹 康雄, 篠田 陽一, 電子情報通信学会技術研究報告. IN, 情報ネットワーク, 112(4), 2012, 31-36.
Description	

住宅における温熱環境シミュレータの開発と評価実験

グエン ホアイソン^{†‡} 牧野 義樹[†] リム アズマン オスマン[†] 丹 康雄[†] 篠田 陽一[†]

[†]北陸先端科学技術大学院大学 〒923-1292 石川県能美市旭台 1-1

[‡]ハノイ国家大学技術大学 144 Xuan Thuy, Cau Giay, Ha Noi, Viet Nam

E-mail: {hsnguyen, m-yoshi,aolim,ytan,shinoda}@jaist.ac.jp

あらまし 空調システムは快適な環境を作り出す一方、住宅エネルギー消費の大きな部分を占めている。住宅における省エネルギーを実現するために温熱環境を含んだ空調システムの挙動をサイバーフィジカルシステムとして総合的に理解することが重要である。我々は住宅における温熱環境のシミュレータの開発をすると共にシミュレーションの精度向上のためのパラメータ同定を行い、実験結果の妥当性を実環境の計測データを比較することで検証してきた。本稿では開発したシミュレータの詳細を述べた上でシミュレーション結果と実験結果との比較を行う。

キーワード 温熱環境、空調システム、サイバーフィジカルシステム

Implementation and Evaluation of Thermal Simulator for Houses

Hoaison NGUYEN^{†‡} Yoshiki MAKINO[†] Azman Osman LIM[†] Yasuo TAN[†] and Yoichi SHINODA[†]

[†] Japan Advanced Institute of Science and Technology 1-1 Asahidai, Nomishi, Ishikawa, 923-1292 Japan

[‡] VNU-University of Engineering and Technology, 144 Xuan Thuy, Cau Giay, Hanoi, Vietnam

E-mail: {hsnguyen, m-yoshi,aolim,ytan,shinoda}@jaist.ac.jp

Abstract Air conditional system can bring to us a comfortable environment, but it also consumes a large portion of electrical energy. To realize energy savings, it is essential to understand the behavior of air conditional system as cyber physical system, which includes both thermal environment and air conditional system. In this research, we implement a thermal simulator for houses and perform system identification to estimate system parameters. We evaluate the correctness of our simulator by conducting experiment and comparing experiment results with simulation results.

Keyword Thermal environment, Air conditional system, Cyber physical system

1. はじめに

空調システムは室内の温度を適切に調節することによって外部環境の気温の高低に関係なく我々に快適な環境をもたらすことができる。そのために電力を消費し、住宅エネルギー消費の大きな部分を占めている。住宅における省エネルギーを実現するためにモデル予想制御やニューラルネットワーク、ファジイロジックなどといった空調システムの最適制御に関する研究[1-4] が盛んに行っている。また、ホームネットワークによる家電の状態把握及び制御により省エネルギーの実現を図るシステムとして HEMS (Home Energy Management System)が開発されつつあり、注目を集めている[5]。これらのシステムを対象として性能評価や利用環境での機能検証を行う需要が高まっている。

空調システムの消費電力は変化が激しい温熱環境に大きく依存する。空調システムへの熱負荷は室内外の温度差による熱伝達や日射熱取得などによって決められ、ルームエアコンの COP (成績係数)は負荷率の他

に室内外温湿度に影響を受ける。また、空調システムの駆動で室内の温湿度が変化して行く。近年実環境とサイバー空間を融合するいわゆるサイバーフィジカルシステムが注目され、研究が活発に行われている[12-14]。温熱環境の情報を住宅に設定されるセンサーで取得し、取得した情報をエネルギーサービスプロバイダに送り、温熱環境の振る舞いを予測し、それに基づいて空調システムのコストパフォーマンスを最適化するというようなサイバーフィジカルシステムが考えられる。

従って、空調システムや HEMS システムの有用性を検証するためには空調システムの挙動を温熱環境も含めて総合的に検証・評価する必要がある。また、空調システムをサイバーフィジカルシステムとして実現するために温熱環境の振る舞いを理解しなければならない。これらの評価は実証実験または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、実証実験を行うためには検証システムの実装が必須であり、

開発の早い段階での検証が難しい。一方、シミュレーションを行う場合、実環境に近い温熱環境でシミュレーションを行うことが難しい。

今まで空調システムのシミュレータは多数開発されている[6,7,8]。しかし、これらのシミュレータは日射や風速などといった天候情報の細かいパラメータを取り入れていない。また、温熱環境のセンサー情報を取得し、サイバーフィジカルシステムとして制御を行うというようなシステムの検証が無い。

本研究では実際のプレハブ住宅を温熱環境としてモデル化してシミュレーションを行い、実環境に近い条件の下で空調システムの挙動を評価する。さらに、温熱シミュレータを用いてサイバーフィジカルシステムの実現に必要な温熱環境の振る舞いの予測を検討し、その予測の精度を評価する。その実現に向けて、まず外気温湿度、風速、日射時間などといった外部環境の情報をセンサーで取得し、これらを入力として与えた時に、室内の温度を計算するシミュレータの設計及び実装を行った。さらに、建物の温熱特性に関する各未定パラメータを推定するために、実環境で測定可能なパラメータの計測を行い、計測した結果をシミュレータに入力させ、システム同定を行う。そして、システム同定後のシミュレーション結果と計測実験結果を比較し、誤差を求めてシミュレータを評価する。また、ルームエアコンを実際に駆動させ、シミュレーション結果と実験結果を比較し、シミュレーションの精度を高める。

本レポートではまず熱負荷計算モデルを述べてからシミュレータの構成と実験環境及び実験結果を記述する。

2. シミュレーションと評価実験の対象

次世代のホームネットワークでは、住宅内の情報家電、センサーにより状況を認識、予測し、状況に最適なサービスを提供する(図1)。本研究で我々は省エネルギーを実現するために、センサーから受け取った温熱環境に関する情報がホームゲートウェイを経由し、サービスプロバイダーに送信され、そこでデータ解析を行い、その解析結果に基づいて、空調システムへの適切な制御を行うようなサイバーフィジカルシステムを想定する。

こういうシステムを実現するために、温熱環境の振る舞いを理解しなければならない。それで、本研究で我々は TANS2 (Testbed for Ambient Network System 2) と呼んでいるプレハブ住宅(図2)を対象としてモデル化し、シミュレーション及び評価実験を行った。

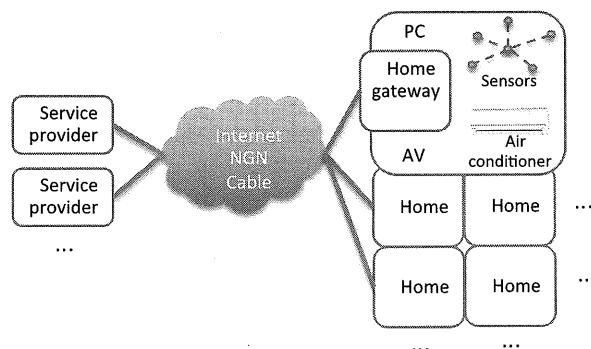


図 1. 次世代ホームネットワーク

TANS2は石川県能美市に位置し、表1に示されるように軽量鉄骨造の建物であり、ホームネットワークの実験を行うことを目的とする実験室である。TANS2にはECHONET ゲートウェイとECHONET 対応エアコン、電力計及び各センサーが設置され、室内の状態を計測しながら家電の制御を行うことが可能である。さらに、TANS2の周辺に太陽電池式日照計、気温計、湿度計及び風速計が配置され、外部環境情報を計測することができる。

表 1. TANS2 建物概要

サイズ	3.862m x 2.400m x 2.960m
主体構造	軽量鉄骨造
壁	ウレタンフォーム (厚さ: 40mm) ガルバリウム鉄版 (厚さ: 0.35mm)
窓	普通複層ガラス (空気層: 12mm)
屋根	ガルバリウム鉄版 (厚さ: 0.5mm) ポリエチレンフォーム (厚さ: 40mm)
天井	ウレタンフォーム (厚さ: 25mm)

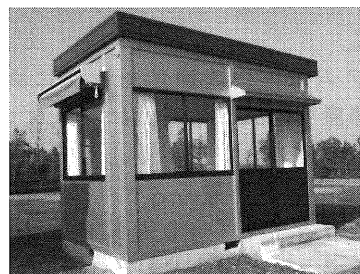


図 2. TANS2 の概要図

3. 熱負荷計算モデル

熱伝導方程式は以下の式で表す。温度の分布を求めるにはこの方程式を解く必要があるが複雑な計算が必要である。ここで、 a は熱拡散率である。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (1)$$

本シミュレータでは簡単のために室内の温度を一

様に分布すると仮定し、以下の熱平衡式を用いて計算する。

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2)$$

Q_{in} は室内に流入する熱量であり、 Q_{out} は室内から流出する熱量である。 Q_{in} と Q_{out} は以下のような要素が含まれる。

- ・ 熱伝達による熱量
- ・ 日射取得熱量
- ・ 空調供給熱量
- ・ 室内の電気機器による発熱量

3.1. 熱伝達

TANS2 の壁が軽量の薄壁のため両側の温度変化に対してその差に比例する熱流が常時起こるものと仮定する。熱伝達による熱量は以下の式で室内外の温度差及び壁や窓の熱貫流率と面積によって計算される。

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (3)$$

$U(W/m^2K)$ は熱貫流率であり、室内外の温度差を $1^\circ C$ とした場合に、単位面積当たりの 1 秒間で壁体を通る熱量である。 A は壁の面積であり、 ΔT は室内外の温度差である。

熱貫流率は壁や窓の材料の熱抵抗と厚さによって決まる。

$$U = \frac{1}{R_i + R_a + \sum \frac{d_k}{\lambda_k} + R_o} \quad (W/m^2K) \quad (4)$$

R_i : 室内側表面熱伝達抵抗 (m^2K/W)

R_a : 外気層の熱抵抗 (m^2K/W)

d_k : 第 k 層の材料厚さ (m)

λ_k : 第 k 層の材料の熱伝導率 (W/mK)

R_o : 外気側表面熱伝達抵抗 (m^2K/W)

外気側表面熱伝達は対流熱伝達と放射熱伝達という二つの要素から成り立っている。対流熱伝達率は風速の一次元関数または指数関数として計算されることが多い。本シミュレータでは以下の近似式で対流熱伝達率を計算する[9]。

建物水平屋根の場合

$$h = 3.96U + 6.42 \quad (W/m^2K) \quad (5a)$$

建物垂直面の場合

$$h = 10.21U + 4.47 \quad (W/m^2K) \quad (5b)$$

また、放射熱伝達率は壁体の外表面温度の関数である。外表面温度を求めるために外表面での熱平衡式を解く必要がある。

3.2. 日射取得

日射は住宅の温熱環境に大きな影響を与えるが、日射量を直接的に測定できるのは基本的に気象台のみに限られる。そこで、より測定しやすい日照時間から全

天日射量日射量を推定する方法がいくつか提案されている。

本研究では日照時間から水平面全天日射量を推定する方法として二宮らが提案した手法[10]を採用した。この手法は時刻別日照率 SD_h が 0 の場合と 1 の場合に時刻別日射量と大気外水平面日射量の関係を求め、任意の日照率 SD_h に対する水平面全天日射量 TH_h を次式で推定する。

$$TH_h = TH_{h,SDh=0}(1-SD_h) + TH_{h,SDh=1}SD_h \quad (6)$$

$TH_{h,SDh=0}$ は時刻別日照率 SD_h が 0 の時の水平面全天日射量であり、 $TH_{h,SDh=1}$ は時刻別日照率 SD_h が 1 の時の水平面全天日射量である。

$TH_{h,SDh=0}$ 及び $TH_{h,SDh=1}$ は大気外水平面日射量及び太陽高度とその日の天気や日照率によって推定できる。大気外水平面日射量は太陽定数と太陽角度から計算できる[11]。また、日照率は 10 分単位で計算する。

日射熱量を算出するためには、直達日射量と天空日射量が必要となり、全天日射量から直達、拡散日射を推定するいわゆる直散分離手法が一般的に使われる。全天日射量から天空日射量を推定するために、Reindl らが提案した直散分離手法[12]を採用する。この手法は水平面天空日射量 TH_d と水平面全天日射量 TH_h との比を晴天指数 (Clearness Index)、太陽高度、大気温度、相対湿度といったパラメータから推定できる。また、法線面直接日射量 TH_b は以下の式で計算できる。 h は太陽高度である。

$$TH_b = (TH_h - TH_d) / \sin(h) \quad (7)$$

水平面天空日射量と法線面直接日射量を用いて、建物のガラス窓に入射する日射熱量を計算できる。さらに、壁や窓が日射熱を吸収することによって、外表面温度が外気温度より高い。外表面において流入する熱量と流出する熱量が平衡すると仮定すると日射相当外気温度を以下の式で求める。

$$T_e = T_a + \frac{a_s}{a_o}(TH_b + TH_d) - \frac{a'_s}{a_o} I_L \quad (8)$$

a_s : 壁やガラス窓の日射吸収係数

a'_s : 外気側表面の日射吸収率

I_L : 放射量

a_o : 対流熱伝達率

3.3. 空調システムのモデル化

本研究では TANS2 に設置してあるルームエアコンの動作をモデル化し、シミュレーションを行う必要がある。しかし、そのルームエアコンの内部論理制御がないため、ルームエアコンの実際の動作に基づいて簡単なモデルを作り、そのモデルと実際に駆動するルームエアコンの動作と比較する。

図 3 は今回のシミュレーションで用いるルームエアコンの暖房モードのモデルを表す。このモデルは 6

つの状態があり、室内温度と設定温度、そして過去の室内温度の関係で状態が遷移する。また、各状態には異なる COP（成績係数）が設けられ、室内外の温度によってその値が変わる。

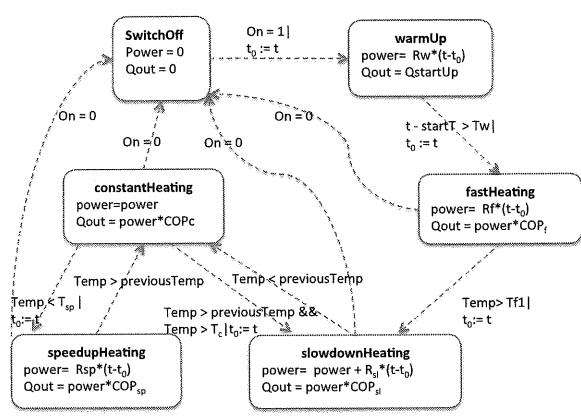


図 3. ルームエアコンの暖房モードの動作モデル

4. シミュレータの構成

本シミュレータの構成は図 4 のように 3 つのモジュールから成り立っている。

- システムモデリング: TANS2 を立方体としてモデリングし、壁や窓に関する各パラメータを読み込む。また、空調システムとしてルームエアコンのモデル化し、関連する各々パラメータを読み込む。さらに、外部環境の情報として温度、湿度、風速と風向き、日照時間を計測データから読み取り、外気側表面熱伝達率や日射量など推定する。
- 温熱シミュレーション: 流出する熱量と流入する熱量を計算し、その計算結果から室内の温度を推定する。また、室内の温度及び設定温度と外気温度でエアコンの状態を推定し、エアコンが消費する電力を推定する。
- 結果分析: シミュレーション結果と計測結果との比較を行う。

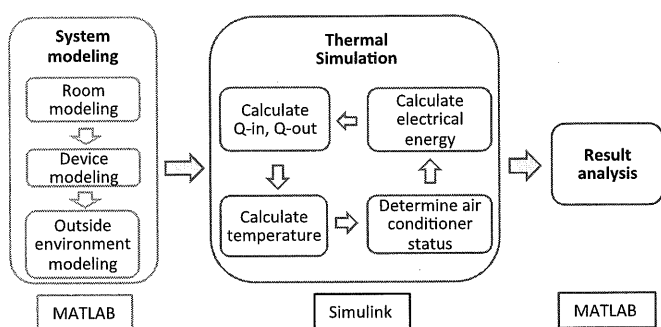


図 4. シミュレータの構成

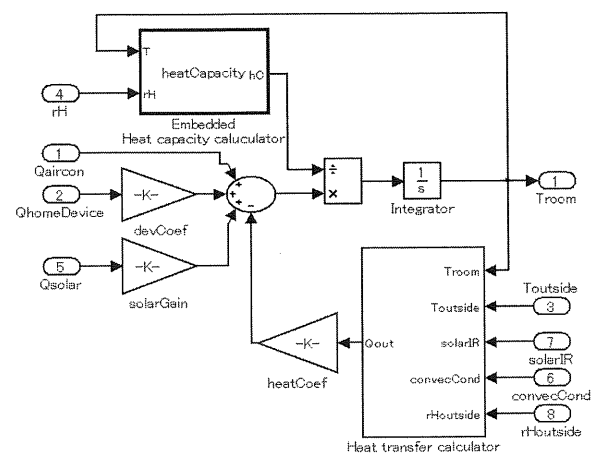


図 5. 温熱シミュレーションのモジュール

システムモデリングのモジュール及び結果分析は MATLAB で実装し、温熱シミュレーションのモジュールを Simulink で実装する (図 5)。

また、温熱環境のモデル化にあたって、壁材料の熱抵抗や室内の電気機器からの発熱量などいくつかの未知パラメータがあり、計測実験でシステム同定を行う必要がある。そのために、シミュレーションと計測実験を複数の段階に分けて行う。

- 熱伝達のシミュレーションと実験: ルームエアコンを駆動せず日射が無い夜間 (午後 6 時から翌日の午前 6 時までの 12 時間) で行い、熱抵抗や発熱量など熱伝達に関するパラメータを推定する。
- 日射及び熱伝達のシミュレーションと実験: ルームエアコンを駆動せず昼間で行い、日射吸収係数など日射に関するパラメータを推定する。
- 空調駆動のシミュレーションと実験: ルームエアコンを駆動し、COP などルームエアコンに関するパラメータを推定する。

従って、シミュレーションと評価実験の流れは図 6 のようになっている。

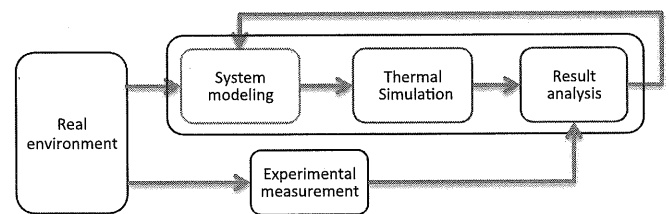


図 6. シミュレーションと評価実験の流れ

5. シミュレーションと評価実験の結果

同定実験を行った後、各未知パラメータを推定し、さらにシミュレーションと評価実験を行った。暖房モードだけのシミュレーションと実験を行った。今回の実験で室内の温湿度を測定するために、室内の真ん中に高さ 30cm の所に一つの温湿度センサーを設置し、測定を行う。

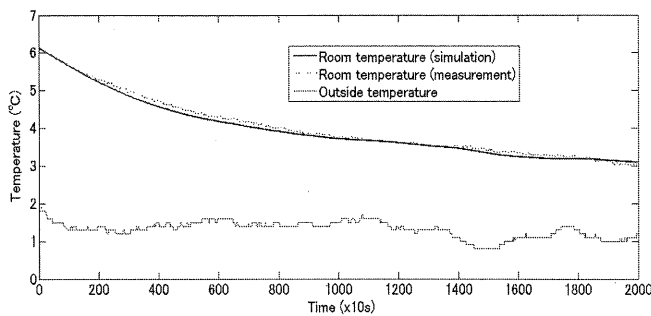


図 7. 熱伝達のシミュレーションと実験の結果

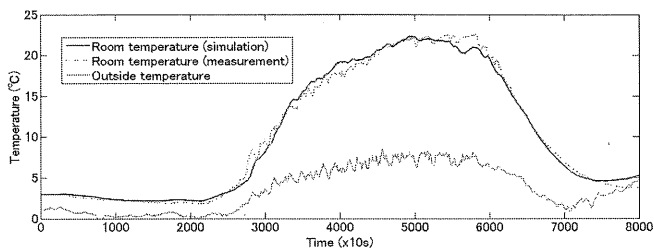


図 8. 日射及び熱伝達のシミュレーションと実験の結果

5.1. 日射及び熱伝達のシミュレーションと評価実験

日射が無い条件下での熱伝達のシミュレーションと実験の結果を図7で示す。シミュレーションと実験の結果の誤差は最大で 1°C である。日射が無い夜の条件下でシミュレーションを行い、温度の変動は比較的に少ないため、かなりいい精度が得られた。

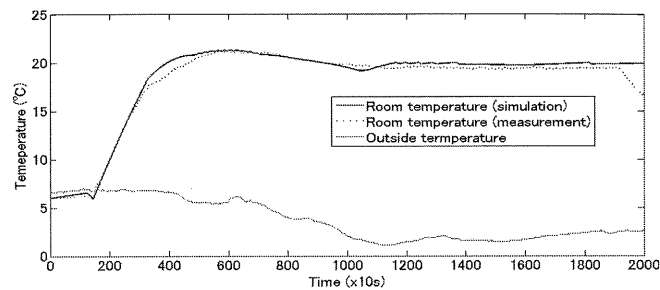
日射がある場合、シミュレーションと実験の結果の誤差は最大で 1.5°C であり、日射がない場合と比べて、増加する(図8)。その原因は日射量が正確に推定することができなかったことにありと考える。また、日射がある場合、室内外の温度の変動が大きいので室内の温度分布に空調システムが駆動するとき

5.2. 空調システムのシミュレーションと評価実験

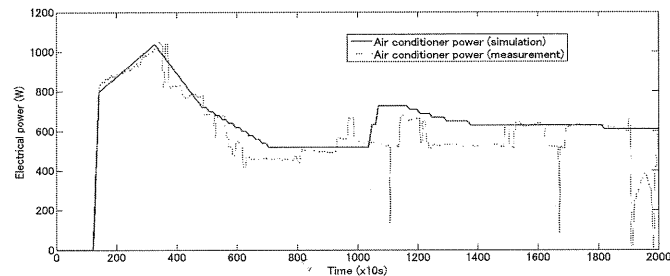
日射が無い時と比べて日射がある時はシミュレーションの誤差が大きい。そこで、ルームエアコンのシミュレーションと評価実験を日射があるときと日射が無いときと分けて行った。

日射が無い条件下でのシミュレーションと実験結果は図9に示す。室内の温度に対してシミュレーションの誤差は最大で約 1°C であったが、消費エネルギーに対してシミュレーションの誤差は最大で約30%であった。

また、日射がある条件下でシミュレーションをするとき、評価実験の結果と比べて、シミュレーションの誤差は最大で約 2°C であった(図10)。そして、消費エネルギーに対してシミュレーションの誤差は多いところで50%であった。

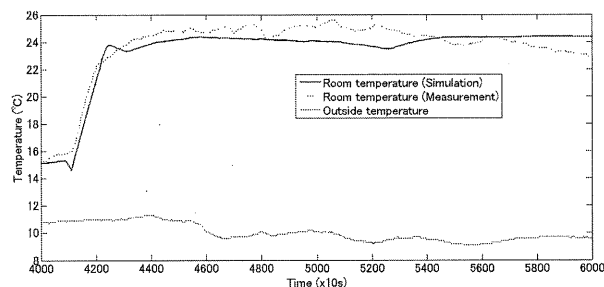


(a)

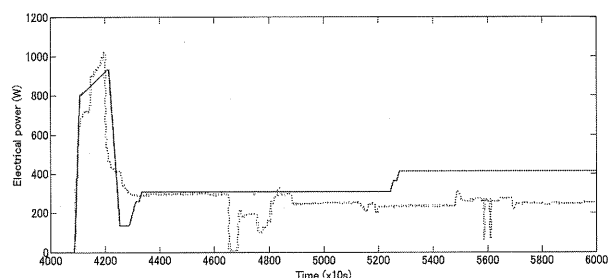


(b)

図 9 日射が無いときの空調システムのシミュレーションと実験結果:室温(a)及び消費電力(b)



(a)



(b)

図 10 日射があるときの空調システムのシミュレーションと実験結果:室温(a)及び消費電力(b)

日射があるとき、温度の変動が大きく、温度のシミュレーションの誤差が大きくなるにつれてルームエアコンのシミュレーションの誤差も大きくなった。

5.3. 考察

シミュレーションの結果は日射が無いときと日射があるとき、精度がかなり異なる。日射量の推定の精

度を改善する必要がある。また、今回室温の測定は一点のみであり、かつ空気の温度が室内に一様に分布すると仮定したがより高い精度でシミュレーションするために室内の温度分布もシミュレータに取り入れる必要があり、今後の検討課題となる。

ルームエアコンの簡単な制御モデルなのでルームエアコンの制御の細かい処理をシミュレーションできない。また、ルームエアコンの内部状態は室温に大きく依存し、内部状態の遷移をより正確にシミュレーションする必要がある。

6. 結論

本研究では TANS2 という実環境をモデル化し、温熱環境のシミュレーションを行った。さらに、システム同定のための計測実験を用いて、未知パラメータを推定できることによって実環境に近いモデルを作ることができた。

今後、シミュレーションの精度を上げると共に、ホームネットワークサービスである空調システムをサイバーフィジカルシステムとし、制御を行う方法を検討したい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、北陸先端科学技術大学院大学丹研究室及びリム研究員の学生及び研究補助員より、有意義で貴重な意見を頂いた。また、実験環境の構築も研究補助員及び学生らの貢献によるものであり、ここに感謝の意を表す。本研究は日本通信機構 (NICT) の北陸先端科学技術大学院大学への委託研究「大規模エミュレーションによる検証技術の試用及びユーザインタフェースの試用に関する研究開発」プロジェクトの成果である。

文 献

- [1] C. Nesler, Adaptive control of thermal processes in buildings, IEEE Control Systems Magazine Vol. 6, No. 4, pp. 9-13, 1986
- [2] G. Huang, S. Wang, and X. Xu, A robust model predictive control strategy for improving the control performance of air-conditioning systems, Energy Conversion and Management Vol. 50, No. 10, pp. 2650-2658, 2009
- [3] R. Freire, G. Oliveira, and N. Mendes, Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings, Energy and Buildings Vol. 40, No. 7, pp.1353-1365, 2008
- [4] Thosar, A., A. Patra, and S. Bhattacharyya, Feedback linearization based control of a variable air volume air conditioning system for cooling applications. ISA Transactions Vol. 47, No. 3, pp. 339-49, 2008
- [5] 石田 建一、伊藤 善朗、IT 時代の計測・制御技術の動向(4) HEMS による家電連動制御、空気調和・衛生工学 80(5), 385-393, 2006
- [6] Excel による空調システムシミュレーション～

LCEM ツール Ver.3 利用解説～、社団法人 公共建築協会、2008

- [7] D. Yan et al., DeST—An Integrated Building Simulation Toolkit Part I: Fundamentals, Build Simulation Vol. 1, No.2, pp. 95-110, 2008
- [8] <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [9] A. Hagishima, J. Tanimoto, Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces, Building and Environment Vol. 38 pp. 873-881, 2003
- [10] 二宮 秀典、松尾 陽、赤坂 祐、曾我 和弘、AMeDAS のデータを用いた時刻別日射量の推定法 (第 2 報)、空気調和・衛生工学会論文集、No.65, 1997 年 4 月
- [11] D.T Reindl, W. A. Beckman, and J.A. Duffie, Diffuse fraction correlations, Solar Energy Vol. 45, No.1, pp. 1-7, 1990
- [12] R. Rajkumar, I. Lee, L. Sha, and J. A. Stankovic, Cyber-physical systems: the next computing revolution, Proceedings of the 47th Design Automation Conference, USA, July 2010
- [13] J. Kleissl and Y. Agarwal, Cyber-physical energy systems: focus on smart buildings, Proceedings of the 47th Design Automation Conference, USA, July 2010
- [14] L. Parolini, N. Tolia, B. Sinopoli, and B. H. Krogh, A Cyber-Physical Systems Approach to Energy Management in Data Centers, Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, USA, 2010