

## 快適度の低下を最小限に抑える 省エネデバイス制御手法

安本 慶一<sup>†1</sup> 小倉 和也<sup>†1</sup>  
山本 眞也<sup>†2</sup> 伊藤 実<sup>†1</sup>

本稿では、ユーザの快適度をできる限り低下させない省エネデバイス制御法を提案する。提案手法では、過去のデバイスの動作履歴、省エネ目標を入力とし、各シチュエーション（読書や食事などのユーザの活動状態）で使用される各デバイスに対する単位消費電力当たりの快適度の低下度合いを重みとして、重みの小さいデバイスほど消費電力の削減量を大きくすることで、快適度を高く保持しながら省エネ目標を達成する。さらに、実デバイスの消費電力計測に基づいて電力消費モデルを構築する方法と快適度アンケートに基づいて物理量と快適度の相関を決定する方法を提案する。一般家庭での電力使用状況を想定したシミュレーション実験の結果、提案手法適用前のデバイス使用状況に対して、平均快適度の14.47%の低下で%の省エネを達成できた。

### Device Control Method for Energy-Saving with Minimal Degradation of Users' Comfort Level

KEIICHI YASUMOTO,<sup>†1</sup> KAZUYA OGURA,<sup>†1</sup>  
SHINYA YAMAMOTO<sup>†2</sup> and MINORU ITO<sup>†1</sup>

In this paper, we propose an energy-saving device control method with the minimal degradation of users' comfort level. Given the past histories of devices' states and the target energy-saving ratio, our method first assigns each device the weight proportional to the comfort level deterioration when reducing energy supply to the device by a unit of energy and reduces more energy supply from less weighted devices, in order to achieve the target-energy-saving ratio while maintaining the users' comfort level as high as possible. Moreover, we propose a method for constructing power consumption models of devices based on measurements of actual power consumption of real devices and a method for constructing comfort level functions of users based on the questionnaires. Through simulations supposing typical power usage in ordinary homes, we confirmed that the proposed method achieved 20% energy-saving with only 14.47% of user's comfort level reduction.

### 1. はじめに

近年、石油などのエネルギー資源の枯渇や二酸化炭素などの温室効果ガスによる地球温暖化に代表されるエネルギー問題および環境問題に対する人々の関心が高まっている。この中でも電力の省エネは、エネルギー問題の直接的な解決策の一つであり、また人々が身近に取り組むことができる。しかし、近年の日本におけるエネルギー消費量の推移は、産業部門が102%、民生部門が135%、運輸部門が114%であり、民生部門のみが増加の一途を辿っており<sup>1)</sup>、家庭での省エネが求められている。2011年3月の東北大地震時の原発事故に伴う発電所の停止により、2011年夏季の電力需要が高い時期に、電力会社により前年比20%減などの節電が要請されたことは記憶に新しい。このような省エネ目標（従来比20%減など）を実現する際に、やみくもに節電する（例えば、昼間は一切照明をつけない、エアコンは常に28℃以上に設定するなど）方法では、ユーザの我慢を強いることになり長続きしないばかりか熱中症になってしまうことも考えられる。

これまでユビキタスコンピューティング技術を用いて、コンテキストの変化に合わせてデバイスを省エネ制御する方法が幾つか提案されてきた<sup>2)3)</sup>。これらのデバイス制御手法を用いることで、ユーザのデバイス操作なしに省エネ制御を実現できる。しかし、NEDO エネルギー需要最適マネジメント推進事業の一環で住宅環境計画研究所の行った HEMS (Home Energy Management System) の実証試験<sup>4)</sup>によれば、自動制御によって削減できる電力量は数%程度と限定的であることが分かった。また一方で同実証試験は、各デバイスの消費電力を実時間で表示するなどの情報提供を行うことで、ユーザの省エネに対する意識を高め、ユーザの自制により大きな省エネが達成できることを報告している。そこで、省エネのためにユーザの自制を効果的に促す方法が求められている<sup>5)6)7)</sup>。

本稿では、設定した省エネ目標をユーザにとって最小限の我慢で実現するデバイス制御法を提案する。提案手法では、過去のユーザの行動履歴やデバイスの動作履歴、省エネ目標が与えられたとき、省エネ目標を達成し、かつ、ユーザの快適度の低下が最小となるような各時刻における各デバイスの設定値を計算する問題を定式化する。提案手法では、定式化した問題に対して、単位消費電力当たりの快適度の低下度合いをデバイスの重みとして、重みの小さいデバイスがより大きく消費電力を削減するように計算を行う。この計算を各シチュ

<sup>†1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
Nara Institute of Science and Technology

<sup>†2</sup> 山口東京理科大学  
Tokyo University of Science, Yamaguchi

エーションに対して行うことで、コンテキストの変化に適応し、かつ、総時間において省エネ目標の達成を支援するようなデバイス制御プランニングを行う。また、デバイスが物理量に及ぼす影響度合いと消費電力の関係を実際にデバイスの消費電力の計測を行うことでモデル化する方法と、各物理量値に対してユーザがどの程度快適あるいは不快であるかを表わす快適度関数をアンケート調査を基に構築する方法を提案する。これらを提案手法で使用することで、現実空間に存在するデバイスの特性や人の嗜好に沿った計算結果が算出できる。

提案手法により、どれだけユーザの快適度低下を抑えた上で省エネ目標を達成できるかを評価するため、一般家庭での典型的なデバイス使用シナリオを想定したシミュレーション実験を行った。実験の結果、提案手法は本手法の適用前のデバイス使用状況に対して、平均快適度を 14.47% 低下させるだけで 20% の省エネを達成できること、全てのデバイスに対する電力量を均等に削減する方法に比べて、省エネ目標達成時のユーザの平均快適度が 34.64–44.84% 大きいことが分かった。

## 2. 関連研究

これまで、省エネを達成するために様々な研究が行われてきた。Fong らは、商業施設における大型空調機器のエネルギー管理システムを最適に制御するためのロバストな進化計算手法を提案し、地下鉄駅を模したシミュレーションにおいて年間で 6.13% の省エネを達成することを示した<sup>8)</sup>。しかし、Fong らの手法は、利用者の行動状態などのコンテキストを考慮していないため、利用者が駅に存在しなくとも機器を動作させてしまう問題がある。

一方、コンテキストの変化に合わせて様々なデバイスを省エネに制御する方法が提案されている。増井らは、センサネットワークを利用して省エネの可視化やデバイスの制御を行い、省エネを達成できる家庭内省電力機器制御システム A-HEMS を提案した<sup>3)</sup>。A-HEMS の空調制御機能 i-fan においては、複数の空調機器を協調動作させることによって、より速やかに目的温度を達成することで省エネを実現した。また、Si らは、コンテキストアウェアサービス提供システム Synapse において、ユーザの活動状況と照度センサの出力からユーザの行動を先読みすることで、照明機器を適切に制御するサービスを実現した<sup>2)</sup>。

文献 4) では、各デバイスの消費電力を実時間で表示するなどの情報提供を行うことで、ユーザの省エネに対する意識を高め、ユーザの自制により大きな省エネが達成できることが報告された。これにより、自動制御に加えて、省エネのためにユーザの自制を効果的に促すことが重要であることがわかる。これを実現するために、ユーザに情報を提供することで省エネの達成を試みる研究が行われてきた。Darby は、エネルギー消費モニタリングを行うことで、ユーザがどのようなフィードバックを得ることができるかを示した<sup>9)</sup>。Chetty ら

は、水および電気、ガスの消費をモニタリングし、ユーザに対して資源消費についての情報を提供することで、ユーザのエネルギー消費を抑制させる研究を行った<sup>10)</sup>。Ueno らは、デバイス単位で消費電力モニタリングが可能なシステムである ECOIS を開発し、実際の家屋にシステムを導入することで、消費電力モニタリングが省エネに対して有用であることを示した<sup>5)</sup>。Ito らは、消費電力モニタリングを社会心理学に基づくエージェントの動作と組み合わせた省エネ行動支援インタフェースを提案した<sup>6)</sup>。河波は、ユーザに理解されやすい省エネ情報を提供することで、ユーザのエネルギー消費行動を抑制できることを示した<sup>7)</sup>。しかし、これらの消費電力モニタリングやエネルギー消費の情報提供に関する研究では、具体的にユーザがどのデバイスをどのように制御すれば効果的な省エネを達成できるかについては示されていない。

## 3. 快適度を考慮したデバイス省エネ制御アルゴリズム

本章では、ユーザの行動を支援することによって、快適度をできる限り大きく保ちながら省エネを達成する問題について述べる。

### 3.1 想定環境

対象空間は複数の部分空間（部屋と呼ぶ）から構成されており、部屋の集合を  $R$  とする。また、対象空間の外部の空間（家に対する屋外）を  $r_o$  とする。対象空間で生活するユーザの集合を  $U$  とする。各ユーザ  $u \in U$  が時刻  $t$  にいる部屋を  $u.loc(t) \in R$  と表す。対象空間においてユーザの快適度に影響のある物理量種類の集合を  $V$  とする。 $V$  の要素として、室温、湿度、照度などを想定する。各部屋には、いくつかのデバイスが設置されており、部屋  $r$  に設置されているデバイスの集合を  $D_r$  と表記する。

#### 3.1.1 シチュエーション

各ユーザ  $u \in U$  は、任意の時刻  $t$  において、何らかの活動状態（シチュエーションと呼ぶ）にあるとする。とりうるシチュエーションの集合を  $SIT$  と表記する。シチュエーションの例として、TV 視聴、音楽鑑賞、読書、食事、休憩、仕事などを想定する。ユーザ  $u$  の時刻  $t$  におけるシチュエーションを  $u.sit(t) \in SIT$  と表記する。

#### 3.1.2 コンテキスト

対象空間の各部屋の状況を場所コンテキストと呼ぶ。部屋  $r$  の場所コンテキストは、 $r$  の室温や湿度、照度などの物理量、 $D_r$  の各デバイスの状態などを含んでいる。部屋  $r$  の時刻  $t$  における場所コンテキスト  $rc(r, t)$  を次のように定義する。

$$rc(r, t) = (v_1(t), \dots, v_n(t), d_1.s(t), \dots, d_m.s(t))$$

ここで、 $v_i(t)$  は、部屋  $r$  における、各物理量 ( $V$  の要素) の時刻  $t$  における値であり、 $d_j.s(t)$

は,  $r$  に設置されている各デバイス  $d_j (\in D_r)$  の時刻  $t$  における状態である. また, 対象空間の外部空間  $r_o$  の時刻  $t$  における場所コンテキストを  $rc(r_o, t) = (v_1(t), \dots, v_n(t))$  と表記する ( $v_i(t)$  は, 外部空間  $r_o$  における, 各物理量の時刻  $t$  における値). 場所コンテキストにおける特定の物理量  $p \in V$  の値を  $rc[p](r, t)$  と表記する.

ユーザの状況をユーザコンテキストと呼ぶ. ユーザ  $u$  の時刻  $t$  におけるユーザコンテキスト  $uc(u, t)$  は,  $u$  のシチュエーション  $u.sit(t)$  と  $u$  がいる部屋  $u.loc(t)$  の場所コンテキストの組として次のように定義する.

$$uc(u, t) = (u.sit(t), rc(u.loc(t), t))$$

### 3.1.3 快適度関数

あるユーザコンテキスト  $uc$  に対し, ユーザ  $u$  がどれだけ快適かを表す関数を  $sat_u(uc)$  とする. ここで,  $0 \leq sat_u(uc) \leq 1$  とし, 値が 1 に近いほど快適度が高く, 0 に近いほど不快であるとする.

### 3.1.4 デバイス

各デバイスは, 高々一つの物理量種類 ( $V$  の要素) を制御可能とする<sup>\*1</sup>. デバイス  $d$  の制御対象物理量種類を  $v_d \in V$  と表記する.  $d$  の状態は off または on であり, on の場合には,  $d$  の制御対象物理量  $v_d$  に対し, 何らかの設定値を持つものとする (例えば, エアコンの場合, 室温  $25^\circ\text{C}$  など).

時刻  $t$  における設定値を  $d.set(t)$  と表記する. また, デバイスが on の場合, 部屋の物理量が設定値に必ず移行するものとする ( $25^\circ\text{C}$  に設定した場合, 必ず室温が  $25^\circ\text{C}$  になる). 各デバイスの  $d$  の消費電力は off の時は 0, on の時は制御対象物理量  $v_d$  に対する設定値  $d.set(t)$  と, 部屋の場所コンテキストおよび外部空間の場所コンテキストの現在値により決まるものとする. 部屋  $r$  に設置されたデバイス  $d$  の時刻  $t$  における消費電力を,  $pow_{(d,v_d)}(d.set(t), rc[v_d](r, t), rc[v_d](r_o, t))$  と表記する. ここで,  $pow_{d,p}(v_{set}, v_{cur}, v_{ext})$  は, デバイス  $d$  が, 制御対象物理量  $p$  に対し, 部屋および外部空間の物理量の現在値が  $v_{cur}$ ,  $v_{ext}$  の時に, デバイスの設定値を  $v_{set}$  に設定した際の消費電力である.

なお, 部屋  $r$  の各物理量  $p$  は,  $p$  を制御可能なデバイスが全て off の場合には, 外部空間  $r_o$  の物理量  $p$  の値に等しくなるという仮定を置く.

## 3.2 問題設定

省エネ行動支援の基準となる期間の長さを  $T$  とする.  $T$  は, 1 か月, 1 週間, 1 日など, 比較的長期間を想定する.

\*1 室温と湿度が制御可能なエアコンなど, 複数の物理量種類を同時に制御可能なデバイスは, 便宜上, それぞれ一つの物理量種類を制御する複数のデバイスであるとする.

対象空間において, 基準時刻 0 から始まる期間  $[0, T]$  における全ての部屋の場所コンテキストの集合を  $RC_{all}(0, T)$ , 外部空間  $r_o$  の期間  $[0, T]$  における場所コンテキストの集合を  $RC_{ext}(0, T)$ , 全ユーザに対する期間  $[0, T]$  のユーザコンテキストの集合を  $UC_{all}(u, 0, T)$  と表記する. また, 全ユーザに対し, 期間  $[0, T]$  において出現する全てのユーザコンテキストに対する快適度関数の値の集合を  $SAT_{all}(0, T)$  と表記する. これらは以下のように定義される.

$$RC_{all}(0, T) = \bigcup_{r \in R} \bigcup_{t \in [0, T]} rc(r, t)$$

$$RC_{ext}(0, T) = \bigcup_{t \in [0, T]} rc(r_o, t)$$

$$UC_{all}(0, T) = \bigcup_{u \in U} \bigcup_{t \in [0, T]} uc(u.sit(t), rc(u.loc(t), t))$$

$$SAT_{all}(0, T) = \bigcup_{u \in U} \bigcup_{t \in [0, T]} sat_u(uc(u.sit(t), rc(u.loc(t), t)))$$

$RC_{all}(0, T)$ ,  $RC_{ext}(0, T)$  を用いて, 期間  $[0, T]$  に消費される電力量  $E(0, T)$  が次の式で計算できる.

$$E(0, T) = \int_{t=0}^T \left( \sum_{r \in R} \sum_{d \in D_r} pow_{d,v_d}(d.set(t), rc[v_d](r, t), rc[v_d](r_o, t)) \right) dt$$

$RC_{all}(0, T)$ ,  $RC_{ext}(0, T)$ ,  $UC_{all}(0, T)$ ,  $SAT_{all}(0, T)$  が与えられると仮定する<sup>\*2</sup>. 省エネ行動支援を行いたい新たな期間  $[t_0, t_0 + T]$  において, 外部空間の場所コンテキストの移り変わりは過去のデータ ( $RC_{ext}(0, T)$ ) と同じであると仮定する. また, 新たな期間  $[t_0, t_0 + T]$  における全ユーザの快適度関数は, 過去のデータ ( $SAT_{all}(0, T)$ ) と同じであると仮定する. さらに, 各ユーザ  $u$  の行動パターン, すなわち, 時刻  $t$  にいる部屋, 時刻  $t$  におけるシチュエーションは, 過去のデータ ( $UC_{all}(0, T)$ ) と同じであると仮定する. すなわち, 以下が成立するとする.

\*2 これらのデータは, 期間  $[0, T]$  において計測可能である. また, 複数期間について計測したデータを平均するなどして求めた統計データを用いることも可能である.

$$RC_{ext}(t_0, t_0 + T) = RC_{ext}(0, T) \quad (1)$$

$$SAT_{all}(t_0, t_0 + T) = SAT_{all}(0, T) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \forall u \in U, \forall t \in \{t | uc(u, sit(t), \dots) \in UC_{all}(t_0, t_0 + T)\}, \\ \forall t' \in \{t' | (uc(u, sit(t'), \dots) \in UC_{all}(0, T))\}, \\ u, sit(t) = u, sit(t') \wedge u, loc(t) = u, loc(t') \end{aligned} \quad (3)$$

省エネ目標が、過去の期間  $[0, T]$  における消費電力量  $E(0, T)$  に対する割合  $\alpha (0 < \alpha < 1)$  として与えられるとする。このとき、新たな期間  $[t_0, t_0 + T]$  における消費電力量  $E(t_0, t_0 + T)$  に対し、以下の条件が成り立たなければならない。

$$E(t_0, t_0 + T) \leq E(0, T) \times \alpha \quad (4)$$

期間  $[t_0, t_0 + T]$  における消費電力量を期間  $[0, T]$  より削減するには、各時刻  $t \in [t_0, t_0 + T]$  におけるデバイス  $d$  の設定値  $d.set(t)$  を、期間  $[0, T]$  の設定値  $d.set(t')$  ( $t' \in [0, T]$ ) より消費電力が少なくなるように変更する必要がある。ただし、デバイスの設定値を変更すると、部屋の物理量が変化し、ユーザの快適度が変化する。この際、各シチュエーションにおいて、ユーザの活動（読書など）に必要な最低限の快適度を確保することが望まれる。シチュエーション  $sit \in SIT$  に対する最低限必要な快適度を  $min_{sit}$  と表記する。各シチュエーションにつき、最低限度の快適度を保証するための条件を、次のように設定する。

$$\forall u \in U, \forall t \in [t_0, t_0 + T], sat_u(u, sit(t), rc(u, loc(t), t)) \geq min_{sit(t)} \quad (5)$$

以上より、本問題の目的は、条件 (1)–(5) を満たし、かつ、ユーザの快適度の総和が最大（言い換えれば、過去の期間  $[0, T]$  と比べた快適度の減少度合いが最小）となるような、各時刻  $t \in [t_0, t_0 + T]$  における各デバイスの設定値  $d.set(t)$  を求めることである。

よって、本問題の目的関数を以下の式で与える。

$$\begin{aligned} \text{maximize } \int_{t=t_0}^{t_0+T} \left( \sum_{u \in U} sat_u(uc(u, t)) \right) dt \\ \text{subject to constraints (1) – (5)} \end{aligned} \quad (6)$$

これはナップサック問題に帰着できる NP 困難問題である。次章では、この問題に対する準最適解を現実的な時間で求めることができるヒューリスティックアルゴリズムを提案する。

#### 4. 省エネプラン導出アルゴリズム

本章では、3章の問題を解くための基本方針を述べ、ユーザの快適度を考慮したデバイスの省エネ制御アルゴリズムを示す。

#### 4.1 基本方針

提案手法では、ユーザの快適度をできる限り低下させずに各デバイスの消費電力量を削減することで省エネ目標を達成する。このために、各シチュエーションにおいて使用されている各デバイスに重みを与え、消費電力量を削減する際の快適度の低下をできる限り抑える。

ユーザのシチュエーションは時間によって移り変わり、そのつどユーザの使用したいデバイスが変化する。また、ユーザが快適性を求めるシチュエーションとあまりそうでないシチュエーションが存在する（たとえば仕事と休憩というシチュエーションが存在するとき、休憩よりも仕事のほうに快適度を求めるなどが考えられる）。そのため、省エネプランを導出する時間区間（以下、サービス期間と呼ぶ）内で全てのデバイスの消費電力量を均一に削減せず、各シチュエーションにおいて使用されるデバイスそれぞれに重みを与え、それらに基づいて削減電力量に差をつけることで効果的に省エネを行う。

##### 4.1.1 シチュエーション間の優先順位付け

シチュエーションに対する重み（以下、シチュエーション重み）は、各シチュエーションでどれだけ消費電力量を削減するかを決定する重みとする。シチュエーション重みはそのシチュエーションにおける快適度が低下しやすいほど大きくなり、シチュエーション重みの大きなシチュエーションほど消費電力量を削減する割合は小さくなる。そのため、適切なシチュエーション重みが与えられたとき、サービス期間におけるユーザの快適度の総和は最大になる。しかし、適切なシチュエーション重みを算出するには、快適度関数だけではなく、各シチュエーションで使用されているデバイスをどのように省エネするかという情報が必要になる。そのため、4.1.2 節で述べるデバイスに対する重みを考慮し、適切なシチュエーション重みを算出する。提案手法では、仮のシチュエーション重みを初期値として与え、結果として算出された各シチュエーションの快適度の比率から新たなシチュエーション重みを計算してフィードバックをかける。この処理を、それぞれのシチュエーション重みの値が収束するまで繰り返すことで、適切なシチュエーション重みを計算する。

例えば、 $R = \{ \text{リビングルーム} \}$ 、 $SIT = \{ \text{読書, 休憩, 仕事} \}$  とする。仮に、各シチュエーションに対するシチュエーション重みを均一に 1 とする。このとき、提案手法によって算出された各シチュエーションの快適度が、読書、休憩、仕事でそれぞれ 0.7, 0.9, 0.6 であるならば、仕事に対するシチュエーション重みを大きくする（もしくは休憩に対するシチュエーション重みを小さくする）ことによって、ユーザの快適度の総和を大きくする。このような計算をそれぞれのシチュエーション重みの値が収束するまで繰り返す。結果として、シチュエーション重みは、快適度の低いシチュエーションほど大きくなるため、初期の重みの昇順である、仕事、読書、休憩の順に大きい値になる。シチュエーション重みを考慮し、重

みの小さいシチュエーションでの消費電力の削減をより大きくすることで、サービス期間での快適度をより大きくすることができる。

#### 4.1.2 各シチュエーションにおけるデバイスの優先順位付け

あるシチュエーションで消費電力量を削減するとき、全デバイスで均一に一定割合だけ消費電力量を削減するように設定値を変更すると、快適度が大きく低下する可能性がある。シチュエーション毎に重要となる物理量種類が異なるため、消費電力量の削減によってデバイスやアクチュエータがユーザにとって重要な物理量種類に作用する効果が小さくなり、快適度を大きく低下させてしまうからである。そこで、各デバイスが単位消費電力当たりでユーザの快適度にどれだけ影響するかを考え、供給電力量を下げる際に、各デバイスへ単位供給電力量当たりの快適度の低下度合いに応じた重みを与える。この重みをデバイス重みと呼ぶ。例えば、シチュエーションが“読書”のときに{エアコン, 照明機器}が動作しているとする。各デバイスへの供給電力量を下げる際に単位消費電力当たりのユーザ快適度の低下度合いが、照明機器, エアコンの順であれば、照明機器により大きい重みを与える。これはすなわち、一定割合の消費電力量を削減したとき、エアコンの作用が小さくなることでユーザがより不快に感じることを意味する。デバイス重みを考慮し、重みの小さいデバイスの削減電力量をより大きくすることで、各シチュエーションにおいてユーザの快適度をより大きくできる。

#### 4.2 アルゴリズム

本アルゴリズムは、省エネ目標を達成し、かつ、ユーザの快適度の低下を最小限に抑えるために、各デバイスをどのように制御するかを決定する。疑似コードを Algorithm1 に示す。

まず、各シチュエーションで削減すべき電力量  $E_{sit}^-$  を計算する(2行目)。ここで、 $E$  は過去における電力の総使用量である。そして、各デバイス  $d$  のデバイス重み  $weight(sit, d)$  を計算し、 $d$  の削減電力量  $E_{sit,d}^-$  を初期化する(3-6行目)。次に、各デバイスの削減電力量  $E_{sit,d}^-$  に、単位電力量  $e$  を、個々のデバイス重み  $weight(sit, d')$  の比率に応じて、分配して加える(9行目)。 $D_{sit}$  の全デバイスでの削減量の和が  $E_{sit}^-$  に達するまでこの計算を繰り返し、個々のデバイスの削減電力量を決定する(7-12行目)。ここで、デバイス重みが削減電力量に応じて変化するため、単位電力量  $e$  を加えるたびに、各デバイスのデバイス重みを更新している(10行目)。最終的に、得られた削減電力量から個々のデバイスの設定値を算出する(13行目)。

デバイスによって消費電力に差があるため、最初に算出したデバイス重みの比率に応じるだけでは削減すべき電力量を満たさない可能性がある。また、快適度関数は必ずしも線形ではないため、初期のデバイス重みを用いるだけでは快適度を最大化することはできない。

#### Algorithm 1 省エネスケジュール計算アルゴリズム

```
1: for each  $sit \in SIT$  do
2:    $E_{sit}^- = (1 - \alpha) \times E \times \frac{\frac{1}{weight(sit)}}{\sum_{sit' \in SIT} \frac{1}{weight(sit')}}$ 
3:   for each  $d \in D_{sit}$  do
4:     compute  $weight(sit, d)$ 
5:      $E_{sit,d}^- = 0$ 
6:   end for
7:   while  $E_{sit}^- > \sum_{d \in D_{sit}} E_{sit,d}^-$  do
8:     for each  $d \in D_{sit}$  do
9:        $E_{sit,d}^- = E_{sit,d}^- + e \times \frac{\frac{1}{weight(sit,d)}}{\sum_{d' \in D_{sit}} \frac{1}{weight(sit,d')}}$ 
10:      update  $weight(sit, d)$  to reflect  $E_{sit,d}^-$ 
11:    end for
12:  end while
13:  compute  $d.set(sit)$  from  $E_{sit,d}^-$ 
14: end for
```

そのため、単位消費電力量ずつ削減し、そのつど快適度からデバイス重みを計算することで、デバイスの消費電力の制約の範囲で、より大きな快適度を保つ。しかし、4.1.1 節で述べたように、一度だけの計算では適切なシチュエーション重みを計算することはできない。そのため、計算結果の一部である各シチュエーションの快適度に基づき、シチュエーション重みを更新してフィードバックをかけ、値を収束させるまで計算を繰り返す。

#### 4.3 インタラクティブな行動プランニング

これまで、ユーザの快適度をできる限り高く保持する行動支援手法について述べてきた。しかし、システムが算出した省エネ行動プランがユーザの期待するものでない可能性があり得る。例えば、シチュエーションや気象条件などを含むユーザコンテキストが過去の履歴とまったく同じであっても、ユーザの体調が異なる場合にはシステムの算出結果に従ったとしても、快適度が大きく低下するかもしれない。このとき、システムではユーザの体調などを測定できないため、ユーザが期待する省エネプランが算出されず、結果としてユーザが満足しないプランを提示する可能性がある。

そこで、ユーザ・システム間でインタラクティブにやり取りを行うことで、ユーザの嗜好に近い行動プラン決定を支援するユーザインタフェースを提案する。提案するユーザインタ

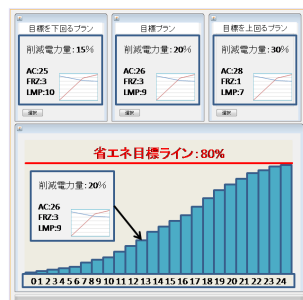


図 1 提案するインタラクティブなユーザインタフェース

フェースのデザインを図 1 に示す．システムは、当該シチュエーションにおける複数の行動プランを提示し、ユーザに最も好みの行動プラン（削減電力量やデバイスの設定値など）を選択させる．選択肢となる行動プランは、省エネ目標を達成するために最適なプラン（4.2 節のアルゴリズムの計算結果）および省エネ目標を下回るが快適度を高く保つプラン、省エネ目標を上回る消費電力量削減を達成するが快適度が相応に低下してしまうプランの 3 候補とする．ユーザはこの 3 つの選択肢から最もその時の嗜好に合った行動プランを選択できる．しかし、選択肢中の 1 候補は当該シチュエーションにおける省エネ目標に対する削減すべき電力量を達成しないため、ユーザが省エネ目標を満たさない選択肢を選んだ場合には、全体として省エネ目標を達成しない可能性が生じる．これを防ぐため、ユーザが行動プランを選択した後、サービス期間で省エネ目標を達成しない可能性がある場合には、その時点で未選択のシチュエーションに対して行動プランの再計算を行う．

## 5. 提案手法の評価

提案手法の有効性を調べるため、家庭での典型的なデバイス使用状況を模したシミュレーション実験を行った．次節では、実験に利用した快適度関数および電力消費モデルについて述べる．

### 5.1 快適度関数の構築

著者らは文献 11) において、アンケートからユーザの快適度を推定する手法を提案した．この手法では、幾つかのシチュエーションに対するユーザの快適度のデータを計測するだけで未知のシチュエーションの快適度の推定が可能である．本実験では、この手法を用いて快適度を問うアンケートを収集しユーザの快適度関数を推定する．

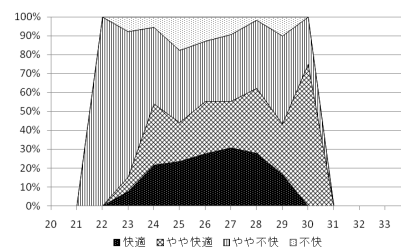


図 2 温度に関する快適度関数

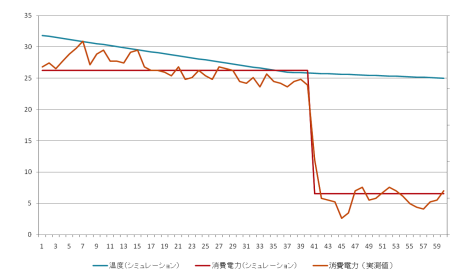


図 3 実装したエアコンの電力消費モデルと実測値

快適度関数の推定を行うために用いたアンケートの詳細を表 1 に示す．アンケートの実施期間は、2010 年 6 月 4 日から 10 月 3 日までのおよそ 4 ヶ月間であり、有効回答数は 307 件である．ここから、温度および温度に関する快不快項目から、温度に関する快適度関数を推定した．推定した温度に関する快適度関数を図 2 に示す．この関数は、ある温度に対して、快適もしくは不快に感じるユーザの割合を表している．たとえば、温度 28°C において、快適、やや快適、やや不快、不快と感じるユーザの割合がそれぞれ 27.87%、34.43%、36.07%、1.64% である．この関数において、ユーザが快適に感じている割合のグラフが PMV のグラフと同様の山型になっており、ユーザの快適度を適切に推定していることがわかる．

温度以外に、照度に関する快適度を扱う指標も存在する<sup>12)</sup>．文献 12) では、様々な照度の下で不快から快適までの 5 段階の選択をさせる被験者実験を行うことでデータ収集し、重回帰分析によって照度と快適度の関係を示している．また、日本工業規格 (JIS) における規格である照度基準は、ある状況においてどの程度の照度が適切かを示している．本研究では、日本工業規格の照度基準を基に、適切な照度を下回ると大きく快適度が低下する快適度関数を作成し、実験に使用する．

### 5.2 電力消費モデルの構築

本実験では、実デバイスから測定した消費電力をモデル化し、シミュレータに組み込んだ．デバイスの消費電力量は、消費電力計測機器であるワットチェッカー（サンワサプライ）およびワットアワーメーター（NTT アドバンステクノロジー）を使用して収集した．

また、物理量値の測定には、温度センサおよび照度センサを搭載したデータロガーである EL-USB-2 (Lascar Electronics) を使用した．測定対象は、一般家庭での消費電力量の大きいデバイス上位 3 種類であるエアコンおよび照明、冷蔵庫である．

まず、エアコンの電力消費モデルの構築について説明する．エアコンの消費電力を計測し



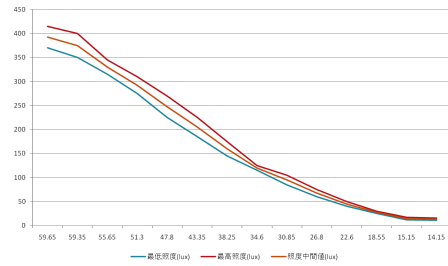


図4 照明機器の照度と消費電力の関係

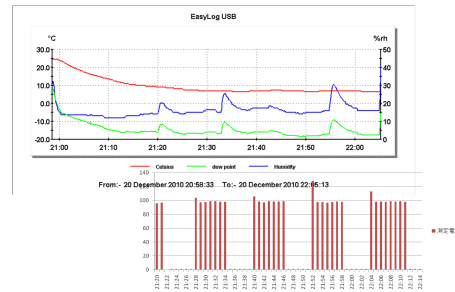


図5 冷蔵庫の庫内温度と消費電力の関係

たところ、周期的に消費電力の大きな期間と小さな期間を繰り返すことがわかった。エアコンは、室温が設定温度から離れていれば（たとえば、冷房モードのときは室温が設定温度より高いとき）、コンプレッサを動作させることによって室温を設定温度に近づける。このときエアコンは大きく電力を消費する。また、室温が設定温度どおりであれば、コンプレッサは動作させず、送風のみを行う。このため使用電力は比較的小さい。コンプレッサを動作させることで大きな電力を消費するというエアコンの構造から、計測結果の大きな電力消費期間がコンプレッサを動作させている期間である。図3に、エアコンの消費電力を計測した結果と、これらのエアコンの動作特徴をシミュレータに組み込んだ消費電力シミュレーションおよびその時間の室温を示す。日本外断熱総合研究所<sup>13)</sup>によれば、室温の上昇もしくは低下は、熱損失係数(Q値)や室温、外気温、エアコンの出力、建物の床面積、熱容量から計算できる。ここから、ある性能をもつエアコンをある設定値で動かしたとき、室温がどのように変化するかを計算するモデルを構築した。

次に、照明機器の電力消費モデルの構築について説明する。無段階調光が可能な照明機器を用いて、調光設定を変更しながら消費電力および照度を測定した。その結果、図4に示すように、照明機器の消費電力および照度には線形に近い相関があることがわかった。ここから、消費電力に対し照度を与えるモデルを構築した。

最後に、冷蔵庫の電力消費モデルの構築について説明する。冷蔵庫の消費電力を計測した結果、エアコンと同様に、周期的に消費電力の大きな期間と小さな期間を繰り返すことがわかった。冷蔵庫の動作の構造は、設定から庫内温度が離れていれば、コンプレッサを動作させて庫内温度を下げる。しかし、エアコンと違って、断熱が優れているため、扉の開閉が少なければ、コンプレッサを動作させない周期は長くなる。そこで、消費電力および庫内温度だけでなく、開閉時間を含む計測を行った。計測結果を図5に示す。図5では、21時20

表1 ユーザ快適度測定のためのアンケート項目

アンケート項目	回答
室温は快適か	快適 ↔ 不快 (4段階)
前項目の詳細 (不快時のみ)	寒い / 暑い
湿度は快適か	快適 ↔ 不快 (4段階)
前項目の詳細 (不快時のみ)	乾燥している / 湿湿している
ユーザシチュエーション	研究, 食事など (9種類)
使用中のデバイス	エアコン, 照明器具, PC など (8種類)
日付	自動入力
室温	温度計を見て入力
湿度	湿度計を見て入力

表2 シミュレーション実験の設定

対象空間 (1部屋)	
容積	5.0m × 5.0m × 2.0m
初期室温	32.0 °C
熱損失係数 (Q値)	2.5
外部空間の気温	35.0 °C
デバイス	
エアコンの消費電力	400 ワット
照明 (無段階調光) の消費電力	80 ワット
冷蔵庫の消費電力	120 ワット
シチュエーション (各 60 分) と重み	
運動 : 読書 : 料理 = 6 : 4 : 5	
シチュエーション毎の快適度関数	
エアコン (室温) : 図2を使用。ただし、運動時の快適度低下度合いは 1.5 倍に設定	
照明 (照度) : (5.1 節の説明に従う) : ただし、読書時の快適度低下度合いは 1.5 倍に設定	
冷蔵庫 : 残り開閉回数 × 0.2 (最大 5 回まで) に設定。ただし、料理時の快適度低下度合いは 1.5 倍に設定	

分、21時32分、21時55分にそれぞれ5秒、10秒、20秒ずつ扉を開くことによって、庫内温度を恣意的に上げることを試みた。しかし、結果として、20秒程度の扉の開閉では、庫内温度をほとんど上げないため、冷蔵庫の動作に影響を与えないことがわかった。しかし、庫内温度が上がるまで扉を開け続けた場合は、コンプレッサを動作させる周期が庫内温度が安定して低いときに比べて短くなる。以上の計測結果から、冷蔵庫のモデルを構築した。

### 5.3 シミュレーションの設定

本実験では、ある部屋において一人のユーザがデバイスの設定を変えず過ごす中で、何度かシチュエーションが変化する状況を想定した。詳細を表2に示す。実験は暑い夏の日を想定して、外部空間の気温を35°C、部屋の初期温度を32°C、ユーザに対する最適温度を28°Cとした。設置デバイスは、エアコンおよび照明器具、冷蔵庫でありそれぞれの初期設定値は“24°C”および“100”、“10”である。シチュエーションは運動、読書、料理と順に変化し、それぞれの時間長はすべて60分とする。なお、実験では運動、読書、料理のシチュエーション重みをそれぞれ6、4、5とする。予備実験で、省エネ目標を達成した時の快適度の低下率が最も少なくなるシチュエーション重みを求め、採用した。また、各物理量種類に対する快適度関数として、温度および照度に関するものは5.1節で記述した快適度関数を利用し、冷蔵庫の開閉に関しては、デバイスの利用方法に基づく擬似の快適度関数を用意した。

提案手法を評価するために、ある省エネ目標を達成するとき、快適度をどの程度下げなければいけないかを測定した。比較対象は以下の2つの手法を使用した：(1) シチュエーション重みのみを考慮した手法 (デバイス重みは考慮せず、各デバイスの供給電力量は一律に低下する) (2) どちらの重みも考慮しない手法 (各シチュエーションにおける供給電力量は一

表 3 実験結果

	省エネ目標=10%		省エネ目標=20%	
	平均快適度	快適度低下率 (%)	平均快適度	快適度低下率 (%)
適用前	0.843	0	0.843	0
提案手法	0.785	6.88	0.721	14.47
シチュエーション重みのみ	0.649	23.01	0.554	34.28
重みなし	0.551	34.64	0.465	44.84

律に低下する)。

#### 5.4 実験結果および考察

省エネ目標を 10% および 20% としたときの実験結果を表 3 に示す。表 3 において、適用前は供給電力量を低下させないときであり、平均快適度はサービス期間における快適度の平均値である(なお、最大値は 1 である)。重みを考慮しない手法は、単純にすべてのデバイスで均等に電力量を削減しているだけなので、平均快適度が最も小さくなっている。また、快適度低下率は省エネ目標が 10% および 20% のとき、それぞれ 34.64% および 44.84% であった。シチュエーション重みのみを考慮した手法は、重みを考慮しない手法に比較して平均快適度は大きいものの、提案手法には大きく劣っている。ここから、デバイス重みが省エネ目標の増大に対する平均快適度の低下を抑制していることが推測される。また、適切なシチュエーション重みを割り当てることによって、デバイス重みを考慮しなくても、快適度低下率を 18.50–27.64% に抑えている。これは、各シチュエーションに快適度が低下しやすい物理量を設定したため、シチュエーション重みによってその影響度合いを小さくしたと考えられる。提案手法は、他の 2 つの手法に比べて、平均快適度を大きく保持していることがわかる。そして、省エネ目標の増大に対する快適度の低下も最も小さい。

#### 6. ま と め

本研究では、ユーザの快適度をできる限り低下させずに省エネ目標を達成することを目的とした省エネ行動支援手法を提案した。提案手法の特徴は、様々なシチュエーション間および各シチュエーションで使用されるデバイス間でユーザ快適度への影響度合いに応じて電力使用の優先順位を決めることにある。アンケートに基づいて決定した快適度関数と実測に基づき構築したデバイスの電力消費モデルを用いたシミュレーション実験により、提案手法適用前と比べて、平均快適度を 14.47% 低下させるだけで 20% の省エネを達成できた。これは、全てのデバイスに対する電力量を均等に削減する方法に比べて、省エネ目標達成時のユーザの平均快適度が 34.64–44.84% 大きいことに相当し、提案手法の有効性が確認できた。提案手法の実用化のためには、様々なシチュエーションに対して快適度を自動で測定でき

る方法が望まれる。そのため、Arduino に照度、温度、湿度の各センサと ZigBee 規格での無線通信を行う XBee チップを搭載したセンサデバイスと SunSPOT rev.8 を用いて赤外線リモコンによるデバイスの操作履歴を取得するシステムを現在開発中である。今後、これらのセンサシステムを使用して快適度関数を自動で取得する実験を行う予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 省エネルギーセンター, “EDMC / エネルギー・経済統計要覧 2009 年版” (2009) .
- 2) H. Si, S. Saruwatari, M. Minami and H. Morikawa: “A Ubiquitous Power Management System to Balance Energy Savings and Response Time Based on Device-level Usage Prediction,” *Journal of Information Processing*, Vol.18, pp.147–163 (2010).
- 3) 増井崇裕, 峰野博史, 水野忠則: “センサネットワークを利用した家庭内省エネシステムの検討”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2009) シンポジウム, pp.10–18 (2009) .
- 4) NEDO: 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, <http://nedo.go.jp/> .
- 5) T. Ueno, F. Sano, O. Saeki and K. Tsuji: “Effectiveness of an energy-consumption information system on energy savings in residential houses based on monitored data,” *Energy and Resources*, Vol.25, No.5, pp.347–353 (2004).
- 6) K. Ito, D. Tomita, T. Imaki, T. Hongo and H. Yoshikawa: “Development of an Affective Interface for Supporting Energy-saving Activities and its Evaluation,” *Proceedings of CSEPC2004 (Cognitive Systems Engineering in Process Control)*, pp.87–93 (2004).
- 7) 河波潤: “省エネルギー情報の提供が家庭内のエネルギー消費行動に及ぼす影響”, 原子力安全システム研究所 社会システム研究所研究報告 (2002) .
- 8) K.F. Fong, V.I. Hanby and T.T. Chow: “System optimization for HVAC energy management using the robust evolutionary algorithm,” *Applied Thermal Engineering*, Vol.29, pp.2327–2334 (2009).
- 9) S. Darby: “The effectiveness of feedback on energy consumption,” *Environmental Change Institute*, University of Oxford (2006).
- 10) M. Chetty, D. Tran and R.E. Grinter: “Getting to green: understanding resource consumption in the home,” *Proc. of UbiComp 2008*, pp.242–251 (2008).
- 11) S. Yamamoto, N. Kouyama, K. Yasumoto, M. Ito: Maximizing Users Comfort Levels through User Preference Estimation in Public Smartspaces, *Proc. of the 7th IEEE Int’l. Workshop on Pervasive Learning, Life, and Leisure (PerEL 2011)*, pp. 187–192 (2011).
- 12) H. Asada and M. Shukuya: “Study on the relation of horizontal and vertical illuminances to visual comfort,” *Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan*, pp.323–324 (1996).
- 13) 日本外断熱総合研究所, <http://www.sotodan-souken.com/> .