

スマートハウス内センシングを活用した 生活行動推薦システム

中村 笙子¹ 廣森 聡仁¹ 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹ 山口 容平² 下田 吉之²

概要：近年、スマートハウスが実用化されつつあるが、現在のスマートハウスは家庭の電力使用量や太陽光発電の発電量、電気自動車の電池残量などを統合的に把握、可視化することで電力ピークシフトや家庭での省エネルギーを目指すものが多い。一方で、センサデバイスの低価格化とコモディティ化により、家庭内の空調環境（温湿度など）や人々の日常生活行動の検出や記録、解析が可能な環境が整ってきているため、スマートハウスに行動検出、解析の機能を保持させ、適切な行動推薦を行わせることで、居住者に対し、省電力を実現しながら健康管理や家族団らんなど生活全体の質を自然に実現することも可能である。本研究では、従来のスマートハウスで計測されている家電の電力使用量や自家発電量、家庭蓄電池の電力残量といったエネルギー関連の情報に加え、居住者の生活行動習慣を計測、把握し、電力コスト、健康、快適度、家族団らんといった複数の生活質基準をなるべく同時に充足するような生活行動を提示するスマートハウス向けの行動検出・解析・推薦システムの設計と評価について述べる。我々の研究グループで開発している人の高精度トラッキングシステムや温湿度センシングシステム、エネルギーセンシングシステム「ひとなび」を活用し、世帯居住者の行動実施頻度や平均実施時間を蓄積・解析し、その結果を元に、現在の生活習慣から大きく逸脱しない範囲で、電力コスト、健康度、快適度、家族団らん度などの評価基準和を最大とする行動基準を提示する。典型的な世帯の生活行動習慣からの行動推薦を導出し、その有効性を確認している。

Activity Sensing, Analysis and Recommendation in Smarthouse

SHOKO NAKAMURA¹ AKIHITO HIROMORI¹ HIROZUMI YAMAGUCHI¹ TERUO HIGASHINO¹
YOHEI YAMAGUCHI² YOSHIYUKI SHIMODA²

1. はじめに

夏冬の電力逼迫への対応やCO₂排出量抑制への社会的要求もあり、世帯における節電やピークシフトが重要視されている。そのような背景にも後押しされ、売買電や蓄電、発電が可能であり、電力量を可視化した家電やPHV/EVを自動制御する機能を有するスマートハウスの研究が実験的段階から普及段階に移行しつつある。スマートグリッドと密接に連携することを前提としている現在のスマートハ

ウスはHEMS（家庭電力管理システム）をその中核とし、BEMS（ビル電力管理システム）のように人の在不在検知を行う赤外線センサや温湿度センサなどの様々なセンサを活用した照明空調制御なども想定されている [1].

一方で、近年ではより高性能で安価なセンサ機器が普及し、家庭における人々の行動や生活も従来より詳細に把握することができるようになってきている。例えば、音声認識による人検知機能を備えた自走式掃除ロボットが商品化され、居住者への話しかけや情報提供が可能である [2]. また、電力パターンから非スマート家電の利用状況を判断したり [3], [4], 人感センサによりリビングやキッチンでの人の立ち位置や行動軌跡を予測する研究もなされている [5]. 生活記録（ライフログ）や健康支援に関する技術では、歯ブラシやコップ、冷蔵庫やコーヒーメーカーなど、小型機

¹ 大阪大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science & Technology, Osaka University,
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

² 大阪大学 大学院工学研究科エネルギー工学専攻
Graduate School of Engineering,
Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

器や家電に埋込まれた移動検出センサやウェアラブル活動センサにより個々の行動を推定し、それを日常的かつ詳細に記録し可視化する技術やサービスが一般化してきている [6]。我々の研究グループでは測域スキャナを利用した共有空間での軌跡検出や環境センシングを行う「ひとたび」を開発し、スマートビルディングやビル電力管理システム (BEMS) における共有空間の人の位置や行動とより密接にリンクした空調制御の可能性を探求しており [7]、オフィスビルにおける節電効果のシミュレーションも実施している [8]。今後は家庭生活行動の把握や理解が省エネルギーや家庭での安全安心へとつながる展開が予想される。

しかし、健康支援などを目標とした現在のサービスは専用センサやウェアラブル活動センサを仮定した個人センシングが主体であり、一方で従来のスマートハウスでは HEMS における電力量制御を主目標とした人物存在検出などが主流である。しかしながら、家庭においては、エネルギーのみならず、生活習慣に対する嗜好や防犯などの安全、健康や家庭内高齢者見まもりなどの安心、家庭内コミュニケーション、生活快適性など、様々な観点から最適な行動や生活が実現されることが望ましく、その意味でスマートハウスはエネルギーセントリックのみならずヒューマンセントリックであることが必要である。そのためには、居住者の家庭内生活行動を把握し、それに応じて居住者の最適生活を推薦できる機能が今後のスマートハウスに望まれているといえる。

本研究では、居住者の生活習慣の嗜好をセンシング技術により把握しながら、省電力に加え、健康、団らん、快適度といった複数の観点において生活の質向上を図ることができるような生活行動推薦を実現するスマートハウスシステムを設計する。提案システムでは、我々の研究グループで開発している人の高精度トラッキングや温湿度・エネルギーセンシングが可能な「ひとたび」を活用し、世帯居住者の行動実施頻度や平均実施時間を蓄積・解析することを前提とする。その結果を元に、外気温や天候、季節、家電や電気自動車の使用有無など行動に影響を与える要因と家庭における実際の行動内容との因果関係を解析し、現在の生活習慣から大きく逸脱しない範囲で、省電力度、健康度、快適度、家族団らん度などの評価基準和を最大とする行動基準を提示する。

実世帯の行動データを用いた評価実験により、行動要因を与えた場合に、居住者が好む生活行動を抽出できることを示した。また、典型的な世帯の生活行動習慣から行動推薦を導出した結果、それが元の生活行動習慣に近く、かつ省電力、健康度、快適度および家族団らん度のそれぞれの基準を向上させることが確認できた。

2. 関連研究

2.1 これまでの HEMS システム

世帯における電力消費を最適化するようなスケジューリングシステムは多数存在する。文献 [9] では、温湿度などの環境やバッテリー残量の変化、ユーザの生活履歴等に応じて、家電の稼働優先度を適応的に更新するスケジューリング手法が示されている。この優先度が高い場合は、買電することになったとしてもただちに家電を稼働させる。優先度が低い場合は、バッテリー残量に応じて家電を稼働するか否かを決定する。文献 [10] では、電気料金が時間帯ごとに変動することを想定し、スマートハウスにおける電力消費をモデル化しており、電気代を最小化するような家電の稼働スケジューリングを混合整数線形計画問題を用いて行っている。文献 [11] では、過去の家電利用とそれによる快適度を参考に家電を制御することにより、消費電力の削減目標値を達成しつつ、高い快適度を維持し、ユーザの嗜好に沿った家電制御が行えることを示している。ただし、これらは電力消費の観点のみで生活改善を図っており、本研究が目的とするヒューマンセントリックな生活改善は考慮されていない。一方で、文献 [12] では、特別なウェアラブルセンサを用いずに健康改善を目指すシステムを提案している。消費カロリー、運動量と体重変化の関係をモデル化しており、1日1回の体重測定と、ユーザに入力してもらった毎日の食事ならびに運動内容から、ユーザの嗜好を推定しつつ、目標体重までの食事や運動プランを推薦する。本研究では、このような指標をシステムに組み込むことで、省エネルギー以外の観点からも生活を評価可能なシステムを目指す。

2.2 家庭内センシングによる行動検出

文献 [13] では、家庭内に配置したセンサからデータを収集し、構築した確率モデルを用いて睡眠、朝食、夕食、シャワーなどの行動を検出する。文献 [3] では、コンセントに付加した処理回路等を用いて機器の電流波形から大きさ、形状、時間差などの特徴量を算出し、ホームサーバーへ送信する。ホームサーバーでは、学習済の特徴量と受信した特徴量を比較することで、コンセントに接続された機器を判別している。文献 [14] では、携帯電話の加速度センサとマイクを用いて収集したデータから、掃除機、皿洗い、ドライヤーの使用等を判別している。本研究においても上記の文献と同様に家庭内にスマートタップや赤外線センサ等を配置し、取得した情報から行動検出を行うことを想定している。

3. アーキテクチャと動作概要

3.1 アーキテクチャ

スマートハウスは、図1のように、居住者、スマート家電などの電力消費源（家電）、家庭内電力供給源（供給源）の三つの要素から構成される。電力消費は居住者の行動と家電の稼働により生じ、電力供給は電力会社からの購入電力および供給源により賄われる。供給源は家庭用蓄電池、太陽光発電器、蓄電池付の自動車（EV または PHV、以下簡単のため EV とする）であり、蓄電池と EV は太陽光発電器からの発電力と購入電力を蓄積できる。また蓄積電力はグリッドへ売却でき、売却量に応じた金額が得られる。スマート家電は ECHONET[19] が想定するような自動制御機能により統括管理され、設定した時間帯にユーザの操作無しに稼働させる予約実行ができるものとする。

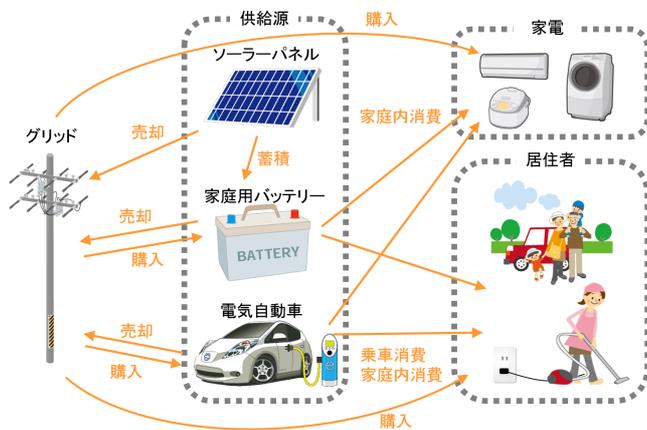


図1 スマートハウス概要図

また本稿で想定するスマートハウス内の行動解析推薦システムのアーキテクチャを図2に示す。スマートハウス内では、我々が開発し、現在大阪駅前の大規模商業ビル「グランフロント大阪」の展示場「The Lab」で1年以上の長期運用を実施している「ひとなび」システム[8]または類似のトラッキングシステムが稼働するものとする。現在ひとなびは北陽電機製のレーザー測域スキャナ、T&D社のおんどとり、および Echonet Lite 準拠のスマートエコワット[20]からデータを取得し統合するとともに、位置情報や電力情報を可視化することもできる（図3、4）。提案システムではこれらから居住者の（匿名の）家庭内位置情報、温湿度および電力使用情報を取得する。さらにレガシーな家電については電力量パターンや利用電力系統などから利用時間を推定し、在宅情報や前述の家庭内位置情報を組み合わせて、各居住者の部屋レベルの位置（在室情報・例えば「リビング」や「書斎」など）や行動を推定する。なおこれらの行動は様々な理由から一般には完全に把握できないとすることが自然である。例えば行動を完全に把握され

ることへの嫌悪感や不安感などから、特定の時間帯や場所（寝室や洗面所など）、居住者を特定しないことを居住者らが選択したり、あるいはセンサ配置や推定アルゴリズムの制限で特定が不可能であることもある。提案システムではそういった不完全なセンシング情報からの行動解析推薦も考慮しており、データが欠損している場合においても妥当性のある推薦結果を提示できることを確認している。詳細は6.2節を参照されたい。また、その他の外部環境情報として、Webサービスなどから取得可能な天候や花粉飛散量なども考慮でき、これらは居住者の行動に一定の影響を与えるものとする。これについては4.1節で述べる。最後に、外出や自動車使用に関しては、居住者に紐付いたスマートフォンのGPS情報や、自動車のスマートハウスへの接続状況等から判断可能とする。

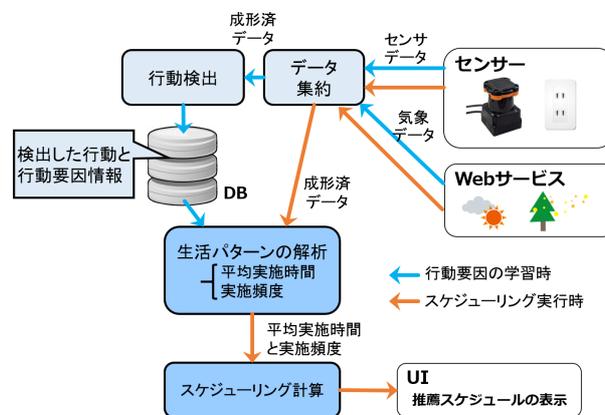


図2 行動解析推薦システムのアーキテクチャ



図3 ひとなびによる人の位置情報の可視化

これらの情報を用いて、行動解析推薦システムは、生活パターンの解析を行い、居住者、家電、供給源が、どの時間帯にどのような行動または動作（電力消費（稼働）、電力供給（蓄電や放電など））を行っているかを推測し、「スケジュール」と呼ばれる行動表で表現する。検出された実スケジュールに基づき、様々な生活の質基準を向上させる生活パターンを改善スケジュールとして居住者に推薦・提示する。居住者は実スケジュールと改善スケジュールを指標に、自らの生活パターンを変更し、その新しい生活パター

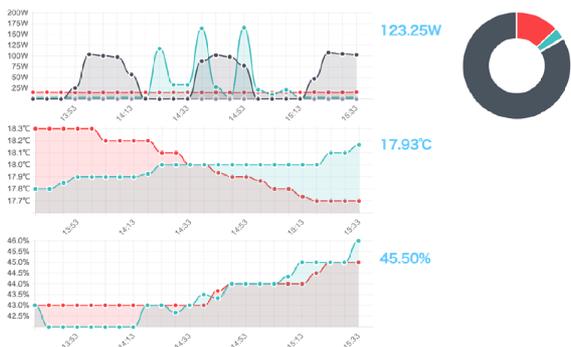


図 4 ひとたびによる温度 (左) と電力量 (右) の可視化

ンは継続的な行動検出により新しい実スケジュールとして反映される。システムはこのサイクルを繰り返すことで生活向上を促す。

3.2 スケジュールの設計

3.2.1 居住者の行動

居住者の行動とは、日常生活で繰り返す食事や労働、余暇 (読書、テレビ鑑賞等) などを表す。提案システムでは時間を単位時間 (タイムスロット) で管理し、各居住者は 1 タイムスロット内で 1 つの行動のみを実施するものとする。居住者の行動は**家庭内行動**と敷地外の**外出行動**に分類し、それらを電力消費を伴うか伴わないでさらに分類する。例えば、掃除や調理などは掃除機や IH キッキングヒーター等の電力消費機器を用いるため、電力消費型の家庭内行動に該当し、睡眠や食事などは電力不用型の家庭内行動に分類される。外出行動は、スマートハウスから外部へ移動し帰宅する一連の行動であり、出社する、買物に出かける、などが該当する。移動手段は EV またはそれ以外 (徒歩など) とする。

3.2.2 スケジュール対象とする家電

本研究では、スマートハウスから制御可能でかつ居住者の明示的な介入なく動作可能な洗濯機、乾燥機、エアコンなどを制御の対象とし、これらをスケジュール可能な家電とみなす。(自走式でない) 掃除機や電子レンジ、オープンのように居住者の行動に紐付いたものは人の家庭内行動として扱い、また冷蔵庫のように常時稼働を前提とした家電は制御対象としない。

3.2.3 供給源の動作

本研究では供給源として家庭用バッテリー、EV、ソーラーシステムを想定する。供給源の動作とは、供給源の電力処理状況 (買電、売電、蓄電、発電) を表す。家庭用バッテリーはタイムスロット毎に、(1) グリッドからの蓄電 (G2B)、(2) ソーラーシステムからの蓄電 (S2B)、(3) 蓄積電力のグリッドへの売電 (B2G)、(4) 蓄積電力のスマートハウスへの供給 (B2H) のいずれかを行うことができる。EV は内蔵蓄電池を動力とし、家庭用バッテリーと

しても機能する。EV は、(1) グリッドからの蓄電 (G2V)、(2) 蓄積電力のグリッドへの売電 (V2G)、(3) 蓄積電力のスマートハウス (または外出行動) への供給 (V2VH) のいずれかを行うことができる。ソーラーシステムは太陽光発電器であり、発電量は時間帯により異なる (本来天候にも依存するが本稿では考慮しない)。ソーラーシステムは、(1) 生成電力のグリッドへの売電 (S2G)、(2) 生成電力の家庭用バッテリーへの供給 (S2B) のいずれかを行うことができる。

3.3 センシングによる行動検出

洗濯機や乾燥機など一般的にコンセントの抜き差しが行われない機器については、接続したタップと機器を対応付け、特定のタップから電力消費が検出されれば当該機器が稼働していると判別できる。掃除機やゲーム機など使用時のタップ位置が不特定な機器については、消費電流の特徴量を学習することで検出が可能である [3]。本研究においては機器の使用と行動の種類は一対一対応させるため (掃除機が稼働した場合は「掃除」行動、IH キッキングヒーターが稼働した場合は「調理」行動など)、電力消費を伴う人の行動ならびに家電の稼働は消費電力情報をベースに検出可能である。

タップからの電力消費を伴わない行動については、位置情報を元に推定を行う。家庭内行動については、敷地内にレーザー測域スキャナを設置し、周囲にレーザーを照射して歩行者の胴体や足までの距離を測定することにより人の存在と移動を検出する。このとき、スキャナを複数台設置し、送信されるデータと設置場所を紐付けることで各居住者の部屋レベルの位置を特定できるだけでなく、測域スキャナはセンチオーダーで距離を計測することができるため、部屋の間取り情報と照らし合わせれば室内における細かい位置情報 (ソファの位置に居る、デスクの前に居るなど) も検出できる [7], [8], [21]。テレビが稼働しておらず、ソファ部分に人が位置しておれば「くつろぎ」行動であるといったように、位置情報を元にルールベースで行動を検出する。

また、居住者が所有するスマートフォンの GPS 情報を用いて、家屋の敷地外に位置している場合に外出行動であると判別する。勤務先や近所のスーパーマーケットなど頻繁に訪れる場所を登録しておけば、場所に紐付く「出勤」「買物」などの行動を特定できる。

3.4 ユーザーインターフェースの実装

提案するシステムのユーザーインターフェースとして、プロトタイプの実装を行った。プロトタイプの様子を図 5 に示す。各種スマートフォンやタブレット上で動作するよう、Javascript を用いて実装しており、推薦されたスケジュールをいつでも確認することができる。



図 5 ユーザーインターフェースのプロトタイプ

4. 生活パターン解析手法

センシングシステムにより得られる居住者、家電、供給源の行動および稼働情報はそれ自身が実スケジュールの集合であるといえるが、提案手法はそれらの実スケジュールの集合から、天候や曜日といった行動を左右する要因（行動決定要因）別に、居住者が最も実施しそうと想定される代表的なスケジュールを導出する。本章ではスケジュールを区分するそれらの要因を列挙するとともに、それに基づき、要因の組み合わせごとに代表的なスケジュールを導出する手法を述べる。

4.1 行動決定要因

居住者の意思決定や家電の稼働頻度や時間帯等に影響を及ぼす行動決定要因として、本研究では例として表 1 に示す項目を考慮するが、手法としてはこれらに限るものではない。なお、今回はスマートホームの機能として「自動車使用」を、空間的要因として「場所」を、時間的要因として「時間」「曜日」「季節」を、そしてコンディションとして「体感」「天気」「花粉飛散量」を考慮している。

表 1 行動要因

要因	概要
行動名	人の行動、家電の稼働の名称（ラベル）
自動車使用	使用、不使用
場所	行動や稼働を実施している部屋または屋外の名称
時間	朝、昼、夕、夜、深夜
曜日	平日、週末
季節	春、夏、秋、冬
体感	寒い、普通、暑い
天気	晴れ、雨
花粉飛散量	少ない、多い

「時間」は 1 日を 5 つの時間帯に分類し、1:00～4:59 を深夜、5:00～9:59 を朝、10:00～16:59 を昼、17:00～20:59 を夕、21:00～0:59 を夜としている。「季節」は 1 年を 3 ヶ月で分類し、3～5 月を春、6～8 月を夏、9～11 月を秋、12～2 月を冬とする。「天気」は降水量の有無で晴れか雨かに分類する。「体感」は居住者の外気温・室温に対する不快度を表しており、温湿度より算出される不快指数 DI を元に

分類する。不快指数は式 (1) で算出される。

$$DI = 0.81Td + 0.01H(0.99Td - 14.3) + 46.3 \quad (1)$$

ここで、 Td は温度、 H は湿度を表す。また、不快指数と体感の関係を表 2 に示す。「花粉飛散量」は一般的な予報において「非常に多い」と判別される飛散量 $50 \text{ 個}/\text{cm}^2$ 以上を多い、未満を少ないとして分類する。

表 2 不快指数と体感の関係

不快指数	不快指数の体感	本研究における体感
～55	寒い	寒い
55～60	肌寒い	
60～65	何も感じない	普通
65～70	快い	
70～75	暑くない	
75～80	やや暑い	暑い
80～85	暑くて汗が出る	
85～	暑くてたまらない	

4.2 行動決定要因組毎の実スケジュール導出

次に、与えられた行動決定要因値とセンシングされた行動の頻度を計測する。まず、(行動名、体感、曜日、季節、天気、花粉飛散量) の組毎に、当該行動の平均実施時間を算出する（例えば、(エアコン、暑い、休日、夏、晴れ、少ない) の組に対する平均稼働時間は 10 時間、など）。次に、(行動名、時間、場所) の組、もしくは(行動名、時間、自動車使用) の組毎に、当該行動が実施されたタイムスロット総数を計測する。その総数が総タイムスロットに占める割合を、その組の行動頻度とする。なお、家庭内行動は、リビングや書斎など実施場所が 1 箇所でないテレビ視聴のような行動と、実施場所が特定 1 箇所である調理などの行動に分類する。前者は、(行動名、時間、場所) の組毎に頻度を算出し、後者は、(行動名、時間) の組毎に頻度を求める。家電の稼働も同様に、エアコンのように複数箇所に設置されているものに分類する。外出行動は、自動車を用いるか用いないかで分類し、(行動名、時間、自動車利用) の組毎に頻度を算出する。

行動頻度算出の例を図 6 に示す。例えばテレビ視聴という行動のタイムスロット数が、図 6 のように観測されたとすると、夜の時間帯に書斎でテレビを見る頻度は、 $12/50$ として得られる。

5. 行動推薦アルゴリズム

本システムでは前章で得られた実スケジュールを大きく逸脱しない範囲で、複数の生活価値基準を改善するような新しいスケジュールを推薦可能な枠組みを提案する。ここではそれらの価値基準として、エネルギー、安心、コミュ

	朝	昼	夕	夜	深夜
リビング		10	17	6	
書斎				12	3
寝室				1	1

総タイムスロット数が50であるので
(テレビ, 夜, 書斎)
の頻度は12/50

図 6 時間、場所と頻度の例

ニケーションの3つを対象とし、エネルギーの代表指標例として電気料金削減度、安心の代表指標例として健康度、コミュニケーションの代表指標例として家族団らん度を用いる。また、実スケジュールになるべく近いことを表すために、生活パターン適合度と呼ばれる指標も定義する。以下ではこれら4つの指標を定義し、それにもとづく改善スケジュールの算出方法を述べる。

5.1 電気料金削減度

一日の生活に要する電気料金を、最大電気料金を0、最小電気料金を1として正規化した値である。ここで、一日中エアコンやテレビをつけっぱなしにするなどして最も電力を浪費するような生活をした場合に支払う金額を最大電気料金とし、エアコン稼働を我慢するなどして節電に徹した生活をした場合の金額を最小電気料金と捉える。例えば、一日に必要な最大電気料金が2000円であり、最小電気料金が1000円であるとすると、導出したスケジュールの電気代が1600円の際の電気代削減度は0.4となる。電気料金の算出は以下に従う。本稿では、東京電力における電力量料金単価 [22] を元に、時間別電力消費量の差を考慮して新たな電力価格を設定した。タイムスロットを $t \in \{0.0, 0.5, 1.0, 1.5, \dots, 23.5\}$ とし、東京電力で現在設定されている電力価格を $r^{midnight}$ (夜間電力価格)、 $r^{morning}$ (朝晩電力価格) および $r^{daytime}$ (昼間電力価格) で、一日の電力消費量の比率として中部電力で算出された指数 [23] を I_t 、指数平均を I_{avg} で表し、以下の時間別電力価格 EP_t [円/kWh] を用いる。

$$EP_t = \begin{cases} r^{midnight} \cdot \frac{I_t}{I_{avg}} & (0 \leq t < 7, 23 \leq t < 24) \\ r^{morning} \cdot \frac{I_t}{I_{avg}} & (7 \leq t < 10, 17 \leq t < 23) \\ r^{daytime} \cdot \frac{I_t}{I_{avg}} & (10 \leq t < 17) \end{cases} \quad (2)$$

電気料金は、グリッドに対する電力売買の際、時間帯によって変動する電力価格と売買する電力量とに応じて発生する金銭的支出であり、買電による支出 $EP_t \cdot e_t^{G2H}$ と売電による収入 $EP_t \cdot e_t^{H2G}$ の差としてモデル化する。これを式 (3) に示す。

$$cost' = \sum_{t=0}^n EP_t \cdot (e_t^{G2H} - e_t^{H2G}) \quad (3)$$

これより、予め求めておいた電気料金の最大値と最小値を用いて、電気代削減度を式 (4) で定義する。

$$cost = \frac{\max(cost') - \min(cost')}{\max(cost') - \min(cost')} \quad (4)$$

5.2 健康度

世帯の居住者全員が一日の生活で消費するカロリー数を、最大消費カロリーを1、最小消費カロリーを0として正規化した値である。例えば、3人家族が全員で消費するカロリーの最大値が7500kcal、最小値が3000kcalであるとき、消費カロリー数6600kcalは健康度0.8に対応する。世帯全員の一日の消費カロリー数の総和は以下で得られる。消費カロリーは運動強度を用いており、安静時における酸素摂取量3.5(mL/kg/分)を1METとし、タイムスロット t における人 p の消費カロリー数を式 (5) で算出する。

$$h_{t,p} = 1.05 \cdot m(\text{METs}) \cdot 0.5(\text{hour}) \cdot W_p(\text{kg}) \quad (5)$$

なお、式中の m は行動ごとに異なり、文献 [24] を参考にしている。 W_p は人 p の体重を表す。これより、世帯全員の消費カロリーは式 (6) で表される。

$$health' = \sum_{t=0}^n \sum_{p \in P} h_{t,p} \quad (6)$$

予め求めておいた式 (6) の最大値と最小値を用いて、健康度は式 (7) で算出される。

$$health = \frac{health' - \min(health')}{\max(health') - \min(health')} \quad (7)$$

5.2.1 団らん度

本稿では、家族全員が同一タイムスロットに同じ場所に居る場合を「団らん」として定義する。これは、団らんとは家族全員もしくは大半が揃うことと、場の共有が優先されていることが団らんであるという認識が定着していることによる [25]。このとき、リビングやダイニングのような特定の部屋に集まることを団らんとみなす家族が多いことから、特定の部屋において団らんに関する値が大きくなるように設定している。また、家族全員が揃うことが重視されていることを考慮し、その場にいる人数が多いほど値が大きくなるよう設定している。

以上より、一日の団らんに関する値は、場所ごとに定められた値 f_r とその場にいる人数ごとに定められた値 f_{num} の積をタイムスロットで総和を取った値として定義する。これを式 (8) に示す。

$$family' = \sum_{t=0}^n \sum_{r \in R} f_r \cdot f_{num} \quad (8)$$

団らん度も同様に、一日の団らんに関する値の最大値と

最小値を基準とし、どれほど団らんを達成しているかの指標として式 (9) で算出する。

$$family = \frac{family' - \min(family')}{\max(family') - \min(family')} \quad (9)$$

団らんに使用される空間はリビングもしくはダイニングがほとんどであること、家屋外における団らん行動として、一家でレジャー施設等への外出も重要であると考えられることから、本稿では、リビング、ダイニング、レジャー施設における団らん度が大きくなるよう設定している。

5.2.2 生活パターン適合度

生活パターン適合度は、あるスケジュールが別のスケジュールにどれだけ合致しているかを表す指標であり、実スケジュールと改善スケジュールの大きな乖離を抑制するために定義する。一日のスケジュールに対し、4章で算出した行動頻度の総和を取り、最大値と最小値を基準とした指数値として算出する。

4章でも述べた通り、人の行動や家電の稼働は、行動頻度の求め方によって3通りに分類できる。場所が変動する行動や稼働は、時間と場所の組ごとに頻度を算出しているため、スケジューリングに際して頻度の和を算出する式は式 (10) のようになる。

$$\begin{aligned} usr_{p,a} &= \sum_{t=0}^n \sum_{r \in R} freq_{t,p,a,r} \cdot x_{t,p,a,r} \\ usr_e &= \sum_{t=0}^n \sum_{r \in R} freq_{t,e,r} \cdot y_{t,e,r} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $x_{t,p,a,r}$ は人 p の行動 a がタイムスロット t に部屋 r で実施される場合に 1 となる 2 値変数である (家電について $y_{t,e,r}$ も同様)。 $freq_{t,p,a,r}$ は人 p の行動 a がタイムスロット t に部屋 r で実施される頻度を表す。特定場所でのみ行われる行動や稼働は、時間ごとに頻度を算出しており、その和は式 (11) で示される。

$$\begin{aligned} usr_{p,a} &= \sum_{t=0}^n freq_{t,p,a} \cdot x_{t,p,a} \\ usr_e &= \sum_{t=0}^n freq_{t,e} \cdot y_{t,e} \end{aligned} \quad (11)$$

外出行動は時間と自動車使用の組ごとに頻度を算出しているため、その和は式 (12) で示される。

$$\begin{aligned} usr_{p,o} &= \sum_{t=0}^n (freq_{t,p,o,U} \cdot w_{t,p,a,U} \\ &\quad + freq_{t,p,o,N} \cdot w_{t,p,o,N}) \end{aligned} \quad (12)$$

$w_{t,p,o,U}$ はタイムスロット t に人 p の外出行動 o で自動車を使用した場合に 1 となる 2 値変数、 $w_{t,p,o,N}$ は自動車を使用しない場合に 1 となる 2 値変数である。式 (10), (11), (12) は、すべての行動と稼働で総和を取る。これを式 (13) に示す。

$$usr' = \sum_{(p,a) \in A} usr_{p,o} + \sum_{e \in E} usr_e \quad (13)$$

式 (13) の最大値と最小値を予め算出しておき、生活パターン適合度を式 (14) で求める。

$$usr = \frac{usr' - \min(usr')}{\max(usr') - \min(usr')} \quad (14)$$

5.3 改善スケジュール導出のための定式化

5.3.1 目的関数

これまでに述べた式 (4), (7), (9), (14) をなるべく大きくすることが理想的なスケジュールであるといえるが、本研究では居住者の従来の生活パターンとの適合度を高く保ちつつ、エネルギー、健康、コミュニケーションの観点から行動推薦を行うことを目的とするため、式 (15) を目的関数と定める。

$$\begin{aligned} maximize : \quad & w_{cost} \cdot cost + w_{health} \cdot health \\ & + w_{family} \cdot family + w_{usr} \cdot usr \end{aligned} \quad (15)$$

なお、 w_{cost} , w_{health} , w_{family} , w_{usr} はそれぞれ電気料金削減度、健康度、団らん度、生活パターン適合度の重みである。

5.3.2 制約式

行動推薦対象日の月日、天気、花粉飛散量、温湿度の予報値あるいは予想値に対し、それに対する各行動の実施平均時間が実スケジュールとして得られるため、それを用いて行動推薦スケジュールを導出する。居住者 p の行動 a の実施平均時間を $T_{p,a}$ として混合整数線形計画問題に与えると、式 (16) で表される制約式に変換される。

$$T_{p,a} - \delta \leq \sum_{t=0}^n x_{t,p,a} \leq T_{p,a} + \delta \quad (16)$$

行動推薦は、実施平均時間 $\pm\delta$ の範囲で行動実施時間を決定するため、実生活パターンにおける行動実施時間と比較し大きな変動がないことが保証される。同様に、エアコンのように稼働時間が一定でない家電 e に対しても、実施平均時間を T_e として混合整数線形計画問題に与えると、式 (17) で表される制約式に変換される。

$$T_e - \delta \leq \sum_{t=0}^n y_{t,e} \leq T_e + \delta \quad (17)$$

なお、洗濯機や乾燥機のように稼働時間が固定であるものについては、稼働するかしないかの 2 通りで表現する。

この他、人の行動や家電の稼働ならびに供給源の動作の定式化や、人の生活として妥当であるための制約式については本稿では割愛する。詳しくは文献 [26] を参照されたい。

6. 性能評価

本システムの評価に際し、今回スケジューリング対象と

した人の行動と家電の稼働の一覧を表3に示す。評価に際しては実世帯における生活行動 [27] を参考に、家族3人(父, 母, 子)の一般的な生活行動パターンを用いて実施平均時間や実施頻度を解析し、それを元に1日のスケジュールリングを行った。学習データとして与えた日の行動要因について表4に示す。

表3 人の行動, 家電の稼働一覧

種別	一覧
人の行動	睡眠, 食事, 入浴, 調理, 身支度, 家事, 掃除, テレビ, 仕事, 勉強, 読書, くつろぎ, PC, ゲーム, 室内運動, 出勤, 学校, 買物, レジャー 外出運動 (ジョギング, ジム通い, 外で遊ぶ)
家電の稼働	洗濯機, 乾燥機, 炊飯器, 空気清浄機, 加湿器, エアコン

表4 学習データの行動要因

年月日	季節	曜日	天気	体感	花粉飛散量
2014/3/19	春	平日	晴れ	寒い	多い
2014/3/26	春	平日	雨	寒い	少ない
2014/3/16	春	休日	晴れ	寒い	多い
2014/3/30	春	休日	雨	寒い	少ない
2013/7/10	夏	平日	晴れ	暑い	少ない
2013/7/3	夏	平日	雨	普通	少ない
2013/7/7	夏	休日	晴れ	暑い	少ない
2013/8/24	夏	休日	雨	暑い	少ない
2013/10/1	秋	平日	晴れ	普通	少ない
2013/10/15	秋	平日	雨	普通	少ない
2013/10/14	秋	休日	晴れ	普通	少ない
2013/10/20	秋	休日	雨	普通	少ない
2014/1/24	冬	平日	晴れ	寒い	少ない
2013/12/18	冬	平日	雨	寒い	少ない
2013/12/14	冬	休日	晴れ	寒い	少ない
2014/2/8	冬	休日	雨	寒い	少ない

6.1 シナリオに基づく生活改善

表4に示したスケジュールを学習後、これ以外の日の行動要因を与えてスケジュールリングを行った。

(2014/1/30, 冬, 平日, 雨, 寒い, 少ない) という要因の組では、電気料金削減度が0.86, 健康度が0.72, 困らん度0.86, そして生活パターン適合度が0.91と高い基準を満たすスケジュールを導出できることを確認した。スケジュール内容の変化を見ると、困らんの観点から、別の部屋でテレビ視聴していた夫婦に対してリビングでテレビ視聴するようにレコメンドされるなど、19:30~22:59の時間帯は家族全員がリビングに集まるように変更された。また、リビングに集まってテレビを見ることは、テレビの稼働台数を抑えるため、電気代削減にも繋がる。この他にも、洗濯機の稼働を8:00から5:30, 掃除を9:00から6:30に早め、電気料金のより安い時間にシフトするなどして電気代の削減

を図っている。健康の観点からも、運動行為がスケジュールに組み込まれ、消費カロリー数はそれぞれ父, 母, 子の順に271.97kcal, 372.75kcal, 350.96kcal ずつ増えている。このときのスケジュールの変化について図7に一例を示す。

元のスケジュール

時間	お父さん		お母さん		子ども		家電			
	行動	場所	行動	場所	行動	場所	家電①	家電②	エアコン	
16:00	00分~出勤	勤務先	くつろぎ	リビング	くつろぎ	リビング	-	-	リビング	出勤
16:00	30分~出勤	勤務先	くつろぎ	リビング	くつろぎ	リビング	-	-	リビング	出勤
17:00	00分~出勤	勤務先	家事	他の部屋	ゲーム	リビング	-	-	リビング	出勤
17:00	30分~出勤	勤務先	家事	他の部屋	ゲーム	リビング	-	-	リビング	出勤
18:00	00分~出勤	勤務先	調理	キッチン	ゲーム	リビング	-	-	リビング	出勤
18:00	30分~出勤	勤務先	調理	キッチン	ゲーム	リビング	-	-	リビング	出勤
19:00	00分~出勤	勤務先	食事	ダイニング	食事	ダイニング	-	-	リビング	出勤
19:00	30分~出勤	勤務先	食事	ダイニング	食事	ダイニング	-	-	リビング	出勤
20:00	00分~食事	ダイニング	家事	リビング	TV視聴	他の部屋	-	-	リビング	-
20:00	30分~食事	ダイニング	家事	リビング	TV視聴	他の部屋	-	-	リビング	-
21:00	00分~くつろぎ	リビング	入浴	他の部屋	くつろぎ	リビング	-	-	リビング	-
21:00	30分~入浴	他の部屋	くつろぎ	リビング	睡眠	寝室	-	-	リビング/寝室	-
22:00	00分~TV視聴	書斎	TV視聴	リビング	睡眠	寝室	-	-	リビング/寝室/書斎	-
22:00	30分~TV視聴	書斎	TV視聴	リビング	睡眠	寝室	-	-	リビング/寝室/書斎	-
23:00	00分~仕事	書斎	睡眠	寝室	睡眠	寝室	-	-	寝室/書斎	-
23:00	30分~仕事	書斎	睡眠	寝室	睡眠	寝室	-	-	寝室/書斎	-

推薦スケジュール

時間	お父さん		お母さん		子ども		家電			
	行動	場所	行動	場所	行動	場所	家電①	家電②	エアコン	
16:00	00分~出勤	勤務先	くつろぎ	リビング	外出運動	出先	-	-	リビング	出勤
16:00	30分~出勤	勤務先	買物	出先	勉強	子供部屋	-	-	リビング	出勤
17:00	00分~出勤	勤務先	入浴	他の部屋	入浴	他の部屋	-	-	リビング	出勤
17:00	30分~出勤	勤務先	調理	キッチン	室内運動	リビング	-	-	リビング	出勤
18:00	00分~食事	ダイニング	調理	キッチン	読書	リビング	-	-	リビング	出勤
18:00	30分~食事	ダイニング	食事	ダイニング	食事	ダイニング	-	-	リビング	-
19:00	00分~食事	ダイニング	食事	ダイニング	食事	ダイニング	-	-	リビング	-
19:00	30分~くつろぎ	リビング	家事	リビング	ゲーム	リビング	-	-	リビング	-
20:00	00分~ゲーム	リビング	家事	リビング	ゲーム	リビング	-	-	炊飯器 空気清浄機	リビング
20:00	30分~ゲーム	リビング	家事	リビング	ゲーム	リビング	-	-	空気清浄機	リビング
21:00	00分~仕事	リビング	読書	リビング	くつろぎ	リビング	-	-	リビング/書斎	-
21:00	30分~室内運動	リビング	読書	リビング	遊び	リビング	-	-	リビング/書斎	-
22:00	00分~TV視聴	リビング	TV視聴	リビング	くつろぎ	リビング	-	-	リビング/書斎	-
22:00	30分~室内運動	リビング	TV視聴	リビング	TV視聴	リビング	-	-	リビング/書斎	-
23:00	00分~入浴	他の部屋	睡眠	寝室	睡眠	寝室	-	-	リビング/寝室/書斎	-
23:00	30分~睡眠	寝室	睡眠	寝室	睡眠	寝室	-	-	リビング/寝室/書斎	-

図7 スケジュール変化の一例

(2013/7/13, 夏, 休日, 晴れ, 暑い, 少ない) という要因の組では、一家全員が12:00~15:59にレジャー施設に出かけており、元の11:00~15:29から時間をずらすことで最も電気料金の高い15時台に家庭内のエアコン稼働を避けるように変更された。また、元々は実施されていなかった外出運動も家族全員1時間ずつ組み込まれるように変化している。休日においても18:00~18:59の間に一家全員で食事を取り、19:00~22:59の間を全員リビングで過ごすなど、困らんの時間を確保できていることが分かる。

これ以外にも、晴れの日には乾燥機を使用しないが雨の日には稼働させる、花粉の多い日には空気清浄機を長時間稼働させるといった傾向を把握し、推薦スケジュールに反映させている。ただし、雨の日や花粉の多い日に外出しないという傾向に関しては、健康度の観点から外出運動の時間を確保するように推薦されている。

6.2 センシングデータ欠損時の導出スケジュール

本システムではセンシングデータを元に人の行動や家電の稼働を検出し、実施頻度や平均実施時間を学習する。しかしながら、家事(洗濯物の取り込みなど)や食事といった検出そのものが難しい行動や、外出先が分からない行動など、一般にセンシングだけではすべての行動を検出できない。また、本研究では行動を実施した人が特定可能であると想定したシステムを提案したが、実際には実施された行動を検出できても、それを行った人が誰であるかまで検

よる安心安全な生活管理の実現を考えている。また、行動検出機構を実装し、実際にセンシングによって得られた実生活行動に対してスケジューリングを行う実証実験も検討している。

謝辞

本研究は文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業「次世代 IT 基盤構築のための研究開発-「社会システム・サービスの最適化のための IT 統合システムの構築」(2012 年度～2016 年度)の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 環境省: HEMS 利用の価値向上のための調査事業検討会資料. http://www.env.go.jp/earth/house/conf_hems.html.
- [2] シャープ: COCOROBO. <http://www.sharp.co.jp/cocorobo/>.
- [3] 伊藤雅仁, 大亦寿之, 井上智史, 重野寛, 岡田謙一, 松下温: 消費電力波形の特徴を利用した家電機器検出手法と制御システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 44, pp. 95-105 (2003).
- [4] Chen, C., Cook, D. J. and Crandall, A. S.: The user side of sustainability: Modeling behavior and energy usage in the home, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 9, pp. 161-175 (2013).
- [5] 村尾和哉, 藤堂智史, 寺田努, 矢野愛, 松倉隆一, 塚本昌彦: 住宅内に設置した人感センサを用いた住人の移動推定手法, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2011 論文集, Vol. 2011, pp. 315-322 (2011).
- [6] ST マイクロエレクトロニクス: Mother, Motion Cookies. <https://www.sen.se/>.
- [7] 山口弘純, 廣森聡仁, 樋口雄大, 内山彰, 梅津高朗, 東野輝夫, 孫為華, 下條真司, 山口容平, 下田吉之: 共有空間の「ひと」「くうき」「きもち」を一体化する「ひとなび」のコンセプトとビッグデータ蓄積に向けた実証実験, 電子情報通信学会 信学技報, Vol. 113, pp. 13-18 (2013).
- [8] Hiromori, A., Kanaya, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Performance Evaluation of Mobility-Based Energy-Saving to Control Air-conditioning and Lighting Equipments, *Proceedings of the 2nd IFIP Conference on Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT2012)*, pp. 1-6 (2012).
- [9] Mohsenian-Rad, A.-H., Vincent W. S. Wong, S. M., Jatskevich, J., Schober, R. and Leon-Garcia, A.: Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, pp. 320-331 (2010).
- [10] Sou, K. C., Weimer, J., Sandberg, H. and Johansson, K. H.: Scheduling Smart Home Appliances Using Mixed Integer Linear Programming, *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC)*, pp. 5144-5149 (2011).
- [11] 安本慶一, 小倉和也, 山本眞也, 伊藤実: 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, 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会報告, Vol. 2011, No. 9, pp. 1-8 (2011).
- [12] 今津眞也, 水本旭洋, 孫為華, 柴田直樹, 安本慶一, 伊藤実: ユーザのアクティビティと体重変化履歴に基づいた継続性の高い健康支援手法の提案, 情報処理学会研究報告 ユビキタスコンピューティングシステム研究会, Vol. 2011, pp. 1-8 (2011).
- [13] van Kasteren, T., Noulas, A., Englebienne, G. and Kröse, B.: Accurate activity recognition in a home setting, *Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing*, pp. 1-9 (2008).
- [14] 大内一成, 土井美和子: 携帯電話搭載センサによるリアルタイム生活行動認識システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 53, pp. 1675-1686 (2012).
- [15] Kim, E., Helal, S. and Cook, D.: Human Activity Recognition and Pattern Discovery, *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 9, pp. 48-53 (2010).
- [16] Pedrasa, M. A. A., Spooner, T. D. and MacGill, I. F.: Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, pp. 134-143 (2010).
- [17] Roldan-Blay, C., Escrivá-Escrivá, G., Alvarez-Bel, C., Roldan-Porta, C. and Rodriguez-Garcia, J.: Upgrade of an artificial neural network prediction method for electrical consumption forecasting using an hourly temperature curve model, *Energy and Buildings*, Vol. 60, pp. 38-46 (2013).
- [18] Fogg, B.: A Behavior Model for Persuasive Design, *Proceedings of the 4th International Conference on Persuasive Technology*, pp. 40:1-40:7 (2009).
- [19] エコネットコンソーシアム: Echonet. <http://www.echonet.gr.jp/>.
- [20] Enegate: スマートエコワット. <https://www.enegate.co.jp/smarteco.portal/>.
- [21] 田中真英, Yoonseok PYO, 辻徳生, 長谷川勉, 諸岡健一, 倉爪亮: レーザレンジファインダを用いた床上センシングによる室内生活行動の計測, 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 592-595 (2012).
- [22] 東京電力: 電化上手 (季節別時間帯別電灯). <http://www.tepco.co.jp/e-rates/individual/menu/home/home01-j.html>.
- [23] 中部電力: 電力需給 最大電力の推移. http://www.chuden.co.jp/corporate/publicity/datalist/juyo/dat_maximum/index.html.
- [24] 田畑泉, 田中茂穂, 引原有輝: 改訂版 身体活動のメッツ (METs) 表 (2012). <http://www0.nih.go.jp/eiken/programs/2011mets.pdf>.
- [25] 正岡さち, 飯塚智子: 世代間コミュニケーションとしての家族の団らんに関する研究, 島根大学教育学部紀要. 教育科学・人文・社会科学・自然科学, pp. 47-53 (2009).
- [26] 中村笙子, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫, 山口容平, 下田吉之: スマートホームにおける電力コストと生活満足度を考慮した行動スケジューリング手法の提案, 情報処理学会. モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告, Vol. 2013-MBL-65, No. 7, pp. 1-8 (2013).
- [27] 山口容平, 佐藤大樹, 田中マルコス, 下田吉之: 家庭における世帯構成員生活時間行動モデルの開発, エネルギー・資源学会. エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (2012-1), CD-ROM, pp. 361-364 (2012).