

大衆の生活ノウハウの定量化とモデル化による スマートライフ支援システム

中村 笙子¹ 志垣 沙衣子¹ 廣森 聡仁¹ 山口 弘純^{1,a)} 東野 輝夫¹

受付日 2014年11月20日, 採録日 2015年5月9日

概要: 本論文では, スマートホームにおいて居住者の生活の“質”を向上させるための行動改善をアドバイスするシステムを提案する. 提案手法では, スマートホームの居住者とその活動, ならびに家電や家庭用バッテリー, 電気自動車などの稼働状況を表すモデルを導入し, そのモデルを用いて生活改善指標を定量化する. 加えて居住者の行動認識情報を利用し, 行動改善アドバイスを生成する. また, クラウドソーシングを活用し, 1,000人を対象としたアンケート調査を通じて不特定多数の人々から得た“生活を充実させるための知恵やノウハウ”を抽出し, それに基づく生活改善指標と改善方策を設計することで, より現実的な指標や改善アドバイスになるような工夫をしている. 34人の被験者に対し, 実際の家族構成情報と生活内容を用いて行動改善アドバイスを生成し, 各被験者から5段階で主観評価を得たところ, 73.53%の被験者がアドバイスに満足した. 加えて, 実在する一般家庭に電力計センサを設置して1カ月以上家電の電力量と使用パターンを計測し, そこから得た推定行動に対するアドバイス生成実験も行っている.

キーワード: 行動改善アドバイス, 生活改善指標, 生活行動モデリング

Smart Life Support System Based on Modeling and Quantification of Common Know-How on Daily Life

SHOKO NAKAMURA¹ SAEKO SHIGAKI¹ AKIHITO HIROMORI¹ HIROZUMI YAMAGUCHI^{1,a)}
TERUO HIGASHINO¹

Received: November 20, 2014, Accepted: May 9, 2015

Abstract: In this paper, we propose a recommendation system that supports to make human life better. Our system recommends to change time or content of activity in non-intrusive way so that they can satisfy smart life metrics which represent residents' energy cost, calories, air comfort and quality of time. We formulate a model where we describe residents' activities and operations of appliances as tuples, and define a variety of recommendations over the model. These metrics are based a large-scaled questionnaire survey. For evaluation, we have implemented two experiments. The one is based on a subjective test, and three fourths of subjects accepted our recommendations. Another is to apply our system to a single family by installing sensors in their real house. We also have our system tested in real situation.

Keywords: smart life advice, smart life criteria, daily activity modeling

1. はじめに

センシングやネットワークの技術を家庭内に導入することで, 人々がより賢く, 快適に暮らすことができるスマー

トホームが普及しつつある. 特に, 省エネルギーについては喫緊の課題であるため, スマートホームの中核的な機能である HEMS (Home Energy Management System) によるスマートグリッドと連動したデマンドレスポンスなど, 様々な取り組みがなされている [1].

一方で, 人が一生の半分もの時間を住居で過ごすことを考慮すると, 豊かで充実した生活を送るためには, 省エネ

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

a) h-yamagu@ist.osaka-u.ac.jp

ルギーだけでなく、肥満防止や家族のコミュニケーションなど、家庭における生活を改善する生活支援においても IT 技術の活用が期待され、スマートホームは HEMS と生活支援の両方の機能を提供することが求められる [2].

近年、ユビキタス・コンピューティングの技術を利用して快適性や健康といった生活の質を向上させることを目指した取り組みが増えてきている。生活改善を IT 技術により行うためには、改善の程度を定量化した上で、人の家庭内行動や家電の動作などを形式的にモデル化する必要がある。また、行動推薦を行う場合には、対象者の現在の生活パターンを基本とし、なるべく自然で受け入れやすい行動改善を提供することが好ましい。こういった改善指標の定量化やモデル化、ならびに居住者の生活行動に沿った行動改善推薦をシステムとして扱う取り組みはほとんどなされていない。

本論文では、スマートホーム居住者の生活全体の“質”を向上させるための行動改善アドバイスをするシステム SLSA (Smart Life Support Adviser) を提案する。提案手法ではまず、スマートホームの居住者とその活動、ならびに家電や家庭用バッテリー、電気自動車などの稼働状況を表すモデルを定義する。次にこのモデルを用いて、エネルギーコストや快適度、健康度や時間の質といった生活改善指標の定量化と、居住者の負担にならずに行動内容を変更できるような改善ルールを定式化を行う。その際、我々はクラウドソーシングを活用し、1,000 人を対象とする大規模なアンケート調査を通じて不特定多数の人々から得た、生活を充実させるための知恵やノウハウを抽出し、それに基づく生活改善の指標とルールを設計することで、より現実的な指標や改善アドバイスになるような工夫をしている。

自動生成したアドバイスが受け入れられるかどうかを確認するために、34 人の被験者の行動内容を元に行動改善アドバイスを導出し、各被験者から 5 段階で主観評価を得たところ、73.53% の被験者が SLSA の推薦するアドバイスに満足したことを確認した。加えて、実際に一般家庭にセンサを設置し、そこから得られた電力データを元に、行動推定とアドバイスの導出を行う実証実験を行い、不完全な行動認識情報からでも行動改善アドバイスを導出できることを確認した。これらの実験を通じて、提案手法により生活改善システムの実現可能性を示している。

2. 関連研究

従来よりスマートな生活環境の実現を目指す研究が行われてきており [2], [3], [4], [5], たとえば、家庭内の機器の自動制御や居住者の行動認識、コンテキストウェアな家庭用サービスやアンビエント・インテリジェンスに関する研究もなされている [6], [7], [8], [9].

スマートホームはスマートグリッドと連動することで、ピークシフトやデマンドレスポンスを実現するこ

とができ、より柔軟で動的なエネルギー供給が可能となる [10], [11], [12]. スマートグリッドネットワークの分野では電力価格の決定手法や送電方法などの問題に対して、様々な手法が提案されている。たとえば、文献 [13] はゲーム理論に基づき時間ごとの電力使用量を決定し、文献 [14] では、異なる 2 つのデマンドレスポンス方針に基づき、電力網の信頼性を保ちつつ、消費電力に対する金銭的なコストを削減するスケジュールを導出する手法を提案している。一方で、各家庭におけるエネルギー消費量の削減が強く訴えられていることや、一般世帯への HEMS 導入が進みつつあることから、スマートホームにおける居住者の行動と家電の稼働に関する情報提供や制御方法についても注目されている。SmartCap [15] は、スマートホームにおいてデマンドレスポンスと連動した家電制御を目的としており、冷蔵庫のような家電の電力消費量を時間に依存せずに一定にするための手法を提案している。文献 [16] は家電による消費電力量をモニタリングすることで、個々の居住者ごとの消費電力量を推定する新たな手法を提案している。このシステムは複数人が居住するような住居において、個人の行動とエネルギー消費量を紐付け、居住者が自身のエネルギー消費に対し自覚を持ってもらうことを目的としている。

日本国内においても HEMS の実証実験や商用化が進んでいる。文献 [17] では、電気自動車と連動した HEMS システムを構築し、災害時における停電を想定した電力供給と家電制御実験を行っている。文献 [18] では、電力使用量を可視化することでユーザの省エネ意識を高めることや、タイマー機能により、電力価格の安い深夜に電気自動車を充電することが可能なシステムが開発されている。また、電力消費の集中する時間帯においては、あらかじめユーザが設定した優先順位どおりに家電稼働や電気自動車充電を取りやめ、ブレーカー遮断を防ぐ機能も有している。文献 [19], [20] では、充電した夜間電力を昼間に使用することで買電を抑える経済優先、太陽光発電で生成した電力を蓄電池に蓄え、夜間に利用する環境優先、停電や災害に備えて蓄電池をつねに満充電にする蓄電優先という 3 つのモードを搭載し、ユーザの好みに合わせた電力消費スタイルを適用することが可能である。ただし、これらの研究の主目的は電力最適化であり、居住者の生活に合わせてシステムの制御方法を変更している。そのため、計測電力量に基づく具体的な改善案を提示するなどして居住者の行動内容そのものの改善を目指す本研究とは目的やアプローチが異なる。

スマートホームにおけるサービス高度化に不可欠な居住者の行動認識についても、居住者の行動と位置情報を推定するようなプロトタイプシステムが多く提案されている [21], [22]. たとえば、MIT メディアラボが提案する BoxLab [22] は一般の家屋にも適用できるプラットフォーム

ムである。また、文献 [23] は、6 世帯で 10 週間データを収集し、実際の家電稼働と消費電力量を紐付ける手法を取り扱っており、JMeasure [24] と呼ばれる指標に基づき、家電の使用頻度を算出し、消費電力から使用者の行動を推定するアルゴリズムを提案している。文献 [8] ではマルコフモデルに基づく行動認識手法として、一般的な確率モデルだけでなく、センシングデータの空間から単一の共通特徴量空間への写像も定義しており、センサ配置やネットワークの状況が異なる状況においても利用できる技術として非常に有用である。

一方、ユーザインタフェースを改善することにより、人々の気づきや行動の変化を促すアンビエント・インテリジェンスでもスマートホームを対象とした研究が行われている [9]。たとえば、文献 [25] では、冷蔵庫など人々がふだん触れるような家電に取り付けるインタフェースを提案し、家電の制御や家族間での情報の交換を簡単に行える提案が示されている。また、文献 [26] では、居住者の行動とその行動に要した消費電力量をカレンダーシステム上に表示し、家族の省エネ行動を促す取り組みを実施している。これらのシステムでは、生活改善のための行動を促す点で提案手法と共通するものの、改善による効果の定量化や、居住者の現状の生活に基づく推薦は困難である。

本論文では個人の生活状況に基づき、生活改善アドバイスを自動で導出するための方法論を提案している。方法論の設計にあたっては、クラウドソーシングを通じて 1,000 人を対象とした大規模なアンケート調査の結果を元に、人々が改善を望む指標を明確化し、それを定量化するとともに、行動改善策のアイデアもアンケートから得ることで、なるべく多くの人々に支持される自然な生活支援を実現する。提案手法によるアドバイスの有用性を主張するため、34 人の被験者からアドバイスに対する主観評価を得ただけでなく、3 人家族の住居にセンサを設置し、実際にシステムを導入し、当該家族からの評価も得ている。本研究は、クラウドソーシングにより、大衆の好みをとらえて指標や改善策を定式化し、個人の行動センシング情報に基づく自然な改善案を提案するこれまでにない方法論といえる。

3. システム概要

本論文で提案する SLISA (Smart Life Support Adviser) のシステムアーキテクチャを図 1 に示す。SLISA は、(i) SLISA カーネルコンポーネント、(ii) 居住者、(iii) スマート家電 (もしくは従来の家電)、(iv) エネルギー供給源、そして (v) 行動検出ならびにエネルギー管理のためのセンサから構成される。

SLISA カーネルコンポーネントはシステムの中核であり、センサデータを利用して居住者の行動検出や家電の制御を行う。この SLISA カーネルコンポーネントは、エネ

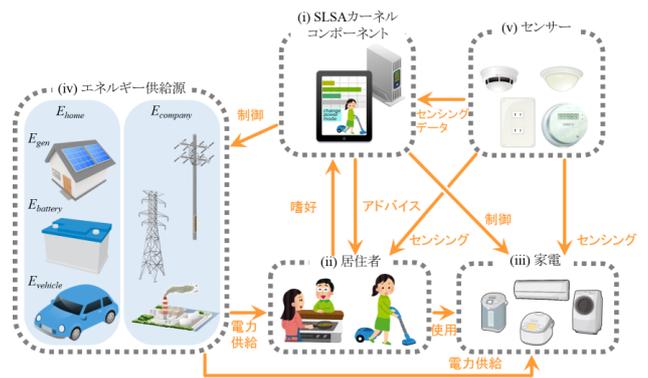


図 1 SLISA アーキテクチャ
Fig. 1 SLISA architecture.

ギーモニタリングや行動検出など従来のスマートホームでも想定される一般的な機能のみを有するものとするため、既存のシステムに対しても容易に導入することが可能である。また、我々はシステムのプロトタイプを実装し、家庭に設置する実験も行っている (詳細は 5.3 節を参照されたい)。加えて、SLISA は UI を通じて、検出した行動と合わせて居住者に行動改善アドバイスを提示する。行動改善アドバイスの例として以下があげられる。

- 「ここ最近はずっと家にいますね。エアコンを付けた家にこもらず、今日は図書館で涼んでみるのはどうでしょう。歩いて行けばいい運動になりますし、エアコンを消すことで電気料金も削減できますよ。」
- 「今日の電力市場の予報によると、お昼ごろの電力価格が高騰するようです。いつも洗濯機を朝のうちに稼働させていますが、今日はそれに加えて朝のうちに掃除も終わらせてしまいませんか。」

本研究では、居住者の好みやライフスタイルに合わせ、ヘルスケアから省エネまで多様なアドバイスを取り扱う。その上で、アドバイスを居住者に提示することで、より良い生活のために改善すべき事項を気づかせることを目的とする。また、改善にむけて居住者が取る行動をセンサを用いて検出し、それを基に再度行動改善アドバイスを導出、提示するというサイクルにより、居住者の日々の生活改善のサポートを図る。

居住者は日々の生活において家電を使用し、UI を通じて SLISA から提示された行動改善アドバイスや家庭内の状態 (消費電力量や実施した行動内容など) を確認する。検出される行動内容は“食事”や“調理”、“掃除”などの家庭内で行うものと、“仕事”や“外出”のように家の外部で行うものがある。家電は居住者が操作して利用する従来の家電と、SLISA が自動で制御するスマート家電の両方を含む。スマート家電は ZigBee SEP2.0 [27], KNX [28], ECHONET Lite [29] のようなホームネットワークを通じて HEMS から制御されることを想定する。家電の稼働時状況や消費電力量は SLISA によってモニタリングされ、UI を通じて居

住者に提示される。また、本研究では、家電の稼働状況はオン/オフの情報と、設定情報 (e.g. エアコンにおける設定温度 28°C) で表現するものとする。

エネルギー供給源は家庭内における電力供給装置や電力会社を指す。家庭内におけるエネルギー供給源は、家庭用バッテリー、太陽光発電機やガス発電機、電気自動車などである。供給源に関して考慮すべきは、電力市場の状況によって電気料金の単価が変動することである。たとえば、東京電力が提供する“ピークシフトプラン”では、7:00~13:00 は 28.99 円/kWh, 13:00~16:00 は 54.68 円/kWh, 16:00~23:00 は 28.99 円/kWh, そして 23:00~翌 7:00 は 12.16 円/kWh として単価が定められている [30]。今後デマンドレスポンスが導入されれば、15 分や 30 分単位でその時間帯の電力需要量に応じた単価設定がなされるが、我々はそのようなより動的な単価変動を想定し、生活行動のモデリングとアドバイスの改善内容を定めている。

センサは居住者の位置や行動内容、家電の稼働状況を認識するために用いられる。スマートフォンを含め、センサを用いた居住者の状況認識手法やそのプロトタイプを実装した研究は数多く見られるが、これらはおおそ (i) 居住者の位置推定, (ii) 居住者の行動検出, (iii) 居住者の個人特定という 3 つに分類される。本研究ではこれら 3 つを任意に組合せて居住者の状況を把握する。

なお、これらの手法の検出精度は、センサの設置密度やセンサそのものの能力によって左右される。玄関付近に数個の赤外線センサを設置しただけの状況であれば“自宅に居る”程度しか検出できないが、各部屋のドア付近と家具で間仕切られた空間ごとに赤外線センサを設置するだけでなく、レーザーレンジスキャナ [31], [32] のような長距離センサを併用する状況であれば、“リビングのソファ部分に居る”などのように高精度に居住者の位置を推定できると考えられる。また、コンセントにスマートタップ [33] を取り付けることで、各部屋で行われている行動を推定することが可能である。たとえば、居住者がリビングのソファに座っていると推定され、かつテレビがオフになっていると分かれば、その人はくつろいでいるか余暇時間を過ごしていると推定できる。しかし、プライバシーの観点から、居住者が自分の位置や行動をすべて知られることに抵抗がある場合も多いため、SLSA は不完全な位置情報や行動内容からでもアドバイスを生成できるように設計しており、詳細な行動情報が得られるほど、より正確なアドバイスが生成可能である。

4. システム設計とアルゴリズム

提案システムが導出する行動改善アドバイスは、“掃除の時間を 10:00 から 8:00 に変更する”といった居住者の行動あるいは家電稼働の変更内容と、“電気料金が 50 円削減できる”といった改善効果の 2 つで構成される。このアド

バイスを自動で導出するにあたり、本章ではまず、行動と稼働において変更可能な要素を定めたモデルについて説明する (4.1 節)。次に、多くの人々が望む生活改善項目を調査し、それに基づき改善指標を定量的に定義する (4.2 節)。さらに、変更内容と改善効果を結び付けるためのアルゴリズム (改善ルール) を定義し (4.3 節)、この改善ルールを用いてアドバイスを導出する過程について述べる (4.4 節)。

4.1 行動、稼働とタイムテーブルの定義

本節ではある期間における居住者の行動と家電の稼働を表現するモデルを提案する。このモデルはいくつかの行動あるいは稼働の単位 (これを以下 **AOU: Activity and Operation Unit** と呼ぶ) からなる **SLSA** タイムテーブルという形で定義される。AOU は単位時間あたりの居住者の行動や家電の稼働を表すものであり、次の 4 項組で表現する。

$$(Name, Time, Location, Activity(params)) \quad (1)$$

本研究では、居住者の行動や家電の稼働の変更を、これら 4 項目の値の変更として取り扱う。ここで、*Name* は居住者や家電の名称を表し、 $Time \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ はタイムスロット番号を表す。タイムスロットは深夜を 0 とする整数で管理し、30 分を単位時間とする場合は $n = 47$ 、1 時間を単位時間とする場合は $n = 23$ など、居住者の好みによってスロット総数を指定する。加えて、たとえば土曜日の 7:00 を“(Sat, 07)”と表すなど、1 週間や 1 カ月間を対象期間として、その間のある特定の時間帯を指すようにもできるが、本論文では説明の簡単のため 1 日を対象とした番号表現を利用する。*Location* はスマートホーム内の部屋や屋外の場所の名称を表すもので、 $Location \in \{\text{living_room, dining_room, bedroom, office, school, store}\}$ のように定義される。*Activity(params)* は行動内容や稼働状態を表し、それぞれに固有のパラメータ *params* と組にして取り扱う。たとえば、(Mom, *, store, shopping(Trans=Car)) という AOU は、母親が店まで自家用車で買物に行くことを意味する。アスタリスク表記は当該項目を特に指定しないことを表しており、上記の例であれば買物に行く時間帯はこの AOU では表されないことを意味する。同様に、(A/C, 20, *, ON(Temp=28°C)) という AOU は、タイムスロット 20 (午後 8 時から午後 9 時の間) にエアコンが設定温度 28°C でどこかの場所で稼働している状況を表している。

SLSA タイムテーブルは複数の AOU からなり、複数タイムスロットにまたがる居住者の行動や家電稼働あるいは複数の居住者の行動が表現される。たとえば、{(Dad, 20, living_room, *), (Mom, 20, living_room, *)} は、午後 8 時から午後 9 時の間に父親と母親が揃ってリビングにいるという状況を表す。我々はこの SLSA タイムテーブルを用いて行動改善アドバイスを生成するためのアルゴリズムを

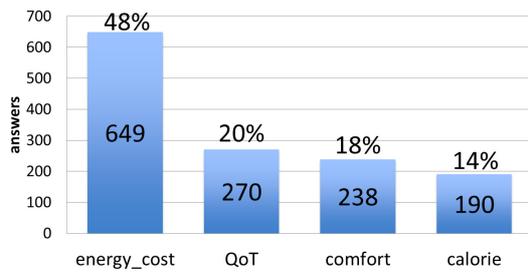


図 2 生活改善指標に対するアンケート調査結果 (クラウドソーシングによる 1,000 人が対象)

Fig. 2 Smart life criteria questionnaire (1,000 people have answered via crowdsourcing system).

提案する.

4.2 スマートライフのための改善指標

前述のとおり, 行動改善アドバイスの導出は生活改善効果を表現する指標を定める必要がある. 一般に, 人々が望む生活改善の内容は, 状況, 環境, 仕事や家族, 収入など様々な要因に依存すると考えられるが, 異なる状況や環境においてもできるだけ多くの人に適用可能であるような指標であることが望ましい.

そこで, 本研究ではクラウドソーシングシステム [34] を利用して不特定の 1,000 人に対してアンケート調査を行い, より良い生活のために改善すべき事柄について自由記述形式で回答を得た. 政治に関する意見から家族関係に関する意見まで, 回答の内容は多岐にわたっていたため, 我々はすべての回答を 1 つ 1 つ確認した上で, 居住者の日常的な行動を対象としていること, 行動検出に高度な技術やシステムを要しないこと, および機械的に評価値を算出できること, といった 3 つの条件を満たす回答のみを対象とした. それらを以下の 4 つのカテゴリに分類した.

- (1) 金銭: エネルギーコスト (*energy_cost*)
- (2) 快適: 活動と空気環境による快適性 (*comfort*)
- (3) 健康: 日常生活で消費するカロリー (*calorie*)
- (4) 生活満足: 時間の質 (*QoT: Quality of Time*)

各カテゴリの回答件数を図 2 に示す. 今回のアンケートにおける有効回答数は 2,647 件であった (複数回答を可としたため) が, このうち, 上記の条件に合致する意見は約半数の 1,347 件であり, 図中ではこれらが上記の 4 つのカテゴリに分類されている.

次に, これら 4 つのカテゴリを AOU を用いて指標として定義する. *energy_cost* は, 各 AOU のエネルギー消費に対して支払われる金銭的成本を表しており, 電気料金の支払額として定義する. $aou = (*, t, *, a)$ に対し, *energy_cost* は式 (2) で与える.

$$energy_cost(aou) = EP_t \cdot EC_a \quad (2)$$

ここで, EP_t はタイムスロット t における電気料金の単価 (円/kWh) を表し, EC_a は行動または稼働 a を 1 タイ

ムスロット分実施した場合に消費する電力量を表す. 例として, $aou = (*, 10, *, Cleaning(Power = Strong))$ に対する *energy_cost* 算出を考える. 電気料金単価は居住する地域によっても異なるが, 東京電力が提供するピークシフトプランならば $EP_{10} = 28.99$ (円/kWh) である. また, 実存の掃除機 (SANYO の SC-XW33J, 2008 年モデル) の消費電力量を 3 つのモード (強, 中, 弱) で 5 分ずつ計測したところ, それぞれ 898 Wh, 643 Wh, 213 Wh であることが分かった. これより, 1 タイムスロットあたりの掃除行動でおよそ 30 分掃除機を稼働させると仮定すると $EC_{Cleaning(Power=Strong)} = 449$ Wh であり, $energy_cost(aou) = 13.02$ (円) となる.

comfort は, 温度と湿度を主とした空気環境と居住者の活動レベルから算出される快適性を表す. 本論文では, ISO 規格である *Predicted Mean Vote (PMV)* [35] の値を *comfort* の評価値として使用する. PMV は代謝量, 着衣量, 空気温度, 平均放射温度, 平均風速, 相対湿度から算出され, 値が 0 より大きいほど暑さによる不快感を感じる人の割合, 0 より小さいほど寒さによる不快感を感じる人の割合がそれぞれ上昇する. 簡単のため, 着衣量は行動内容に依存した定数値, 平均風速は場所に依存した定数値とし, 平均放射温度は空気温度と同じ値であると仮定する. 代謝量は居住者の行動の METs (後述) より算出し, 空気温度, 相対湿度はエアコンなど冷暖房家電の稼働に応じて変動する値とする. なお, ここでは算出式の説明は割愛するため, 詳しくは文献 [35] を参照されたい.

calorie は, 日常生活で居住者がどの程度カロリーを消費しているかを表す指標である. $aou = (u, *, *, a)$ に対し, 市販の活動量計などでも利用される METs [36] 指標を用いて式 (3) で与える.

$$calorie(aou) = 1.05 \cdot W_u \cdot METs_a \quad (3)$$

ここで, W_u は居住者 u の体重を表し, $METs_a$ は行動 a で消費される酸素量を表している. METs の値は行動ごとに規定されており, 詳しい値に関しては文献 [36] を参照されたい.

QoT は, 人が過ごす時間の質や生活に対する満足度を表現する指標である. これまでの指標とは異なり, QoT は SLSA タイムテーブルに対して定義する. AOU 集合 $X = \{(u_1, t_1, l_1, a_1), (u_2, t_2, l_2, a_2), \dots, (u_n, t_n, l_n, a_n)\}$ に対し, X の関数 (QoT 関数) を考える. これは X の “価値” を定めるものであり, たとえば, 家族が同じ場所で一緒に過ごす時間を評価する関数 $f(X)$ は, 式 (4) のような 2 値関数で定義できる.

$$f(X) = 1 \text{ iff } \exists X' \subseteq X \text{ where}$$

$$\forall (u_i, t_i, l_i, a_i), (u_j, t_j, l_j, a_j) \in X'$$

$$t_i = t_j \wedge l_i = l_j$$

$$\text{and } \bigcup_i u_i \text{ is the set of family members} \\ = 0 \text{ otherwise} \quad (4)$$

関数 $f(X)$ は、集合 X に含まれる AOU を実施する居住者全員が、あるタイムスロットにおいて同じ場所で時間を共有している場合に $f(X) = 1$ となり、そうでなければ $f(X) = 0$ となる。今回のアンケート調査において生活の質として分類された回答のうち、家族団らんに関する意見は約 94% の 178 件である。また内閣府によると、家族団らんの時間はここ数十年間で減少し続けており、なんらかの対策が必要である [37] と報じられていることから、今回は QoT の評価関数として家族団らんに関する関数を用いたものの、こういった価値観に関わる指標は個人差が大きいため、個々で指標定義ができることが重要である。たとえば、余暇時間を確保できているかを評価するために、集合 X の中に少なくとも 1 タイムスロット分は余暇時間の AOU が含まれているときに 1 となるような関数を定めることもできる。本論文の目的は、生活改善指標の基本的なモデルと行動改善アドバイスを導出するアルゴリズムを提供することであるため、QoT 関数が多様な評価指標として各自設定できる点を重要とする。

4.3 アドバイス生成のための改善ルール群

続いて、行動や稼働の変更内容と改善効果に対応付けるアルゴリズムについて検討する。持続可能で賢い生活支援のためには、アドバイスの際に居住者の状況や嗜好を尊重することが重要である [38]。そこで我々の手法では、AOU モデルに基づき、居住者にとって自然な行動改善アドバイスを生成することを目指す。

一般的に、人は省エネや健康などに対して自分なりの経験や知識を保有している。このようなノウハウは我々の生活にとって自然で有用であるにもかかわらず、多くの分野において定式化されていなかった。我々は、まずはこの経験や知識を知るため、前述の同じ 1,000 人の回答者に対して生活の知恵や生活改善案を伺い、こちらも同様に自由記述形式で回答を得た。集めた回答はたとえば“クールシェア”のような 8 つの改善ルールとして分類しており、そこからさらに、“節電”に関しての“エアコンの節電”や“テレビの節電”のように細かく分類を行っているものもある。このアンケートによる有効回答件数は 2,505 件であり、その内訳を図 3 に示している。

この調査結果に基づき、我々はアドバイスを生成するアルゴリズムを、SLSA タイムテーブルにおける AOU の値を変更する 8 つのルールとして定義した。この 8 つのルールはそれぞれ図 3 の (a)~(h) に対応している。以下、 X を AOU の集合 (SLSA タイムテーブル) とし、これをルールの入力として与える。

Peak_shift ルールは (h) ピークシフトに対応しており、

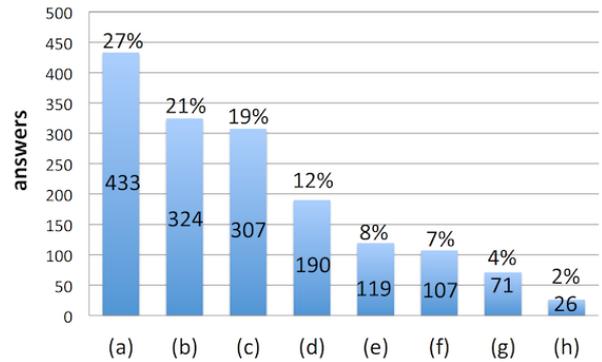


図 3 生活改善ルールについてのアンケート調査結果 (クラウドソーシングによる 1,000 人が対象, (a) 節電, (b) 余暇活動, (c) 規則的な生活, (d) 運動, (e) 交通手段の改善, (f) 家族との時間共有, (g) クールシェア, (h) ピークシフト)

Fig. 3 Smart life strategy questionnaire (1,000 people have answered via crowdsourcing system, (a) Power saving, (b) Relaxing, (c) Achieving regular life, (d) Exercise, (e) Transportation, (f) Time share, (g) Cool share and (h) Peak shift).

集合 X 中の AOU の実施時間をシフトすることによって、電気料金のピーク時間帯の電力使用を避ける状態に変更するルールである。

Peak_shift(X)

```
if  $\exists(u, t, l, a) \in X, \exists \Delta t \in INT : EP_{t+\Delta t} < EP_t$  then
  shift_time( $t, \Delta t$ );
end if
```

ここで、**shift_time**($t, \Delta t$) は実施時間をスロット t からスロット $t + \Delta t$ に変更することを表し、対象となる居住者 u の AOU($u, t + \Delta t, l, a$) については、スロット t の位置に (u, t, l, a) が割り込む形でスロットを移動させる。

Cool_share ルールは (g) クールシェアに対応しており、すべての居住者が 1 箇所に集まって時間を共有するとともに、空室となった場所のエアコンをオフにする状態に変更するルールである。

Cool_share(X)

```
while  $\exists(u, t, l, a), (u', t, l', a') \in X : u \neq u' \wedge l \neq l' \wedge (u \text{ and } u' \text{ are residents})$  do
   $l \leftarrow l'$ ;
end while
if  $\exists X' \subseteq X$ ; (AOUs of  $X'$  have same  $t$  and  $l$ ) then
  if  $\exists(AC, t, l, a) \in X : a == \text{OFF}$  then
     $a \leftarrow \text{ON}$ ;
  end if
  if  $\exists(AC, t, l', a) \in X : l' \neq l \wedge a == \text{ON} \wedge \neg \exists(u, t, l', a') \in X : (u \text{ is a resident})$  then
     $a \leftarrow \text{OFF}$ ;
  end if
end if
```

Power_saving ルールは (a) 節電に対応しており、エアコンや掃除機といった家電の消費電力量を削減するように稼働時の設定を変更するルールである。

```
Power_saving( $X$ )
if  $\exists(u, t, l, a(p)) \in X, \exists p' : EC_{a(p')} < EC_{a(p)} \wedge$ 
( $u$  is an appliance) then
   $p' \leftarrow p$ ;
end if
```

Time_share ルールは (f) 家族との時間共有に対応しており、“食事”のような行動を家族全員で楽しむために、これらの行動の実施時間と実施場所を統一した状態に変更するルールである。

```
Time_share( $X$ )
while  $\exists(u, t, l, a), (u', t', l', a) \in X : u \neq u' \wedge$ 
( $u$  and  $u'$  are residents) do
   $t \leftarrow t'; l \leftarrow l'$ ;
end while
```

Relaxing ルールは (b) 余暇活動に対応しており、任意の行動を“余暇”行動に変更するルールである。なお、ここでの“余暇”とは、くつろぎの時間や余暇・趣味活動の時間全般を指す。

```
Relaxing( $X$ )
if  $\exists(u, t, l, a(p)) \in X : (u$  is an resident) then
   $a \leftarrow Relaxing$ ;
end if
```

Exercise ルールは (d) 運動に対応しており、任意の行動を“運動”行動に変更するルールである。

```
Exercise( $X$ )
if  $\exists(u, t, l, a) \in X : (u$  is a resident) then
   $a \leftarrow Exercise$ ;
end if
```

Transpiration ルールは (e) 交通手段の改善に対応する。これは外出時の移動手段をより環境にやさしい手段に変更するルールであり、自家用車での移動を徒歩や自転車、公共交通機関を利用するように変更することを考える。

```
Transportation( $X$ )
if  $\exists(u, t, l, a(p)) \in X : (u$  is a resident)  $\wedge$ 
( $p$  has Trans=Car) then
  Trans =  $w$ ; ( $w \neq Car$ )
end if
```

Achieving_regular_life ルールは (c) 規則的な生活に対応しており、“睡眠”や“食事”といった行動を規則正しくするルールや、生活上好ましくない行動 (e.g. 睡眠の直前にパソコンを使用することは安眠を妨げるなど) を防ぐようなルールを含む。それぞれ当該行動の実施時間帯を、前者であればふだんの実施頻度の高いスロットに、後者であ

れば実施しても問題のない時間帯に変更する。ただし、時間の変更自体は Peak_shift ルールと同様であるため、ここではアルゴリズムの記載は省略する。

4.4 行動改善アドバイスの導出

前節で述べたルールを用いてアドバイスを導出する。現状の行動を表し、ルールに与える AOU 集合を X 、行動改善により変更された AOU 集合を G で表すとする。行動改善アドバイスは G の行動を促すものとして得られる。

我々は現在の生活状況 X をセンサなどにより検出することを想定しているが、前述のとおり、一般的には居住者の生活内容を完全に認識することは難しい。そこで、 X はある時間や場所、居住者に限られた一部の AOU のみで構成されるタイムテーブル、もしくはセンシングを利用せず、居住者によって1日のはじめに登録されたその日の行動予定を X として扱うこととする。以下に Cool_share ルールを適用した G の導出例を示す。以降、集合 X は午後8時から9時の間に検出された AOU の集合とする。

```
 $X = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$ 
 $a_1 = (Dad, 20, study\_room, Work(device=PC))$ 
 $a_2 = (Mom, 20, living\_room, Relaxing)$ 
 $a_3 = (Child, 20, child's\_room, Study)$ 
 $a_4 = (AC, 20, living\_room,$ 
  ON(mode = cooling, temp = 26°C))
 $a_5 = (AC, 20, study\_room,$ 
  ON(mode = cooling, temp = 27°C))
 $a_6 = (AC, 20, child's\_room, OFF)$ 
```

まず、 a_1 に対して $l \leftarrow living_room$ を適用して $a'_1 = (Dad, 20, living_room, Work(device=PC))$ とし、集合 $X_1 = \{a'_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}$ を得る。次に、 a_3 に対して $l \leftarrow living_room$ を適用することで $a'_3 = (Child, 20, living_room, Study)$ とし、 $X_2 = \{a'_1, a_2, a'_3, a_4, a_5, a_6\}$ を得る。 a_5 に対して $a \leftarrow OFF$ を適用して $a_5 = (AC, 20, study_room, OFF)$ とし、 $X_3 = \{a'_1, a_2, a'_3, a_4, a'_5, a_6\}$ を得たところで、 X において Cool_share の変更が適用可能な AOU がなくなる。したがって、集合 X_3 が G の一候補となる。 G では、居住者がすべてリビングに集まり、リビングのエアコンはオン、それ以外の場所のエアコンはオフの状態となっている。

ただし、ルールの適用方法とそれにより得られる G は1通りではないため、本研究では不要な導出を避けるために2つの手法を採用している。1つは、導出の各ステップにおいて、いわゆる“常識”から逸脱するような変更や居住者の好みに反するような変更を却下する。たとえば、上述の例でリビングではなく子供部屋に集まる変更を適用する(子

供部屋でクールシェアを行うようなタイムテーブルを G とすると、 a_2 から $a'_2 = (\text{Mom}, 20, \text{child's_room}, \text{Relaxing})$ を得ることができるが、これはやや不自然である。提案手法では禁止規則をデータベースに蓄積させており、この禁止規則は AOU に対する論理式で記述される。上述の例として、 $\text{AOU}(u, *, l, \text{Relaxing})$ に対し論理式 $u \neq \text{Child} \Rightarrow l \neq \text{child's_room}$ が定義されていた場合、これは子どもを除く他の居住者が、子供部屋で余暇行動を行う状況を禁止することを意味する。提案手法では導出の各段階においてこのデータベースを参照し、禁止規則に反する変更は破棄する。これらの規則については「Activity = GoWork である AOU の Time は変更しない」といった AOU の構成要素の変更の可否と「くつろぎはリビングで行う」といった生活習慣を居住者に登録してもらうことで生成することを想定している。これに関して我々はクラウドソーシングで別の 1,000 人に対し、あるスケジュールをエネルギーコストや消費カロリーの観点から改善したいいくつかのスケジュールを提示し、「仕事からの帰宅時間を早めるのは難しい」といったスケジュールの変更内容に関しての自由記述意見と、「家族団らんとしての場所にくつろぐことが多いか」といった生活習慣についての回答を得ており、それらを基にあらかじめ一般的な AOU 変更可否と生活習慣の情報を設定している。各家庭に SLSA を導入する際には、あらかじめ設定された内容について居住者が任意に変更することでカスタマイズできるものとする。さらに、居住者自身も認識できていない規則を実現することや、カスタマイズすらも煩雑に感じる居住者にとっても使いやすいシステムを実現することを目的として、行動検出を利用した禁止規則の登録と自動生成も検討している。たとえば、子供部屋で母親がくつろいでいることが検出されれば上述の a'_2 は“常識外”として登録されることはないが、そのような行動が検出されなければなければデータベースに登録され、 a'_2 を導出するようなアドバイスは推薦の対象外とすることができる。

しかしながら、種々の禁止規則を登録していくに連れ、禁止規則どうしが矛盾することや、禁止規則が多すぎることにより行動改善アドバイスが生成されない恐れがある。このような状況を防ぐため、単純な解決策として、禁止規則を参照しないアドバイス生成を定期的に行うことなどを検討している。時間の経過とともに生活状況に変化が生じるなどしていったん登録された禁止規則が居住者の都合に沿わなくなることも考えられることから、上記を実施することで、不要になった禁止規則を削除することや、ふだんとは異なるアドバイスを導出することを試み、導出アドバイス数の少ない居住者にとっても有益なシステムを目指している。

もう 1 つは、居住者の生活を極端に変えるようなアドバイスを自動で除外する。提案手法では、2 つの SLSA タイム

テーブル A, A' 間の距離 $d(A, A')$ を定義し、AOU の値の変更に制限を設けている。距離 $d(A, A')$ を求めるにあたり、まず 2 つの AOU $s = (u, t, l, a(p))$ と $s' = (u', t', l', a'(p'))$ 間の距離 $d(s, s')$ を以下のとおり定める。

$$d(s, s') = w_1 \cdot d_{\text{name}}(u, u') + w_2 \cdot d_{\text{time}}(t, t') \\ + w_3 \cdot d_{\text{location}}(l, l') + w_4 \cdot d_{\text{activity}}(a, a') \\ + w_5 \cdot d_{\text{params}}(p, p')$$

ここで、Name, Location, Activity についてはそれぞれ $u \neq u'$ ならば $d_{\text{name}}(u, u') = 1$, $l \neq l'$ ならば $d_{\text{location}}(l, l') = 1$, $a \neq a'$ ならば $d_{\text{activity}}(a, a') = 1$, $p \neq p'$ ならば $d_{\text{params}}(p, p') = 1$ とし、そうでなければ $d_{\text{name}}(u, u) = 0$, $d_{\text{location}}(l, l) = 0$, $d_{\text{activity}}(a, a) = 0$, $d_{\text{params}}(p, p) = 0$ とする。Time については $d_{\text{time}}(t, t') = |t - t'|$ として定める。 w_1, w_2, w_3, w_4 と w_5 は項目間の値の非正規性を補正するための補正係数である。今回は、前述のクラウドソーシングの意見を参考に Location, params, Time, Activity, Name の順で変更を優先させるように、補正係数の値を定めている。これは Location よりも Time を変更することに抵抗がある人が多い、などといった結果に基づいており、上記の順位にそって補正係数を定めることで、Time が変更された場合の距離は、Location が変更された場合の距離より大きくなる。これにより、たとえば、Time.share ルールにおいて「夕食の時間と場所の両方を変更する」アドバイスよりも「夕食の場所のみを変更する」アドバイスの方を優先して提示することが可能である。また、このようにして求めた $d(s, s')$ に対し、SLSA タイムテーブル間の距離 $d(A, A')$ は、 A' の要素 s' に対する最小距離 $d(s, s')$ の和として定義される。

$$d(A, A') = \sum_{s' \in A'} \min_{s \in A} d(s, s') \quad (5)$$

ルールの適用中に元の AOU 集合 X からの距離がある閾値を超えた場合は、そのルール適用を中止することで、居住者にとって無理のある（変更前後のタイムテーブル間の距離が大きい）アドバイスを生成しないようにする。ただし、適切な閾値は居住者の生活状況や嗜好にも左右される。一意に決定するには多くの居住者の生活情報とフィードバックが必要であるため、閾値の分析と決定については今後の課題とし、今回は AOU 集合 X の部分集合 A に対し、同じ改善ルールのアドバイスは 1 通りだけになるよう、 $d(A, A')$ の値が最小であるもの以外を破棄するという処理を行っている。

実際のアドバイス作成時には、行動や稼働の変更内容として SLSA タイムテーブル X および G の各候補 G_i を組にして提示するとともに、 G_i ごとに改善の 4 指標の値を計算する。たとえば、

$$(\text{energy_cost}, \text{comfort}, \text{calorie}, \text{QoT}) \\ = (-103 \text{ yen}, -0.57, 230 \text{ kcal}, 1 \text{ hour})$$

のような形で行動改善アドバイスの効果を提示する。また、類似する2つのアドバイスに対し、一方の効果が他方よりも小さい場合には、効果の小さいアドバイスを推薦しないことによって、居住者の混乱を避けることができる。

5. 性能評価

SLSA が実用的なアドバイスを導出できていることを確認するためには、利用者のフィードバックが不可欠である。本論文では、34人の被験者それぞれの実際の生活状況と家族構成、家電の所有情報に基づいて導出したアドバイスに対し、フィードバックを得る実験(実験1)を行った。次に、実在する3人家族の自宅に電力計センサを設置し、1カ月以上計測したデータを元に行動推定を行い、アドバイスを導出する実験(実験2)を行った。いずれの実験においても、タイムスロットは30分単位、電力価格は東京電力のピークシフトプラン[30]を利用している(価格は3章に示している)。また、禁止規則については4.4節でも述べたとおりクラウドソーシングでの意見を基に設定したものをを用いており、その設定内容を表1に示す。表中において、関数 $DC(a)$ は AOU の項目 a の変更を禁じることを表し、`reported_room` は各実験の被験者が回答した「行動の実施場所」を表す。なお、今回の実験では生活状況の回答やセンシングによる行動検出を利用した禁止規則の生成は実施していない。

5.1 実験1：34人の被験者の実生活に対するシステム適用と評価

我々は34人の被験者に対し、クラウドソーシングシステムを介してアドバイスの評価を依頼した。まず、各被験者は自身の典型的な平日のスケジュール(1日分)を回答する。次に、SLSA は報告された各スケジュールに対してアドバイスを導出するが、このときの温度と湿度(気象庁の発表値)、電化製品の消費電力量は事前に用意した計測値を利用した。導出後、各アドバイスを対応する被験者に提示し、アドバイスに対して満足できるかの主観評価を得た。評価項目として、(i) 行動改善アドバイスに対する総合評価、(ii) アドバイスを実施することで得られる改善効果に対する満足度、(iii) アドバイスを実行することに対するモチベーションの高さ(動機)をあげている。(ii) と (iii) に関しては、アドバイス実行の利益と手間に関する評価を確認するためであり、これらのバランスを考慮し、最終的に被験者がそのアドバイスを良いと思えたかを(i)の結果とあわせて判断する。また、被験者の嗜好を把握するために、(iv) 4章であげたアドバイス導出ルール(クールシェアや節電など)に対する興味についても調査している。これら4つの項目は5段階評価で被験者に採点され、5が「非常に良い、満足である、実行したい、興味がある」、3が「普通」、1が「非常に悪い、不満である、実行したくない、

表1 禁止規則一覧

Table 1 Prohibited rules.

内容
$(u, *, *, *, *)$; $DC(u)$
$(*, t, l, a)$, $a \in \{\text{GoWork, GoSchool}\}$; $DC(t) \wedge DC(l)$
$(*, t, l, a)$, $a \in \{\text{Bath, Sleep, Meal, Cook}\}$; $DC(l)$
$(*, *, l, \text{Relaxing})$; $l = \text{living_room} \vee \text{reported_room}$
$(*, *, l, \text{Meal})$; $l = \text{dining_room} \vee \text{reported_room}$

興味がない”を表す。

この実験で実際に導出したアドバイスの例を以下に示す。

- **Power_saving** ルールにより、「13:00~14:30に使用している掃除機の稼働モードを**Strong**から**Weak**に変更すれば、1日あたり56.25円(1カ月あたり1,687.5円)の節約になります」というアドバイスが、**Peak_shift** ルールにより、「掃除の時間を9:30から7:00に変更すれば、1日あたり15.13円(1カ月あたり453.9円)の節約になります」というアドバイスが推薦された。
- 消費カロリーの改善効果が大きかったものとしては、**Transportation** ルールによる「お父さんの通勤手段として自家用車を使うのをやめると、1日につき、徒歩で通勤すれば376.69kcal、自転車で通勤すれば183.75kcal多く消費できますが、不快感はそれぞれ-0.18(5.67%の人が不快と感じる暑さ)から3.00(同99.12%)、1.84(同69.13%)まで上がります」といったトレードオフを示すアドバイスのほか、**Exercise** ルールによる「お母さんはふだん朝に家事をしていますが、その時間帯に30分運動すると、52.50kcal消費できます」といったアドバイスが導出された。
- **Cool_share** ルールのアドバイス例としては、「夕食後、家族全員でリビングに集まれば、PMVの値が1.65(59.02%の人が不快と感じる暑さ)から0.79(同18.29%)まで下がりますし、エアコン稼働台数を減らすことで1日あたり20.78円(1カ月あたり約600円)の節約になります。さらに、一部屋に集まれば家族の団らん時間が増加します」、「13:00に家でくつろぐのをやめて外部の施設に行くと、エアコンオフにより1日あたり23.40円(1カ月あたり702円)の節約になります」というものが導出された。
- **Time_share** ルールにより、「お父さんとお母さんが息子さんの帰宅を待っていつもより1時間遅く夕食を取るようになれば、家族全員で夕食の時間を楽しむことができます」などのアドバイスが見受けられた。
- **Achieving_regular_life** ルールにより、「入浴時間を23:30から20:00にずらしてみたいかでしょう。睡眠の直前の入浴は快眠を妨げる原因となり得ます」といったアドバイスが推薦された。

表2は5段階評価の結果を示している。表2において、「平均評価」は提示したアドバイスの平均評価(全被験者平

表 2 推薦アドバイスに対する平均評価 (実験 1)

Table 2 Average scores for recommended tips (Experiment 1).

改善方策	総合	満足度	動機	興味
peak_shift	3.35	3.61	3.26	4.00
cool_share	3.30	3.48	3.41	3.93
power_saving	3.95	3.75	3.63	3.99
time_share	2.50	2.60	2.40	4.45
relaxing	2.78	2.76	2.76	4.13
exercise	3.07	3.27	3.23	4.34
transportation	2.78	2.85	2.70	3.82
achieving_regular_life	2.51	2.75	2.69	3.50
平均評価	3.12	3.22	3.08	4.05
最高評価	4.09	3.84	3.84	4.63

均)、「最高評価」は提示したアドバイスのうちの最高評価 (全被験者平均、満足度と動機については総合評価が最大であったアドバイスに対する評価値) を表している。全体として、アドバイスに対する総合最高評価の平均値は 4 を上回っており、改善効果と実行動機に対する最大評価はそれぞれ 3.84 であった。さらに、アドバイスに対する総合最高評価が 4 以上であった人の割合は 73.53% であることから、SLSA は多くの被験者に対して少なくとも 1 つは魅力的なアドバイスを提案できており、これらのアドバイスは被験者の生活を改善するための動機になりうると考えられる。

ただし、提示したアドバイスが被験者にとって有用であるかは、実際にアドバイスの提示後、各被験者の行動にどのような変化が見られたかを分析する必要がある。これに関しては今後、本システムを導入した家庭に対し、長期間分の行動内容のログやフィードバックなどを取得し、アドバイス提示前後で検出された行動内容の変化や、被験者のエネルギーコストや消費カロリー数といった指標値の推移を分析することで、本システムの有用性を検証していきたいと考えている。

5.2 不要なアドバイスの削減と導出に要する計算時間の評価

スマートホームにおける行動改善アドバイスシステムは、デマンドレスポンスならびにスマートグリッドと連動することや、居住者と対話的に稼働することを考えると、計算時間が数秒オーダーであることが望ましい。そこで、行動改善アドバイスの導出に要する計算時間を調査した。アドバイスの導出には市販のノート PC を用いており、CPU は Intel Corei7-3612QM、メモリは 8GB である。実験 1 における各被験者に対して計測を行った結果、平均で 77.48 件のアドバイスが生成されていたが、その平均計算時間は 0.25 秒であった。なお、実験 1 における平均居住者数は 1.91 人であり、所有する家電台数の平均は 2.19 台である。実験 1 の 34 人の被験者データのうち、最大導出アドバイス数は 233 件であり、そのときの計算時間は 1.04 秒であっ

表 3 フィルタリング適用時の各導出段階におけるアドバイス数

Table 3 Number of tips after applying filters in derivation process.

導出段階	アドバイス数
生成されうる全アドバイスの件数	1,231.07
改善ルールの候補条件一致件数	1,041.22
AOU 集合の距離が閾値以下である件数	684.89
禁止規則に当てはまらない件数	140.54
SLSA 総提案件数	77.48
実際の提案件数	17.57

たことから、アドバイスシステムとして望ましい時間に収まっていることが分かった。

さらに、我々は行動改善アドバイス導出の各段階におけるアドバイス生成数に関しても調査を行い、不要なアドバイスがどの程度削減できているかを確認した。表 3 は、実験 1 において導出時の各ステップの平均アドバイス数を示している。結果として、SLSA の提示したアドバイス数は、生成されうる全アドバイス数の 7 分の 1 にまで削減されている。特に、44.37% は AOU 集合間の距離に関する制約により除外され、さらにその 79.48% が常識を逸脱するものとして除外された。また、SLSA は生成したアドバイスの中でも上位の 3~10 件のみを提示しており (通常 3 件程度のアドバイスを提示するが、Power_saving のように多くの行動や稼働に適用されるような改善ルールは、他の改善ルールよりも多くのアドバイスを推薦する)、最終的に被験者に提示されたアドバイスの平均数は 17.57 件であった。これら 18 件のアドバイスだけで表 2 における総合評価が 4.09 という値を達成できたのは、AOU 集合の距離と禁止規則のデータベースを利用して不要なアドバイスを除外し、居住者にとって本当に必要なアドバイスのみを選別して提案できているためと考えられる。

5.3 実験 2：実家庭における行動把握とアドバイス生成

実験 2 に際し、我々は SLSA のプロトタイプを実装した。プロトタイプは、(a) 居住者と SLSA とをつなぐためのユーザインタフェース (タブレットなどで提供される) (図 4)、(b) 北陽製レーザーレンジスキャナ [39] を用いた居住者の位置情報を可視化するトラッキングシステム (図 5)、(c) 電化製品の消費電力量を可視化するためのシステムの 3 つの機能を有している。実験 2 では、ECHONET-Lite 基準 [29] であるスマートエコワット [33] を、3 人家族 (両親と 11 歳の男児) が居住している 2 階建ての住居 (120 m³, キッチン, リビング, 書斎, 寝室, 子供部屋と洗面所/浴室を有する) の各コンセントに取り付けている。データの計測は、2014 年 8 月 24 日から 2014 年 10 月 1 日までの 1 カ月以上の期間実施した。機能 (c) に関して簡単なルール (掃除機がリビングで稼働していれば、居住者はリビングに居ると考えられるなど) を定義することで部屋レベルでの居

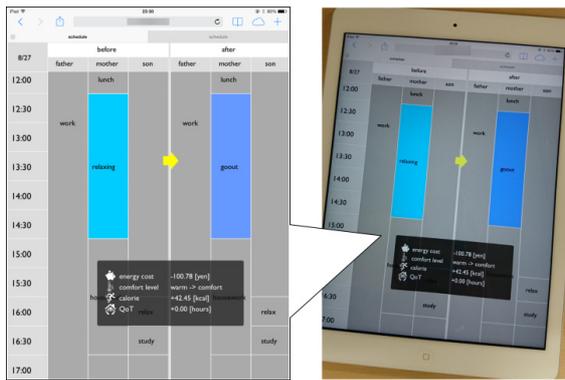


図 4 SLSA ユーザインタフェース
Fig. 4 SLSA user interface.



図 5 居住者のトラッキング
Fig. 5 Residents tracking.

住者の位置情報を知ることができるため、今回は機能 (c) で得られたデータのみから居住者の行動や位置を推定するといった、簡易的な行動検出を行っている。実際に電力を計測した家電と、そこから推測される居住者の行動の対応 (推定ルール) を表 4 に示す。なお、機能 (b) により、居住者の位置は部屋ごとの特定の空間レベルで計測することができるが、これらのセンサは高価であり一般家庭に容易に導入できるものではないため、本実験ではこの位置情報を用いずに行動推定を行い、正解データの取得用途に留めている。加えて、家電使用情報だけでは完全に行動が特定できない場合は、「夜間電化製品が稼働していない時間帯は、居住者は睡眠中と見なす」、「昼間電化製品が稼働していない時間帯は、居住者は仕事や学校に出かけていると見なす」、「テレビが稼働していて、かつ表 4 の推定ルールに当てはまらない場合は、居住者はくつろいでいるものと見なす」という 3 つの行動推定ルールを定義することで行動情報の補完を行っている。実際に検出された電力量と、そのデータから推定した行動内容の一例については、表 5 に示している。

さらに、推定した行動内容に対し、行動改善アドバイスを導出した。表 4 から明らかとなっており、今回の実験では想定する生活行動のうちの一部しか推定できないにもかかわらず、2014 年 8 月 27 日のスケジュールを例に取ると、

表 4 計測電力量と推定される行動内容の対応 (実験 2)

Table 4 Association of power monitor and activities in real house experiment (Experiment 2).

家電	設置位置	推定行動内容
エアコン	リビング	エアコン: ON
エアコン	子供部屋	エアコン: ON
洗濯機	洗面所/浴室	洗濯機: ON
炊飯器	キッチン	炊飯器: ON
テレビ	リビング	テレビ: ON
電子レンジ	キッチン	お母さん: 調理
パソコン	寝室	不特定: パソコン
デスクライト	子供部屋	子ども: 勉強
扇風機	リビング	不特定: くつろぐ
扇風機	ダイニング	不特定: 食事
扇風機	子供部屋	子ども: 睡眠
扇風機	洗面所/浴室	不特定: 入浴
ドライヤー	洗面所/浴室	不特定: 入浴

表 5 センシング結果と推定スケジュールの一例 (実験 2)

Table 5 Sensing data and estimated schedule in real house experiment (Experiment 2).

8/27のセンシングデータ(30分間の最大瞬間電力[W])

	洗濯機	テレビ	炊飯器	電子レンジ	扇風機(1)	扇風機(2)	デスクライト	パソコン	ドライヤー	扇風機(3)
6:30	0	0	1	0	1	22	0	0	0	0
7:00	0	373	1	1287	19	0	0	0	0	0
7:30	253	312	1	1	19	0	0	0	1110	31
8:00	268	349	1	0	1	0	0	0	0	31
8:30	0	0	1	0	1	0	0	0	0	31

8/27の推定スケジュール

	お父さん		お母さん		子ども		洗濯機	テレビ	炊飯器
6:30	睡眠	寝室	-	睡眠	寝室	-	OFF	OFF	OFF
7:00	くつろぐ	リビング	-	調理	キッチン	ON	OFF	ON	OFF
7:30	朝食	ダイニング	-	朝食	ダイニング	-	ON	ON	OFF
8:00	くつろぐ	リビング	-	くつろぐ	リビング	-	ON	ON	OFF
8:30	仕事	会社	車	仕事	会社	車	学校	学校	徒歩

「食事の間にテレビを消すようにすれば、1日あたり 5.8 円 (1 カ月あたり 174 円) 節約することができます」、「息子さんは自室でエアコンを付けて勉強しているようですが、図書館に行って勉強するようにすれば、1日あたり 19.14 円 (1 カ月あたり約 600 円) の節約になります」、「21:30 (就寝前 3 時間以内) にパソコンを使用するのは、快適な睡眠に良くありません」などのアドバイスを推薦できた。これらの結果から、センサの精度やプライバシーの観点から完全なタイムテーブルを取得できない状況においても、SLSA によるアドバイスの導出が可能であることを確認した。

6. おわりに

本論文では、居住者の行動や習慣の改善を促すようなアドバイスを導出するスマートホームシステム SLSA を提案した。アドバイスの導出にあたっては、クラウドソーシングを利用し、不特定多数の人から得た幅広い経験や知識を元にアドバイスの生成ルールと生活改善指標を定義し、これらの定量的なモデルを設計した。クラウドソーシングを用いた生活改善案の生成や、スマートホームにおける生活改善システムの提案という観点において、本研究は新しい要素を多く含んでいる。また、34 人の被験者に対する評価実験と、実環境における 1 カ月以上のセンシング実験を通

じて、「生活改善システム」の実現可能性を示した。

今後の課題としては、提示したアドバイスが居住者にどのような影響を与えるかについて実証実験を交えて検証することや、センシングの精度に応じて導出されるアドバイスの内容と影響力の変化を調査することなどにより SLISA の有用性を確認していきたいと考えている。またアンケートの精度向上についてもより深く検討していきたい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15H02690, 15K12019, ならびに文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業「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

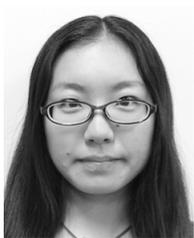
- [1] Byun, J., Hong, I. and Park, S.: Intelligent Cloud Home Energy Management System Using Household Appliance Priority Based Scheduling Based on Prediction of Renewable Energy Capability, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, pp.1194–1201 (2012).
- [2] Edwards, W.K. and Grinter, R.E.: At Home with Ubiquitous Computing: Seven Challenges, *Proc. 3rd International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp '01)*, pp.256–272 (2001).
- [3] Intille, S.S.: Designing a Home of the Future, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.1, No.2, pp.76–82 (2002).
- [4] Aldrich, F.K.: Smart Homes: Past, Present and Future, *Inside the Smart Home*, pp.17–39 (2003).
- [5] Intille, S.S.: A new research challenge: persuasive technology to motivate healthy aging, *IEEE Trans. Information Technology in Biomedicine*, Vol.8, No.3, pp.235–237 (2004).
- [6] Cook, D.J. and Das, S.K.: How Smart Are Our Environments? An Updated Look at the State of the Art, *Pervasive Mobile Computing*, Vol.3, No.2, pp.53–73 (2007).
- [7] Brush, A., Lee, B., Mahajan, R., Agarwal, S., Saroiu, S. and Dixon, C.: Home automation in the wild: Challenges and opportunities, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.2115–2124 (2011).
- [8] Ordonez, F., Englebienne, G., de Toledo, P., van Kasteren, T., Sanchis, A. and Krose, B.: In-Home Activity Recognition: Bayesian Inference for Hidden Markov Models, *IEEE Pervasive Computing*, Vol.13, No.3, pp.67–75 (2014).
- [9] Sadri, F.: Ambient Intelligence: A Survey, *ACM Computing Survey*, Vol.43, No.4, pp.36:1–36:66 (2011).
- [10] Jahn, M., Jentsch, M., Prause, C., Pramudianto, F., Al-Akkad, A. and Reiners, R.: The Energy Aware Smart Home, *Proc. 5th International Conference on Future Information Technology (FutureTech 2010)*, pp.1–8 (2010).
- [11] Farhangi, H.: The path of the smart grid, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol.8, pp.18–28 (2010).
- [12] Fan, Z., Kalogridis, G., Efthymiou, C., Sooriyabandara, M., Serizawa, M. and McGeehan, J.: The new frontier of communications research: Smart grid and smart metering, *Proc. 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking (e-Energy '10)*, Vol.1, pp.115–118 (2010).
- [13] 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 Trans. Smart Grid*, Vol.1, pp.320–331 (2010).
- [14] Behrangrad, M., Sugihara, H. and Funaki, T.: Analyzing the system effects of optimal demand response utilization for reserve procurement and peak clipping, *Proc. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp.1–7 (2010).
- [15] Barker, S., Mishra, A., Irwin, D., Shenoy, P. and Albrecht, J.: SmartCap: Flattening peak electricity demand in smart homes, *Proc. 2012 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2012)*, pp.67–75 (2012).
- [16] Lee, S., Ahn, D., Lee, S., Ha, R. and Cha, H.: Personalized Energy Auditor: Estimating personal electricity usage, *Proc. 2014 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2014)*, pp.44–49 (2014).
- [17] 三菱電機株式会社：業界初「PV・EV 連携 HEMS」による電力最適制御実証を大船スマートハウスで開始，入手先 (<http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2012/0515.html>) (2012).
- [18] トヨタホーム：トヨタホームのスマートハウス，入手先 (<http://www.toyotahome.co.jp/smarthouse/>).
- [19] パナソニック：蓄電システム，入手先 (<http://www2.panasonic.biz/es/souchikuene/chikuden/index.html>).
- [20] パナソニック：スマート HEMS でできること，入手先 (<http://www2.panasonic.biz/es/densetsu/aiseg/index.html>).
- [21] Kientz, J.A., Patel, S.N., Jones, B., Price, E., Mynatt, E.D. and Abowd, G.D.: The Georgia Tech aware home, *CHI'08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.3675–3680 (2008).
- [22] BoxLab: BoxLab Wiki Page, available from (<http://boxlab.wikispaces.com/>).
- [23] Rollins, S. and Banerjee, N.: Using rule mining to understand appliance energy consumption patterns, *Proc. 2014 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2014)*, pp.29–37 (2014).
- [24] Piateski, G. and Frawley, W.: *Knowledge Discovery in Databases*, MIT Press, Cambridge, MA, USA (1991).
- [25] Taylor, A.S., Harper, R., Swan, L., Izadi, S., Sellen, A. and Perry, M.: Homes That Make Us Smart, *Personal Ubiquitous Computing*, Vol.11, No.5, pp.383–393 (2007).
- [26] Neustaedter, C., Bartram, L. and Mah, A.: Everyday Activities and Energy Consumption: How Families Understand the Relationship, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1183–1192 (2013).
- [27] ZigBee Alliance: ZigBee Smart Energy Profile 2, available from (<http://www.zigbee.org/>).
- [28] KNX Association: KNX, available from (<http://www.knx.org/>).
- [29] エコネットコンソーシアム：ECHONET，入手先 (<http://www.echonnet.gr.jp/>).
- [30] 東京電力：ピークシフトプラン，入手先 (<http://www.tepco.co.jp/e-rates/individual/menu/home/home06-j.html>).
- [31] Wada, Y., Higuchi, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Accurate positioning of mobile phones in a crowd using laser range scanners, *Proc. 2013 IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2013)*,

- pp.430-435 (2013).
- [32] Shao, X., Zhao, H., Nakamura, K., Katabira, K., Shibasaki, R. and Nakagawa, Y.: Detection and tracking of multiple pedestrians by using laser range scanners, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007)*, pp.2174-2179 (2007).
- [33] Enegate: スマートエコワット, 入手先 (https://www.enegate.co.jp/smarteco_portal/).
- [34] Yahoo! Japan: Yahoo! Japan クラウドソーシング, 入手先 (<http://crowdsourcing.yahoo.co.jp>).
- [35] International Standard Organization: Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, ISO 7730, Second Edition (1994).
- [36] Ainsworth, B., Haskell, W., Herrmann, S., Meckes, N., Bassett Jr, D., Tudor-Locke, C., Greer, J., Vezina, J., Whitt-Glover, M. and Leon, A.: 2011 Compendium of Physical Activities: A second update of codes and MET values., *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol.43, No.8, pp.1575-1581 (2011).
- [37] Kuroda, S.: Do Japanese Work Shorter Hours than before? Measuring trends in market work and leisure using 1976-2006 Japanese time-use survey, *Journal of the Japanese and International Economies*, Vol.24, No.4, pp.481-502 (2010).
- [38] Haines, V., Mitchell, V., Cooper, C. and Maguire, M.: Probing user values in the home environment within a technology driven Smart Home project, *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol.11, No.5, pp.349-359 (2007).
- [39] 北陽電機株式会社: 測域センサ, UTM-30LX.



中村 笙子

平成 25 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。平成 27 年同大学大学院情報科学研究科修士課程終了。センサを用いたスマートホームシステムに関する研究に興味を持つ。



志垣 沙衣子 (学生会員)

平成 27 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。現在、同大学大学院情報科学研究科修士課程。センサを用いた家庭内行動検出に関する研究に興味を持つ。



廣森 聡仁 (正会員)

平成 16 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。平成 17 年株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモ入社。平成 20 年より大阪大学大学院情報科学研究科助教。平成 25 年より同大学未来戦略機構講師。博士 (工学)。モバイルアプリケーションやモバイルネットワークの設計および性能評価に関する研究に従事。IEEE 会員。



山口 弘純 (正会員)

平成 6 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 10 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年オタワ大学客員研究員。平成 11 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。平成 14 年同大学大学院情報科学研究科助手。平成 19 年より同大学大学院情報科学研究科准教授。博士 (工学)。モバイルコンピューティングと分散システムに関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



東野 輝夫 (フェロー)

昭和 54 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和 59 年同大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学助手。現在、同大学大学院情報科学研究科教授。博士 (工学)。分散システム, 通信プロトコル, モバイルコンピューティング等の研究に従事。電子情報通信学会, ACM 各会員。IEEE Senior Member.